

SOCIÉTÉ NATIONALE
DES
CHEMINS DE FER BELGES

Cours pour Elèves - Conducteurs

Cours 124.20

TRACTION ÉLECTRIQUE

TEXTE

DIRECTION M.
BUREAU 22-32

1979

SOCIETE NATIONALE DES CHEMINS DE FER BELGES.

COURS POUR ELEVES-CONDUCTEURS.

COURS 124.20.

TRACTION ELECTRIQUE.

SOMMAIRE.

1ère leçon.- Alimentation du réseau.

- 1.01. Evolution de la traction électrique.
- 1.02. Système en courant alternatif 16 2/3 Hz.
- 1.03. Système en courant continu 1,5 kV.
- 1.04. Système en courant continu 3 kV.
- 1.05. Système en courant alternatif 50 Hz.
- 1.06. Système adopté en Belgique.

2e leçon - Système de traction électrique par courant continu.

- 2.01. Conversion du courant alternatif triphasé en courant continu.
- 2.02. Alimentation de la sous-station en courant triphasé.
- 2.03. Transformation du courant triphasé en courant continu.
- 2.04. Distribution du courant continu - côté positif.
- 2.05. Test en cas de court-circuit.
- 2.06. Distribution du courant continu - côté négatif.

3e leçon - Sélectivité - Suspension caténaire.

- 3.01. Principe de la sélectivité.
- 3.02. Poste de sectionnement.
- 3.03. Conditions auxquelles doit satisfaire une ligne caténaire.
- 3.04. Systèmes de suspension.

4e leçon - Questionnaire.

5e leçon - Suspension caténaire (suite).

- 5.01. Fils et câbles.
- 5.02. Types de supports.
- 5.03. Distance entre poteaux.
- 5.04. Changement des niveaux.
- 5.05. Désaxement - Antibalançants.

6e leçon -

- 6.01. Equipement tendeur.
- 6.02. Sectionnement.
- 6.03. Sectionneurs et interrupteurs.

Cours 124.20.

7ème leçon -

- 7.01 Circuits de retour
- 7.02 Répartiteur E.S.
- 7.03 Couvertures
- 7.04 Mise à la terre de la ligne caténaire
- 7.05 Signaux propres à la traction électrique
- 7.06 Respect des signaux d'abaissement des pantographes.

8ème leçon - Questionnaire.

9ème leçon - Type d'automotrice électrique.

- 9.01 Intérêt de la traction par automotrice
- 9.02 Accouplement d'automotrices
- 9.03 Intérêt de la traction par locomotive
- 9.04 Résistance de frottement
- 9.05 Résistance propre d'un véhicule
- 9.06 Effort moteur d'un véhicule
- 9.07 Vitesse - Accélération

10ème leçon -

- 10.01 Mouvement uniforme
- 10.02 Mouvement uniformément accéléré
- 10.03 Influence des rampes
- 10.04 Résistance due aux courbes
- 10.05 Accélération et vitesse d'équilibre ou de régime d'un train

11ème leçon -

- 11.01 Adhérence
- 11.02 Variation du coefficient d'adhérence
- 11.03 Moyens d'empêcher le patinage
- 11.04 Utilisation de l'adhérence sur les automotrices et locomotives électriques

12ème leçon - Questionnaire.

13ème leçon - Organes Mécaniques du matériel roulant électrique.

- 13.01 Trains de roues
- 13.02 Boîtes d'essieux à coussinets
- 13.03 Boîtes à rouleaux
- 13.04 But des appareils de choc et de traction
- 13.05 Description des appareils de traction et d'attelage

14ème leçon -

- 14.01 Appareils de choc
- 14.02 Tampon Spencer
- 14.03 Attelage Henricot
- 14.04 Attelage de transition

- 14.05 Attelage Scharffenberg
- 14.06 Matériel rigide
- 14.07 Description du bogie type Pennsylvania
- 14.08 Ressorts de suspension.

15ème leçon - Systèmes de Transmission.

- 15.01 But de la transmission
- 15.02 Moteur à suspension élastique totale
- 15.03 Moteur à suspension par le nez
- 15.04 Le châssis de bogie
- 15.05 Suspension primaire ou liaison entre train de roue et châssis de bogie
- 15.06 Suspension secondaire et liaison entre caisse et bogie
- 15.07 Liaison entre train de roue et châssis de bogie
- 15.08 Suspension secondaire et liaison entre caisse et bogie d'une locomotive électrique
- 15.09 Liaison entre bogies.

16ème leçon - Questionnaire.

17ème leçon -

- 17.01 Constitution d'un moteur à courant continu
- 17.02 Rôle des pôles
- 17.03 Mode d'excitation des pôles
- 17.04 Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu
- 17.05 Equation fondamentale du moteur
- 17.06 Vitesse du moteur série
- 17.07 Couple du moteur série
- 17.08 Influence des variations de tension sur la vitesse et le couple
- 17.09 Courbes caractéristiques du moteur série
- 17.10 Inversion du sens de marche du moteur série.

18ème leçon - Caractéristiques d'un moteur de traction.

- 18.01 Définitions. Régime. Tension nominale
- 18.02 Démarrage du moteur série
- 18.03 Intérêt de l'emploi du moteur série en traction.

19ème leçon -

- 19.01 Cran de démarrage
- 19.02 Différents couplages des moteurs de traction

20ème leçon - Questionnaire.

21ème leçon -

- 21.01 Sensibilité au patinage des moteurs couplés en série
- 21.02 Affaiblissement du champ des moteurs
- 21.03 Mode et degré d'affaiblissement de champ.

22ème leçon -

- 22.01 Schéma de principe des circuits haute tension
- 22.02 Schéma de principe du circuit de traction
- 22.03 Schéma de principe des circuits auxiliaires
- 22.04 Particularités des circuits haute tension
- 22.05 Appareil de prise de courant
- 22.06 Isolateur d'entrée de courant
- 22.07 Sectionneur d'élimination de pantographe
- 22.08 Parasurtension "Soulé".

23ème leçon -

- 23.01 Parafoudre
- 23.02 Sectionneur de mise à la terre
- 23.03 Sectionneur des appareils de mesure
- 23.04 Principes généraux de la coupure des circuits
- 23.05 Coupure en courant continu.

24ème leçon - Questionnaire.

25ème leçon -

- 25.01 Résistance de démarrage - Schéma
- 25.02 Dimensionnement de la résistance de démarrage
- 25.03 Ventilation de la résistance de démarrage.

26ème leçon -

- 26.01 Transition
- 26.02 Commande d'élimination des résistances de démarrage
- 26.03 Comparaison des deux méthodes de commande.

27ème leçon -

- 27.01 Processus d'affaiblissement du champ des moteurs de traction
- 27.02 Elimination des moteurs de traction
- 27.03 Protection des circuits H.T.
- 27.04 Disjoncteur ou interrupteur principal
- 27.05 Fusible général H.T.

28ème leçon - Questionnaire.

29ème leçon -

- 29.01 Relais à maxima
- 29.02 Fusibles divisionnaires H.T.
- 29.03 Relais de potentiel ou relais tension nulle
- 29.04 Relais de pression (control switch).

30ème leçon -

- 30.01 Relais différentiel
- 30.02 Relais de décel de patinage
- 30.03 Système de détection ultra-rapide du patinage
- 30.04 Techniques nouvelles utilisées pour retarder l'apparition du patinage ou pour l'enrayer

- 30.05 Ventilation des moteurs de traction
- 30.06 Génératrices basse tension
- 30.07 Utilité de la basse tension
- 30.08 Utilité de l'emploi de l'air comprimé
- 30.09 Marche en unités multiples

31ème leçon - Etude des appareils électriques et de leur commande

- 31.01 Electrovalve
- 31.02 Pantographe
- 31.03 Description du pantographe type A.C.E.C.
- 31.04 Description du pantographe type Faiveley

32ème leçon - Questionnaire.

33ème leçon -

- 33.01 Circuit pneumatique du pantographe
- 33.02 Commande électrique du pantographe

34ème leçon - Résistances de démarrage

- 34.01 Généralités
- 34.02 Résistances en ruban de nickel-chrome
- 34.03 Résistances à grille de nickel-chrome
- 34.04 Résistances du type Calrod
- 34.05 Shunt inductif

35ème leçon -

- 35.01 Caractéristiques générales
- 35.02 Dispositifs destinés à favoriser l'extinction de l'arc
- 35.03 Types de contacteurs
- 35.04 Contacteurs à commande électropneumatique
- 35.05 Contacteurs à commande électromagnétique
- 35.06 Contacteurs à commande par arbre à cames.

36ème leçon - Questionnaire.

37ème leçon -

- 37.01 Interrupteur principal des automotrices
- 37.02 Rupteur ou interrupteur principal
- 37.03 Eliminateurs des moteurs de traction des automotrices
- 37.04 Eliminateurs des moteurs de traction des locomotives.

38ème leçon -

- 38.01 Systèmes de commande des contacteurs
- 38.02 Contrôleur à action directe
- 38.03 Commande par tambour d'asservissement
- 38.04 Servo-contrôleur à commande électropneumatique ACEC

39ème leçon -

- 39.01 Commande par arbre à cames
- 39.02 Systèmes de démarrage par arbre à cames commandés par servo-moteur électrique
- 39.03 Mécanisme de commande de l'arbre à cames système J.H.
- 39.04 Principe de fonctionnement du servo-moteur J.H.
- 39.05 Résumé d'une manoeuvre de progression du servo-moteur
- 39.06 Cylindre d'asservissement.

40ème leçon - Questionnaire.

41ème leçon -

- 41.01 Inverseur de marche
- 41.02 Inverseur de marche à commande par moteur électropneumatique
- 41.03 Inverseurs de marche à commande par moteur électrique
- 41.04 Manipulateurs
- 41.05 Manipulateur des automotrices
- 41.06 Manipulateur des locomotives avec démarrage automatique.

42ème leçon -

- 42.01 Disjoncteur ultra-rapide
- 42.02 Description du disjoncteur
- 42.03 Fonctionnement du D.U.R.
- 42.04 Schéma de principe de commande du disjoncteur.

43ème leçon -

- 43.01 Rôle et classification des relais
- 43.02 Relais à maxima des automotrices
- 43.03 Relais à maxima des locomotives et A.M. construites à partir de 1962
- 43.04 Relais de potentiel
- 43.05 Relais différentiel
- 43.06 Relais à maxima de chauffage des locomotives
- 43.07 Relais de pression ou "Control-switch"
- 43.08 Relais d'accélération type J.H.C. des automotrices et locomotives équipées d'un système de démarrage du type J.H.
- 43.09 Relais de génératrice.

44ème leçon - Questionnaire.

45ème leçon -

- 45.01 Caractéristiques des fusibles H.T.
- 45.02 Fusible général à H.T. des automotrices

45.03 Coupe-circuit fusible à expulsion type M.F.

45.04 Généralités sur les batteries d'accumulateurs.

46ème leçon - Batterie.

46.01 Charge de l'accumulateur au plomb

46.02 Décharge de l'accumulateur au plomb

46.03 Constitution et fonctionnement de l'accumulateur alcalin

46.04 Construction des accumulateurs alcalins

46.05 Charge et décharge des accumulateurs alcalins

46.06 Entretien des accumulateurs alcalins

46.07 Avantages des accumulateurs alcalins.

47ème leçon -

47.01 Dispositif de veille automatique

47.02 Description des appareils communs aux différents dispositifs

47.03 Fonctionnement du dispositif de veille automatique (automotrices)

47.04 Fonctionnement du dispositif de veille automatique hie séries 22 - 23

47.05 Mise hors service du dispositif de veille automatique

47.06 Essai du dispositif V.A.

47.07 Equipements supplémentaires combinés au dispositif V.A.

48ème leçon - Questionnaire.

49ème leçon -

49.01 Dispositif de sécurité

49.02 Dispositif de sécurité des automotrices

49.03 Dispositif de mise à la terre

49.04 Dispositif de sécurité des locomotives

49.05 Boîte à clés du dispositif de sécurité des locomotives séries 22 à 26

49.06 Conclusions.

50ème leçon -

50.01 Description et fonctionnement des appareils pneumatiques de la commande électropneumatique des portes et marchepieds

50.02 Fonctionnement de la commande électrique des portes

50.03 Signalisation de la fermeture des portes

51ème leçon - Les Génératrices à courant continu.

51.01 Généralités concernant les génératrices à courant continu

51.02 Induction de courant électrique. Théorie simplifiée

- 51.03 Le collecteur
- 51.04 Les inducteurs de champ
- 51.05 L'induit
- 51.06 Nature de l'excitation de l'inducteur. Types de dynamo.

52ème leçon - Questionnaire.

53ème leçon - Caractéristiques des Dynamos.

- 53.01 La dynamo à excitation indépendante
- 53.02 La caractéristique magnétique
- 53.03 La caractéristique interne
- 53.04 La caractéristique externe

54ème leçon -

- 54.01 Dynamo à auto-excitation
- 54.02 La dynamo série
- 54.03 La dynamo - shunt

55ème leçon -

- 55.01 La dynamo compound
- 55.02 La réaction d'induit
- 55.03 Moyens de compenser la réaction d'induit
- 55.04 Couple de forces antagoniste de la dynamo
- 55.05 Réversibilité des génératrices à courant continu : fonctionnement comme moteur
- 55.06 Façon simplifiée pour retrouver le sens de rotation et le montage d'une machine à courant continu fonctionnant comme moteur ou comme dynamo
- 55.07 Applications.
- 55.08 Montage des dynamos

56ème leçon - Questionnaire.

57ème leçon - Généralités sur le freinage électrique

- 57.01 Les principes de fonctionnement du moteur à courant continu
- 57.02 Freinage rhéostatique - Excitation
- 57.03 Freinage rhéostatique - Propriétés.

58ème leçon - Freinage rhéostatique - Schéma de principe.

- 58.01 Méthode par variation d'excitation
- 58.02 Considérations sur le freinage rhéostatique en traction électrique
- 58.03 Conclusions
- 58.04 Freinage par récupération - schéma
- 58.05 Intérêt de la récupération
- 58.06 Instabilité de la génératrice série en récupération.

59ème leçon -

- 59.01 Schéma de récupération des locomotives série 23
- 59.02 Dispositifs de stabilisation
- 59.03 Dispositifs de sécurité.

60ème leçon - Questionnaire.

61ème leçon - Théorie du courant alternatif.

- 61.01 Courant continu et courant alternatif
- 61.02 Définitions
- 61.03 Déphasage entre deux grandeurs en courant alternatif.

62ème leçon - Self-Induction.

- 62.01 La notion "Self-induction - self-induction en courant continu"
- 62.02 Coefficient de self-induction
- 62.03 Self-induction en courant alternatif
- 62.04 Déphasage dû à la self-induction
- 62.05 Récapitulation.

63ème leçon - Capacité.

- 63.01 Les notions "condensateur" et "capacité"
- 63.02 Fonctionnement d'un condensateur en courant continu
- 63.03 Fonctionnement d'un condensateur en courant alternatif
- 63.04 Résistance apparente d'un condensateur.

64ème leçon - Questionnaire.

65ème leçon -

- 65.01 L'impédance d'un réseau
- 65.02 Exemple
- 65.03 Détermination préalable de Z et de φ pour un appareil ou une installation
- 65.04 Facteur de puissance d'un appareil ou d'une installation $\cos \varphi$
- 65.05 La puissance en courant alternatif
- 65.06 Le transformateur - Définition et principe de fonctionnement
- 65.07 Transformateurs de puissance
- 65.08 Transformateurs de mesure.

66ème leçon - Généralités sur les semi-conducteurs.

- 66.01 Définition
- 66.02 Explication simplifiée
- 66.03 Semi-conducteurs
- 66.04 Semi-conducteurs du type n

- 66.05 Semi-conducteurs du type p
- 66.06 Récapitulation
- 66.07 Définition d'une jonction p.n.
- 66.08 Description du processus de redressement d'une jonction p.n.
- 66.09 Caractéristiques d'un redresseur à semi-conducteurs.

67ème leçon -

- 67.01 La diode à semi-conducteur comme cellule redresseuse
- 67.02 Redressement d'une alternance d'un courant alternatif
- 67.03 Inconvénients du redressement mono-alternance par rapport au redressement bi-alternance
- 67.04 Redressement bi-alternance
- 67.05 Lissage du courant continu pulsé
- 67.06 Le Transistor
- 67.07 Schéma de traction des locomotives poly-tensions.

68ème leçon - Questionnaire.

69ème leçon - Généralités sur les thyristors

- 69.01 Détermination du thyristor
- 69.02 Propriétés du thyristor
- 69.03 Courbe caractéristique du thyristor
- 69.04 Principe de fonctionnement du thyristor
- 69.05 Limitation du thyristor
- 69.06 Groupement de thyristors

70ème leçon - Application du Thyristor dans la traction à courant continu.

- 70.01 Généralités sur le démarrage en traction à C.C.
- 70.02 Principe d'un dispositif de démarrage à thyristors
- 70.03 Schéma de principe d'un dispositif de démarrage à thyristors
- 70.04 Caractéristiques d'un dispositif de démarrage à thyristors.

71ème leçon - Généralités sur l'application des thyristors dans le hacheur.

- 71.01 La fonction du hacheur
- 71.02 Description du fonctionnement du hacheur
- 71.03 Discussion du schéma de traction H.T.

72ème leçon - Questionnaire.

Traction électrique.

1e Leçon.

.01 Evolution de la traction électrique.

La traction électrique trouve son origine dans des problèmes ferroviaires particuliers et dans l'évolution de l'électrotechnique.

- Le premier train électrique fut mis en service en 1879 lors d'une exposition industrielle à Berlin.

La petite "locomotive" était équipée d'un moteur à courant continu de 2,2 kW .

- Les premiers tramways électriques font leur apparition en 1880 et leur développement s'intensifie.

En 1894 l'Amérique exploite déjà 12 000 km de voies électrifiées contre 300 km en Europe.

Les tensions varient entre 500 et 750 V. L'alimentation se faisait par des génératrices à courant continu entraînées par des machines à vapeur.

- En 1900 en Suisse, les premières voies étroites de montagne sont électrifiées en courant alternatif triphasé avec des moteurs asynchrones.

Ensuite, le système triphasé s'est étendu jusqu'au Nord de l'Italie. Ce système exigeait 2 fils de contact, le rail était le 3e conducteur.

Cet ensemble présentait de gros inconvénients, surtout dans les croisements.

Comme le moteur asynchrone n'était pas particulièrement indiqué pour réaliser de nombreux démarrages, ce système fut finalement abandonné. On lui préféra le moteur série.

Cependant en 1903 le 200 km/h pu être atteint sur la ligne Marienfeld - Zossem par une automotrice équipée de moteurs asynchrones triphasés 50 Hz alimentés en 10 kV.

- Le système monophasé 15 kV. 16. 2/3 Hz a été appliqué depuis 1904 en Allemagne et en Suisse.

L'alimentation s'effectuait par des centrales hydrauliques autonomes.

2.

De même en Amérique ce système est appliqué à New-York en 11 kV et 25 Hz.

Les moteurs de traction sont des moteurs série à collecteur.

- En 1920 la France et la Hollande décident d'appliquer l'électrification aux grandes lignes et adoptent le courant continu 1,5 kV.

Le courant fourni par les centrales est redressé dans les sous-stations au moyen de convertisseurs rotatifs.

- Vers 1930, le redresseur à vapeur de mercure fut introduit dans les sous-stations de traction et ainsi la voie était ouverte à l'électrification sous 3 kV.

C'est ainsi que la Belgique, la Pologne, le Maroc, l'Italie qui décidèrent vers cette période d'électrifier leur chemin de fer ont opté pour le courant continu 3 kV.

- Le premier train électrique Belge a circulé en 1935 entre Bruxelles et Anvers, exactement 100 ans après que le premier train à vapeur ait relié Bruxelles à Malines.

- Déjà en 1939 des essais en 50 Hz, 25 kV étaient effectués dans la Forêt-Noire (Höllental) avec des moteurs série monophasés dérivés de ceux utilisés en $16 \frac{2}{3}$ Hz.

- Mais ce n'est qu'en 1950 que le système 25 kV, 50 Hz a été réalisé pratiquement sur la ligne Thionville-Valenciennes.

- Le moteur de traction 50 Hz (moteur direct) est lourd et a toujours une commutation délicate. Pour cette raison l'on chercha à redresser le courant sur la locomotive au moyen d'ignitrons.

Mais ce n'est en fin de compte qu'en 1959 grâce aux redresseurs Silicum, que ce système de traction a définitivement été mis au point et qu'en outre il a été possible de construire du matériel de traction pouvant aussi bien fonctionner sur un réseau alternatif que continu.

- Nous arrivons avec l'électrification Bruxelles-Paris (1963) et Bruxelles-Cologne (1966) à l'ère des relations internationales rapides avec les trains TEE remorqués par locomotives polycourant.

A l'heure actuelle, pour l'électrification des grandes lignes des chemins de fer, le choix se fait entre les systèmes suivants :

- 1° Courant alternatif monophasé 15 000 V - 16 2/3 Hz.
- 2° Courant continu 1 500 V.
- 3° Courant continu 3 000 V.
- 4° Courant alternatif monophasé 25 000 V. - 50 Hz.

1.02 Système en courant alternatif 16. 2/3 Hz (fig. 1.01)

Il s'agit du plus vieux système qui s'est néanmoins maintenu.

- Les lignes caténaïres sont alimentées en 15 kV par des centrales autonomes, propriété des réseaux ou par des centrales industrielles.

Dans ce dernier cas le courant alternatif triphasé 50 Hz. est transformé en courant alternatif monophasé 16 2/3 par des centrales autonomes (groupe moteur-alternateur).

- Les avantages résident principalement dans la légèreté des lignes caténaïres (100 mm²), poteaux, fondations et l'espacement des points d'alimentation (60 à 80 km).
- Si la tension élevée de la caténaire procure les avantages indiqués ci-dessus, elle impose par contre, des distances d'isolement importantes.

Il en résulte des difficultés parfois considérables; en effet, ces distances d'isolement exigent une augmentation importante du gabarit de la section libre, et, par voie de conséquence, des travaux d'aménagement des ponts et des tunnels dont la hauteur actuelle est alors insuffisante, ce qui exige des dépenses supplémentaires très élevées.

A bord du matériel se trouve un transformateur abaisseur; le démarrage des moteurs série alternatifs monophasés à collecteur est obtenu au secondaire du transformateur par suite de ses prises multiples et se fait sans pertes.

Les moteurs sont alimentés à une tension relativement faible (500 à 750 V), ce qui est favorable du point de vue constructif (plus grande facilité d'isolement) et exploitation (réduction des coups de feu au moteur).

Le point faible de ce système est le moteur de traction qui a une très mauvaise commutation.

En effet, malgré la fréquence très basse, le tiers de 50 Hz, soit 16 2/3 Hz, il existe dans les spires, mise en court-circuit par les balais, une f.e.m. très élevée sous l'action du champ inducteur alternatif.

Ce courant détériore à la fin les balais et les lamelles du collecteur.

On arrive à réduire cette difficulté de commutation par des dispositions spéciales de construction du moteur.

- diminution du flux inducteur par pôle ce qui revient à augmenter le nombre de paires de pôles (parfois 10 paires et plus)
- addition des pôles auxiliaires et des enroulements compensatoires.
- utilisation de connexions résistances dans les enroulements d'induit et des balais Sandwich (balais en 2 pièces avec résistances) afin de limiter le courant de court-circuit.

1.03 Traction électrique en 1,5 kV. (Fig.101).

L'expérience aidant, les constructeurs de moteurs de traction élevèrent progressivement la tension de 600 V des lignes de tramway à 750 puis 900 et enfin à 1 500 V.

Pour un moteur 200 à 750 kW, qui doit être logé entre les roues, dans un bogie, cette tension est un maximum

En 1920, c'était la meilleure solution pour une électrification à grande échelle.

Entre temps, les centrales électriques avaient pris suffisamment d'extension pour pouvoir supporter la charge de la traction électrique.

L'alimentation des lignes caténares s'effectuait au moyen de moteurs-générateurs ou avec des commutatrices, plus tard au moyen de redresseurs à vapeur de mercure et actuellement avec des redresseurs secs.

Les lignes caténares doivent avoir une forte section (550 mm²) afin de réduire les chutes de tension en ligne par fort trafic.

Pour cette même raison les sous-stations seront très rapprochées (15 à 20 km).

1.04 Le système 3 kV. (fig.102).

De nombreux pays qui comme le nôtre, ont électrifié leur réseau vers les années 1930 ont appliqué le système 3 kV.

En effet, à ce moment le redresseur à vapeur de mercure (actuellement le redresseur sec) permettait cette tension alors que cela eut été impossible avec une commutatrice rotative.

En conséquence les lignes caténaïres pouvaient être beaucoup plus légères, et de plus les sous-stations devenaient beaucoup plus espacées (30 à 40 km).

Les isolateurs ne sont pas beaucoup plus lourds en 3 kV qu'en 1,5 kV.

Les économies d'investissement sur les installations fixes s'élevaient à 30 %.

En ce qui concerne le matériel de traction, la situation n'est cependant pas aussi favorable.

Les moteurs de traction ne peuvent avoir une tension aux bornes supérieures à 1500 V pour des raisons de commutations et d'encombrement du collecteur. (La tension entre lames ne peut dépasser 40 V).

L'on ne pourra donc adopter un couplage parallèle des moteurs mais il faudra les placer toujours au moins en série deux par deux. (couplage série-parallèle).

Les moteurs sont plus encombrants parce qu'ils doivent être isolés à 3 kV.

Aux grandes vitesses, ils sont plus sensibles aux flashes et à l'emballement (survitesse).

Les contacteurs sont également plus sollicités et la fréquence des coups de feu est plus grande en 3 kV qu'en 1,5 kV.

Dans la phase initiale de l'électrification en 3 kV, l'on craignait que la durée de vie des moteurs de traction serait réduite mais une expérience de plus de 40 ans en a fait des organes sûrs et robustes qui ne coutent en fin de compte pas beaucoup plus cher que les moteurs 1,5 kV.

1.05 Système 50 Hz. (fig. 1.03)

Ce système est bien le plus attrayant car l'alimentation peut se faire directement par des centrales du réseau public à 50 Hz.

La caténaire est alimentée à 25 kV 50 Hz et peut donc être très légère. (Mêmes avantages et désavantages que le système 16 2/3 Hz).

Les sous-stations se limitent à un transformateur 110 ou 220 kV/ 25 kV.

Grâce aux puissances élevées des réseaux HT actuels le déséquilibre local dû à la charge monophasée n'est plus guère ressenti par les centrales.

Un moteur asynchrone a un couple bien trop faible au démarrage pour être pris en considération.

Le moteur à 50 Hz (moteur direct) était bien une solution séduisante (voir fig. 1.03a).

On a donc essayé d'améliorer encore le moteur 16 2/3 en utilisant encore plus de balais et plus d'artifices.

Après quelques envois à grande échelle, on s'est convaincu enfin que rien n'égalait un moteur à courant continu pour la traction ferroviaire.

La seule solution valable consistait donc à transformer sur le véhicule le courant de la caténaire en courant continu.

Dans cet ordre d'idée, on a même construit en France une locomotive équipée d'un convertisseur rotatif ! (fig. 1.03b).

Un redresseur classique à vapeur de mercure pouvait difficilement être installé sur un engin de traction, mais des résultats valables ont été obtenus au moyen de redresseurs mano-anodiques "ignitrons" et "excitrons". (fig. 1.03c).

L'équipement était cependant lourd et compliqué.

L'entretien de l'arc (tache cathodique) doit être assuré par toutes les températures extérieures. Il faut non seulement refroidir (à l'eau) mais en hiver il faut réaliser un préchauffage de cette eau !

Si l'on songe alors aux problèmes que pose l'isolement de ces appareils, ainsi que le dispositif d'entretien de l'arc on peut dire que l'invention des redresseurs secs au silicium, a permis la percée définitive du système 50 Hz.

Ces cellules de redresseurs secs occupent relativement peu de place, ils sont d'un fonctionnement sûr, comme leur fonctionnement est statique, ils sont pratiquement inusables. (fig. 1.03d).

Ils permettent la construction de locomotives de très grande puissance (4.500 kW et plus) qui ne pèsent guère plus que les machines actuelles (80 t).

1.06 Conclusion.

Les pays qui, après 1950 passèrent à l'électrification à grande échelle de leur réseau ferroviaire ont adopté sans hésitation le système 50 Hz, surtout si les distances sont très longues (France, Russie, Inde, Congo etc).

Lorsqu'en Belgique après 1950 il fut décidé d'étendre l'électrification, il existait déjà la ligne Charleroi-Anvers en 3 kV.

Dans ce petit pays il est impensable d'adopter deux systèmes différents de traction électrique. La complexité des gares bi-courant rend l'exploitation très difficile.

De plus, à cette période il n'était pas encore question d'utiliser des redresseurs secs et le système était loin d'être au point.

2e leçon.

SYSTEME DE TRACTION ELECTRIQUE PAR COURANT CONTINU 3 KV.

Une fois choisi le système de traction électrique par courant continu, pour passer du courant alternatif triphasé fourni par les centrales du secteur privé au courant continu nécessaire à la traction électrique, il faut dans la sous-station un organe de conversion.

2.01. Comment réaliser la conversion du courant alternatif triphasé en courant continu?

4 solutions sont possibles :

- 1) Groupe moteur générateur,
- 2) Commutatrice,
- 3) Redresseur à vapeur de mercure.
- 4) Semi-conducteur (silicium).

2.02. Circuit d'alimentation de la sous-station en courant triphasé (fig. 2.01).

L'énergie est amenée de la centrale par plusieurs arrivées, le nombre de celles-ci étant fixé par la puissance de la sous-station et les sections de câble utilisées; les câbles d'arrivée sont souterrains ou aériens. Pour toute sécurité un ou des câbles de réserve sont prévus.

A l'entrée dans la sous-station, chaque câble aborde un sectionneur permettant : la liaison, la coupure et la mise à la terre.

En effet, en cas de travaux sur le câble, il ne suffit pas de l'isoler à l'aide d'un sectionneur pour être certain qu'il ne règne plus de potentiel dangereux. L'induction mutuelle avec tout câble ou appareil sous tension ou simplement un défaut d'isolement, créent des risques supplémentaires contre lesquels il faut se défendre en mettant systématiquement les sectionneurs à la terre. De plus, la mise à la terre préalable protège contre toute remise sous tension accidentelle.

Un disjoncteur, généralement du type pneumatique, protège le câble et l'isole dès qu'un court-circuit se produit en aval.

Les câbles sont connectés à l'un des 2 jeux de barres de la sous-station : 2 par raison de sécurité pour permettre l'alimentation lorsque l'autre est mis hors service pour travaux, incident, etc...

Les disjoncteurs étant des appareils coûteux, il faut limiter leur emploi là où ils sont nécessaires.

Ainsi on peut connecter les câbles sur l'un ou l'autre jeu de barres par l'intermédiaire d'un seul disjoncteur et de 2 sectionneurs.

Un sectionneur ne pouvant pas couper le courant, c'est bien entendu le disjoncteur qu'on doit ouvrir en premier lieu.

On ouvre par après les sectionneurs, leur ouverture donne la certitude, au cas où les contacts du disjoncteur ne sont pas visibles, qu'il n'existe pas de haute tension.

2.03. Circuit de transformation du courant triphasé en courant continu (fig. 2.01)

Partant de l'un des jeux de barres triphasé on alimente le groupe transformateur redresseur par l'intermédiaire d'un disjoncteur de protection généralement identique à celui d'alimentation en courant triphasé. Ce disjoncteur est encadré comme d'habitude par des sectionneurs : 2 sectionneurs sont prévus à l'amont de façon à pouvoir se brancher sur l'un ou l'autre jeu de barres.

Le point neutre du transformateur est relié à une barre qui constitue le pôle négatif du circuit à courant continu; la sortie du redresseur est reliée à une barre qui constitue le pôle positif du circuit à courant continu.

La connexion à la barre positive du circuit à courant continu se fait au travers d'un disjoncteur ultra-rapide qui fonctionne par retour du courant. Ce disjoncteur est encadré de ses sectionneurs; en aval, on trouve 2 sectionneurs permettant de se brancher sur l'une ou l'autre barre positive.

2.04. Circuit de distribution du courant continu - côté positif (fig. 2.01).

Les lignes de contact de chacune des voies sont coupées au droit des sous-stations et des postes de sectionnement. Chacun des tronçons constituant ce qu'on appelle un feeder est alimenté par la sous-station.

Partant de l'une ou l'autre des barres positives - 3000 V - chaque feeder est alimenté à travers un disjoncteur ultra-rapide encadré de sectionneurs.

Le disjoncteur ultra-rapide du feeder fonctionne à maximum de courant et non à retour du courant. Il est destiné à couper l'alimentation du feeder en cas de court-

circuit sur celui-ci : cette coupure doit être très rapide, sinon on risque d'occasionner des dégâts à la ligne ou au matériel roulant.

Pour permettre l'entretien ou la réparation d'un disjoncteur de feeder, il a été prévu dans chaque sous-station un disjoncteur de réserve, appelé disjoncteur by-pass, connecté en permanence et qui peut alimenter l'un quelconque des départs par l'intermédiaire de l'autre barre 3000 V moyennant simple manoeuvre de sectionneurs.

2.05. Test .

En cas de court-circuit sur un feeder, le disjoncteur ultra-rapide de protection déclenche; il se réenclenche automatiquement et si pendant 3 secondes, il se maintient fermé le défaut est considéré comme fugitif.

Si dans ce délai le disjoncteur de feeder déclenche à nouveau, avant de pouvoir le réenclencher, il faudra s'assurer que le défaut a disparu. Le répartiteur E.S. intervient et la collaboration du répartiteur M.A. est nécessaire quand le matériel roulant est présumé en cause.

2.06. Circuit de distribution du courant continu côté négatif (fig. 2.01)

Les 2 "conducteurs" d'alimentation du matériel roulant sont :

Côté positif : la caténaire qui est alimentée par la sous-station comme indiqué à l'art. 2.04.

Côté négatif : le rail qui est relié à la sous-station comme indiqué ci-dessous.

En face de la sous-station, chaque rail est relié à une barre négative par câbles unipolaires, 2 par raison de sécurité.

La barre négative est alors mise à la terre par au moins 2 prises de terre et reliée au point neutre du transformateur.

3e leçon.

3.01. Principe de la sélectivité.

La protection d'un secteur de ligne caténaire est dite "sélective" si, lors d'un court-circuit, seuls les disjoncteurs qui l'alimentent déclenchent.

Le secteur déficient se trouve ainsi immédiatement isolé pendant que les autres sections continuent à être alimentées normalement.

Cette sélectivité est obtenue grâce au réglage des différents disjoncteurs de feeders.

La fig. 3.01 montre le principe général de la sélectivité; un réseau étant alimenté généralement par plusieurs sources (sous-stations) en parallèle, par exemple A, B et C, le court-circuit au point x sera alimenté par deux chemins différents. Ce seront les disjoncteurs 2 et 3 qui devront déclencher sans laisser le temps au courant des autres disjoncteurs d'atteindre la valeur de déclenchement.

La protection des lignes caténares soulève encore un autre problème : les disjoncteurs doivent déclencher en cas de court-circuit, même si celui-ci se présente à grande distance, mais ne peuvent pas déclencher sous l'effet des courants de charge normaux. Or, le courant provoqué par un court-circuit à grande distance peut, à cause de la résistance de la ligne caténaire, être du même ordre de grandeur que les courants de charge normaux.

Par exemple : Une masse franche survenant en bout de ligne à 20 km de la sous-station provoque un courant de court-circuit :

$$I = \frac{E}{R}$$

où $E = 3000 \text{ V}$

$R = 1,15 \ \Omega$

(c.à.d. $0,047 \ \Omega/\text{km}$ pour la caténaire + $0,01 \ \Omega$ par km pour les rails)

donc $I = \frac{3000}{1,15} = 2625 \text{ A}$.

Or, deux locomotives électriques remorquant chacune une forte charge peuvent prendre une pointe de courant de 1000 A chacune, soit 2000 A au total.

Il est remédié à ce problème, par l'emplacement d'un "shunt inductif", en parallèle avec la bobine de déclenchement du disjoncteur : ce shunt présente une grande inductance,

2.

mais une faible résistance ohmique par rapport à la bobine de déclenchement (fig. 3.02).

En cas de court-circuit, par suite de la brusque variation du courant, celui-ci évite le shunt avec sa grande inductance et passe presque entièrement par la bobine de déclenchement, provoquant ainsi l'ouverture du disjoncteur.

Par contre, les courants de charge normaux, soumis à des variations moins brusques, se répartissent différemment entre le shunt et la bobine de déclenchement : cette dernière ayant une résistance ohmique relativement élevée, une faible partie seulement de ce courant de charge passe par cette bobine de déclenchement : le disjoncteur reste enclenché.

3.02. Poste de sectionnement.

Afin de réduire considérablement la chute de tension en ligne pour les trains éloignés des sous-stations, les caténaires sont mises en parallèle entre deux sous-stations. Dans la fig. 3.03 par exemple, les deux sous-stations sont mises en parallèle à l'endroit PS, environ à moitié chemin entre M et N.

Pour assurer néanmoins la sélectivité et garder en service la voie A par exemple malgré un défaut sur la voie B en x, on doit placer en plus des disjoncteurs des feeders des sous-stations 1, 2, 3 et 4 les disjoncteurs 5, 6, 7 et 8. Ces disjoncteurs sont placés dans un bâtiment appelé "poste de sectionnement".

La fig. 3.04 représente le schéma d'un poste de sectionnement.

Nous voyons que les disjoncteurs relient 4 secteurs de caténaires entre eux sur une barre commune appelée barre 3 kV.

Les disjoncteurs sont placés entre les sectionneurs pour permettre leur entretien séparément.

Lignes caténaires.

3.03. Conditions auxquelles doit satisfaire une ligne caténaire.

La caténaire est destinée au transport du courant des sous-stations vers le matériel roulant électrique.

Elle doit satisfaire aux conditions suivantes :

a) Assurer le transport de grandes puissances sur des longues distances sans chutes de tension ni échauffe-

ments exagérés. Cette condition déterminera la section de la ligne. Il ressort des calculs qu'un seul fil de contact, comme utilisé par les tramways, est insuffisant.

b) La ligne de contact doit permettre une captation de courants importants par tous les temps et à grande vitesse sans donner lieu à des arcs nuisibles. La suspension "tramway" (simple fil de contact suspendu à des isolateurs) ne saurait satisfaire à cette condition.

Seule la suspension dite "caténaire" permet de capter des courants importants au moyen d'un pantographe sans produire des arcs nuisibles.

Cette suspension caténaire permet en outre d'obtenir sans complications une section de ligne suffisante afin de satisfaire à la première condition.

c) Les lignes caténaires ne peuvent gêner la visibilité des signaux. A cette fin des dispositions spéciales devront être prises lors de l'étude des plans d'implantation des poteaux.

d) Le contact entre la raquette du pantographe et le fil de contact doit être élastique afin d'éviter des interruptions de contact lors des variations de niveau inévitables. Afin d'obtenir une bonne captation de courant, la pression de contact doit être aussi constante que possible.

Pendant la marche, le fil de contact est soulevé légèrement par le pantographe. La flexibilité de la caténaire doit donc être la plus constante possible de façon à éviter les "points durs" causes d'une augmentation brusque de la pression suivie d'un décollement du pantographe.

e) Les lignes caténaires devront être tracées de façon à limiter à un seul secteur une avarie survenant en service. Une protection efficace des lignes caténaires et du matériel roulant électrique sera obtenue par une disposition judicieuse des disjoncteurs et des sectionneurs alimentant et protégeant les différents secteurs.

3.04. Systèmes de suspension.

Les systèmes de suspension normalement utilisés pour les lignes de contact sont : la suspension tramway, la caténaire simple et la caténaire compound.

a) La suspension tramway est la plus simple et consiste à suspendre le fil de contact à des isolateurs fixés sur consoles ou portiques (fig. 3.05)

Pour que la flèche ne prenne, sous l'effet de l'élévation de température, des valeurs trop importantes, on est obligé de réduire la portée, c.à.d. de multiplier les supports.

Mais comme on est limité dans cette voie par le coût de la ligne, la flèche de la suspension tramway est toujours trop importante pour permettre des vitesses élevées.

A la S.N.C.B. ce système de suspension n'est utilisé que pour des voies secondaires dans les gares de marchandises (parcourues à faible vitesse : max. 40 km/h).

b) La caténaire simple (fig. 3.06) comprendra un câble porteur (a) suspendu au moyen d'isolateurs (b) entre deux portiques ou consoles (c) lesquels sont fixés à des poteaux (d) plantés le long des voies dans des fondations en béton (e).

Le câble porteur porte, par l'intermédiaire de pendules (f) de longueur différente, un ou deux fils de contacts (g) qui prennent de ce fait une position horizontale.

La flèche du câble porteur peut atteindre sans inconvénients des valeurs importantes et les portées (distances entre les poteaux) sont de l'ordre de 60 à 70 m en ligne droite.

Les points de suspension des fils de contact sont distants de 5 à 10 m : il en résulte donc de très faibles flèches de ces fils de contact entre ces points de suspension, ce qui autorise des vitesses relativement élevées.

Cette suspension caténaire simple ne convient pas encore pour les grandes vitesses. Aux basses températures il se produit fréquemment des décollements de pantographes.

Ces décollements s'accompagnent d'arcs électriques et de chocs mécaniques nuisibles tant pour le matériel roulant que pour la caténaire.

Pour ces raisons la caténaire simple n'est utilisée que pour les tronçons de lignes qui ne sont normalement pas parcourus à grande vitesse.

c) La caténaire compound (fig. 3.07) comprend un câble porteur principal (a) qui supporte un porteur auxiliaire (b) par l'intermédiaire de pendules (c) appelés pendules principaux ; au porteur auxiliaire sont suspendus un ou deux fils de contact (d) au moyen de pendules étriers (e) qui sont tous de même longueur.

La caténaire compound actuellement adoptée pour l'électrification du réseau comporte les caractéristiques suivantes :

- Le câble porteur principal est en bronze et a une section de $94,14 \text{ mm}^2$. Il est constitué de 37 fils de $1,8 \text{ mm}$ de diamètre. La distance entre les pendules principaux est de 7 m .
- Le porteur auxiliaire est en cuivre au cadmium et a une section de 104 mm^2 . Il a été choisi en fil rond (diamètre $11,5 \text{ mm}$) dans le but de faciliter le déplacement des pendules cavaliers.

Les deux fils de contact sont en cuivre au cadmium et présentent chacun une section de 100 mm^2 .

Les pendules étriers sont distants de $3,5 \text{ m}$ et ont tous la même longueur de $0,20 \text{ m}$. Ils alternent entre eux de telle façon que les pendules d'un même fil sont distants de 7 m lorsqu'il y a deux fils de contact.

La section totale de la caténaire est donc de $94,13 + 104 + (2 \times 100) = 398,13 \text{ mm}^2$ mais comme la conductibilité du bronze du porteur principal et du cuivre au cadmium du porteur auxiliaire n'est que respectivement 70 et 90% de celle du cuivre on dit que la section équivalente de la caténaire compound est de 360 mm^2 .

4e leçon

QUESTIONNAIRE.

- 1.02 Quels sont les avantages et les inconvénients de l'électrification en courant alternatif 16 2/3 Hz ?
- 1.04 Pourquoi, vers 1930, de nombreux pays ont appliqué le système d'électrification à 3 kV ?
- 1.05 Pourquoi le système de courant alternatif 50 Hz a-t-il actuellement des possibilités illimitées ?
- 2.01 A l'aide de quels appareils transforme-t-on le courant alternatif en courant continu ?
- 2.02 Quels appareils spéciaux sont installés dans le circuit d'alimentation triphasé d'une sous-station ?
- 2.03 Dans les sous-stations, de quelle manière le courant alternatif triphasé est-il actuellement transformé en courant continu ?
- 2.04 Quel est le rôle du disjoncteur UR de feeder ?
- 2.06 Quels sont les conducteurs d'alimentation des engins moteurs ?
- 3.01 Que comprenez-vous par "sélectivité d'un secteur" ?
- 3.02 Quel est le rôle des postes de sectionnement ?
- 3.04 Quels sont les systèmes de suspension utilisés à la S.N.C.B. ?

Faites le schéma de la suspension des lignes principales en y indiquant nominativement chaque pièce.

5e leçon.

5.01 Fils et câbles.

a) Porteur principal et porteur auxiliaire.

Ils ont été décrits dans la leçon précédente.

b) Fil de contact.

Le fil de contact est en cuivre au cadmium.

La section est représentée à la fig. 5.01 ; les griffes de suspension viennent prendre dans deux rainures latérales.

La surface de frottement est sensiblement plane dans le but d'obtenir une bonne captation de courant.

En général, on utilise deux fils de contact ce qui amène l'avantage de supprimer les points durs au droit des griffes de suspension puisque l'autre fil y présente justement sa flèche maximum.

c) Feeder.

Comme leur nom l'indique, les feeders sont des câbles d'alimentation qui relient les sous-stations, les postes d'alimentation ou de sectionnement à la ligne caténaire.

Lorsqu'ils longent la ligne, ils sont suspendus à des consoles spéciales dites consoles de feeders.

Ce sont des câbles en cuivre électrolytique constitués de 37 brins de 1,9 mm.

d) Câbles de terre.

Les poteaux étant encastrés à leur base dans des massifs en béton on les suppose isolés par rapport au sol.

Pour éviter que par suite d'un manque d'isolement de la caténaire, le poteau ne se trouve à un potentiel élevé par rapport à la terre, on le connecte au rail au moyen d'un câble isolé.

De cette façon le percement d'un isolateur occasionne un court-circuit direct qui fera déclencher le disjoncteur du feeder. La méthode actuelle, les poteaux ou portiques sont reliés entre eux par un câble aérien : dans ce cas, une partie seulement de ces poteaux sont reliés au rail.

A remarquer que les ferrures des passages supérieurs et des tunnels sont également reliées entre elles par un câble de mise à la terre.

2.

5.02 Types de supports.

Les lignes caténares sont suspendues à des supports qui sont constitués différemment suivant les circonstances.

a) Poteaux à console.

Un poteau en acier, planté dans un massif de béton, est muni d'une console haubannée (fig. 5.01) ou contre-fichée (fig. 5.03).

Ces poteaux à console sont utilisés principalement sur les lignes à simple voie.

Ils furent également utilisés sur les lignes à double voie en Belgique dans le but de garder l'indépendance des deux lignes en cas d'accident.

Cette technique a évolué depuis et dans les nouvelles électrifications le portique a remplacé le poteau à consoles.

Pour les lignes à double voie, il est parfois impossible de planter à certains endroits des poteaux de part et d'autre de la voie, soit que la plateforme n'est pas assez large, soit que la visibilité d'un signal est gênée; on utilise dans ce cas un poteau avec grande console servant pour les deux voies (fig. 5.04).

Ce type de support constitue un point faible dans l'équipement de la ligne.

Lorsque l'entrevoie est assez grande, on peut utiliser également un poteau planté dans l'axe de l'entrevoie et supportant deux consoles opposées (fig. 5.05).

Ce support à console double est bien équilibré et est très économique.

Les poteaux sont généralement en acier profilé (fig. 5.06). La poutre Grey est utilisée sur toutes les lignes récemment électrifiées. (fig. 5.07)

b) Portiques rigides.

Ces dernières années le portique rigide est généralisé en Belgique sur les lignes à double voie.

Il est composé de deux poteaux reliés entre eux par une traverse (fig. 5.08).

Ce système a l'avantage d'être plus léger que deux poteaux avec simple console et de coûter par conséquent moins cher.

L'augmentation des risques d'interruption des deux voies en cas de déraillement s'est avérée peu importante.

Lorsque usage est fait de portiques, l'emplacement des fondations doit être effectué avec grand soin car les deux poteaux doivent être montés exactement en regard l'un de l'autre.

Le portique rigide est également utilisé pour des tronçons à plus de deux voies (fig.5.09).

c) Portiques souples.

Dans les gares importantes, lorsque la largeur du faisceau à électrifier dépasse une trentaine de mètres, l'on recourt à un portique souple (fig.5.10).

Ce portique est constitué par un câble funiculaire (a) auquel est suspendu un câble transversal en position horizontale (b) qui porte au moyen d'isolateurs (c) les porteurs principaux des différentes lignes caténares (e). Les porteurs auxiliaires (f) sont tenus en place par un autre câble transversal inférieur (g) qui fait office d'antibalançant.

Les portiques souples peuvent atteindre des portées de 100 à 150 m. Ils sont plus coûteux et d'un montage plus difficile que les poteaux à consoles mais présentent certains avantages :

- Meilleure visibilité des signaux;
- Diminution des risques d'accrochage en cas de déraillement;
- Aspect plus homogène des installations.

Les poteaux des grands portiques deviennent relativement importants.

Ils sont construits, en forme de poutre d'égale résistance, assemblés par soudure ou rivure (fig.5.11).

5.03 Distance entre poteaux.

La distance maximum entre supports en alignement est limitée entre autres par le déplacement latéral admissible des fils de contact sous l'action du vent.

Ce déplacement latéral qui dépendra également du poids de la caténaire et de la tension mécanique des fils de contact doit rester assez faible pour que le pantographe ne quitte le fil de contact même pour une position très inclinée du véhicule (ressort cassé).

Ces considérations ont amené à fixer la distance maximum entre poteaux en ligne droite sur notre réseau à 63 m.

En courbe, comme le tracé de la ligne devra se réaliser en polygone (fig.5.12), la distance des points de suspension sera plus réduite afin d'éviter de trop grands désaxements.

5.04 Changement des niveaux.

En pleine voie la hauteur des fils de contact au-dessus du rail est de 5,5 m. Dans les gares où des locomotives à vapeur stationnent sur les voies électrifiées, cette hauteur est plus grande pour des raisons de sécurité (au maximum 6 m).

Aux abords de certains passages supérieurs et des tunnels cette hauteur ne peut être maintenue.

La hauteur minimum des fils de contact au-dessus du rail a été fixée à 4,8 m. De cette façon, il restera toujours au moins 25 cm entre le fil de contact et un pantographe abaissé (hauteur maximum au-dessus du rail du pantographe abaissé 4,55 m). On a ainsi la certitude qu'aucun arc ne se maintiendra.

Les changements de niveau doivent être progressifs dans les deux sens de façon à éviter les décollements du pantographe et la production d'arcs.

On admet en général que la pente d'une portée ne doit pas dépasser 6 0/00. En outre, deux niveaux différents du fil de contact devraient être raccordés théoriquement par une courbe, mais comme ceci est irréalisable (fig.5.13) dans la pratique, on se contente de limiter à 3 0/00. La différence entre les déclivités de deux portées contiguës.

En résumé, le raccord entre deux niveaux différents du fil de contact se présentera généralement comme représenté à la fig.5.14.

5.05 Désaxement - Antibalançants.

a) En alignement les fils de contact doivent être placés en zig-zag afin d'obtenir une usure régulière des frotteurs de pantographes.

Quand on utilise des poteaux à console (fig.5.01 à 5.05) la pose en zig-zag est réalisée au moyen d'antibalançants.

Cet appareil (fig.5.15) se compose d'un tube (T) dont une extrémité terminée par un isolateur (I) est fixé avec articulation cardan à une chaise (c) du poteau, tandis

que l'autre extrémité est attachée au câble porteur auxiliaire (A) par une bague et une pince.

Quand on utilise le portique rigide (fig. 5.16) c'est le câble transversal qui joue le rôle d'antibalançant. Il fixe le porteur auxiliaire.

Ces derniers temps (1969) sur certaines lignes à double voie, le câble transversal est supprimé et remplacé par deux antibalançants dont leur chaise est attachée à un poinçon (pièce en forme de Y) lui-même fixé au milieu de la traverse. La souplesse de la suspension est améliorée de ce fait. (fig. 5.17)

Le désaxement admis sur notre réseau est de 20 cm; il peut être réalisé comme présenté à la fig. 5.18 soit -20, -10, 0, +10, +20, +10, 0, -10, -20 et ainsi de suite.

Par suite de l'inclinaison des pendules au droit des antibalançants le désaxement exact des fils de contact est légèrement inférieur, soit 18 cm au sommet des zig-zag.

b) En courbe, le désaxement sera déterminé par la distance des poteaux (paragraphe 5.3). La fig. 5.12 donne une idée du désaxement réalisé de cette façon en courbe. Les valeurs $+x$, 0, $-x$, 0, $+x$ sont obtenues ainsi successivement pour une même portée. A remarquer que dans ce cas x n'atteint pas la valeur de 20 cm, les oscillations latérales du pantographe étant toujours plus marquées en courbe qu'en ligne droite.

En courbe, le déplacement du porteur auxiliaire par rapport aux fils de contact serait trop important et on les tient en place au moyen de bretelles articulées (fig. 5.15).

Suivant que le montage est employé à l'intérieur ou l'extérieur des courbes, on parlera d'un antibalançant à compression ou à traction (fig. 5.19 et 5.20 cas de poteaux à consoles).

Dans le cas d'un portique où le câble transversal fixe le porteur auxiliaire, les biellettes sont montées sur une articulation laquelle est fixée au câble transversal par deux cavaliers (fig. 5.21).

Quand le câble transversal n'existe pas, on utilise des antibalançants et des biellettes articulées. Leur chaise est attachée à deux consoles spéciales fixées à la traverse du portique.

6.01 Equipement tendeur.

Une élévation de la température entraîne un allongement du fil de contact ce qui pourrait être nuisible pour une bonne captation de courant, la flèche devenant trop importante.

Par contre, un abaissement de la température provoquerait une contraction donnant lieu à une augmentation dangereuse de la tension mécanique.

Afin de rendre la tension du fil de contact indépendante de la température, on utilise des appareils tendeurs.

D'autre part, les fils de contact sont livrés en tourets de 1500 m environ. Il y a intérêt à éviter les pinces de jonction qui constituent des points durs dans la ligne.

On placera généralement un tendeur à chaque extrémité, le milieu du fil de contact étant ancré au câble porteur.

De cette façon, nous aurons pour une différence de température de -20 à 40°C et un coefficient de dilatation de $0,017$ mm par m et $^{\circ}\text{C}$:

$$0,000\ 017 \times 1500 \text{ m} \times 60 = \underline{1,53 \text{ m.}}$$

A chaque extrémité, le fil de contact se déplacera donc d'environ $0,8$ m entre ses positions extrêmes.

Les tendeurs automatiques en usage sur notre réseau sont des tendeurs à contre-poids.

Tendeurs à contre-poids.

La fig. 6.01 représente un appareil tendeur à contre-poids tel qu'il est généralisé sur notre réseau. A chaque extrémité, les fils de contact sont isolés et fixés à des câbles souples en acier qui s'enroulent sur deux petits tambours de rayon r .

Ces tambours sont calés sur un axe qui porte une poulie de rayon R .

Sur celle-ci est fixé un câble en acier supportant un contre-poids (disques en fonte) d'une masse de 400 kg. Alors le poids comporte: $400 \times 9,81 \approx 400 \times 10 = 4.000$ N ou 400 daN.

Le rayon R étant 5 fois plus grand que r , la tension par fil de contact est donc de 1000 daN.

Comme nous avons vu que l'extrémité du fil de contact peut se déplacer d'environ 0,8 m, la course prévue pour les contre-poids le long du poteau est de 4 m.

Le chevauchement des deux secteurs de fils de contact doit se faire sur une longueur de 4 ou 6 portées (fig.6.02).

Dans la zone commune, le câble porteur est surchargé de deux fils de contact avec leurs pendules.

Les câbles porteurs principal et auxiliaire ne sont pas interrompus. Les extrémités de ces câbles sont reliées par des pinces.

6.02 Sectionnement.

Nous avons vu que pour des raisons d'exploitation, les lignes caténares sont divisées en tronçons qui peuvent être mis hors tension indépendamment les uns des autres.

Ces interruptions entre deux tronçons ou deux secteurs consécutifs appelés sectionnements doivent aussi permettre l'entretien et la réparation.

Le pantographe devra de toute façon être guidé à l'endroit du sectionnement.

En pleine voie, on utilise pour les grandes vitesses un sectionnement à lames d'air tandis que dans les gares et pour les tronçons parcourus à faible vitesse, on intercale un isolateur de section dans la ligne.

a) Sectionnement à lames d'air.

Un sectionnement à lames d'air coïncide toujours avec un équipement de tendeur.

Mais tandis que les équipements tendeurs sont placés tous les 1500 m environ, les sectionnements à lames d'air ne se trouveront généralement que tous les 15 à 20 km en voie principale (près des sous-stations et des postes de sectionnement).

Les fils de contact dans la zone commune se trouvent au même niveau et sont écartés à une distance de 40 cm. afin d'assurer l'isolement des secteurs (fig.6.03).

Dans cette zone commune, le pantographe passe progressivement d'un secteur à l'autre sans interruption dans la captation de courant.

Les porteurs (principal et auxiliaire) sont également interrompus et reliés par l'intermédiaire d'isolateurs à un câble d'acier ancré à un poteau d'ancrage.

Le relèvement et la déviation des conducteurs sont réalisés de telle façon qu'aux endroits des croisements des fils, un espace suffisant est laissé pour éviter tout contact (dilatation, vent, etc...).

Les sectionnements à lames d'air entraînent toujours des dépenses importantes; par contre, ils présentent le grand avantage de pouvoir être franchis sans ralentissement et sans production d'arcs.

6) Isolateur de section type "B".

Pour pallier les inconvénients des isolateurs de section type Schabelitz, la SNCB a mis au point un isolateur de section appelé type "B". Cet appareil est représenté à la fig.6.05. Il se compose d'un bâton en matière isolante spéciale b et d'un patin isolant p lequel est intercalé dans le fil de contact au moyen d'éclisses "e".

L'ensemble est suspendu au câble porteur principal par l'intermédiaire d'un isolateur en porcelaine I à une extrémité et d'un pendule ordinaire à l'autre extrémité du bâton isolant.

Le montage de cet isolateur de section dans une caténaire simple à double fil de contact nécessite deux appareils (fig.6.06).

De cette façon, les points durs peuvent être évités puisque le patin isolant est légèrement soulevé et que le pantographe frotte principalement sur l'autre fil de contact; ces isolateurs peuvent donc être franchis à grande vitesse, sans formation d'arcs.

6.03 Sectionneurs et interrupteurs.

Rappelons que les lignes caténares sont divisées en secteurs, alimentés et protégés par un ou plusieurs disjoncteurs.

La mise en parallèle des différents secteurs contigus se fait soit aux sous-stations soit aux postes de sectionnement au moyen de disjoncteurs U L.

Ces disjoncteurs sont normalement fermés et ne déclenchent qu'en cas de court-circuit.

Chaque secteur est divisé en sections élémentaires appelées tronçons et limités comme les secteurs par des sectionnements à lames d'air en voie principale et par des isolateurs de section dans les gares et dans les voies secondaires.

A l'intérieur de chaque secteur, la continuité électrique entre tronçons est assurée par des sectionneurs ou par des interrupteurs normalement fermés et montés sur poteaux.

L'ouverture de ces sectionneurs ou interrupteurs se fera exceptionnellement soit pour localiser rapidement un défaut, soit pour assurer l'entretien de certains tronçons.

Remarquons ici qu'il y a lieu de ne pas perdre de vue que le passage du pantographe sur un sectionnement porte celui-ci et que si l'interrupteur est ouvert on remet sous tension la section isolée.

Nous retrouvons également des sectionneurs et des interrupteurs dans les feeders qui permettent d'isoler entièrement d'une façon visible un poste de sectionnement ou d'alimentation.

A titre d'exemple, la fig. 6.07 représente :

- T1, T2, T3, T4 interrupteurs des feeders du poste de sectionnement;
- T5, T6 interrupteur de shuntage des sectionnements de la ligne principale;
- S1, S2, S3 sectionneurs des isolateurs de section placés dans la gare.

Nous appelons sectionneur, un appareil ne pouvant être ouvert en charge tandis que le nom d'interrupteur est donné à l'appareil permettant l'ouverture sous débit de courant.

A. Sectionneurs.

Un sectionneur (fig. 6.08) est un appareil très simple ayant la forme d'un couteau serré entre deux gâches. Il est supporté par 3 isolateurs, un cadre et est monté au sommet d'un poteau caténaire.

Le sectionneur est commandé manuellement par un levier de commande installé au bas du poteau à une hauteur de 1,5 m du sol.

Le levier est relié mécaniquement à l'isolateur du couteau par une tringle de commande.

Le sectionneur de coupure hors charge ne doit jamais être ouvert sous débit de courant, c.-à-d. lorsque le courant circule à travers le couteau.

L'inobservance de cette précaution élémentaire peut provoquer des avaries importantes au sectionneur ainsi que des brûlures et blessures à l'agent qui le manoeuvre.

Les leviers des sectionneurs doivent toujours être cadenassés (en position ouverte ou fermée). La manoeuvre se fait toujours avec des gants en caoutchouc et avec l'ordre par télégramme numéroté du Répartiteur ES.

B. Interrupteurs.

Tout comme le sectionneur, l'interrupteur de coupure en charge est placé au sommet d'un poteau caténaire (fig.6.09).

Il se compose en principe d'un couteau principal (a) et d'un couteau auxiliaire (b) placés sur des isolateurs. La commande s'effectue au moyen d'un moteur électrique placé dans un petit coffret en bas du poteau ou éventuellement au moyen d'une manivelle.

Ces interrupteurs sont généralement commandés à distance par le Répartiteur ES ou à partir d'un poste de bloc.



7e leçon.

7.01. Circuits de retour.

A. But.

Le courant électrique fourni par les sous-stations passe via les fils caténaïres aux moteurs de traction et retourne aux sous-stations par les rails (fig. 7.01).

Les lignes caténaïres des voies principales sont isolées l'une de l'autre au point de vue électrique tandis que les rails sont connectés en parallèle d'une façon permanente et ceci sur toute la longueur de la ligne.

Il en résulte que, lors de la mise hors service d'un secteur de caténaire (circulation à voie unique par exemple), le courant continue à circuler dans les rails de toutes les voies.

La résistance du circuit de retour par les rails doit être la plus faible possible (de l'ordre de 0,01 d'ohm par km pour une ligne à double voie) et ce, pour les raisons suivantes :

- 1° Economie : Réduction des pertes par effets Joule.
- 2° Sécurité : Tension minimum entre terre et rail.
- 3° Réduction des courants "vagabonds".

Les courants "vagabonds" sont des courants qui s'échappent des rails et vont regagner la sous-station par d'autres chemins (fig. 7.02). Ces courants "vagabonds" présentent l'inconvénient suivant : ils suivent les canalisations métalliques d'eau et de gaz, les enveloppes des câbles, etc... constituant de bons conducteurs et les abandonnent à certains endroits pour retrouver le rail ou la plaque de terre de la sous-station.

A l'endroit où les courants s'échappent des conducteurs métalliques, il se produit une électrolyse du métal constituant une corrosion.

Les courants vagabonds peuvent se produire sous forme de courants superficiels autour des traverses.

Pour réduire ces dérivations, la voie doit être bien isolée par rapport à la terre au moyen de traverses en bois et un ballast en gravier (on arrive à réaliser des isollements de 1 à 5 ohms par km).

B. Connexions.

Toute interruption du circuit de retour aurait pour effet de couper le courant et de mettre sous haute tension les rails sur lesquels se trouverait un train.

1° Connexions longitudinales.

Pour constituer au moyen des rails un conducteur de résistance minimum, on shunte les éclisses lesquelles ne présentent pas de contact suffisant, par des connexions en cuivre nu de 50 mm² de section.

2° Connexions inductives.

Les rails isolés qui servent pour la signalisation ne peuvent évidemment pas servir au retour du courant. Des connexions sont établies de part et d'autre du rail isolé comme le montre la fig. 703.

Lorsqu'il s'agit de circuits de voie constitués par deux files de rails d'une certaine longueur et qui forment deux conducteurs isolés entre eux, pourvus à leur extrémité d'éclisses isolantes, on utilise des connexions inductives. Ce sont des bobines de self (fig. 704) avec noyau en acier qui présentent une très faible résistance ohmique au passage du courant de traction continu et une très grande impédance pour le courant alternatif de signalisation.

7.02. Répartiteur E.S.

La distribution caténaire d'une ou de plusieurs lignes est placée sous la direction d'un répartiteur ES.

Cet agent doit connaître à tout moment la situation exacte de l'ensemble de la distribution caténaire.

A cette fin, il doit être informé sur le champ, au besoin par téléphone SOS placé le long des voies, de tout accident ou incident en rapport avec les lignes caténaires.

Il est seul qualifié pour ordonner une manoeuvre d'appareils de distribution caténaire comme par exemple l'ouverture ou la fermeture d'un sectionneur.

Il est également le seul qualifié pour autoriser une mise à la terre du fil de contact au moyen de la perche spéciale afin que des travaux y soient effectués (par exemple pour dégager un pantographe avarié).

Tout ordre donné téléphoniquement par le répartiteur ES fait l'objet d'un télégramme numéroté.

Cours 124.20

7e leçon.

Le personnel qui a reçu l'ordre doit en confirmer l'exécution par télégramme numéroté également.

Une stricte discipline est nécessaire afin de prévenir des accidents qui seraient toujours très graves en conséquence (électrocution).

7.03. Couvertures.

Quand un secteur ou tronçon est mis hors tension pour avarie, ou travaux à la caténaire, l'accès des trains électriques doit y être interdit et ce pour deux raisons :

- 1° le train qui passerait sous le sectionnement délimitant une partie de la ligne caténaire mise hors tension, cette partie étant remise intempestivement sous tension par le frotteur du pantographe, provoquerait des déclenchements et même des accidents.
- 2° les trains qui seraient ainsi passés dans la zone sans tension y resteraient en détresse.

Afin d'interdire sans tarder l'accès des trains sur le secteur mis hors tension, le répartiteur ES fait appliquer des mesures qui consistent à mettre à l'arrêt les signaux fixes et au besoin à placer des signaux mobiles rouges.

C'est pour cette raison qu'un conducteur, qui ne pourrait arrêter à temps devant un signal rouge, doit abaisser ses pantographes d'urgence.

7.04. Mise à la terre de la ligne caténaire.

Tout contact avec une pièce sous tension, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un objet ou d'un jet d'eau, peut avoir des conséquences mortelles.

Le personnel peut être appelé, au cours de l'exploitation, à effectuer des travaux à proximité de la ligne caténaire par exemple, pour porter secours à un électrocuté, ou pour travailler sur le toit d'un véhicule ou en cas d'incendie.

Les lignes caténaires doivent être en tout temps considérées comme étant sous tension, sauf affirmation contraire du répartiteur ES, par télégramme numéroté.

On ne pourra cependant toucher les fils caténaires qu'après avoir réalisé une connexion visible entre fil de contact et rail. C'est ce qu'on appelle une "mise à la terre" de la caténaire.

Cette mesure est indispensable pour éviter qu'un malentendu ou une erreur dans l'échange des télégrammes ou même une remise sous tension accidentelle ne provoquent une électrocution.

Une discipline rigoureuse doit être observée par tout le personnel appelé à travailler aux lignes caténaïres ou à proximité de celles-ci.

Avant de s'engager dans une position dangereuse par rapport aux fils sous tension, il faut demander au réparateur ES la mise hors tension du secteur en question en précisant l'endroit exact et la raison.

Ce n'est qu'après avoir reçu la confirmation de la coupure du courant par télégramme numéroté que l'on peut procéder à la mise à la terre de la caténaire :

Une perche de mise à la terre est représentée à la fig. 7.05 Elle se compose d'une perche creuse en matière isolante comprenant à une extrémité un crochet destiné à être accroché aux fils de contact. Un câble isolé relie ce crochet au rail au moyen de deux griffes appropriées, fixées par vis à pression.

Il est absolument nécessaire de fixer en premier lieu ces griffes sur les rails préalablement nettoyés.

En agissant de la sorte, la mise à la terre accidentelle d'une caténaire sous tension ne pourra avoir de conséquences mortelles tandis qu'en inversant les opérations les griffes se trouveraient sous haute tension.

A remarquer qu'une griffe doit être fixée sur chacun des rails afin d'être sûr de ne pas brancher sur un rail isolé.

7.05. Signaux propres à la traction électrique.

En dehors des différentes plaques indiquant au public et au personnel le danger de mort, la HT ou les 3000 V aux endroits particulièrement dangereux, il est fait usage pour l'exploitation des lignes caténaïres de certains signaux propres à la traction électrique, se référer au Livret HLT, Fasc. 2, Chap. XIII.

7.06. Respect des signaux d'abaissement des pantographes.

L'abaissement des pantographes à certains endroits peut être imposé pour une des raisons suivantes :

- Sectionnement à lames d'air en face d'un poste de sectionnement : comme il peut y avoir dans certains cas une grande différence de tension entre les deux tronçons

considérés, un très fort courant passerait à travers les charbons du pantographe au risque de détériorer celui-ci ainsi que les fils de contacts.

- tronçon temporairement hors service et à la terre : le passage du pantographe sur l'isolateur de section provoquerait un déclenchement des feeders.
- caténaire avariée : le pantographe risque d'accrocher les fils de contact, les étriers ou les pendules provoquant l'arrachement de la caténaire et l'arrachement de la raquette du pantographe.

Comme on le voit, la non-observance de ces signaux peut occasionner de graves avaries.

8e leçon.

QUESTIONNAIRE.

- 5.05 Quel est le rôle de l'appareil antibalançant ?
- 6.02 Quels sont les moyens utilisés pour diviser les lignes caténaïres en tronçons ou secteurs ?
- 6.03 Quelle différence y a-t-il entre un sectionneur S et un interrupteur T (au point de vue manoeuvre) ?
- 7.02 Quel est le rôle du "Répartiteur ES" ?
- 7.03 Pourquoi faut-il abaisser les pantographes quand un signal retombe intempestivement à l'arrêt ?
- 7.04 Avant de s'engager dans une position dangereuse par rapport aux lignes caténaïres, quelles sont les mesures de sécurité à prendre ?
- 7.04 Comment procède-t-on pour effectuer la mise à la terre d'une caténaire ?

MEMORANDUM

- 1. The first item is the report of the...
- 2. The second item is the report of the...
- 3. The third item is the report of the...
- 4. The fourth item is the report of the...
- 5. The fifth item is the report of the...
- 6. The sixth item is the report of the...
- 7. The seventh item is the report of the...
- 8. The eighth item is the report of the...

Type d'automotrice électrique.

9.01. Intérêt de la traction par automotrice.

Une automotrice est composée d'une ou plusieurs voitures pourvues d'un équipement de traction. La partie mécanique de l'engin de traction se confond avec la partie mécanique de l'engin de transport; il en résulte un allègement considérable des trains, à nombre de places égales, particulièrement pour les trains de quelques voitures.

Les voitures des automotrices comportent chacune deux bogies, on aura donc $2n$ bogies pour n voitures.

Quatre moteurs équipent les automotrices doubles à raison de 1 moteur par bogie. (bogie mixte formé d'un essieu moteur et d'un essieu porteur).

Huit moteurs équipent les automotrices quadruples. Les bogies des voitures 1 et 4 sont des bogies porteurs.

L'automotrice étant réversible (une cabine de conduite à chaque extrémité) constitue un moyen économique d'exploiter les lignes de faible longueur et à gros trafic (Exemple Malines - Braine-l'Alleud).

La réversibilité permet d'augmenter la capacité des gares et le coefficient d'utilisation du matériel. De plus la sécurité et la régularité que procurent les services d'automotrices sont excellentes. Cet avantage est particulièrement apprécié de la clientèle.

9.02. Accouplement d'automotrices.

A certain moment de la journée il faut accoupler des unités entre elles de manière à augmenter momentanément la

capacité de la rame; chaque automotrice travaillant à sa puissance normale, comme si elle était seule, l'accélération reste constante.

Des dispositifs, dits de "train-contrôle", permettent de faire conduire un train, composé de plusieurs unités accouplées, par un seul agent.

Celui-ci manipule un contrôleur qui met sous tension des fils basse tension établis le long de toutes les voitures; ces fils agissent à leur tour sur les appareils de démarrage, compresseur, chauffage etc...

Des coupleurs à fiches doivent être disposés entre les voitures adjacentes d'unités accouplées de manière à assurer la continuité des circuits. Dans certains pays (Hollande, par exemple), on a fait emploi de "l'accouplement intégral" qui réalise d'un seul coup l'accouplement mécanique de 2 unités et la liaison des circuits électriques et des conduites pneumatiques du frein.

L'expérience montre toutefois que ces appareils compliqués sont sujets à des irrégularités, en particulier, en cas de chute importante de neige.

A la S.N.C.B., les automotrices sont équipées d'un attelage automatique (du type Atlas-Henricot) qui réalise l'accouplement mécanique. (sauf sur les automotrices B.N.L.).

L'accouplement des circuits pneumatiques se fait manuellement comme pour des voitures ordinaires. L'accouplement des circuits électriques se fait également manuellement par l'intermédiaire de coupleurs.

9.03. Intérêt de la traction par locomotive.

La locomotive s'impose évidemment pour la remorque des trains de marchandises et trains internationaux.

Pour les trains de voyageurs, 2 possibilités existent:

- soit les assurer par automotrices;
- soit par locomotives remorquant des voitures.

La locomotive s'impose dès qu'il s'agit de trains lourds; toutefois dès qu'une ligne est électrifiée, la fréquence des trains augmente considérablement et, de ce fait, les trains lourds sont peu nombreux, à part toutefois les trains internationaux.

Eu égard aux avantages reconnus de la traction par automotrice, celle-ci devrait donc assurer la totalité des trains de voyageurs.

Cependant, comme c'est le trafic de pointe qui détermine l'effectif de matériel, on serait amené à acquérir un

nombre considérable d'automotrices dont quelques-unes ne serviraient qu'à assurer le trafic de pointe; elles ne rouleraient donc que pendant les quelques heures que durent les pointes et seraient mal utilisées.

Pour ces raisons, on a intérêt :

- à acquérir un nombre limité d'automotrices qui assureront le trafic moyen de la journée et qui roulent donc en moyenne de 6 h à 22 h.
- à acquérir des locomotives mixtes, c.-à-d. des locomotives qui peuvent assurer indifféremment des trains de marchandises lourds ou légers et des trains de voyageurs omnibus - semi-directs - directs et express qui seront utilisées aux heures de pointe à la remorque des trains de voyageurs.

Choix du type de locomotive.

La plupart des efforts qui agissent sur la voie sont directement fonction des masses en mouvement et par conséquent des charges par essieu. Les efforts latéraux sont particulièrement néfastes parce qu'ils sont les plus aptes à déformer et à faire riper la voie; de plus leurs valeurs risquent toujours de s'accroître dangereusement lorsque les vitesses maxima s'élèvent.

Il apparaît alors logique, pour ne pas accroître la fatigue des voies, de réduire de plus en plus la charge par essieu au fur et à mesure que la vitesse maximum est augmentée.

Le désir de faire une machine légère et économique conduit à supprimer le poids mort nécessaire à la charge des essieux directeurs et à faire par conséquent une locomotive à adhérence totale.

L'adhérence totale présente un intérêt considérable car on n'a jamais trop d'adhérence sous une locomotive pour éviter les patinages dans les circonstances défavorables.

C'est très souvent l'insuffisance d'adhérence qui limite les possibilités de trafic d'une locomotive électrique.

On peut dire que la locomotive articulée (chaque essieu attaqué par un moteur) et à adhérence totale a maintenant imposé sa supériorité tant au point de vue économique qu'au point de vue de ses possibilités dans la zone des grandes vitesses.

Les locomotives actuelles de la S.N.C.B. sont du type BB ou du type CC .

9.04. Résistance de frottement.

Considérons un corps pesant de poids P placé sur une surface S (fig. 9.01).

Si nous imprimons au corps P un mouvement par rapport à S , il naît une résistance qui s'oppose au mouvement; cette résistance s'appelle le frottement.

La force F à appliquer à ce corps pour le déplacer mesure cette résistance de frottement. Elle vaut $F = f.P$. dans laquelle f est un nombre appelé "Coefficient de frottement" et dépendant essentiellement de la nature des surfaces en contact.

Il y a 2 sortes de frottements.

- 1) Le frottement de glissement ainsi nommé lorsque la même partie de la surface de l'un des corps reste toujours en contact.

Exemple : le bloc de frein sur le bandage de la roue;
la fusée d'essieu sur le coussinet de la boîte d'essieu s'il s'agit d'une boîte à huile.

- 2) Le frottement de roulement.

Ce n'est pas un frottement à proprement parler et on le désigne généralement sous le nom de résistance au roulement.

Cette résistance se manifeste lorsque la surface de contact de chacun des corps en présence varie à chaque instant.

Exemples : le bandage de la roue sur le rail;
la fusée d'essieu dans la boîte d'essieu s'il s'agit d'une boîte à roulement à billes.

9.05. Résistance propre d'un véhicule.

Pour déplacer un véhicule sur une voie en alignement et en palier, il faut exercer un certain effort.

Ce véhicule comporte donc de par lui-même une résistance propre à l'avancement.

Celle-ci résulte de :

- a) la résistance due au frottement de roulement des roues sur les rails;
- b) la résistance due au frottement des fusées dans leurs boîtes d'essieux. Ce frottement sera de roulement ou de glissement suivant le type de boîte;

c) la résistance de l'air.

Lors de son mouvement, le véhicule doit se tracer un chemin dans l'air qui tend à s'y opposer.

Cette résistance dépend essentiellement :

- de la section transversale du véhicule;
- de la forme du véhicule, c.-à-d. de son aptitude à "glisser" dans l'air (forme aérodynamique);
- de la vitesse du véhicule.

La résistance de l'air est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle au carré de la vitesse (V^2).

Aux vitesses élevées, ce terme V^2 est prépondérant et surpasse de loin les autres termes. Le matériel rapide devra donc être caréné.

d) la résistance due aux chocs de la voie.

La résistance R peut être donnée soit :

- sous forme de résistance totale du véhicule; elle est alors exprimée en N mais habituellement en daN .
- sous forme de résistance spécifique du véhicule : elle est alors exprimée en newton par kN de poids du véhicule.

En multipliant la résistance spécifique en N/kN par le poids en kN du véhicule, on obtient la résistance totale en newtons.

Les fig. 9.02 et 9.03 donnent respectivement la résistance totale d'une automotrice et la résistance spécifique d'une locomotive en fonction de la vitesse.

9.06. Effort moteur d'un véhicule.

Tout véhicule pourvu d'un moteur : locomotive, auto-rail, automotrice peut exercer un effort moteur. Cet effort moteur est variable avec la vitesse : la courbe donnant l'effort moteur en fonction de la vitesse est ce qu'on appelle la courbe caractéristique du véhicule.

Effectivement, comme son nom l'indique, cette courbe caractérise bien les possibilités du véhicule moteur.

En outre, l'allure de la courbe caractéristique caractérise un mode de traction : l'allure de la courbe est différente en tractions vapeur, Diesel et électrique.

La fig. 9.04 représente les courbes caractéristiques de 2 locomotives BB d'une masse totale sensiblement identique (+ 80 tonnes) : la locomotive Diesel-électrique type 59 et la locomotive électrique type 22.

6.

9.07. Vitesse - Accélération.

Vitesse.

Si un véhicule parcourt d'un mouvement uniforme (c.-à-d. à vitesse constante) une distance L (50 km par exemple) en un temps t (1/2 heure par exemple), on dit qu'il possède une vitesse

$$v = \frac{L}{t} = \frac{50}{0,5} = 100 \text{ km/h} = \frac{100 \times 1\,000}{3\,600} = \frac{100}{3,6} = 27,7 \text{ m/s}$$

La vitesse est donc l'espace parcouru par unité de temps. Elle s'exprime en m/s ou en km/h.

Si le mouvement n'est pas uniforme c.-à-d. si la vitesse ne reste pas constante, ce qui est généralement le cas, on peut définir la vitesse à un moment donné, la vitesse instantanée comme on l'appelle, en faisant le rapport de l'espace (parcouru pendant un temps très petit compté à partir de l'instant considéré) et ce temps très petit.

On définit alors également la vitesse moyenne qui est la vitesse qu'aurait le véhicule s'il parcourait la même distance dans le même temps mais à vitesse constante.

Par exemple, si un véhicule prend le départ à 10,00 h et qu'il a parcouru 60 km à 11,00 h, il a roulé à une vitesse moyenne de

$$V. \text{ moy.} = \frac{60}{1} = 60 \text{ km/h.}$$

Si de 11,00 h à 11,01 h, il a parcouru 2 000 m, il roulait alors à une vitesse instantanée de :

$$\begin{aligned} V \text{ instantanée} &= \frac{2000}{1} = 2000 \text{ m/minute} \\ &= \frac{2000 \times 60}{10^3 \times 1} = 120 \text{ km/h.} \end{aligned}$$

Accélération.

Supposons à un instant donné t₁ (10,00 h par exemple) un véhicule animé d'une vitesse instantanée V₁ (60 km/h par exemple); si un instant plus tard t₂ (10,05 h par exemple) le véhicule est animé d'une vitesse instantanée V₂ (70,8 km/h par exemple), l'accroissement de vitesse par unité de temps aura été de

$$\begin{aligned} j &= \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} = \frac{70,8 - 60}{10,05 \text{ h} - 10,00 \text{ h}} = \frac{10,8 \text{ km/h}}{5 \text{ min.}} \\ &= \frac{10,8 \times 1000}{5 \times 60} = 0,01 \text{ m/s} / \text{s} = 0,01 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

C'est ce qu'on appelle l'accélération j.

Cette accélération peut être positive, négative, ou nulle. Elle s'exprime généralement en m/s².

A tout instant un véhicule en mouvement possède une accélération qu'on appelle "accélération instantanée" : c'est le rapport de la variation de vitesse pendant un espace de temps très court, compté à partir de l'instant considéré, à cet espace de temps.

10ème leçon

10.01 Mouvement uniforme.

Un mouvement est dit uniforme lorsqu'il s'effectue à vitesse constante.

$$\text{Cela étant } V = \frac{L}{t} = \text{constante} = V_0$$

$$\text{donc } L = V_0 \times t$$

L'espace parcouru est dès lors proportionnel au temps mis à le parcourir.

D'autre part, l'accélération est nulle,

$$\text{Vu que } V_1 = V_2 = V$$

$$\text{donc } j = \frac{V - V}{t_2 - t_1} = 0$$

Exercice numérique.

Un véhicule roule pendant 1 h à la vitesse constante de 100 km/h.

Quel est l'espace parcouru pendant ce temps et l'accélération à un instant donné ?

$$\text{On a } V = \frac{L}{t}$$

$$\text{d'où } 100 \text{ km/h} = \frac{L}{1 \text{ h}}$$

$$\text{d'où } L = 100 \text{ km/h} \times 1 \text{ h} = 100 \text{ km.}$$

$$j = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} = \frac{100 - 100}{1} = 0$$

10.02 Mouvement uniformément accéléré.

Un mouvement est dit uniformément accéléré lorsqu'il s'effectue à une accélération constante.

L'appellation "uniformément accéléré" est réservée au cas où l'accélération est positive.

Au cas où l'accélération est négative, on donne plutôt l'appellation "uniformément décéléré".

Dans le cas où l'accélération est constante, on peut écrire :

$$j = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} = \text{constante} = J_0$$

où, en supposant que l'on parte de l'instant $t_1 = 0$ avec une vitesse $V_1 = 0$:

$$J_0 = \frac{V_2 - 0}{t_2 - 0} = \frac{V}{t} \quad \text{d'où } V = J_0 \times t$$

Donc dans un mouvement uniformément accéléré, la vitesse varie proportionnellement au temps.

On pourrait montrer que l'espace parcouru L vaut alors

$$L = J_0 \frac{t^2}{2}$$

Exemple numérique.

Un véhicule roule avec une accélération constante de $0,60 \text{ m/s}^2$ depuis la vitesse 0 jusqu'à la vitesse 50 km/h .

Déterminer le temps nécessaire pour atteindre la vitesse de 50 km/h depuis la vitesse 0 et l'espace parcouru pendant ce temps.

Le mouvement s'effectuant à l'accélération constante $J_0 = 0,60 \text{ m/s}^2$ est uniformément accéléré.

La vitesse est donnée par $V = J_0 \cdot t$.

J_0 étant exprimé en m/s^2 , nous devons exprimer V dans les mêmes unités c.à.d. $V = 50 \text{ km/h} = \frac{50.000}{3.600} = \pm 13,9 \text{ m/s}$

$$\text{d'où } t = \frac{V}{J_0} = \frac{13,9}{0,6} = 23,16 \text{ s}$$

L'espace parcouru est donné par $L = J_0 \frac{t^2}{2}$

$$\text{d'où } L = 0,6 \times \frac{23,16^2}{2} = 160 \text{ m.}$$

10.03 Influence des rampes.

Supposons (fig. 10.01) un véhicule pesant $P \text{ kN}$ arrêté sur une rampe de $i \text{ mm}$ par m .

Le poids P est dirigé suivant la verticale et peut être décomposé en deux forces N et H :

- N est perpendiculaire à la rampe
- H est parallèle à la voie.

Pour le cas d'une rampe, cette force constitue une résistance à l'avancement, tandis que, si le véhicule descend une pente, cette force devient motrice.

Quelle est la valeur de cette force H ?

Le triangle O A B et celui formé par les forces F, N et H sont semblables et l'on peut écrire :

$$\frac{P}{OA} = \frac{H}{AB}$$

ou encore $\frac{P}{1000 \text{ mm}} = \frac{H}{1 \text{ mm}}$ ou encore $H = \frac{P \times i}{1000}$

Si P est exprimé en kN, H sera également exprimé en kilonewton.

Si l'on veut trouver H en kg il faut multiplier par 1000

$$H = \frac{1000 \times P \times i}{1000} = P \times i$$

Pour P = 1 kN et i = 1 mm par m on trouve

$$H = 1 \times 1 = 1 \text{ kg.}$$

donc une charge d'un poids de 1 kN placée sur une pente de 1 mm/m donne lieu à :

- une résistance supplémentaire de 1 N si l'on remonte la pente.
- un effort moteur supplémentaire de 1 N si on descend la pente.

Ex. numérique.

Déterminez la résistance due à la rampe d'un train ayant 1 000 tonnes de masse remorqué par une locomotive de 80 tonnes de masse lors de la montée d'une rampe de 10 mm/m?

On a:

Masse du train et de la locomotive = 1 000 t + 80 t = 1 080 t.

Valeur de la rampe i = 10 mm/m.

Poids du train = masse \times 9,81 = 1 080 000 \times 9,81 \approx
10 800 000 N = 10 800 kN

H = 10 800 \times 10 = 108 000 newtons = 10 800 daN

Il y a lieu de noter l'importance considérable des rampes dans la résistance totale à l'avancement d'un train.

En effet, alors qu'à 50 km/h par exemple, la résistance propre à l'avancement est de 2,5 à 4 N par kilonewton de poids, chaque mm/m de rampe y ajoute une résistance supplémentaire à l'avancement de 1 newton par kilonewton de poids.

4.

Ainsi sur une rampe de 10 mm/m la résistance à l'avancement due à la rampe est de 10 N par kN de poids alors qu'elle n'est que de 2,5 à 4 N par kN de poids pour la résistance propre.

En Belgique, les rampes les plus fortes se rencontrent sur la ligne Bruxelles - Namur - Arlon - Luxembourg où l'on a des rampes de 16 à 17 mm/m.

Les plans inclinés de Liège, c.à.d. le tronçon Liège - Guillemans - Montegnée de la ligne Liège-Bruxelles présente des rampes atteignant à certains endroits 33 mm/m.

10.04 Résistance due aux courbes.

Les courbes opposent au mouvement du véhicule une résistance qui varie en raison inverse de leur rayon.

Ce sont donc les courbes de plus faible rayon qui présentent les plus grandes résistances.

La résistance additionnelle due aux courbes exprimée en N/kN vaut $\frac{750}{R}$ où R est le rayon de la courbe exprimée en mètres.

Ainsi une courbe de 750m de rayon oppose à l'avancement une résistance supplémentaire de $\frac{750}{750} = 1$ newton par kilonewton.

Quoique non négligeable, la résistance due aux courbes est généralement très inférieure à la résistance propre et à celle due aux rampes eu égard aux rayons des courbes rencontrées sur les lignes axiales.

10.05 Accélération et vitesse d'équilibre ou de régime d'un train.

La mécanique enseigne que

$$F = m j$$

c.à.d. qu'un corps de masse m soumis à un certain nombre de forces dont la résultante vaut F, prend une accélération j.

Considérons le cas d'un véhicule moteur tirant un train.

L'ensemble des forces sollicitant le train comprend :

- l'effort moteur F donné par le véhicule moteur;
- la résistance totale R du véhicule moteur et du train; cette résistance R comprend la résistance propre et les résistances dues à la gravité et aux courbes.

Cela étant, la relation fondamentale de la mécanique s'écrit

$$F - R = m j$$

Cette relation permet de déduire à tout instant la valeur de l'accélération j .

En outre, nous avons vu :

- à l'article 9.05 que l'effort moteur F était fonction de la vitesse pour un véhicule moteur donné;
- à l'article 9.04 que la résistance propre à l'avancement était fonction de la vitesse.

Donc la résistance totale R dans laquelle intervient la résistance propre sera également fonction de la vitesse.

Cela étant, si on porte en graphique (fig. 10.02) :

- la valeur de l'effort moteur en fonction de la vitesse (F, V);
- la valeur de la résistance totale en fonction de la vitesse (R, V),

on constate que pour une certaine valeur V_1 de la vitesse les 2 courbes se coupent.

La vitesse V_1 est appelée la vitesse d'équilibre ou de régime du train.

En effet, puisque les 2 courbes se coupent pour la vitesse V_1 , on a à ce moment $F = R$.

D'après l'équation de la dynamique

$$m j = F - R = 0$$

donc $j = 0$

Or (art. 9.07), l'accélération j étant la variation de vitesse par unité de temps, si $j = 0$ cela veut donc dire que la vitesse ne varie pas, qu'elle est constante : d'où le nom de vitesse d'équilibre ou de régime.

6.

Ex. numérique.

Une véhicule moteur possède un effort moteur de 6 180 daN qui reste constant de 0 à 50 km/h.

La résistance propre de 2,2 N par kilonewton (2,2 N / kN) entre 0 et 50 km/h.

Le véhicule dont la masse est de 1 000 t, est supposé rouler en palier et en alignement.

Déterminer son accélération?

La résistance spécifique étant exprimée en N par kN de poids, nous devons d'abord déterminer le poids du véhicule moteur.

$$P = m \times g \text{ ou } P = 100\ 000 \times 9,81 = 981\ 000\ \text{N} = 981\ \text{kN}$$

$$\text{Résistance du véhicule} = 2,2 \times 9,81 = 2\ 158,2\ \text{N}$$

De la loi de Newton, nous pouvons donc déduire l'accélération.

$$a = \frac{F - r}{m} = \frac{61\ 800 - 2\ 158,2}{100\ 000} \hat{=} 0,6\ \text{m/s}^2$$

11ème leçon.

11.01 Adhérence.

A l'article 9.04 nous avons parlé du frottement de roulement ou de la résistance au roulement et nous avons évoqué l'exemple du bandage de la roue sur le rail.

Quand 2 corps solides sont en contact (la roue du véhicule et le rail), il se produit sous l'action de la force qui les appuie l'un contre l'autre, non seulement une déformation, mais encore une véritable pénétration : les aspérités de la surface d'un des corps s'arc-boutent sur celles des autres.

L'expérience montre que le contact d'une roue sur un rail peut servir d'appui pour la production d'un effort de traction aussi longtemps que l'effort moteur que nous désignerons par F ne dépasse pas une valeur limite $P \cdot f_v$ dans laquelle :

P = poids appliqué par la roue sur le rail;

f_v = coefficient de frottement ou "adhérence" roue-rail à la vitesse v .

A vitesse nulle, c.à.d. lors du démarrage, nous représenterons par f_0 le coefficient de frottement ou l'adhérence.

L'effort moteur F que peut développer un engin moteur est donc limité par l'adhérence.

Il faut que l'on ait à tout moment

$$F < P \times f_v$$

sinon on patine.

Ainsi une locomotive électrique BB d'une masse de 80 tonnes pourra, dans l'hypothèse où le coefficient d'adhérence est de 0,20, développer un effort maximum de

$$\text{Poids de la HL: } P = 80.000 \times 9,81 \approx 80.000 \times 10 =$$

$$800.000 \text{ N}$$

$$F < P \times f_v$$

$$\text{avec } F < 800.000 \times 0,20$$

$$\text{ou } F < 160.000 \text{ N ou } 16.000 \text{ daN}$$

Si les moteurs de la locomotive développaient à un moment donné un effort de 18000 daN, ce qu'ils permettent, les essieux de la locomotive patineraient.

L'application de la relation $F < P \cdot x f_v$ présente certaines difficultés.

En effet, si P est connu exactement (c'est le poids adhérent c.à.d. la somme des poids agissant sur les essieux moteurs) il n'en est pas de même de f_v .

11.02 Variation du coefficient d'adhérence.

Ce coefficient d'adhérence dépend essentiellement :

- 1) de l'état des surfaces en contact, influencées très fortement par les conditions atmosphériques;
- 2) de la vitesse.

$$\text{La formule empirique : } f_v = \frac{f_0}{1 + 0,01 v}$$

ou v est exprimé en km/h représente assez exactement la loi de variation du coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse.

On voit notamment qu'à 100 km/h l'adhérence a diminué de moitié.

A côté des 2 facteurs essentiels cités plus haut, l'adhérence dépend également d'une série de circonstances accessoires, telles que les suivantes :

- a) les inégalités de la voie pouvant provoquer une modification de la répartition de la charge sur les différents essieux;
- b) les causes ayant leur siège dans le véhicule moteur lui-même, comme la disposition des essieux, la répartition inégale du poids adhérent sur les essieux moteurs, le mode d'attaque des essieux moteurs, le couplage des moteurs, la finesse du réglage de la vitesse, l'adresse du conducteur, les imprévus;
- c) le démarrage ou la marche à faible vitesse dans les courbes sont très défavorables en ce qui concerne l'adhérence; lorsque la vitesse est inférieure à celle qui correspond au devers de la voie, le véhicule se déplace vers le centre de la courbe de sorte que, par suite de la conicité des bandages, le diamètre de roulement est plus grand pour la roue située à l'intérieur de la courbe que pour l'autre roue du même essieu qui, de plus, roule sur le rail le plus long; il s'ensuit obligatoirement un glissement des roues intérieures qui entraîne une augmentation de l'effort de traction pouvant atteindre 10 % et même davantage car ce glissement, à l'inverse de l'adhérence, se manifeste comme une résistance absorbant de l'énergie;

c'est pourquoi les conducteurs n'aiment pas démarrer sur les courbes.

Il est très difficile de déterminer le coefficient d'adhérence lorsque l'état de la voie est mauvais car les mesures accusent une dispersion extrêmement grande et les résultats sont donc incertains.

L'état de la voie est mauvais lorsque les rails sont souillés ou gras, lorsqu'il commence à pleuvoir, lorsqu'il gèle ou que les feuilles tombent. La valeur du coefficient d'adhérence peut alors diminuer de moitié et même davantage par rapport à l'état sec et propre.

Dans certains tunnels, il peut y avoir des chutes de gouttes d'eau sale qui encrassent les rails.

L'habileté du conducteur de locomotive joue un très grand rôle dans la lutte contre de telles difficultés.

L'adhérence devient extrêmement mauvaise lorsque la température descend au-dessous de zéro degré, par brouillard épais au sol et lorsqu'il se forme une mince couche de glace sur les rails.

De même, lors de la chute des feuilles, par temps humide, le coefficient d'adhérence peut tomber à des valeurs extrêmement faibles de l'ordre de grandeur de 0,05.

11.03

Moyens d'empêcher le patinage.

Le patinage est particulièrement sensible en traction électrique et Diesel électrique vu la commande individuelle des essieux. D'autre part, il est très dangereux pour les moteurs de traction comme nous le verrons plus loin.

Lors de l'introduction de la traction électrique, on a continué à utiliser, comme moyen d'empêcher ou de réduire le patinage des essieux moteurs, le sablage des rails qui était usuel avec les locomotives à vapeur. On a constaté dès le début que le sablage ne suffisait pas à vaincre de façon satisfaisante les difficultés causées par le patinage. Il faut reconnaître que le sablage est inefficace lorsque par exemple, les rails sont couverts de feuilles, de glace, de givre ou de neige fraîche. L'expérience a montré, en outre, qu'aux vitesses supérieures à 40 km/h, une partie du sable est simplement chassée par le courant d'air et ne reste pas sur le rail. Le sablage présente, en outre, des inconvénients : il encrasse les rails, ce qui constitue un danger pour le fonctionnement des aiguilles automatiques et augmente la résistance au démarrage parce que le sable qui reste

sur les rails accroît la résistance au roulement des roues des voitures remorquées.

De nombreuses idées ont été émises et de nombreuses solutions ont été proposées pour augmenter l'adhérence autrement que par le sablage et pour diminuer les risques de patinage. Nous les décrirons dans la suite du cours suivant leur application sur notre matériel roulant.

Disons cependant, tout de suite, qu'un moyen efficace d'éviter le patinage est de freiner légèrement au frein direct les roues motrices.

Il peut paraître paradoxal, au premier abord, de freiner au cours d'un démarrage ou lorsqu'il s'agit de franchir un passage où les conditions d'adhérence sont mauvaises.

Il faut remarquer toutefois qu'en freinant légèrement la roue, lorsque le patinage s'amorce la roue est quand même retenue par le frein ce qui, dans certains cas, bloque le patinage. En l'absence de freinage, tout patinage amorcé se poursuit jusqu'à intervention extérieure.

11.04 Utilisation de l'adhérence sur les automotrices et locomotives électriques.

Nous avons vu que pour éviter le patinage, il fallait que pour chaque essieu moteur nous ayons

$$F < P \times f_v \quad (1)$$

relation dans laquelle

F = effort moteur sur l'essieu moteur;
 P = charge sur l'essieu moteur;
 f_v = coefficient d'adhérence à la vitesse v

La relation (1) peut aussi s'écrire

$$\frac{F}{P} < f_v$$

Le coefficient d'adhérence f_v est éminemment variable comme nous l'avons vu précédemment.

On constate immédiatement l'importance de la répartition de la charge sur les essieux moteurs : plus P est grand, plus grand sera l'effort F transmissible.

A. Automotrices.

L'automotrice est conçue de façon que F soit fixé une fois pour toutes.

P est légèrement variable suivant la charge de l'automotrice (d'autant plus que la charge est grande vis-à-vis de la tare de l'automotrice).

Il faut que, dans tous les cas, on ait :

$$\frac{F}{P} < f_v$$

Etant donné que nous ne pouvons pas régler l'effort moteur F et que f_v est très variable, on conditionne cet effort de manière que

$$\frac{F}{P} < 0,16$$

P étant le poids correspondant à l'automotrice à vide.

Avec un coefficient aussi faible, on est à l'abri du patinage dans la plupart des cas.

La faible valeur du rapport $\frac{F}{P}$ dispense d'établir sur les automotrices des systèmes compliqués d'antipatinage ou de détection du patinage.

D'autre part, nous verrons plus loin que les moteurs de traction d'automotrices sont autoventilés, le ventilateur étant calé en bout d'arbre du moteur. Lors du patinage, la roue du ventilateur freine l'emballement du moteur (la puissance absorbée par ce ventilateur est proportionnelle au cube de la vitesse) et diminue par le fait même les risques de détérioration du moteur.

A titre d'exemple, sur une automotrice type 1950, on a

Effort moyen par moteur : 1750 daN

Effort maximum par moteur : 1950 daN

Charge par essieu moteur
(automotrice à vide) : 12.000 daN

Charge par essieu moteur
(automotrice à charge
complète) : 15.000 daN

D'où

$$\text{à vide} : \frac{F}{P} = \frac{1950}{12.000} = 0,162$$

$$\text{à charge complète} = \frac{F}{P} = \frac{1950}{15.000} = 0,13$$

B. Locomotives.

Le problème se pose différemment vu que l'effort moteur F peut être ajusté par le conducteur.

La charge sur l'essieu P est essentiellement constante; afin d'avoir une accélération maximum au démarrage, l'effort F est ajusté de manière que le rapport $\frac{F}{P}$ soit aussi voisin que possible de la limite d'adhérence f_v ; on utilise donc l'adhérence au maximum dans les locomotives. Ceci se justifie d'ailleurs vu les fortes charges que la locomotive peut être amenée à remorquer.

Par contre, l'utilisation maximum de l'adhérence nécessite sur les locomotives l'installation de dispositifs en vue de déceler ou d'éviter le patinage, dispositifs que nous décrirons plus loin. Les moteurs de locomotive ne sont pas autoventilés et le moteur n'est donc pas freiné par la roue du ventilateur lors de l'emballement, ce qui aggrave le danger.

A titre d'exemple, pour une locomotive de 80 tonnes à 4 essieux, tous moteurs, soit 20.000 kg par essieu, on considère que développer un effort total de 20 tonnes soit 5.000 kg par moteur représente la limite maximum, ce qui se traduit par un rapport $\frac{F}{P} = \frac{5.000}{20.000} = 0,25$

Ces valeurs ne sont atteintes dans nos régions qu'avec des conditions atmosphériques exceptionnelles.

QUESTIONNAIRE.

- 9.02 Quel est l'attelage utilisé pour l'accouplement des automotrices S.N.C.B. ?
- 9.03 Que signifie "locomotive à adhérence totale" ?
- 9.04 Qu'entend-on par frottement de glissement et frottement de roulement ?
- 9.05 En quelle unité s'exprime la résistance à l'avancement d'un véhicule ?
- 9.06 Qu'est-ce que la courbe caractéristique d'un véhicule moteur ?
- 9.07 Qu'est-ce que l'accélération ?
- 10.03 Quelle est la résistance à l'avancement supplémentaire due à la rampe d'un engin moteur d'une masse de 100 t sur une rampe de 10 mm par mètre ?
- 10.05 Qu'est-ce que la vitesse d'équilibre ou de régime d'un train ?
- 11.01 Quel est l'effort maximum que peut développer un engin moteur de 80 t de masse si le coefficient d'adhérence est de 0,2 ?
Qu'advient-il si l'effort dépasse le résultat trouvé ?
- 11.05 Pourquoi les automotrices ne sont-elles pas équipées du système de détection du pacinage ?

13ème leçon

13.01. Organes mécaniques du matériel roulant électrique.

Un train de roues se compose en principe d'un essieu en acier forgé et de deux roues (fig. 13.01). Les roues sont calées sur les essieux. Pour les essieux moteurs, un engrenage est calé sur le moyeu d'une roue ou sur le moyeu des deux roues.

Sur la face intérieure les roues sont pourvues d'un bourrelet. Celui-ci a pour objet d'empêcher le déraillement du train de roues. (fig. 1302).

Au moment du contact du bourrelet et du rail, il se produit en général à cet endroit une friction de glissement, différente de celle qui se produit dans la zone de contact surface de roulement/rail où ne se développent essentiellement que des frictions de roulement.

Si le bourrelet devait être en contact permanent avec le rail, il serait bientôt usé.

Pour y parer, la surface de roulement est légèrement conique; ainsi les trains de roues porteurs (libres) sont affectés d'un mouvement fluctuant autour d'une position d'équilibre. Plus la conicité est forte, plus courte est la période du mouvement, ce qui, par le truchement de différents mécanismes, donne lieu à une certaine instabilité. C'est pourquoi il convient de limiter la conicité et de la fixer comme un compromis entre la stabilité du mouvement et l'usure du bourrelet.

A. Essieux (fig. 1301)

Les essieux de locomotives sont en acier forgé (ou laminé).

Le corps d'essieux entier est travaillé. Les tolérances d'usinage de certaines zones sont strictes. Lorsqu'il s'agit d'essieux moteur, l'exigence s'attache essentiellement aux zones suivantes :

1. les fusées sur lesquelles sont calées les bagues intérieures des roulements ^{à rouleaux} (dans la plupart des cas, la fusée est rectifiée).
2. Les portées de calage qui reçoivent les centres de roues posés à la presse
3. pour les locomotives à suspension par le nez les paliers lisses.

En l'occurrence, la valeur absolue du diamètre a moins d'importance que l'absence de défauts de forme et une bonne structure de surface. De plus en plus, la surface dans ce cas est donnée.

Sur les automotrices appliquant le système cannonbox, on trouve des portées de calage pour roulement à rouleaux au lieu de paliers lisses.

Afin d'éviter autant que possible les bris dus à la fatigue, il y a lieu de soigner^{au} mieux les passages entre zones de diamètres différents. On a pu constater qu'une rugosité moindre se traduit par une plus longue durée de vie.

Pour les mêmes raisons, le matériau doit satisfaire à de sévères conditions de pureté (absence d'inclusions et de défauts en surface). Pour que l'examen aux ultra-sons prenne tout son sens, il faut que le grain soit suffisamment fin.

B. Roues. (fig. 1303)

Selon le type, on a utilisé des roues monobloc ou des roues à bandage. Seules les locomotives modernes sont équipées de roues monoblocs.

Lorsqu'une roue remplit sa tâche, elle est soumise à l'usure. La surface de roulement et le bourrelet sont les éléments qui subissent l'usure la plus rapide. L'usure n'a pas seulement pour effet de modifier les cotes caractéristiques, mais encore le profil peut s'éloigner de sa forme originale ce qui, pour un type de bogie donné, peut donner naissance à une certaine instabilité.

Les tours à roues servent à rectifier le profil de façon que les cotes caractéristique satisfassent de nouveau aux conditions. Cette opération va toujours de pair avec un enlèvement de matière et le diamètre du cercle de roulement s'en trouve réduit; toutefois le procédé ne peut se répéter qu'à concurrence du diamètre minimal.

Il existe deux possibilités : remplacer le bandage (à condition que la construction le permette) ou remplacer la roue entière (roue monobloc).

La solution la plus ancienne est la roue à bandage qui présente toujours de nombreux avantages mais n'est toutefois pas sans inconvénients :

1. le bandage calé sur la jante peut se décaler .

Une fois ce stade atteint, l'usure évolue à une allure telle qu'après quelques centaines de kilomètres seulement, il peut en résulter un déraillement. Pour éviter cette éventualité, on pose un cercle de retenue qui relie le bandage à la jante.

C'est pourquoi les roues de ce type doivent faire l'objet de nombreux contrôles

En effet, un bandage lâché est très aisé à reconnaître.

2. Un train de roues à bandages est plus lourd que le même train à roues monobloc.

La tension de calage diminue lorsque le bandage s'échauffe notamment sous l'effet de freinage prolongés.

Il arrive même que le bandage se déplace de quelques centimètres.

Pour pouvoir relever très facilement les déplacements de cet ordre, on a prévu de tracer des repères sur la jante et sur le bandage. Le personnel spécialisé peut déceler les bandages lâches en les sonnant au marteau.

Bandages (fig. 1304).

Le bandage est également fabriqué au départ d'un lingot à chaud, d'abord soumis à un forgeage, ensuite à un laminage.

A la S.N.C.B., les bandages sont posés sur le centre de roues après chauffage par induction. Pendant le refroidissement il en résulte un calage . La résistance à la traction

des bandages peut être choisie plus forte que pour des roues monobloc. Pendant la durée de vie d'un bandage, la tension de calage se réduit progressivement du fait que :

1. le bandage va s'amincissant ;
2. les efforts de compression considérables en service ont une action de laminage qui se traduit par un agrandissement virtuel du diamètre ;
3. au freinage, le bandage s'échauffe ;
ce qui fait que le risque de décalage d'un bandage croît en raison directe de son usure.

L'épaisseur *originelle* au cercle de roulement est de 70 mm, et la limite d'usure selon le type de 40 ou 45 mm.

Le tableau ci-dessus donne les principales cotes, d'une part, à l'état neuf, d'autre part, au moment où un reprofilage s'impose

	<u>Etat neuf</u>	<u>usé</u>
Epaisseur du bourrelet (mm)	33	20
Hauteur du bourrelet (mm)	27	36
Critère "QR" (mm)	11	6,5

La grandeur "QR" est la distance dans le plan horizontal séparant deux points de la surface active du bourrelet, l'un situé à 2 mm du sommet, l'autre à 10 mm au-dessus du cercle de roulement (fig. 1302).

La bandage nécessite un reprofilage lorsque :

- le critère "QR" du bourrelet est devenu trop petit (moins de 6,5 mm) ou lorsqu'il présente un bord tranchant (bavure).
- l'épaisseur ou la hauteur du bourrelet ont atteint les limites d'usure ci-dessus.
- la surface de roulement présente des plats ou ne possède plus la conicité voulue.

Grâce à la surépaisseur du bandage, le reprofilage peut être répété plusieurs fois.

Une fois l'épaisseur minimale atteinte, le bandage doit être remplacé en raison du danger de décalage qu'il présente.

En effet, le bandage devient plus élastique à mesure que l'épaisseur diminue et la tension de contact entre bandage et centre de roues diminue fortement.

La roue monobloc

Les roues monobloc en usage à la S.N.C.B. sont obtenues d'abord à la presse au départ d'un lingot de métal porté à température voulue, ensuite la portion du bandage et du moyeu sont obtenues par laminage.

Pour terminer, la forme de la roue intérieure est obtenue par une dernière opération à la presse. Le bandage est durci par traitement thermique. De cette manière, on obtient un compromis entre les conditions exigées du bandage et de la jante.

13.02. Boîte d'essieux de wagons.

A. Boîte à aliers lisses.

Le poids de la caisse repose sur les fusées d'essieux par l'intermédiaire de coussinets en métal anti-friction lubrifiés à l'huile ou par l'intermédiaire de roulements à rouleaux lubrifiés à la graisse consistante.

Une boîte en acier moulé, appelée boîte d'essieu enveloppe la fusée et le coussinet, elle sert en même temps d'appui aux ressorts de suspension.

Les boîtes d'essieux doivent également assurer le guidage des mouvements du châssis dans le plan vertical (fig. 1305).

Le système à tampon graisseur (ou mèche)(fig. 1306) est encore utilisé sur certains types de wagons.

Le corps de boîte^A porte en sa partie supérieure un coussinet en métal antifriction "M". L'huile du carter est amenée sur la fusée par capillarité au moyen d'un

tampon graisseur T constitué par une garniture de fils de laine montée sur une carcasse en tôle, pressée légèrement contre la partie inférieure de la fusée par un ressort "V". Le joint d'étanchéité "E" en bois assure l'étanchéité à l'arrière de la boîte.

En variante du système à tampon graisseur, la fig. 13.07 présente une boîte d'essieux avec packing.

Ces boîtes présentent de sérieux inconvénients :

- étanchéité déficiente;
- entrée d'eau et de poussières.

Malgré de fréquentes visites, l'échauffement est à craindre à la moindre irrégularité et ses conséquences sont toujours graves (voir article 13.03).

B. Boîtes à rouleaux.

La conception des boîtes à rouleaux est toute différente des boîtes à coussinets. Le frottement onctueux entre fusée et coussinet est remplacé par le roulement de rouleaux entre surface très dure.

Un roulement à rouleaux se compose d'une bague extérieure "A" et d'une bague intérieure "B" en acier de très haute résistance trempé et rectifié (fig. 13.18).

Entre ces deux bagues sont placés des rouleaux "C" en acier trempé et rectifié. Ces rouleaux peuvent être de forme cylindrique conique ou en forme de tonneau. C'est ce dernier modèle qui est également généralisé pour les boîtes d'essieux utilisées en traction électrique à la S.N.C.E.

La fig. 13.09 présente une boîte à rouleaux utilisée sur les locomotives électriques. Les rouleaux sont séparés entre eux par une cage en bronze.

La bague intérieure des roulements à rouleaux est calée sur la fusée au moyen d'un manchon conique fendu "M", ce qui permet de régler avec beaucoup de précision le jeu entre les rouleaux et les bagues au montage.

Il existe également des roulements posés directement sur la fusée par calage à chaud.

Les roulements à rouleaux sont lubrifiés à la graisse consistante de bonne qualité. En effet, la graisse doit adhérer aux surfaces malgré la vitesse de rotation élevée; elle ne peut fondre à une température de régime relativement importante.

L'étanchéité à la poussière et à l'eau est assurée à l'avant par un couvercle avec joint et à l'arrière par un joint en feutre et par un labyrinthe.

Les boîtes à rouleaux ont le grand avantage de nécessiter très peu d'entretien.

Les résistances de frottement sont minimales; le graissage est assuré à tous les régimes. De ce fait, les avaries à ces organes sont très rares.

C. Echauffement des boîtes d'essieux.

13.03. Détection

a) en dehors des zones d'action d'un détecteur automatique

Ce genre d'anomalie ne sera révélé, en ligne, que par des signes extérieurs déjà très avancés. (Agents E, V ou ES).

Par exemple :

boîte en feu - fumées - sifflements.

Dans un tel cas, et quel que soit le type de boîte en cause, il y a lieu de vérifier s'il n'y a pas de rupture de fusée, et dans la négative, rechercher la possibilité la plus proche de différer le wagon pour examen ultérieur par des agents M spécialisés. En cas de bris, appeler l'équipe de secours sur place.

b) Boîte de wagon signalée par un détecteur automatique.

Ces appareils qui déclenchent l'alarme en cabine lorsqu'un seuil de température (1) déterminé est dépassé, sont installés sur des lignes à fort trafic en des endroits permettant le garage du train à courte distance (entrées de gares de passage dans les 2 sens). Lors d'une telle alarme, le train étant arrêté, il y a lieu de procéder à un examen de près avant toute décision.

Etant donné que le détecteur ne mesure que la température du centre de la boîte, il ne donnera, en principe, pas d'alarme pour une température trop élevée des blocs de frein. Le détecteur ne réagira donc qu'en cas de calage prolongé des freins avec transmission de la chaleur de la roue à la boîte d'essieu.

Si la voie de garage est située dans une gare disposant à ce moment d'un visiteur du matériel, c'est ce dernier qui procédera à l'examen et prendra une décision.

Dans le cas contraire, le conducteur du train est habilité à prendre la décision après examen.

(1) Soit un seuil maximum, soit un seuil de différence de température des boîtes d'un même essieu.

Compte tenu des différences fondamentales dans le comportement des boîtes d'essieux selon leur type de graissage, il est important reconnaître le type de boîte en cause avant toute décision.

13.04. Identification

a) Boîtes à paliers lisses.

Les différents types de boîtes sont représentés dans les figures n°S 13.05. - 13.06 - 13.07.

Si le modèle en cause n'est pas clairement identifié et ne répond pas aux critères du point b) ci-dessous, il y a lieu de le considérer comme "probablement à paliers lisses" et de le traiter comme tel (voir 13.05).

b) Boîtes à rouleaux

1. elles sont généralement de l'un des modèles figurés en 13.10. 13.11;
2. elles portent sur le couvercle avant ou sur le corps de boîte le sigle d'un constructeur de roulement : SKF - FAG - Jager - Timken - RIV, etc.
- 3) les wagons de la SNCF et ^{NS} et bientôt ceux de la SNCB équipés de boîtes à rouleaux portent sur les parois d'about, une marque spéciale reproduite à la figure 13.16.

Les boîtes du même modèle se trouvant sur d'autres wagons peuvent donc y être assimilées. Si cependant un doute persiste sur la nature réelle de la boîte, on la traitera comme "à paliers lisses".

13.05. Conduite à tenir en cas d'alarme donnée par détecteur automatique

a) Boîte à paliers lisses en cause

Compte tenu du danger d'évolution rapide vers la rupture de fusée, toute alarme significative d'un détecteur non défaillant doit donner lieu au retrait du véhicule (vide ou chargé).

b) Boîte à rouleaux

Pour certains types de boîtes à rouleaux il arrive que dans certaines conditions de graissage et de chargement ou par température ambiante élevée, la température de régime de la boîte dépasse légèrement le seuil d'alarme fixé et s'y stabilise.

Plusieurs possibilités existent donc selon la nature du cas d'espèce observé.

1° on ne constate aucun ~~dégagement~~ de fumée, ni perte importante de graisse fondue et on peut toucher la boîte du dos de la main sans avoir une sensation de brûlure.

2° la boîte est manifestement chaude et présente les anomalies ci-après : couleur brûlée, graisse fondue, fumée ou un seul de ces indices.

Dans ce cas, le retrait s'impose (vide ou chargé).

Remarque importante.

Si le wagon est chargé de marchandises dangereuses (inflammables - explosibles - explosives - radio-actives, etc...) il doit, sur place, être déclaré en détresse et la décision ultérieure doit être prise par le service E quelles que soient les constatations faites lors de l'examen (voir étiquettes des produits dangereux).

13.06. But des appareils de choc et de traction

Les appareils de choc et de traction sont constitués par les butoirs et les attelages.

Alors que les attelages servent à transmettre l'effort de traction de la locomotive à tous les véhicules du train, les butoirs ont pour but d'absorber les chocs survenus entre les véhicules.

Cours 124.20

13e leçon

Lors de l'accouplement des voitures, dans les trains de voyageurs on donne un certain serrage aux butoirs (environ 800 kg) au moyen du tendeur. Cette "tension d'attelage" a pour but d'améliorer le confort des voyageurs en amortissant les mouvements parasites tels entre autres les mouvements de balancement, de lacet.

Dans les trains de marchandises par contre, on laisse dans les attelages un certain mou de façon à faciliter le démarrage de trains lourds. En effet, au démarrage d'un train de voyageurs dont toutes les voitures forment un tout, la locomotive doit arracher simultanément tous ces véhicules à l'inertie et déployer une force de traction considérable.

Cette méthode de démarrage ne pourrait s'appliquer à un train de marchandises. Grâce à la détente d'attelage entre les wagons, la locomotive commence par mettre en mouvement le premier wagon, ensuite le deuxième et ainsi de suite jusqu'au dernier. L'effort de traction à exercer croît donc progressivement pendant toute la durée du démarrage.

13.07. Description des appareils de traction et d'attelage.

a) traction discontinue

Sur certains types de voitures, les crochets de traction ou les attelages sont fixés sur la traverse de tête par l'intermédiaire d'un ressort (fig. 13.13. a + 13.13. b).

L'effort de traction se transmet d'un véhicule à l'autre par l'intermédiaire du châssis qui doit supporter la résistance de tous les véhicules qui le suivent.

Il en résulte que les véhicules supportent des chocs violents qui se répercutent dans tout le train, sauf si chaque voiture développe un effort;

b) traction continue

La plupart des voitures et des wagons ordinaires de la SNCB sont équipés d'une barre de traction continue sur toute la longueur du véhicule et terminée à chaque extrémité par un crochet de traction.

L'effort se transmet à chaque véhicule par l'intermédiaire d'un ressort (fig. 13.14 a et 13.14 b).

Chaque châssis n'est donc plus sollicité que par l'effort

constituent un ensemble non élastique sur toute la longueur du train.

c) crochet de traction (fig. 13.15)

Pour faciliter l'inscription en courbe de longues voitures, le crochet d'attelage se termine par un oeillet "A" qui lui permet de pivoter autour d'un axe vertical. A l'arrière du crochet un trou "B" est prévu pour le pivot de fixation du tendeur.

Les organes de traction sont prévus pour résister à un effort de 65 T (85 T pour les engins de traction).

Les crochets de traction sont en acier forgé à haute résistance (55 kg/mm²) et un allongement de 20 %.

d) tendeurs d'accouplement

Le tendeur a pour rôle de transmettre l'effort de traction d'un véhicule à l'autre. Il permet en outre de réaliser la tension d'attelage voulue dans les trains de voyageurs.

Le tendeur le plus généralisé à la SNCB est représenté à la fig. 13.16. Il se compose d'une tige filetée A, à pas gauche et droit, à profil rond reliant les pièces D et l'étrier C par l'intermédiaire d'écrous B munis de tourillons.

Les pièces D sont fixées par un pivot au crochet d'attelage correspondant tandis que la pièce C s'accroche au crochet de la voiture à accoupler.

Pendant la marche, le contrepoids reste pendu vers le bas et empêche ainsi le desserrage par trépidation.

Lorsque le tendeur n'est pas utilisé, il est accroché à un crochet spécial A se trouvant sous la traverse de tête comme représenté à la fig. 13.17.

A remarquer que l'accouplement de la locomotive se fait toujours au moyen du tendeur du véhicule remorqué.

14e leçon.

14.01. Appareils de choc.

Les appareils de choc ont pour but d'atténuer les réactions qui se produisent entre les véhicules d'un train en marche. Ces efforts de compression, parfois violents sont préjudiciables à la conservation du matériel; ils se produisent quand le train est comprimé, par exemple à l'abord des pentes ou rampes, durant la double traction ou lors de manoeuvres de triage.

En outre, le frottement des plateaux des butoirs qui sont comprimés par la tension d'attelage, sur le matériel à voyageurs contribue à amortir les oscillations verticales et latérales des voitures.

L'emplacement et les dimensions des butoirs par rapport au gabarit des voitures ont été fixés de façon à éviter que dans une courbe, les plateaux puissent se quitter pour s'accrocher ensuite en provoquant un déraillement à la sortie de la courbe.

Un butoir se compose en principe d'une tige A munie d'un plateau B (fig. 14.01). La tige coulisse dans un guide C fixé sur la traverse de tête du châssis.

Un ou plusieurs ressorts R servent à l'absorption des chocs.

Un butoir comprenant uniquement des ressorts transmettrait encore des chocs violents au châssis du véhicule notamment lorsque les ressorts sont comprimés à fond.

14.02. Tampon Spencer.

Dans les butoirs Spencer (fig. 14.02) le choc ne produit jamais un contact à bloc d'organes métalliques.

En effet, le ressort R peu puissant absorbe le choc au premier abord; ensuite le ressort H entre en action. Ce ressort très puissant est composé d'éléments encaoutchouc.

Le butoir Spencer absorbe le travail de compression et le restitue entièrement lors de la détente. La courbe de compression de la fig. 14.03 coïncide donc avec la courbe de détente, ce qui nuit au confort et peut provoquer des ruptures d'attelage.

Butoirs à friction.

Les butoirs à friction ne restituent plus à la détente qu'une partie du travail emmagasiné pendant la compression, l'autre partie du travail est transformée en chaleur de frottement dans le ressort à friction.

Les réactions entre les différents véhicules sont donc amorties efficacement.

Les principaux types de butoirs à friction utilisés à la S.N.C.B. sont les types Ringfeder fig. 14.04 et Mohr fig. 14.05 leur différence réside dans la forme du ressort à friction.

14.03. Attelage Henricot.

Les appareils de choc et de traction sont soumis à rude épreuve en service.

On peut reprocher aux attelages ordinaires les inconvénients suivants :

- Usure rapide des crochets et tendeurs ;
- Visite fréquente nécessaire si on veut éviter des ruptures d'attelage ;
- Faible résistance à la rupture (55.000 daN).

On peut encore ajouter à cela que l'accouplement et le désaccouplement des attelages ordinaires sont assez laborieux et ces manoeuvres sont à éviter autant que possible.

Par contre, l'attelage semi-automatique central présente de nombreux avantages :

- Il a une très grande résistance à la rupture ;
- L'appareil de traction et l'appareil de choc sont réduits à un seul appareil ;
- Les frais d'entretien sont minimes ;
- Le degré d'usure n'influence pas la résistance ;
- La rupture de l'attelage est extrêmement rare même en cas de déraillement ;
- Cet attelage oppose en outre une certaine résistance à la torsion, empêchant les véhicules de se renverser lors d'un déraillement.

L'accouplement et le désaccouplement se faisant rapidement et aisément cet attelage est particulièrement intéressant pour les trains qui changent fréquemment de composition (automotrices).

A la S.N.C.B. toutes les automotrices électriques sont équipées d'attelages Henricot type Atlas (130.000 daN) fig. 14.06.

Cet attelage se compose essentiellement d'une mâchoire (a) pivotant autour d'un axe (b) fixé à la tête (c) et d'un verrou (e) qui en tombant vient immobiliser la mâchoire (a) lorsque celle-ci est fermée.

Lorsque le verrou est tombé suffisamment bas pour empêcher la surface (f) de sortir, la mâchoire ne peut plus s'ouvrir et l'accrochage (dans une autre mâchoire identique) est assuré.

Pour accrocher, le seule préparation consiste donc à :

- ouvrir une des deux mâchoires,
- aligner les deux attelages.

L'accouplement se fait par accostage, la mâchoire se ferme et le verrou tombe.

Pour effectuer le découplément, le verrou doit être soulevé suffisamment haut pour permettre la rotation de la mâchoire. A cette fin, un mécanisme à leviers très simple (fig. 14.07) permet de poser le verrou sur un petit rebord (2) qu'il quittera aussitôt que la mâchoire s'ouvre pour poser sur le plan incliné (1) de la mâchoire (voir fig. 14.08).

- Les bourrelets (2) et (3) (fig. 14.08) servent à absorber l'effort de traction en laissant libre de toute charge, le pivot qui de ce fait ne sert que pour la rotation de la mâchoire.
- A remarquer que l'élément élastique de l'attelage Henri-cot est constitué par un ressort à friction Mohr tel que décrit à l'article précédent. Ce ressort travaille aussi bien à la compression qu'à la traction.

Nous voyons sur la fig. 14.09 que l'attelage peut pivoter autour d'un pivot vertical et qu'un dispositif de rappel tend à ramener la tête dans l'axe.

14.04. Attelage de transition.

Afin de pouvoir accoupler le cas échéant une automotrice avec un véhicule muni d'un attelage ordinaire et de butoirs, il se trouve dans le fourgon de chaque automotrice électrique de la S.N.C.B. un attelage de secours appelé "attelage de transition".

La tête de l'attelage (fig. 14.10) possède la même forme que l'attelage Atlas en position fermée mais la mâchoire (G) est fixe.

L'autre extrémité est pourvue d'une broche (B) qui s'emboîte sur le crochet de traction. Une clavette de sécurité (c) empêche la broche de sortir.

Un bec A venu de fonderie avec l'attelage vient s'appuyer sous le crochet de traction de façon à donner à l'ensemble une position plus ou moins horizontale.

Dans le coffre à outillage existe un levier en bois très dur qui permet le placement de l'attelage de secours en position horizontale.

Il va de soi que l'accouplement s'effectue en ouvrant la mâchoire de l'attelage de l'automotrice.

14.05. Attelage Scharffenberg.

Les automotrices doubles de la S.N.C.B. constituent des unités indivisibles au point de vue traction; les deux voitures d'une automotrice double sont reliées entre elles par un attelage permanent qui ne doit être décroché qu'occasionnellement en atelier (par exemple pour levage d'une voiture).

Un demi-attelage identique est logé dans la traverse de tête de chaque véhicule (fig.14.11).

Vu les inconvénients de cet attelage permanent, les automotrices électriques récentes sont équipées, entre voitures, de butoirs, crochet de traction et tendeurs ordinaires.

LA SUSPENSION.

14.06. Matériel rigide (fig.14.12).

Le matériel rigide est constitué par 2 ou 3 essieux sur lesquels repose la caisse (1) par l'intermédiaire du châssis (2).

Le poids de la caisse est transmis aux boîtes d'essieux (3) via les ressorts à lames (4).

Ceux-ci sont fixés à des supports (6) du châssis au moyen d'étriers (5).

La boîte d'essieux peut donc se déplacer verticalement dans ses guides tout en restant en contact avec le ressort. Les irrégularités de la voie seront donc amorties avant d'être transmises à la caisse.

Il n'est prévu qu'un jeu relativement faible dans le sens longitudinal et latéral par rapport au véhicule.

Le jeu latéral pratiqué est fonction du déplacement (fig.14.13) du train de roues lors du passage en courbe.

L'ampleur de ce déplacement dépend de la distance L , de l'entre-axe l et du rayon (R) de la courbe.

Pour des entre-axes élevés (par exemple 4,5 m) et des courbes de faible rayon on peut utiliser une ou plusieurs des solutions suivantes :

- a) Augmenter l'écartement des rails ;
- b) Permettre un déplacement latéral de la fusée ou du coussinet dans la boîte d'essieux ;

c) Appliquer des dispositifs de convergence (fig. 14.14).

Les deux premières solutions sont limitées soit pour des raisons de sécurité (écartement des voies) soit pour des raisons constructives.

On conçoit aisément que la 3e solution est la plus rationnelle.

A la sortie de la courbe les essieux devront être re-placés dans leur position initiale; l'effort de rappel des ressorts, l'inclinaison des étriers et le poids de la caisse contribuent à effectuer ce mouvement de rappel.

Le principe de convergence consiste en un petit chariot comprenant un train de roues placé sous le véhicule. Ce chariot doit pouvoir pivoter autour d'un axe vertical.

La phase suivante, qui fut décisive, consistait à munir ce chariot ou "bogie" (1) de deux ou trois essieux et d'y poser la caisse (2) en la retenant au moyen d'un pivot vertical (fig. 14.15).

Ainsi est né le "bogie" dont l'entre-axe peut être réduit à un minimum tout en permettant d'augmenter au maximum la longueur des véhicules. D'autre part, il est possible de monter des moteurs de traction dans le bogie d'où le nom du matériel articulé.

14.07. Description du bogie type Pennsylvania - fig. 14.16 -

Il existe une grande variété de types de bogies.

Un des plus simples, qui nous permet néanmoins de voir le principe des différentes pièces constitutives et le type Pennsylvania.

Le châssis du bogie est constitué par deux poutres longitudinales (1) munies de baies (2) pour les boîtes d'essieux. Après le placement des trains de roues, ces baies sont fermées par dessous au moyen de sous-gardes (3) qui sont reliées longitudinalement par une barre de liaison (4).

Les poutres longitudinales sont reliées par deux traverses de tête (5) et deux traverses intermédiaires (6). Afin de consolider le châssis on ajoute le cas échéant deux traverses intermédiaires longitudinales (16).

Le châssis de bogie est réalisé en tôles rivées, soudées ou bien en acier moulé.

Le poids du châssis est transmis aux boîtes d'essieux (9) par l'intermédiaire de deux cavaliers de suspension (cols de cygne) (7) et de quatre ressorts hélicoïdaux (8) doubles.

Ces ressorts hélicoïdaux placés entre boîtes (roues) et châssis constituent ce que l'on nomme la suspension primaire.

La caisse repose sur le châssis de bogie par l'intermédiaire d'une traverse danseuse (10) comprenant une crapaudine sphérique (11) permettant des oscillations par rapport à la caisse.

Deux appuis latéraux (12) ont pour but de limiter ces oscillations (à 2 mm par rapport à la position moyenne).

La traverse danseuse repose sur une traverse inférieure (13) au moyen de quatre ressorts à lames doubles (14) (ressorts à pincettes) placés de part et d'autre.

La traverse inférieure est suspendue au châssis du bogie au moyen de biellettes obliques (15).

Les ressorts à pincettes formant un lien souple entre la caisse et le châssis de bogie constituent la suspension secondaire.

La rotation de la traverse danseuse par rapport à la caisse est possible grâce à la crapaudine (fig. 14.17).

14.08. Ressorts de suspension.

Les ressorts de suspension à lames ou hélicoïdaux sont fabriqués en acier silico manganéux de composition suivante :

0,45 à 0,55 % de Carbone
1,5 à 1,8 % de Silice.
0,5 à 0,8 % de Manganèse.

Dans certains cas, on emploie d'autres aciers alliés; la résistance à la rupture est toujours très élevée : 90 à 175 daN/mm²

Les ressorts de suspension sont conçus de façon à ce que le bris de l'un d'eux soit sans conséquences graves. A cette fin, la lame maîtresse est généralement double ainsi que les ressorts en hélice qui forment parfois deux ou trois ressorts hélicoïdaux placés concentriquement.

a) Ressorts à lames (fig. 14.18).

Les lames sont pourvues de nervures afin d'empêcher tout mouvement latéral ; elles sont assemblées en paquets au moyen d'une bride.

Le grand frottement survenant entre les lames assure un amortissement automatique, comme la poussière et la rouille entre les lames modifieraient les caractéristiques des ressorts en les rendant plus durs on les enduit d'une

graisse graphitée. La valeur de la flèche p à l'état libre (et évidemment aussi en charge) donne une idée de la fatigue du ressort.

b) Ressorts hélicoïdaux (fig. 14.19).

On utilise généralement du fil rond.

Les extrémités sont meulées suivant des plans parallèles, perpendiculairement à l'axe.

Les ressorts hélicoïdaux ne sont pratiquement pas amortis.

On utilisera dans certains cas des amortisseurs hydrauliques afin de parer à cet inconvénient.

Le caoutchouc est également utilisé sous forme de silentblocs afin de favoriser l'amortissement (voir plus loin les bogies type Alsthom et Schlieren).

D'autre part, il est intéressant d'obtenir une grande souplesse (flèche par tonne) car une inégalité de la voie aura d'autant moins d'influence sur la charge de l'essieu que le ressort est plus souple, diminuant ainsi les risques de déraillement.

La distance (a) entre les spires est une cote permettant de se rendre compte de l'état de fatigue du ressort. Lorsque les spires se touchent sous charge, le ressort est à remplacer.

... of the

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

SYSTEMES DE TRANSMISSION.

15.01 But de la transmission.

Avant d'étudier les particularités de bogies utilisés en traction électrique, il est nécessaire de savoir comment le mouvement se transmet aux roues; en effet, le genre de suspension du moteur de traction dans le bogie dépend essentiellement du système de transmission utilisé et inversement l'exécution du bogie ainsi que son comportement en service sont fonction de la suspension du moteur de traction.

En traction électrique, la transmission du mouvement et de l'effort entre moteur et train de roues est réalisée au moyen de commande individuelle des essieux. Le couple moteur est transmis directement aux essieux moteurs et ce, au moyen d'engrenages.

On distingue, en traction électrique, 3 types de bogies, à savoir :

- Le bogie à deux essieux moteurs (deux moteurs de traction incorporés).
- Le bogie à un essieu moteur et un essieu porteur (un seul moteur de traction incorporé).
- Le bogie à deux essieux porteurs (ce bogie ne comprend pas de moteur de traction) appelé bogie porteur.

D'après le montage du moteur dans le bogie, nous distinguons essentiellement deux systèmes :

- a) Moteur à suspension élastique totale ;
- b) Moteur à suspension par le nez.

15.02 Moteur à suspension élastique totale.

Le châssis du bogie supporte le poids entier du moteur qui y est fixé et en subit tous les mouvements. Comme le train de roue se maintient à une hauteur fixe par rapport au rail, il faut nécessairement une liaison élastique entre l'axe du moteur et le train de roue.

La réalisation de cette liaison élastique fait l'objet de différents systèmes.

Système Alsthom (fig. 15.01)

- Chaque bogie supporte 2 moteurs de traction attaquant chacun un essieu par l'intermédiaire d'un arbre creux et d'une transmission élastique.

Les moteurs sont fixés en trois points au châssis de bogie un sur la traverse de tête et 2 sur la traverse centrale ; ils se déplacent verticalement avec le châssis de bogie et subissent les déflexions de la suspension primaire.

- La transmission de l'effort moteur aux roues est du type "Alsthom" et est bilatérale.

Le pignon du moteur calé en bout d'arbre d'induit entraîne une couronne dentée fixée à un arbre creux qui entoure l'essieu. L'arbre creux est équipé de portées recevant les coussinets du moteur. Solidaire du moteur et donc du châssis de bogie l'arbre creux doit présenter par rapport à l'essieu le jeu suffisant pour permettre les débattements de la suspension.

- L'arbre creux est muni, à chacune de ses extrémités de 2 bielles qui commandent un anneau dansant entourant également l'essieu. Les anneaux dansants sont eux-mêmes reliés au voile de la roue voisine par 2 bielles identiques aux précédentes.

Chaque extrémité de bielle est pourvue d'une articulation élastique "Silentbloc" et d'un pivot approprié pour sa fixation sur l'arbre creux, sur l'anneau dansant ou sur le voile de la roue, selon le cas.

15.03 Moteur à suspension par le nez. (fig. 15.01)

a) Le moteur (1) pose d'une part sur l'essieu (2) au moyen de coussinets (3) en bronze ou en acier munis d'un métal antifricition.

Le graissage à l'huile se fait au moyen de mèches ou de tampons en feutre (4) placés dans les paliers (5).

D'autre part, le nez (6) du moteur pose sur les appuis (8) de la traverse du bogie par l'intermédiaire d'un paquet de ressorts (7).

En cas de bris ou de perte des ressorts hélicoïdaux (9) un nez de sécurité empêchera la chute du moteur dans la voie en évitant de provoquer un déraillement.

b) Environ 50 % du poids du moteur pose donc directement sur l'essieu qui lui communique par conséquent tous les chocs dus aux inégalités de la voie et 50 % du poids est suspendu au châssis du bogie.

c) Dans ce système, la distance entre l'axe du moteur (axe d'induit) et l'essieu reste invariable.

Le pignon (10) engrène avec une roue dentée (11) calée à chaud sur le moyeu de roue. Un carter (12) sert de protection et de réservoir d'huile pour le graissage des engrenages.

d) Au sujet de la roue dentée (11) il y a lieu de remarquer :

- que toutes les automotrices sont équipées d'une roue dentée rigide par moteur ;
- que les locomotives électriques sont équipées normalement d'une roue dentée élastique par moteur (fig. 15.03).

Un moyeu d'engrenage (1) pourvu de 5 évidements est calé sur le centre de roue. Une couronne dentée (2) munie de 5 protubérances (3) est fixé sur le moyeu d'engrenages au moyen de 10 buselures (4) par l'intermédiaire de Silentblochs (5). La transmission élastique est donc réalisée par le caoutchouc des Silentblochs tandis que la couronne est montée sur les rebords (6) du moyeu avec assemblage glissant.

Conclusion. Le moteur à suspension totale, donc à transmission élastique est plus compliqué et par conséquent plus coûteux que le moteur à suspension par le nez.

Le fait que la suspension totale du moteur oblige de diminuer la flexibilité des ressorts de suspension du bogie au détriment du confort constitue également un inconvénient surtout pour les automotrices.

Par contre, l'isolement ainsi que d'autres organes du moteur à suspension totale (les roulements par exemple), seront moins soumis aux chocs de la voie.

On n'applique d'ailleurs pas la suspension par le nez pour de très grandes vitesses.

Particularités des bogies du matériel roulant électrique.

15.04 Le châssis de bogie.

Trois méthodes de construction sont appliquées, à savoir: rivées, coulées et soudées. Ces deux dernières sont plus fréquentes.

Bogies d'automotrices.

15.05 Suspension primaire ou liaison entre train de roue et châssis de bogie.

Certaines automotrices ont des bogies qui sont pourvus de guides de boîtes d'essieux suivant fig. 15.04. Des guides (1) fixés au châssis du bogie et pourvus d'appliques (2) en Manax.

Une applique semblable (3) est montée sur la boîte d'essieux afin de réduire l'usure au minimum. Un graissage périodique est évidemment nécessaire.

Afin d'éliminer complètement l'usure par friction, on a appliqué la suspension Alsthom (fig. 15.05).

Le châssis de bogie (1) pose, par l'intermédiaire des ressorts hélicoïdaux (2) sur des cuvettes (3) faisant corps avec la boîte d'essieux (4).

Deux biellettes (5) munies de silentblocs (fig. 15.06) relie la boîte d'essieux au châssis du bogie.

A part la déformation élastique des silentblocs, il n'est pas prévu de jeu.

Comme les silentblocs ne peuvent supporter des charges axiales importantes, le déplacement dans ce sens est limité par des butées en acier Cr-Ni.

15.06

Suspension secondaire et liaison entre caisse et bogie.

La suspension secondaire de plusieurs types d'automotrices présente de grandes ressemblances avec le bogie type Pennsylvania ordinaire.

Nous nous bornerons donc à décrire la suspension secondaire Schlieren appliquée aux automotrices récemment construites (fig. 15.07).

La traverse danseuse (4) pose sur des sommiers (1) au moyen de ressorts hélicoïdaux (5). Ce sommier est suspendu par des anneaux (2) au châssis de bogie (3).

Les sommiers sont reliés d'une part, à la traverse danseuse par un barreau d'écartement (6) et d'autre part, au châssis de bogie par une barre d'entraînement (7).

Le pivot (8) sert uniquement à l'entraînement de la caisse tandis que celle-ci pose sur des appuis latéraux (9) à bain d'huile.

Comme les ressorts hélicoïdaux n'ont pas d'amortissement propre, on utilise un amortisseur "Fichtel und Sachs" (10) placé entre traverse danseuse et sommier.

Les déplacements latéraux de la traverse danseuse sont amortis par un amortisseur à friction "Silentbloc" (19) monté sur le châssis du bogie et relié à la traverse danseuse par une tige (12).

De cette façon, on obtient une suspension secondaire extrêmement souple et bien amortie qui contribue largement à l'amélioration du confort.

Bogies type SLM Winterthur.15.07. Liaison entre train de roue et châssis de bogie (fig. 15.08).

Deux plateaux (1) faisant corps avec la boîte d'essieux portent les ressorts hélicoïdaux (2) qui forment la suspension primaire.

Deux guides cylindriques (3) fixés au châssis de bogie, coulissent dans une buselure en bronze (4) laquelle est pressée dans un Silentbloc (5).

L'intérieur du Silentbloc forme bain d'huile ; cette huile ne doit être remplacée qu'à l'occasion des grandes révisions.

L'emploi des Silentblocs présente un double avantage.

1. Ils amortissent les chocs ;
2. Ils compensent pour une grande part les légères déformations survenant aux bogies durant la fabrication (par soudure).

Le jeu dans les guides peut ainsi être réduit au minimum.

Les oscillations verticales sont amorties par un disque à friction (6), un amiante et une tige (7) transmettant les mouvements du châssis de bogie.

Le réglage de l'amortissement s'obtient en serrant plus ou moins l'écrou de réglage de l'amortisseur.

15.08 Suspension secondaire et liaison entre caisse et bogie (fig. 15.09).

Le pivot (4) est fixé au châssis de bogie (2). La traverse (6) fixée par boulon (3) au longeron de caisse (1) comprend en son centre, un logement pour le pivot constitué par une rotule (5) placée dans un bain d'huile.

La traverse pose sur des ressorts à lames (11) suspendus latéralement au châssis de bogie par des anneaux de suspension (10).

Le contact entre traverse et brides des ressorts se fait dans un bain d'huile (9). Une poutre (8) sert de liaison aux deux ressorts à lames. Une rotule sphérique (7) transmet d'autre part tous les mouvements transversaux de la caisse aux ressorts créant ainsi un effort de rappel.

Un déplacement latéral de la caisse de 35 mm est toléré de part et d'autre de la rotule (5). De même, un jeu longitudinal est prévu entre la rotule (7) et la poutre (8).

D'autre part, cette poutre est reliée au châssis de bogie par une barre de maintien (12) pourvue de Silentblochs.

15.09 Liaison entre bogies (fig. 15.10).

Afin de réduire l'usure des bandages et en particulier des bourrelets de roue, un accouplement transversal relie deux pièces triangulaires (1) fixées au châssis du bogie et suspendues à la caisse (2) au moyen de Silentblochs.

Par cette disposition, on diminue l'angle d'attaque ainsi que la pression latérale du bourrelet du bandage sur la voie lors des parcours en courbe.

Un jeu initial de 10 mm est prévu dans chaque sens. Lorsque le déplacement relatif dépasse cette valeur, le dispositif de rappel constitué par deux pistons et deux ressorts concentriques entre en action.

Conclusion. Ce type de bogie permet des parcours de 300.000 km sans reprofilage des bandages.

Cours 124.20

15e leçon

16e leçon.

QUESTIONNAIRE.

- 14.02 Quelle est la principale caractéristique des butoirs à friction ?
- 14.03 Quels sont les principaux avantages de l'attelage Henri-cot ?
- 14.04 Décrivez l'attelage de transition.
- 14.07 Qu'entend-on par suspension primaire et suspension secondaire ?
- 15.02 Qu'entend-on par moteur de traction à suspension élastique totale ?
- 15.03 Qu'entend-on par moteur de traction à suspension par le nez ?
- 15.03 Citez les avantages et inconvénients des deux systèmes de suspension ?

17e leçon.

17.01. Constitution d'un moteur à courant continu.

Un moteur à courant continu comprend plusieurs pièces principales:

- a) Un inducteur formé de une ou plusieurs paires de pôles fixées dans une carcasse en acier.

Chaque pôle est constitué d'un noyau en tôle de fer sur lequel on a bobiné un enroulement.

Cet ensemble fixe constitue ce qu'on appelle le stator (fig. 17.01).

- b) Un induit composé de tôles de fer isolées les unes des autres et assemblées sur un axe de rotation.

L'induit est rainuré suivant son axe de rotation: ces rainures ou encoches sont identiques et placées symétriquement sur toute la périphérie de l'induit.

Le bobinage de l'induit est composé de barres de cuivre isolées, logées dans les encoches et reliées entre elles de façon à former un circuit fermé.

L'induit, encore appelé rotor, tourne dans le stator.

- c) Un collecteur formé de barres de cuivre isolées de l'arbre et isolées entre elles et tournant avec l'induit.

Les barres placées dans les encoches sont reliées électriquement entre elles côté collecteur par jonction aux lames du collecteur. La fig. 17.02 donne à titre d'exemple un développement partiel de bobinage.

- d) Des frotteurs fixes, appelés balais, logés dans des cages porte-balais et amenant le courant électrique à l'induit.

Comme le bobinage forme un circuit fermé, la présence des balais va créer 2 circuits d'alimentation connectés en parallèle (fig. 17.03).

Le raisonnement a été fait dans l'hypothèse où le bobinage comporte un seul circuit fermé.

Dans la plupart des cas, le bobinage comporte plusieurs circuits fermés superposés.

17.02. Rôle des pôles.

Les pôles sont destinés à créer le flux magnétique ϕ .

2.

Ce flux magnétique est donné par la loi fondamentale de l'électromagnétisme

$$nI = R \phi$$

où

n = nombre de spires enroulées autour d'un pôle
I = courant parcourant ces spires.

L'expression nI porte le nom d'ampères-tours ou force magnétomotrice.

R = réluctance du circuit magnétique où $R = \frac{1}{\mu S}$

l = longueur du circuit magnétique

S = section du circuit magnétique

μ = perméabilité du matériau constituant le circuit magnétique

Une fois connu le moteur, la réluctance R est connue par les dimensions géométriques du moteur (avec toutefois une approximation sur μ).

Cela étant, on constate que le flux ϕ est proportionnel au nombre d'ampères-tours; comme dans un moteur donné, le nombre de spires n enroulées autour du moteur est donné, on constate en dernier ressort que le flux est proportionnel au courant traversant les enroulements des pôles.

17.03. Mode d'excitation des pôles.

Suivant le mode d'alimentation des spires enroulées autour des pôles, le moteur a reçu des appellations différentes:

a) Moteur à excitation indépendante:

Lorsque les spires d'excitation sont alimentées par une source indépendante de celle alimentant le moteur (fig. 17.04).

b) Moteur à excitation shunt:

Lorsque les spires d'excitation sont connectées en parallèle sur l'induit du moteur et alimentées en conséquence par la même tension que l'induit (fig. 17.05).

c) Moteur à excitation série:

Lorsque les spires d'excitation sont connectées en série avec l'enroulement d'induit du moteur. Le courant parcourant ces spires est donc le même que celui qui parcourt l'induit (fig. 17.06).

d) Moteur à excitation compound:

Dans ce cas, il y a 2 enroulements différents sur le pôle: un enroulement shunt et un enroulement série (fig. 17.07).

Suivant le mode d'excitation, les caractéristiques du moteur seront très différentes.

17.04. Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

La théorie de l'électricité enseigne que (fig. 17.08) si un conducteur situé dans un champ magnétique H est parcouru par un courant I , le conducteur sera soumis à une force f .

Le sens et la direction de la force f sont obtenus par la règle des 3 doigts de la main gauche (fig. 17.09) : dans l'hypothèse où les 3 éléments :

champ H : figuré par l'index
 courant I : figuré par le médium
 force f ou mouvement : figuré par le pouce
 sont perpendiculaires deux à deux.

Cela étant, si on considère (fig. 17.10) un moteur bipolaire, dont le champ est orienté comme indiqué, et qu'on envisage le conducteur "a" de l'induit, ce conducteur sera sollicité par la force f .

Un raisonnement semblable pouvant être fait avec chacun des conducteurs, on voit que finalement l'induit du moteur va tourner dans le sens indiqué par la flèche.

Dans le cas particulier du moteur série, on constate (fig. 17.11) que si, sans rien changer au moteur, on inverse la tension d'alimentation de l'ensemble : induit + inducteur, le sens de rotation n'a pas changé.

17.05. Equation fondamentale du moteur.

La théorie de l'électricité enseigne que (fig. 17.12) : si un conducteur se déplace dans un champ magnétique H variable ou non, dans la direction v , ce conducteur est le siège d'une force électromotrice E ayant le sens indiqué.

Le sens de la force électromotrice est obtenu par la règle des 3 doigts de la main droite (fig. 17.13) dans l'hypothèse où les 3 éléments :

champ H : figuré par l'index
 déplacement : figuré par le pouce
 force électromotrice E : figuré par le médium
 sont perpendiculaires deux à deux.

Cela étant, si nous considérons (fig. 17.14) l'induit d'un moteur tournant dans le sens indiqué par la flèche dans le champ H également indiqué, l'application de la règle précédente montre que le conducteur "a" sera le siège d'une force électromotrice dans le sens indiqué.

Si nous comparons les fig. 17.10 et 17.14 et les raisonnements qui s'y rattachent, nous constatons donc qu'il se passe deux phénomènes bien distincts lors de l'alimentation d'un moteur:

- La naissance d'une force mécanique sollicitant chaque conducteur du fait que ceux-ci sont parcourus par un courant. Chaque force qui sollicite le conducteur possède par rapport à l'axe du moteur un couple qui vaut le produit de la force par la distance du conducteur à l'arbre. Ce couple fait tourner le moteur;
- La naissance au sein de chaque conducteur d'une force électromotrice; les conducteurs sont connectés entre eux de façon que ces forces électromotrices s'ajoutent.

On constate d'après la comparaison des fig. 17.10 et 17.14 que cette force électromotrice tend à pousser un courant de sens contraire à la tension d'alimentation du moteur, d'où le nom de force contre-électromotrice qu'on lui donne.

Cela étant, ce qui pousse le courant I dans le moteur, c'est la différence U-E entre la tension d'alimentation U du moteur et sa force contre-électromotrice E.

Dans le cas particulier du moteur série (fig. 17.15), on peut écrire que

$$U - E = (R_a + R_s) I$$

expression dans laquelle:

U = tension d'alimentation du moteur

E = force contre électromotrice

I = courant circulant dans le moteur

R_s = résistance des enroulements des pôles

R_a = résistance de l'induit: cette résistance comprend la résistance des câbles de jonction, résistance des balais, résistance de contact: balai - collecteur, résistance des conducteurs d'induit,

ou encore

$$U = E + (R_a + R_s) I \quad (1)$$

La théorie de l'électricité montre que:

$$E = \frac{P}{c} n N \phi$$

où

- 2 P = nombre de pôles du moteur
 2 C = nombre de circuits en parallèle dans le bobinage d'induit
 n = nombre de conducteurs d'induit
 N = vitesse du moteur
 ϕ = flux sous le pôle

Pour un moteur donné, P, C et n sont fixés, d'où en posant $\frac{P}{c} n = K = \text{constante}$

On trouve

$$E = K N \phi$$

et l'équation (1) peut s'écrire sous la forme

$$U = K N \phi + (R_a + R_s) I \quad (2)$$

17.06. Vitesse du moteur série.

La relation (2) peut se mettre sous la forme suivante:

$$K N \phi = U - (R_a + R_s) I$$

ou

$$N = \frac{U - (R_a + R_s) I}{K \phi}$$

Dans cette expression, K, R_a , R_s sont des constantes, ainsi que U pour autant que l'on suppose le moteur alimenté à tension constante.

Cela étant, la vitesse N du moteur dépend uniquement du courant I et du flux ϕ .

Nous avons vu que dans un moteur série, le courant parcourant les enroulements des pôles est le même que le courant parcourant l'induit I.

De ce fait, le flux ϕ dépend uniquement du courant I.

Cela étant, la vitesse N d'un moteur série alimenté à une tension déterminée U est donc fonction uniquement du courant I.

17.07. Couple du moteur série.

Si nous multiplions les 2 membres de la relation (1) de l'article 17.05 par I, nous trouvons

$$UI = EI + (R_a + R_s) \cdot I^2 \quad (3)$$

UI représente l'énergie électrique fournie au moteur par unité de temps (donc la puissance).

Cette énergie, comme l'indique la relation (3) peut se décomposer en 2 parties:

- L'énergie perdue en chaleur dans les enroulements d'induit et d'excitation $(R_a + R_s) I^2$;
- L'énergie mécanique que le moteur va fournir: EI.

La mécanique enseigne que dans une machine animée d'un mouvement de rotation, la puissance est égale au produit du couple (C) par la vitesse angulaire (ω); la vitesse angulaire est égale à $\omega = 2 \pi N$, si N est la vitesse en tours/seconde.

Cela étant, on peut écrire pour le moteur que

$$EI = C \omega$$

ou encore $C = \frac{EI}{\omega} = \frac{K \cdot \phi \cdot I}{2 \pi N} = \frac{K}{2} \cdot \phi \cdot I$ si on pose

$$K' = \frac{K}{2 \pi}$$

nous avons:

$$C = K' I \phi$$

- dans la partie non saturée de la caractéristique magnétique la loi de variation du flux ϕ en fonction du courant I est une droite;
- dans la partie saturée de la caractéristique magnétique le flux ϕ est pratiquement constant quel que soit le courant I.

Les moteurs série utilisés en traction travaillent généralement dans la partie saturée; cela étant, le flux est pratiquement constant.

$$C = K' I \phi = K'' I.$$

et la loi de variation du couple en fonction du courant est une droite.

17.08. Influence des variations de tension sur la vitesse et le couple.

Partant de la relation fondamentale (2)

$$U = K N \phi + (R_a + R_s) I \quad (2)$$

Supposons que la tension U varie et devienne U' , le courant I restant constant.

L'équation (2) deviendrait:

$$U' = K N' \phi + (R_a + R_s) I \quad (5)$$

Les lettres K , R_a , R_s sont restées les mêmes puisqu'il s'agit de valeurs caractéristiques du moteur.

D'autre part, puisque nous avons à faire à un moteur série, le flux est uniquement fonction du courant I et comme I est supposé constant, ϕ le sera également.

En faisant le rapport des 2 relations (2) et (5), on a:

$$\frac{U}{U'} = \frac{K N \phi + (R_a + R_s) I}{K N' \phi + (R_a + R_s) I} \quad (6)$$

Or, le terme $(R_a + R_s) I$ est toujours très petit devant $K N \phi$ et en conséquence, on peut le négliger.

Ainsi, pour un moteur série de locomotive électrique $R_a + R_s = 0,125$ ohms en moyenne, pour un courant $I = 300$ A, on aurait:

$$(R_a + R_s) I = 0,125 \times 300 = 37,5 \text{ volts}$$

Or, si le moteur est alimenté à une tension $U = 750$ V, nous aurons en appliquant la relation fondamentale (2)

$$\begin{aligned} 750 &= K N \phi + 37,5 \\ K N \phi &= 750 - 37,5 = 712,5 \text{ V} \end{aligned}$$

On constate donc comme annoncé que le terme $(R_a + R_s) I$ est bien négligeable vis-à-vis de $K N \phi$.

Si la tension U' était de 1500 V, on aurait:

$$1500 = K N' \phi + 37,5$$

$$K N' \phi = 1500 - 37,5 = 1.462,5 \text{ V}$$

donc à fortiori $(R_a + R_s) I$ serait négligeable vis-à-vis de $K N' \phi$.

8.

Cela étant, on peut écrire, à peu de choses près:

$$\frac{U}{U'} = \frac{K N \phi}{K N' \phi}$$

et comme nous avons vu que K et ϕ restaient constants, on a finalement:

$$\frac{U}{U'} = \frac{N}{N'}$$

On conclut que: si le courant I reste constant, la vitesse du moteur N est proportionnelle à sa tension d'alimentation.

Le moteur série a donc une vitesse extrêmement variable avec la tension; ainsi à courant constant la vitesse du moteur varie du simple au double lorsque la tension d'alimentation passe de 750 à 1500 V.

Pour ce qui est du couple, un moteur série dépendait uniquement du courant I ; si donc, la tension d'alimentation U du moteur varie, le courant I restant constant, le couple n'est pas influencé par la tension et reste constant.

17.09. Courbes caractéristiques du moteur série.

On entend par courbes caractéristiques, les courbes donnant en fonction du courant I parcourant le moteur:

- la vitesse du moteur;
- le couple du moteur;
- le rendement du moteur.

La fig. 17.16 donne à titre d'exemple ces courbes caractéristiques pour le moteur série équipant les automobiles électriques de la S.N.C.B.

L'allure de la courbe donnant le couple a été expliquée à l'article 17.07.

Le rendement du moteur, comme dans toute machine d'ailleurs, il est défini par:

$$\text{rendement} = \frac{\text{Energie fournie par le moteur au récepteur}}{\text{Energie fournie au moteur par la source d'énergie électrique}}$$

17.10. Inversion du sens de marche du moteur série.

Pour inverser le sens de marche d'un moteur série, il faut inverser soit le sens de champ H , soit le sens du courant I , l'inversion simultanée des 2 éléments ne changeant rien au sens de marche.

La fig. 17.17 illustre cette règle dans l'hypothèse d'une inversion du champ H.

En pratique, l'une et l'autre méthode sont employées:

- a) soit inversion des connexions aux bornes de l'inducteur (inversion du champ H);
- b) soit inversion des connexions aux bornes de l'induit (inversion du courant I).

L'inversion du sens de rotation du moteur ne peut se faire que sur des moteurs à l'arrêt.

En effet, supposons le moteur alimenté comme indiqué à la fig. 17.18 : la force mécanique qui va naître a le sens indiqué par f et le moteur tourne dans le sens indiqué par V .

La force contre électromotrice E qui prend naissance du fait de la rotation du moteur est de sens contraire à la tension d'alimentation U .

Si maintenant nous coupons l'alimentation du moteur, celui-ci continue à tourner dans le sens indiqué par suite de la vitesse acquise.

Si nous inversons les connexions de l'inducteur par exemple, comme indiqué à la fig. 17.19 et que nous réalimentons à nouveau le moteur, il va en résulter une inversion de la force contre électromotrice E qui sera de même sens que la tension d'alimentation U . La tension d'alimentation U et la force contre électromotrice E vont donc s'ajouter et le courant I qui circule dans le moteur sera donné par la relation:

$$I = \frac{U + E}{R_a + R_s}$$

Ce courant énorme va brûler le moteur.

En outre, le couple moteur va s'inverser puisque le champ H s'est inversé et que le courant I a conservé son sens.

Sur un moteur en rotation entraîné par l'inertie considérable de l'automotrice ou de la locomotive, on va donc brusquement appliquer un couple de sens contraire au sens de rotation du moteur: il en résultera un choc mécanique important pouvant entraîner le bris des organes de la transmission.

Changer de sens de marche lorsque les moteurs ne sont pas arrêtés est donc une opération extrêmement dangereuse entraînant la destruction du moteur et de leurs engrenages et qui par conséquent ne freine en rien une locomotive ou une automotrice en marche.

Afin d'éviter tout incident sur les engins moteurs électriques de la SNCB, on procède comme suit:

L'inversion du sens de marche, c.à.d. l'inversion des connexions de l'inducteur ou de l'induit, est commandée à distance par le conducteur au moyen d'une manette spéciale dénommée "manette d'inversion".

18e leçon.

18.01. Définitions - Caractéristiques d'un moteur de traction.

Régime continu. Le régime continu d'un moteur de traction est celui qu'un moteur peut supporter au banc d'essai pendant une période illimitée dans les conditions de l'essai d'échauffement sans que les limites d'échauffement soient dépassées (voir article suivant).

Régime unihoraire. Le régime unihoraire d'un moteur de traction est celui qu'un moteur peut supporter au banc d'essai, pendant une heure (l'essai étant commencé lorsque le moteur est froid et poursuivi dans les conditions de l'essai d'échauffement) sans que les limites d'échauffement soient dépassées (voir article suivant).

Courant continu : c'est le courant correspondant au régime continu.

Courant unihoraire : c'est le courant correspondant au régime horaire.

Courant maximum : c'est le courant maximum pouvant être admis dans le moteur pendant un court instant (1 minute par exemple) sans entraîner de détériorations électrique ou mécanique au moteur et sans dommage pour le collecteur.

En général, le courant maximum d'un moteur de traction est égal à 1,7 x courant unihoraire.

Tension nominale. La tension nominale d'un moteur est la tension spécifiée aux bornes de ce moteur.

Cette tension nominale est la même que la tension nominale du réseau de traction dans tous les cas où le moteur est alimenté directement par la ligne de contact.

Pour les moteurs travaillant d'une façon permanente en série de n unités, la tension nominale du moteur est désignée par le rapport $\frac{U}{n}$ de la tension nominale d'alimentation U au nombre n de moteur.

Ainsi, dans le cas de la SNCB, la tension nominale d'alimentation U de la ligne de contact est de 3.000 V.

2 moteurs de traction sont couplés en permanence par 2 en série. La tension nominale des moteurs est de $\frac{3.000}{2} = 1.500$ Volts.

Les moteurs doivent être couplés en permanence par 2 en série sous 3.000 V parce que dans l'état actuel de l'électrotechnique, il n'est pas possible de construire

2.

des moteurs de traction suffisamment robustes que pour supporter en permanence la tension de 3.000 V.

Puissance d'un moteur.

La puissance d'un moteur de traction est la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur, exprimée en kilowatts ou en chevaux.

On distingue la puissance continue correspondant au régime continu et la puissance unihoraire correspondant au régime unihoraire.

Sauf indication spéciale, la puissance nominale d'un moteur de traction est sa puissance unihoraire.

18.02. Démarrage du moteur série.

Au démarrage, la vitesse N du moteur est nulle, l'équation du moteur série $U = K N \phi + (R_a + R_s) I$ devient donc : $U = (R_a + R_s) I$.

Exemple.

La résistance combinée $(R_a + R_s)$ d'un moteur série est très faible : 0,125 ohms pour le moteur type de locomotive.

Si la pleine tension nominale de 1.500 V de la caténaire était appliquée au moteur, on aurait :

$$I = \frac{U}{R_a + R_s} = \frac{1.500}{0,125} = 12.000 \text{ Ampères}$$

On serait donc conduit à des courants énormes à titre de comparaison le courant maximum admissible dans le moteur type de locomotive est de l'ordre de 600 A.

Il est donc nécessaire d'abaisser la tension d'alimentation aux bornes du moteur de façon que le courant absorbé reste dans des limites acceptables; ainsi dans l'exemple précédent la tension à admettre à l'instant du démarrage serait de $0,125 \times 600 = 75$ V.

Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse N la force contre électromotrice $K N \phi$ du moteur apparaît et l'équation de fonctionnement du moteur est alors :

$$I = \frac{U - K N \phi}{R_a + R_s}$$

le courant I diminuerait donc au fur et à mesure que le moteur accélère.

Or, pour utiliser pleinement la puissance du moteur, on a intérêt à maintenir le courant I aussi voisin que possible de sa valeur maximum admissible.

En conséquence, au fur et à mesure que la vitesse N du moteur et par là sa force contre électromotrice $K N \emptyset$ croît, on va augmenter d'autant la tension aux bornes du moteur U de façon que le courant I reste constant.

Comment en disposant d'une tension de ligne essentiellement constante (3000 V), allons nous faire varier la tension aux bornes du moteur pendant la phase de démarrage ?

Le moyen le plus simple employé depuis le début, consiste à intercaler, dans le circuit, des résistances qui absorbent l'excédent de tension; on diminue alors progressivement cette résistance par paliers plus ou moins réguliers au fur et à mesure que le moteur accélère.

Cette méthode qui à chaque démarrage occasionne d'importantes pertes en chaleur dans les résistances de démarrage peut paraître "barbare" à première vue.

Toutefois, à peu de chose près, c'est la méthode qui s'est généralisée dans tous les systèmes de traction électrique par courant continu : elle est simple et, combinée avec le couplage et le shuntage des moteurs (dont nous parlerons plus loin), son rendement s'est sensiblement amélioré.

18.03. Intérêt de l'emploi du moteur série en traction.

Maintenant que nous avons jeté les bases du fonctionnement du moteur série, nous pouvons mieux comprendre l'intérêt de l'emploi du moteur série en traction :

- Au démarrage il faut mettre en mouvement des masses énormes m avec la plus grande accélération possible j .

D'après l'article 10.05 nous savons que :

$$F - R = mj$$

où F = effort moteur du véhicule
 R = résistance à l'avancement du train.

Pour un train donné, R et m sont fixés; l'accélération j , au démarrage, sera d'autant plus élevée que l'effort moteur F sera élevé.

Or, c'est précisément le moteur série qui donnera le couple le plus élevé.

En effet, le couple du moteur à courant continu vaut $C = K' I \phi$; dans tous les types de moteur I serait élevé au démarrage comme nous l'avons vu plus haut; mais, de plus, dans le moteur série ϕ sera également élevé vu qu'il dépend directement du courant I , ce qui n'est pas le cas des autres types de moteurs; toutes choses égales d'ailleurs, le moteur série donnera un couple de démarrage sensiblement plus important que les autres types de moteurs.

Sans entrer dans les détails, on peut dire que la construction du moteur série est notablement plus robuste que celle des autres types de moteurs.

La présence autour des pôles d'enroulements de grosse section, puisque parcourus par un courant important (le courant d'induit) au lieu des enroulements à fils fins des moteurs shunt, excitation indépendante ou compound, intervient pour beaucoup dans cette robustesse.

La caractéristique effort moteur-vitesse du moteur série (fig. 18.01) est la mieux adaptée aux caractéristiques d'un réseau de traction; cette courbe notamment est moins "plongeante" (moins verticale) que celle des autres types de moteur; de ce fait, à une variation de vitesse donnée ΔN , il correspond une variation d'effort moteur ΔF_m moindre.

Cet avantage joue particulièrement lorsque plusieurs moteurs sont couplés électriquement, ce qui est généralement le cas comme nous le verrons plus loin; chaque moteur entraînant des roues de diamètre légèrement différent, par suite de l'usure des bandages, il en résulte que tous les moteurs tournent à des vitesses légèrement différentes; ces différences de vitesse ΔN ne doivent pas occasionner de sensibles différences de répartition d'effort entre les différents moteurs d'où l'avantage du moteur série.

Si le moteur série présente par rapport aux autres les avantages ci-dessus, il présente par contre l'inconvénient d'entraîner des conséquences beaucoup plus graves en cas de patinage.

En effet, supposons le moteur alimenté à une tension constante U .

$$U = K N \phi + (R_a + R_s) I$$

En cas de patinage, la vitesse du moteur N augmente.

Pour que la relation précédente, où U , K , R_a et R_s sont des constantes, reste vérifiée, il faut que I diminue.

Mais toute diminution de I entraîne une diminution de \emptyset (ce qui n'est pas le cas pour les autres moteurs, sauf pour le moteur compound mais à un degré moindre que le moteur série) et de là une augmentation de la vitesse N .

Le phénomène d'accroissement de vitesse s'amplifie donc : on dit que le moteur "s'emballe", il risque d'atteindre des vitesses dangereuses pouvant amener la destruction du moteur.

19.01 Cran de démarrage.

Pour démarrer le moteur, il est indispensable, avons-nous vu, de mettre une résistance R_d en série avec le moteur en vue de limiter le courant de démarrage.

Cette résistance R_d est calculée de façon à ne pas dépasser le courant maximum autorisé : I_{\max} , soit par le moteur lui-même, soit par l'adhérence.

L'équation du moteur série :

$$U = K N \Phi + (R_a + R_s) I + R_d I$$

devient au démarrage :

$$U = (R_a + R_s) I_{\max} + R_d I_{\max}$$

puisque à ce moment la vitesse N est nulle.

On démarre avec un effort F_1 . Au fur et à mesure que le moteur accélère, sa vitesse augmente, le courant diminue et l'effort également (fig. 19.07).

Pour une certaine valeur I_{\min} . du courant correspondant à une vitesse N_2 du moteur, l'effort est tombé à la valeur F_2 .

On diminue alors la valeur de la résistance de démarrage de R_d à R'_d , en vue d'augmenter l'effort correspondant et de revenir à une valeur voisine de l'effort initial F_1 .

On dit qu'on a passé un cran de démarrage.

Lors du passage du cran, la vitesse N_2 est restée constante; la résistance de démarrage a diminué de R_d à R'_d ; le courant a augmenté de I_{\min} . à I_{\max} . et l'effort de F_2 à F_1 .

On poursuit de même jusqu'à ce que toute la résistance de démarrage soit hors service, toute la tension étant alors appliquée aux bornes du moteur.

On dit alors qu'on se trouve sur un cran de marche économique.

Pour passer d'un cran au suivant, c'est le courant qui sert de guide. On se fixe une valeur I_{\min} . du courant appelée courant de reprise; pour laquelle on passe le cran.

On n'est donc pas maître de la pointe de courant qui se produit au passage du cran. Celle-ci dépend des gradins de résistance qui ont été prévus par le constructeur de la machine. Toutefois, lors de la construction on s'arrange pour que les pointes soient sensiblement égales.

De ce fait le courant moyen défini par $\frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$ reste sensiblement constant pendant la phase de démarrage.

La fig. 19.12 montre les courbes de démarrage de la locomotive type 28.

La courbe en traits gras et en "zig-zag" marque la progression cran par cran.

On constate que le courant de reprise I_{\min} y est de 330 A; il lui correspond un effort de 14200 daN. Le courant maximum I_{\max} est en moyenne de 350 A et l'effort correspondant de 15.250 daN.

Comme on le remarque, les 7 premiers crans sont passés pour des courants inférieurs au courant de reprise. Il s'agit de "crans d'approche".

Il y correspond des courants inférieurs au courant de reprise et croissant depuis le cran 0 jusqu'au cran 7. L'effort correspondant suit les mêmes fluctuations.

Le but de ces crans d'approche est d'appliquer progressivement l'effort de démarrage normal en vue d'éviter les chocs.

Leur nombre varie suivant le type de locomotive et d'automotrice et ce, pour les mêmes raisons que celles développées ci-dessous.

Le démarrage peut se faire :

1° Soit avec un rapport $\frac{I_{\min}}{I_{\max}}$ faible.

Dans ces conditions, le courant moyen $\frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$ sera faible et l'effort moyen également.

L'accélération sera faible au démarrage, les pointes de courant élevées et les chocs dus aux variations d'efforts également. Le confort des voyageurs et le matériel en souffriront.

Par contre, cette méthode de démarrage n'exigera que peu de matériel d'où simplicité de l'appareillage, encombrement et poids réduits, diminution des frais d'installation, d'entretien et de réparation.

2° Soit avec un rapport $\frac{I_{\min}}{I_{\max}}$ élevé.

L'effort moyen sera élevé et proche de l'effort maximum ce qui conduira à une accélération élevée au démarrage.

Les variations d'effort seront peu sensibles. Le confort des voyageurs sera meilleur et le matériel souffrira moins.

Par contre, cette méthode de démarrage conduit à un nombre élevé de crans d'où un matériel plus compliqué, plus coûteux d'établissement, d'entretien et de réparation.

19.02 Différents couplages des moteurs de traction.

Dans un véhicule équipé de plusieurs moteurs de traction il est classique d'effectuer différents couplages de moteur.

Ainsi, sous une caténaire à 3000 V, il est classique pour un véhicule équipé de 4 moteurs à la tension nominale de 1500 V de coupler les 4 moteurs :

- Soit pour 4 en série sous 3 000 V;
- Soit 2 par 2 en série parallèle.

Les 2 schémas sont représentés à la figure 19.03.

Un 3e couplage, consistant à connecter les 4 moteurs en parallèle, n'est pas réalisable vu l'impossibilité actuelle de construire des moteurs de traction alimentés directement à 3 000 V.

Quel est l'intérêt de ce changement de couplage ?

1° Réduction des pertes pendant la phase de démarrage.

Pour la facilité de l'exposé, nous considérons le cas de 2 moteurs couplés d'abord en série, ensuite en parallèle.

Pendant la phase de démarrage, nous avons vu à l'article 19.03 que le courant de démarrage (le courant moyen en réalité) restera constant : appelons ce courant I_{moy} .

Le courant étant constant, le flux Φ et le couple C le seront également.

Le couple de démarrage étant constant et la résistance à l'avancement restant pratiquement constante pendant la phase de démarrage, il en résulte que le démarrage se fait à accélération constante; il résulte de ce mouvement uniformément accéléré que la vitesse N variera proportionnellement au temps.

Si dans l'équation fondamentale du moteur nous négligeons les chutes ohmiques, qui sont faibles comme nous l'avons vu précédemment; on peut écrire que, à tout instant

$$U_m = K N \Phi$$

avec U_m = tension aux bornes du moteur et comme Φ est constant, U_m varie proportionnellement à N donc au temps.

Désignons par T la durée du démarrage, c'est-à-dire le temps pendant lequel les résistances de démarrage restent en service.

La tension totale de la ligne U est équilibrée par la tension U_m aux bornes des moteurs et la chute de tension U_R dans les résistances de démarrage.

Cas de 2 moteurs connectés directement en parallèle.

La variation de la tension aux bornes des moteurs et de la résistance en fonction du temps se présente comme l'indique la fig. 19.04.

L'énergie étant égale au produit de la tension par le courant et par le temps, on peut écrire :

Energie W_R perdue dans les résistances de démarrage pendant la phase de démarrage T

$$W_R = \frac{U}{2} \times 2 I_m \times T = UI_m T \text{ (aire hachurée).}$$

Pendant le même temps T , on a fourni aux moteurs une énergie W_M qui vaut :

$$W_M = 2 \times \frac{U}{2} \times I_m \times T = UI_m T$$

Le rapport entre l'énergie fournie aux moteurs et l'énergie prise au réseau vaut donc

$$\frac{W_M}{W_M + W_R} = \frac{UI_m T}{UI_m T + UI_m T} = 0,5$$

Cas de 2 moteurs connectés d'abord en série, ensuite en parallèle (fig. 19.05).

En couplage série, à la fin de l'élimination de la résistance de démarrage, on peut écrire :

$$\frac{U}{2} = K N' \Phi$$

$$\text{d'ou } N' = \frac{U}{2 K \Phi}$$

Dans le cas où les 2 moteurs étaient couplés directement en parallèle (cas précédent) on avait :

$$U = K N \Phi$$

$$\text{où } N = \frac{U}{K \Phi}$$

$$\text{d'où } N' = \frac{N}{2}$$

On voit donc que la marche avec 2 moteurs en série, toute résistance éliminée, est atteinte après un temps qui vaut $\frac{T}{2}$

A ce moment la tension aux bornes de chaque moteur vaut $\frac{U}{2}$; on les couple alors en parallèle avec résistance de façon à finalement amener la tension U aux bornes de chaque moteur après un temps T .

La variation de tension aux bornes des moteurs et résistances est indiquée à la fig. 19.05.

Energie W_R perdue pendant le démarrage T dans les résistances de démarrage :

$$W_R = \frac{1}{2} U \times I_m \times \frac{T}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{U}{2} \times 2 I_m \times \frac{T}{2}$$

Pendant le même temps T , on a fourni aux moteurs une énergie W_M qui vaut :

$$W_M = \frac{1}{2} U \times I_m \times \frac{T}{2} + \frac{U}{2} \times 2 I_m \cdot \frac{T}{2} + \frac{1}{2} \frac{U}{2} \times 2 I_m \times \frac{T}{2} = UI_m T$$

Le rapport entre l'énergie W_M fournie aux moteurs et l'énergie prise au réseau vaut donc :

$$\frac{W_M}{W_M + W_R} = \frac{UI_m T}{UI_m T + \frac{UI_m T}{2}} = \frac{2}{3} = 0,667$$

On voit donc que le rendement au démarrage est notablement amélioré par le changement de couplage des moteurs.

Cette amélioration s'accroît avec le nombre de moteurs.

2° Amélioration de la souplesse du véhicule moteur.

A l'article 19.01, nous avons défini les "crans économiques" c'est-à-dire les crans où la résistance de

démarrage est complètement éliminée et sur lesquels on peut se maintenir indéfiniment.

A chaque cran économique, il correspond une vitesse d'équilibre du train sur une ligne donnée (figure 19.06).

En multipliant le nombre de couplages, nous multiplions le nombre de crans économiques et en conséquence le nombre de vitesses d'équilibre ou de régime et en conséquence la souplesse du véhicule.

Prenons l'exemple d'une locomotive équipée de 4 moteurs de traction.

Lorsque les 4 moteurs sont couplés en série, la tension aux bornes de chacun d'eux est de 750 V en fin de couplage.

Lorsque les 4 moteurs sont couplés 2 par 2 en série parallèle cette tension est de 1500 V.

Comme nous l'avons montré précédemment, à courant constant, les vitesses sont proportionnelles aux tensions ce qui, dans le cas présent, veut dire que les vitesses en couplage série et série parallèle seront dans le rapport de 1 à 2.

Ainsi il en résulte (fig. 19.07) que nous aurons deux courbes économiques "Effort moteur-vitesse" d'où 2 vitesses économiques possibles V_1 et V_2 .

L'intérêt des 2 couplages est particulièrement marqué pour la locomotive.

En effet, la vitesse maximum des trains de marchandises est limitée à 60 km/h, le plafond de vitesse des trains de voyageurs est généralement de 120 km/h : pour pouvoir avec la même locomotive effectuer ces 2 types de trains, il faut pouvoir disposer d'une locomotive "mixte" ayant deux gammes de vitesse s'échelonnant dans le rapport 1 à 2 : ceci est réalisé économiquement en utilisant les couplages série et série parallèle des moteurs de traction.

20e leçon.

QUESTIONNAIRE.

- 17.03 Faites le schéma de principe des différents moteurs à courant continu.
- 17.04 Donnez l'équation fondamentale du moteur série.
- 17.09 Comment peut-on inverser le sens de marche d'un moteur série ? Schémas de principe.
- 18.02 Pourquoi un moteur à l'arrêt ne peut pas être alimenté à la tension nominale ?
- 19.01 Qu'entendez-vous par "marche économique" ?
- 19.02 Pour quelles raisons utilise-t-on le couplage série et série-parallèle ?

21e leçon.

21.01. Sensibilité au patinage des moteurs couplés en série.

Le fait de coupler plusieurs moteurs en série ne présente pas que des avantages : il présente notamment l'inconvénient d'augmenter la sensibilité au patinage.

Supposons, par exemple, 2 moteurs couplés en série sous tension d'alimentation constante U de la ligne.

On a (fig. 21.01)

$$U = 2 \left[K N \Phi + (R_a + R_s) \times I \right] \quad (1)$$

Si à un instant donné l'un des moteurs patine, (le moteur 2 par ex.), sa vitesse augmente et devient N_1 alors que la vitesse de l'autre est restée constante N .

On a (fig. 21.02)

$$U = K N \Phi' + K N_1 \Phi' + 2 (R_a + R_s) I' \quad (2).$$

Pour que la relation (2) puisse exister eu égard à l'augmentation de la vitesse du moteur 2, il faut évidemment que le courant, donc le flux, diminue et devienne I' et Φ' .

Vu que le terme $(R_a + R_s) I'$ est négligeable devant les autres, on peut écrire

$$U \cong K N \Phi' + K N_1 \Phi'$$

On constate que les tensions aux bornes de chaque moteur qui normalement sont égales à $\frac{U}{2}$, valent respectivement $K N \Phi'$ et $K N_1 \Phi'$ c'est-à-dire qu'elles sont proportionnelles aux vitesses des moteurs.

Ainsi, si le moteur 1 tourne à 750 tr/min et le moteur 2, par suite d'un patinage, à 1500 tr/min, la tension U de 3 000 V se partagera inégalement à raison de 1 000 V aux bornes du moteur 1 et 2 000 V aux bornes du moteur 2.

Un premier inconvénient provient de cette élévation de tension aux bornes du moteur qui patine, ce qui peut amener un coup de feu au moteur, la tension nominale de celui-ci étant comme nous l'avons vu de 1 500 V seulement.

En outre, lors du patinage, la diminution du courant I' et par voie de conséquence du couple est moins importante que si le moteur était seul (puisque la vitesse de l'un des 2 moteurs n'a pas varié).

Or, pour "étouffer" le patinage, il faudrait que ce couple diminue le plus vite possible.

La présence du rhéostat de démarrage augmente encore la sensibilité au patinage, si celui-ci, bien entendu, se produit pendant la phase de démarrage.

En effet, si nous raisonnons avec un seul moteur (fig. 21.03), pour plus de facilité, on a

$$U = K N \Phi + (R_a + R_s) I + R I$$

ou, en négligeant le terme $(R_a + R_s) I$,

$$U = K N \Phi + R I$$

Au cas où le moteur patine, la vitesse augmente et devient N_1 ; vu que U est constant, il faut que I , et par conséquent Φ , diminue et devienne I' et Φ' .

La présence de la résistance de démarrage R va amener un relèvement brusque de la tension aux bornes du moteur, en même temps qu'elle va freiner la diminution de courant comme indiqué plus haut.

Il va de soi que le couplage en série des moteurs, cumulé avec la présence du rhéostat de démarrage, augmente très fortement la sensibilité au patinage.

21.02. Affaiblissement du champ des moteurs.

On sait que la vitesse N du moteur est donné par

$$N = \frac{U - (R_a + R_s) I}{K \Phi}$$

ou plus simplement, en négligeant le terme $(R_a + R_s) I$,

$$N \approx \frac{U}{K \Phi}$$

Si, par un moyen quelconque, par exemple en shuntant l'inducteur par une résistance, nous diminuons le flux à une valeur de Φ' , la vitesse va augmenter et devenir

$$N = \frac{U}{K \Phi'}$$

Il en résulte que le fait d'affaiblir le champ à un certain degré, va nous donner une nouvelle caractéristique économique du moteur, économique puisqu'on peut rester indéfiniment sur cette position.

Par comparaison avec la fig. 19.07, nous aurons maintenant la fig. 21.04; nous constatons donc que nous obtenons une nouvelle vitesse économique V_3 .

L'affaiblissement du champ à différents degrés permet donc d'augmenter le nombre de vitesses d'équilibre et en conséquence la souplesse du véhicule.

La pointe d'effort qui se produit au moment précis de l'affaiblissement du champ s'explique comme suit.

Avant l'affaiblissement du champ du moteur, nous avons (en raisonnant pour un seul moteur)

$$U = K N \Phi + (R_a + R_s) I \quad (1)$$

Si nous diminuons le champ des inducteurs, donc si nous diminuons le flux jusqu'à une valeur Φ' , au moment précis où nous commandons cet affaiblissement, la vitesse N du moteur (V pour le véhicule sur la fig. 21.04) n'a pas le temps de varier par suite de l'inertie mécanique et en conséquence l'équation (1) devient

$$U = K N \Phi' + (R_a + R_s) I'$$

où le courant a augmenté jusqu'à la valeur I' pour compenser la réduction du flux.

Il se produit donc une brusque augmentation de courant lors de l'affaiblissement du champ.

Avant affaiblissement du champ, la puissance prélevée au réseau valait UI .

Lors de l'affaiblissement du champ, elle vaut UI' avec $I' > I$.

L'affaiblissement du champ va donc permettre de mieux utiliser la puissance du moteur, de le "régénérer".

La mécanique enseigne d'autre part que la puissance est égale à

$$C. \frac{2\pi N}{60}$$

où C est le couple du moteur et N sa vitesse en tr/min.

Comme au rendement près, la puissance électrique UI prise au réseau par le moteur est égale à la puissance mécanique $C. \frac{2\pi N}{60}$ fournie par le moteur, on voit que si

la puissance UI augmente lors de l'affaiblissement du champ, le couple du moteur augmente également (vu que la vitesse N reste constante à l'instant précis de l'affaiblissement du champ).

Si le couple du moteur augmente, l'effort moteur du véhicule augmente évidemment de la même façon.

21.03. Mode et degré d'affaiblissement de champ.

L'affaiblissement du champ peut se faire de deux manières différentes.

- 1) En éliminant ou en court-circuitant un certain nombre de spires des inducteurs (fig.21.05). Ceci provoque la réduction des ampères-tours ηI par suite de la réduction du nombre de spires η .

Cette méthode est généralement appliquée en 2 stades en vue de réduire l'à-coup sur le moteur (fig.21.06) : avant affaiblissement du champ, le contacteur A est fermé et le contacteur B est ouvert; dans le premier stade on ferme B, A étant toujours fermé; dans un second stade, on ouvre A, B restant fermé.

- 2) En shuntant l'inducteur complet par une résistance (fig.21.07). Ceci a pour effet de réduire le courant traversant les inducteurs : au lieu de I et de diminuer en conséquence les ampères-tours (ηi au lieu de ηI).

On appelle degré d'excitation le rapport :

$$\frac{\text{Ampères-tours après shuntage}}{\text{Ampères-tours avant shuntage}} \quad (\text{pour un même courant d'induit}).$$

c'est-à-dire :

Pour la 1ère méthode :
$$\frac{\text{Nombre de spires après shuntage}}{\text{Nombre de spires avant shuntage}}$$

Pour la 2e méthode :
$$\frac{\text{Courant dans inducteur après shuntage}}{\text{Courant dans inducteur avant shuntage}}$$

(pour un même courant d'induit).

On définit également dans cette seconde méthode le degré de shuntage qui vaut :

$$\frac{\text{Courant dans résistance de shuntage}}{\text{Courant dans inducteur avant shuntage}}$$

(pour un même courant d'induit).

Lorsqu'on affaiblit le champ des inducteurs par shuntage de ceux-ci, on le fait généralement non pas avec une résistance mais avec une résistance et une self (un shunt inductif comme on l'appelle) : ce système est notamment appliqué à la S.N.C.B.

Ce processus est motivé par ce qui suit :

Si nous considérons (fig. 21.08) un circuit comprenant une résistance pure R et une self pure L , on démontre que le courant de régime $I = \frac{U_0}{R}$ ne s'établit pas instantanément,

mais suit la loi représentée à la fig. 21.09 et n'atteint sa valeur de régime qu'après un temps T fonction des valeurs de R et L . Un phénomène analogue a lieu lors de la coupure du courant.

Or, les inducteurs des moteurs ont une certaine résistance R et une self L et leurs variations de courant suivent la loi rappelée ci-dessus.

Si la résistance de shuntage était une résistance pure, ce circuit aurait des caractéristiques très différentes de celui de l'inducteur et il en résulterait des perturbations dans le fonctionnement du moteur.

Pour éviter cela, on intercale dans le circuit de shuntage un shunt inductif afin de rapprocher les caractéristiques du circuit de shuntage et de l'inducteur et d'atténuer l'ampleur des phénomènes transitoires.

On ne peut augmenter indéfiniment le degré de shuntage : à partir d'un certain moment il apparaît des difficultés de commutation au moteur.

Sur le matériel de la S.N.C.B., le taux maximum de 73 % a été appliqué sur certaines locomotives.

22.01. Schéma de principe des circuits haute tension.

Toutes les automotrices et locomotives électriques actuelles de la S.N.C.B. sont munies d'équipements électriques comportant 4 moteurs de traction. Les schémas de principe des circuits haute tension (traction et services auxiliaires) se présentent comme indiqué aux figures 22.01 pour les automotrices et 22.02 pour les locomotives.

22.02. Schéma de principe du circuit de traction.

Dans l'état actuel de l'électrotechnique, on ne construit pas de moteur de traction série à courant continu d'une tension nominale supérieure à 1500 V.

La tension nominale de la caténaire étant de 3000 V, on associe les moteurs par groupe de deux de façon que chacun ait à ses bornes une tension de $3000/2 = 1500$ V.

Chaque moteur est cependant isolé pour 3000 V par rapport à la masse.

Sur la base des exposés théoriques faits précédemment, pour démarrer il faudra :

- prévoir des résistances de démarrage;
- prévoir des contacteurs de démarrage K1, K2 ... pour l'élimination de ces résistances au fur et à mesure que le véhicule accélère;
- prévoir des contacteurs de couplages S, O, P, G pour permettre de démarrer les groupes de moteurs d'abord en série, ensuite en parallèle;
- prévoir des résistances de shuntage, shunt inductif et contacteurs de shuntage ShI... pour le shuntage des inducteurs des moteurs;
- sortir des moteurs les bornes de l'induit et des inducteurs pour pouvoir inverser leur sens de marche en inversant les connexions des bornes de l'inverseur.

Il faut en outre prévoir :

- L'appareil de prise de courant : le pantographe P;
- Un appareil de coupure protégeant le circuit de traction.

Cet appareil, dénommé rupteur (RL) sur les automotrices, protège uniquement le circuit de traction.

Par contre, sur les locomotives, l'appareil de protection est un disjoncteur (DUR) protégeant tout l'équipement traction et services auxiliaires.

Le tableau d'enclenchement des contacteurs de la fig. 22.01 illustre dans quel ordre se ferment les différents contacteurs de démarrage, de couplage et de shuntage.

Le détail du passage du couplage série au couplage parallèle des groupes de moteurs, encore appelé transition, sera traité en détail plus loin.

22.03. Schéma de principe des circuits auxiliaires.

Pour les automotrices, les circuits auxiliaires comportent (fig. 22.01) :

- Le chauffage des voitures.

La réalisation la plus simple et la plus répandue consiste en des résistances chauffantes disposées dans la voiture le long des longs-pans et sous banquettes.

Chaque voiture comporte deux circuits résistants alimentés en parallèle par un contacteur électromagnétique 1 ou 2. Chacun des 2 circuits d'une voiture est protégé par un fusible divisionnaire de façon qu'en cas de défaut sur l'un des radiateurs, le circuit correspondant est éliminé, mais il reste un circuit donc un demi chauffage par voiture :

Un groupe moteur générateur compresseur ou un groupe moteur-alternateur et un groupe moteur-compresseur. (fig. 22.01bis)

- Le compresseur fournissant l'air comprimé nécessaire au frein, aux appareils électropneumatiques de contrôle et des servitudes, etc...
- La génératrice qui recharge la batterie de l'automotrice.

Le groupe est mis en service moyennant fermeture préalable de son contacteur d'alimentation.

Une résistance est intercalée dans le circuit et reste constamment en service: Elle permet :

- De limiter le courant de démarrage;
- Une fois le groupe démarré, de limiter la tension aux bornes du moteur : la tension sera de l'ordre de 2700 V au lieu de 3000 V.

Pour les locomotives, les circuits auxiliaires comportent (fig. 22.02) :

- Les coupleurs de chauffage placés aux extrémités de la locomotive et permettant d'alimenter le chauffage de tout le train par accouplement du coupleur de la locomotive et des coupleurs de voitures. La conduite de chauffage est mise sous tension moyennant fermeture du contacteur d'alimentation Cch et préalablement ouverture du sectionneur Sch : ce dernier est inséré dans le dispositif de sécurité dont il sera question plus loin;
- Le chauffage des cabines de conduite de la locomotive.

Les circuits de chauffage des 2 cabines de conduite sont couplés en parallèle et alimentés par un contacteur d'alimentation unique : de ce fait, la cabine de conduite inoccupée est également chauffée; cela permet, lors des changements de cabine de conduite, de se retrouver dans les mêmes conditions de confort.

- 2 groupes moteurs compresseurs fournissant l'air comprimé nécessaire au frein, aux appareils électropneumatiques de contrôle et de servitudes, etc.

Le débit d'un seul compresseur suffit pour assurer le service; le second sert de réserve. La réserve est nécessaire sur une locomotive et pas sur une automotrice parce qu'une locomotive roule la plupart du temps seule, alors qu'un train est généralement composé de plusieurs automotrices accouplées, ce qui fait que, si le compresseur de l'une d'elles tombe en panne, les compresseurs des autres automotrices suppléent à son insuffisance.

L'alimentation du moteur se fait par l'intermédiaire d'une résistance comme indiqué pour l'automotrice;

- 2 groupes moteurs ventilateurs fournissant l'air nécessaire au refroidissement des moteurs de traction.

Ces ventilateurs n'existent pas sur les automotrices parce que là les moteurs sont autoventilés : le ventilateur est incorporé dans le moteur et entraîné par son arbre.

Ces moteurs comportent également leur résistance de limitation.

- L'un des groupes ventilateurs entraîne par courroie une génératrice branchée en tampon sur une batterie.

Le groupe ventilateur devant être en service pendant tout le temps de service de la locomotive, la génératrice est également constamment en service.

22.04. Particularités des circuits H.T.

Les figures 22.01 et 22.02 donnent le schéma de principe

des circuits H.T., schéma des appareils essentiels que l'on retrouve à peu de chose près sur tout le matériel.

A côté de ces circuits et appareils essentiels, il en existe d'autres qui, quoique moins importants, n'en sont pas moins nécessaires; ces circuits et appareils sont représentés en traits gras sur les figures 22.03 et 22.04.

Nous allons dans ce qui suit, en commenter la fonction.

22.05. Appareil de prise de courant.

Le courant est collecté à la ligne caténaire aérienne par une prise de courant à pantographe P, qui sera décrite plus loin.

22.06. Isolateur d'entrée de courant.

Le pantographe se trouvant sur la toiture du véhicule moteur et l'appareillage électrique étant disposé dans la caisse ou sous le châssis, le câble H.T. amenant le courant du pantographe à l'appareillage doit nécessairement traverser la toiture. Afin d'éviter de blesser le câble H.T. à la traversée de la toiture, on peut se servir à cet effet d'un isolateur d'entrée de courant I. De plus en plus, l'isolateur d'entrée est remplacé par un câble isolé passant dans un tuyau en forme de col de cygne et traversant la toiture.

22.07. Sectionneur d'élimination de pantographe.

Un pantographe, qui serait à la masse par suite d'une avarie quelconque (bris du pantographe à la rencontre d'un obstacle, bris avec mise à la masse d'un isolateur support de pantographe ou d'un isolateur d'entrée de courant, etc..), entraînerait automatiquement la détresse du véhicule moteur.

En effet, si on abaisse le pantographe avarié et qu'on relève l'autre pantographe, celui-ci est également à la masse comme le prouvent les schémas des figures 22.03 et 22.04.

Pour éviter que le pantographe relevé soit à la masse et pour permettre de sauver la situation, on prévoit par pantographe un sectionneur d'élimination Sp.

Ainsi, en cas d'incident à la partie située en amont du sectionneur Sp, il suffit d'ouvrir celui-ci pour éliminer l'avarie. De plus, il faut fermer le robinet d'isolement et ouvrir l'interrupteur basse-tension correspondant au pantographe à la masse.

Sur certains équipements, le sectionneur Sp est non seulement ouvert mais en outre mis à la masse de façon à fixer le potentiel du circuit avarié, pour toute sécurité.

Sur certaines automotrices, le sectionneur d'élimination H.T. entraîne avec lui, dans son mouvement, un sectionneur basse tension, l'un et l'autre étant bien entendu isolés. Ce sectionneur basse tension est inséré dans le circuit basse tension de commande du pantographe; ainsi, en cas d'élimination du pantographe, il est impossible de le lever; on évite ainsi de lever par inattention un pantographe éliminé du point de vue H.T.; ceci est en effet susceptible de créer des incidents car, si on a éliminé un pantographe, c'est qu'il est avarié et qu'on ne désire plus le relever.

22.08. Parasurtension "Soulé".

Une mise sous tension accidentelle de 25 kV ou 15 kV dans une gare frontière pourvue de voies commutables provoquerait de graves avaries à l'équipement électrique 3 kV.

Pour cette raison certains engins S.N.C.B. ont été équipés d'un appareil parasurtension destiné à éclater en premier lieu lors d'une fausse manoeuvre.

Cet équipement se trouve sur la toiture et est relié au panto I des automotrices et au panto II des locomotives.

Si par mégarde un engin était mis sous tension 25 ou 15 kV, il faut toujours éliminer le panto avec parasurtension.

23e leçon.

23.01. Parafoudre.

Afin de permettre l'écoulement des ondes à haute tension d'origine atmosphérique circulant sur les lignes caténaïres et de permettre ainsi de protéger l'appareillage électrique contre les surtensions, un parafoudre P.f est installé sur le véhicule moteur.

Ce parafoudre, tant du point de vue schéma que dans la réalisation pratique, est installé le plus près possible du pantographe avec la longueur de câble minima.

Sur certains équipements, le parafoudre est protégé par un fusible H.T., sur d'autres pas. Les 2 schémas se défendent.

S'il n'y a pas de fusible HT, un défaut au parafoudre n'est pas décelé sur le véhicule moteur; seule, la sous-station peut intervenir, encore que l'intensité à absorber par le défaut doive être suffisante que pour engendrer le fonctionnement de la sous-station.

S'il y a un fusible HT et si celui-ci s'interrompt, pour une raison quelconque indépendante du parafoudre (par exemple vieillissement); personne ne s'en aperçoit et tout se passe comme si l'équipement ne possédait pas de parafoudre.

23.02. Sectionneur de mise à la terre.

Lorsque l'on travaille à la partie haute tension d'un véhicule moteur, il faut évidemment abaisser les pantographes en vue de couper toute alimentation HT; une sécurité supplémentaire est obtenue en mettant l'équipement électrique à la terre par un sectionneur St; de cette façon, on écoule vers la terre les charges statiques pouvant exister; d'autre part, si le pantographe n'avait pas répondu à la commande d'abaissement ou s'il s'était relevé intempestivement, on ferait déclencher la sous-station avant d'accéder à la haute tension. Il est à noter cependant que dans ce dernier cas, ce sectionneur ne constitue qu'une sécurité supplémentaire destinée à suppléer à l'insuffisance du conducteur. Aussi longtemps que le conducteur applique intégralement les consignes de sécurité réglementaires, ce sectionneur est inutile; d'ailleurs, il n'existe que sur une partie du matériel seulement. L'abaissement des pantographes et la mise en position terre du sectionneur St sont conjugués dans l'appareil qu'on dénomme "dispositif de sécurité" dont il sera question plus loin.

23.03. Sectionneur des appareils de mesure.

Dans chaque cabine de conduite est installé un
Cours 124.20

voltmètre H.T., permettant la mesure de la tension de ligne; les 2 voltmètres reliés en série sont branchés en potentiomètre sur une résistance. La bobine d'un relais de potentiel R T N, dont la fonction protectrice sera décrite plus loin, est également alimentée au travers d'une résistance.

Le niveau d'isolement de ces 2 circuits est relativement bas; en cas de foudre, et nonobstant la présence du parafoudre, il arrive que ces résistances percent à la masse.

En l'absence du sectionneur SA, le véhicule moteur serait en détresse; l'ouverture de SA permet d'éliminer le circuit avarié et de continuer sa route; comme le relais de potentiel est alors éliminé, un interrupteur basse tension installé sur le véhicule permet de court-circuiter les contacts du relais RTN et donc d'annuler temporairement la fonction protectrice de ce relais.

23.04. Principes généraux de la coupure des circuits.

Aux schémas de principe des figures 22.01 et 22.02, chaque appareil de coupure est figuré par un seul contacteur. Dans la réalisation pratique (fig. 22.03 et 22.04), on constate que certains contacteurs sont doublés, triplés et même quadruplés (exemple : rupteur R L des automotrices).

Afin d'expliquer cette disposition et pour permettre la compréhension de la technologie des appareils de coupure, nous énoncerons les principes généraux de la coupure des circuits.

Supposons (fig. 23.01) qu'une source S alimente à travers un interrupteur I un circuit constitué d'une résistance R et d'une self \mathcal{L} , le courant étant i .

On constate que, lors de l'ouverture du circuit par l'interrupteur I :

- a) le courant i tend vers zéro;
- b) la force contre-électromotrice de self induction et, par là, la différence de potentiel aux bornes de l'interrupteur augmente.

Cette force contre-électromotrice de self s'exprime en valeur absolue par $\mathcal{L} \frac{\Delta i}{\Delta t}$ où

\mathcal{L} = coefficient de self du circuit;

Δi = variation du courant i ;

Δt = temps pendant lequel s'effectue la variation de courant.

La différence de potentiel aux bornes de l'interrupteur ou encore la "surtension à la coupure" comme on l'appelle, sera donc d'autant plus élevée que :

- a) \mathcal{L} est grand, c.-à-d. qu'on coupe des circuits fortement inductifs;
- b) i est grand, c.-à-d. qu'on coupe des courants importants;
- c) Δt est faible, c.-à-d. qu'on coupe vite.

Au moment où ils viennent de se séparer, les contacts de l'interrupteur sont encore très voisins. Il suffit d'une faible différence de potentiel aux bornes de cet interrupteur pour faire jaillir une décharge à travers l'air qui les sépare. Si cette différence de potentiel est suffisante, et ce sera le cas la plupart du temps, un arc s'amorce entre les 2 contacts. Ainsi donc, la coupure du courant n'accompagne donc pas nécessairement la séparation des contacts. Pour l'obtenir, il faut, en outre, éteindre l'arc qui suit. Le procédé le plus simple et le plus utilisé consiste à l'allonger.

Le problème le plus important lors de la coupure est celui de l'arc, vu la faible différence de potentiel qui suffit à son entretien et la dissipation d'énergie importante dont il est le siège.

Cette dissipation d'énergie joue un rôle capital dans la destruction des contacts, par suite du dégagement de chaleur qui en résulte.

On la réduit au minimum, sauf raisons spéciales, en coupant aussi rapidement que possible. Certes, on augmente la surtension en fin de coupure, mais il y a une certaine compensation dans le fait que les contacts s'écartent plus vite.

Il convient également de choisir pour constituer les contacts un matériau aussi bon conducteur de la chaleur que possible. On leur donnera des dimensions qui leur assurent une capacité calorifique suffisante et on leur assurera un refroidissement énergétique.

23.05. Coupure en courant continu.

Le problème de la coupure est différent en courant continu et en courant alternatif.

Le courant est, en effet, constant en courant continu alors qu'il est variable en courant alternatif et passe notamment par zéro. On profite du passage par zéro pour favoriser la coupure.

Nous n'envisagerons que le cas de la coupure en courant continu qui seul nous intéresse en traction électrique courant continu.

Coupure limitée.

La puissance de coupure d'un interrupteur n'est pas illimitée : quand l'arc est traversé par un courant trop intense ou dure trop longtemps, la chaleur dégagée détériore les contacts au point de compromettre tout bon fonctionnement de l'appareil.

Pour ces deux raisons : un interrupteur déterminé est généralement prévu pour couper au plus un courant donné sous une tension donnée.

De plus, le type de circuit qu'on coupe est également spécifié : charge ohmique, charge inductive, charge fortement inductive.

La différence de potentiel aux bornes de l'arc atteint sa plus grande valeur au moment où celui-ci s'éteint; elle correspond à un courant nul.

Tous les moyens qui accélèrent l'extinction de l'arc : augmentation de la vitesse de séparation des contacts, nature de ceux-ci, refroidissement, etc... concourent à accroître cette surtension en accélérant la diminution du courant.

Coupure multiple.

Nous avons vu qu'il fallait allonger l'arc lors de la coupure en vue de favoriser celle-ci.

Si on dispose d'un interrupteur à n coupures, cet interrupteur se comporte sensiblement comme un interrupteur simple dans lequel la longueur d'arc serait $n \times l$, l étant la longueur d'arc correspondant à une coupure. On voit immédiatement l'intérêt des interrupteurs à coupure multiple : ils permettent de couper une puissance de coupure importante, ce qu'un seul contacteur ordinaire ne pourrait faire sans prendre des dimensions exagérées.

n contacteurs en série réalisent exactement le même effet qu'un contacteur à n ruptures pour autant, bien entendu, que ces contacteurs en série s'ouvrent simultanément. Dans le cas contraire, on risquerait de reporter toute la charge sur les contacteurs qui s'ouvrent en premier lieu alors qu'ils ne sont pas prévus pour cela, d'où les risques de coup de feu.

Dispositifs pour favoriser le soufflage de l'arc. Cornes de soufflage.

Un arc crée autour de lui-même un courant d'air chaud ascendant qui tend à l'entraîner. On peut facilement vérifier qu'un arc entre contacts horizontaux s'accroche à la partie supérieure de ceux-ci et s'incurve vers le haut. Il en résulte que sa longueur est supérieure à la distance qui sépare les contacts. On peut exploiter systématiquement cette propriété pour allonger l'arc sans exagérer la course de l'interrupteur, en munissant les contacts de cornes divergentes.

Soufflage magnétique.

Comme tout conducteur parcouru par un courant électrique, un arc soumis à l'influence d'un champ magnétique subit l'action d'une force qui tend à l'entraîner; la direction de cette force est donnée par la règle des 3 doigts de la main gauche (fig. 1709) : on dit que l'arc est soufflé; le soufflage magnétique est assuré par une bobine comportant quelques spires de fortes sections parcourues par le courant même qui traverse l'interrupteur.

Pour que l'action du soufflage magnétique ne soit pas contrariée mais aidée par celle du courant d'air chaud, on dispose généralement les choses de façon que l'arc soit rejeté vers le haut. Les cornes de soufflage dirigent l'arc et l'épanouissent de telle sorte qu'il éclate vers les extrémités des cornes; c'est là que se produisent les granules de métal en fusion dus à la rupture.

Pour obtenir de grandes valeurs de champ magnétique sans exagérer les ampères-tours-nécessaires, il faut faire usage d'un circuit magnétique comportant un entrefer dans lequel sont placés les contacts (fig. 2302).

Comme l'arc pourrait s'accrocher aux pièces polaires, on l'enferme dans une chambre étroite, ouverte soit vers le haut et le bas, soit latéralement, en matière réfractaire et isolante; les parois de cette chambre sont glissées entre les pièces polaires et les doigts de contact de l'appareil. (boîte de soufflage).

Résistances auxiliaires de coupure.

Si, pendant le fonctionnement de l'interrupteur, on offre au courant, que la force contre-électromotrice de self tend à maintenir, un chemin moins résistant que l'arc (et dénué de self), on ralentit la diminution de ce courant; d'où limitation de la surtension finale.

Par contre, on facilite la diminution du courant dans l'arc et l'extinction de l'arc.

6.

On peut y arriver en shuntant l'interrupteur par une résistance (fig. 23.05).

Cette résistance sert surtout à améliorer les conditions de coupure en cas de court-circuit.

Lors de l'ouverture de l'interrupteur, le courant trouve un circuit fermé pour continuer à circuler avec une valeur moindre vu qu'une résistance a été insérée dans le circuit : on coupe par paliers. Il faut alors un autre interrupteur pour réaliser la coupure complète, coupure qui se fait sous un courant moindre, donc dans des conditions plus faciles.

QUESTIONNAIRE.

- 21.03 Quelles sont les manières pour shunter les moteurs de traction ?
A la S.N.C.B., quelle est la méthode utilisée ?
- 21.03 Qu'entendez-vous par le degré de shuntage ?
- 22.02 Citez les types de contacteurs HT qu'il faut prévoir dans le circuit de traction.
- 22.03 De quoi se composent les circuits auxiliaires d'une automotrice ?
- 22.03 De quoi se composent les circuits aux. d'une locomotive ?
22.04 Donnez un schéma de principe, des appareils sous tension quand le pantographe d'une locomotive vient en contact avec la caténaire.
- 22.07 Comment peut-on éliminer un pantographe ?
- 22.08 A quoi sert le parasurtension ?
- 23.01 A quoi sert le parafoudre ?
- 23.03 Quels appareils sont isolés après ouverture du sectionneur SA ?
- 23.05 Quel est le rôle du sectionneur ST ?

25.01. Résistance de démarrage - Schéma.

La disposition de la résistance de démarrage et son processus d'élimination peuvent différer d'un équipement à l'autre; la disposition de la résistance de démarrage est d'ailleurs influencée, par le choix du type de transition adopté pour passer du couplage série au couplage série parallèle.

La disposition représentée aux fig. 22.01 et 22.02 est la plus logique et c'est celle qui actuellement est appliquée de préférence sur le matériel de la S.N.C.B., en relation avec la transition par la méthode du pont.

Dans cette disposition, chaque groupe de 2 moteurs de traction est équipé de son rhéostat propre, les rhéostats des 2 groupes de moteurs étant égaux; chaque rhéostat est divisé en un même nombre de tronçons identiques qui sont éliminés alternativement dans une branche puis dans l'autre au fur et à mesure de l'accélération du véhicule; dans le couplage série parallèle, cette façon de faire provoque un déséquilibre dans l'une des branches de moteur, mais qui est sans effet.

A noter que dans cette méthode également, chaque tronçon de résistance est en service une seule fois en série et une seule fois en série parallèle.

25.02. Dimensionnement de la résistance de démarrage.

Le dimensionnement de la résistance est conditionné par :

- 1) La valeur ohmique;
- 2) L'énergie dissipée dans la résistance à chaque démarrage;
- 3) La fréquence de démarrage.

1) Valeur ohmique.

Au premier cran de démarrage, l'effort doit être tel que :

- La limite d'adhérence ne soit pas dépassée;
- Le courant maximum des moteurs ne soit pas dépassé.

Ces 2 conditions permettent de déterminer la valeur minimum de la résistance, valeur en-dessous de laquelle il n'est pas permis de descendre.

2) Energie dissipée dans les résistances à chaque démarrage.

Cette énergie est proportionnelle au carré du courant moyen qui parcourt les résistances et au temps de mise en service de la résistance.

a) Courant moyen.

Comme il a été vu précédemment, le courant moyen de démarrage est fonction :

- Soit du courant maximum admissible dans le moteur;
- Soit de l'effort de démarrage lorsque c'est la limite d'adhérence qui conditionne cet effort;
- Du nombre de crans de démarrage.

b) Temps de mise en service.

Le temps de mise en service de la résistance de démarrage est fonction :

- de l'accélération de l'automotrice qui dépend :
 - de l'effort moteur moyen de démarrage;
 - de l'effort résistant fonction de la conception même de l'automotrice et du profil de la ligne;
 - du poids de l'automotrice;
- de la vitesse à laquelle toute la résistance de démarrage est éliminée; ceci est lié à la vitesse maximum de l'automotrice, donc au rapport d'engrenage.

3) Fréquence des démarrages.

La fréquence des démarrages joue également son rôle dans le dimensionnement des résistances.

En effet (fig. 15.01), si les démarrages sont fréquents, la résistance n'a pas le temps de se refroidir jusqu'à la température ambiante t_{amb} .; on reprend donc un démarrage avec des résistances qui sont à des températures $t_1, t_2 > t_{amb}$; il en résulte que la température maximum atteinte par la résistance croît à chaque démarrage.

Pour le dimensionnement des résistances de démarrage, on déterminera quel est le parcours le plus dur à effectuer par l'automotrice (à la fois au point de vue horaire et profil). On dimensionnera alors la résistance de manière que la température maximum atteinte par les résistances au cours du cycle ne dépasse pas celle autorisée par le constructeur.

Remarque importante.

Les résistances de démarrage sont largement dimensionnées; en effet, quoiqu'elles soient calculées de façon à ne pas dépasser en service normal une température t_{max} indiquée par les constructeurs, elles peuvent supporter momentanément des températures dépassant largement t_{max} . (presque $2 \times t_{max}$).

C'est ce qui explique qu'en cas de marche avec certains moteurs éliminés, on puisse encore se tirer d'affaire, quoique, dans ce cas, l'accélération ait diminué et que le temps de mise en service des résistances soit sensiblement augmenté.

Toutefois, dans le cas des lignes accidentées, certaines restrictions doivent être apportées à l'horaire du train (suppression de certains arrêts) en vue de ne pas surcharger les résistances de démarrage.

25.03. Ventilation de la résistance de démarrage.

La quantité de chaleur dissipée dans la résistance pendant la phase de démarrage doit être évacuée autant que possible, sous peine de voir augmenter dangereusement la température des éléments de la résistance.

Dans une automotrice, la résistance de démarrage placée sous le châssis ne reçoit que la ventilation naturelle due au mouvement du véhicule. Les démarrages normaux sont très brefs : la quantité de chaleur à dissiper est relativement faible et la faible capacité calorifique de la résistance et les pertes par convection dues à la ventilation naturelle suffisent largement pour maintenir la température des éléments de la résistance en-dessous des limites admissibles.

Dans le cas de démarrages anormaux (patinages ou moteurs éliminés) qui sont exceptionnels, on peut accepter que le métal soit porté momentanément au rouge et même à l'incandescence : de ce fait, le rayonnement intervient pour accroître considérablement la dissipation calorifique.

Il n'est évidemment pas recommandable de porter à l'incandescence les éléments de la résistance, car cela abrège de façon sensible leur durée de vie.

Dans une locomotive par contre, les démarrages anormaux, difficiles n'ont rien d'exceptionnel; une locomotive étant utilisée à sa limite d'adhérence et pouvant être amenée à remorquer de fortes charges, il arrive qu'en cas de remorque sur un parcours difficile, on patine de façon répétée, ce qui allonge la durée du démarrage : la résistance de démarrage doit donc pouvoir faire face à tout instant à des démarrages de longue durée : il faut donc adopter des solutions différentes de celles retenues pour les automotrices.

Le rhéostat classique des locomotives (cas des locomotives type 101) est caractérisé par une grande masse de métal; la chaleur qui naît pendant la phase de démarrage y est en grande partie emmagasinée; elle s'évacue ensuite pendant les longues périodes séparant 2 démarrages.

Mais la capacité de ce type de rhéostat est limitée quoi qu'on fasse : en cas de démarrage difficile, une fois dépassée sa capacité calorifique, la température des éléments de la résistance commence à s'élever anormalement.

On peut augmenter la puissance d'un tel rhéostat en substituant à la ventilation naturelle une ventilation artificielle.

La solution pour une locomotive est d'avoir un rhéostat qui puisse tenir indéfiniment le courant de démarrage : pour cela, il ne faut plus compter sur la capacité calorifique du rhéostat; il faut concevoir non plus un rhéostat massif mais un rhéostat à très grande surface d'échange, combinée avec une ventilation énergique de façon que, à tout instant, la quantité de chaleur qui naît au sein du rhéostat soit complètement évacuée et qu'il ne reste ainsi rien pour augmenter la température des éléments de la résistance.

Cette disposition a été appliquée à la satisfaction générale sur toutes les locomotives autre que t 101 et t 121 où le système est en outre perfectionné à l'extrême. En effet, les moteurs des ventilateurs des résistances sont des moteurs basse tension alimentés comme l'indique la fig. 15.01. On constate que ces moteurs MV connectés en parallèle entre eux sont insérés entre le dernier moteur de traction et la masse; chaque moteur MV est donc parcouru par une fraction i de courant I qui parcourt les moteurs de traction et la résistance de démarrage.

Si le courant I augmente, la quantité de chaleur dissipée dans les résistances augmente, mais le courant i parcourant le moteur MV augmente également, le couple du moteur augmente et le débit du ventilateur augmente. Il y a donc une régulation en ce sens qu'à toute augmentation des calories à évacuer, il correspond une augmentation de débit. Une fois le démarrage terminé, le contacteur 1 court-circuite les moteurs des ventilateurs qui s'arrêtent.

Il est à remarquer que cette ventilation n'absorbe pas d'énergie utile : en l'absence des moteurs MV, la tension qui existe à leurs bornes aurait de toute façon dû être absorbée par un tronçon supplémentaire de la résistance de démarrage.

26e leçon.

26.01. Transition.

Lors des démarrages, nous avons vu qu'il y avait intérêt à démarrer d'abord les moteurs en série, puis de les coupler en série parallèle.

Le passage d'un couplage de moteur à un autre s'appelle la transition.

Deux méthodes sont couramment utilisées pour le changement de couplage :

1° Méthode par court-circuit et mise hors circuit d'un groupe de moteur.

Cette méthode est illustrée à la fig. 26.01 pour le cas de 4 moteurs.

Elle consiste en ceci :

Les 4 moteurs étant en série, toutes résistances éliminées, on court-circuite un groupe de 2 moteurs, puis on déconnecte le groupe court-circuité.

On marche donc momentanément avec 2 moteurs seulement en service, ceux-ci étant connectés en série avec une résistance.

Dans la dernière phase, le groupe de moteurs primitivement éliminé est remis en service.

On a alors 4 moteurs couplés 2 à 2 en série parallèle avec une résistance de démarrage en série avec chaque groupe.

Ce qui a été décrit plus haut constitue le principe de la méthode; on peut évidemment modifier à souhait la façon de la réaliser mais dans tous les cas, on en revient aux idées de base décrites plus haut. Entre autres, au lieu de court-circuiter un groupe de moteur, on peut brancher une résistance en parallèle à ses boîtes. Cette méthode présente l'avantage d'être très simple et de ne pas exiger de contacteurs supplémentaires. Par contre, elle présente l'inconvénient d'occasionner des chocs. En effet, pendant le temps relativement court que dure la transition, on enregistre des variations d'efforts très sensibles.

Couplage fin série : les moteurs 1 et 2 donnaient un effort égal à celui des moteurs 3 et 4.

1er cran transition : l'effort des moteurs 1 et 2 s'annule.

2.

Dans le cas où une résistance serait branchée aux bornes du groupe 1-2, l'effort de ces moteurs ne s'annulerait pas mais diminuerait sensiblement d'après la valeur de la résistance.

2e cran transition : l'effort des moteurs 1 et 2 est nul.

1er cran série parallèle : les efforts des moteurs 1 et 2 et des moteurs 3 et 4 sont sensiblement égaux. Leur valeur est pratiquement la même que celle atteinte lors du couplage fin série.

L'influence de ces variations d'effort peut être diminuée par un choix judicieux des résistances et une répartition adéquate des moteurs dans les différents bogies. Il n'en reste pas moins vrai que cette méthode engendrera toujours des chocs, quoi qu'on fasse.

2° Méthode du Pont.

Cette méthode est illustrée à la fig. 16.02 pour le cas de 4 moteurs.

Voici en quoi elle consiste.

Les moteurs étant en série, toutes résistances éliminées, on shunte chacun des groupes de 2 moteurs par une résistance.

De la sorte, il s'établit 2 circuits (fig. 16.03) :

- L'un des circuits (traits pleins) est constitué par les 4 moteurs en série et parcouru par le courant i 1;
- L'autre circuit (traits pointillés) est constitué par la mise en série des résistances et est parcouru par le courant i 2.

Comme l'indiquent les flèches, la connexion centrale A B appelée le pont, est parcourue par 2 courants de signes contraires i 1 et i 2. C'est donc finalement le courant i 1 - i 2 qui parcourt la branche centrale.

Dans la 3e phase, on supprime la connexion centrale A B ; les 4 moteurs sont alors couplés en série parallèle avec une résistance de démarrage dans chacun des groupes.

Les résistances de shuntage des moteurs sont calculées de manière que la différence de courant i 1 - i 2, qui parcourt la branche centrale, soit voisine de zéro, autrement dit que les courants i 1 et i 2 soient sensiblement égaux.

Ainsi, lors du passage de fin série au premier cran série parallèle, la variation de courant dans les moteurs est sensiblement nulle. De ce fait, il n'y a pas de variation de couple, donc pas de choc.

De plus, la branche AB étant parcourue par un courant sensiblement nul, le contacteur qui ouvre cette branche, le contacteur de pont, ne souffre pas lors de son ouverture.

Il y a lieu de remarquer toutefois que les résistances de shuntage de moteur étant en série sous 3 000 volts, il en résulte un courant i 2 bien déterminé.

Par contre, les 4 moteurs étant en série sous 3 000 volts, le courant i 1, qui les parcourt, est variable suivant la vitesse des moteurs au moment du passage à fin série.

Il en résulte que le courant parcourant le pont n'est nul que pour une valeur bien déterminée du courant i 1 qui parcourt les moteurs.

On dit alors que le pont est équilibré.

Pour toutes les autres valeurs, le pont est déséquilibré, i 1 et i 2 étant différents.

Les résistances sont généralement calculées de façon que la plus grande différence de courant i 1 - i 2 soit réduite au minimum.

Quoi qu'il en soit, la méthode du pont est nettement la meilleure pour le passage de la transition; elle ne présente que l'inconvénient d'exiger un ou deux contacteurs supplémentaires : le contacteur de pont.

26.02. Commande d'élimination des résistances de démarrage.

Nous avons déjà vu, que les crans économiques fin série et fin série parallèle n'étaient atteints qu'après une élimination progressive des résistances de démarrage.

Cette élimination peut se faire soit manuellement, soit automatiquement.

Commande manuelle.

C'est le conducteur qui choisit lui-même, à son gré, le moment où il va passer d'un cran de démarrage au suivant; il choisit donc lui-même le courant de reprise; à cet effet, il consulte le ou les ampèremètres des moteurs de traction.

Le nombre de crans étant caractéristique de la locomotive, le conducteur ne peut rien y changer. Par contre, il peut changer à son gré l'effort au démarrage en modifiant le courant de reprise.

De plus, il peut faire varier le courant de reprise d'un cran au suivant et s'attarder sur un cran déterminé.

Commande automatique.

Le conducteur n'a aucune action sur le démarrage; il choisit uniquement la position finale sur laquelle il s'arrêtera : fin série plein champ ou shunté, fin série parallèle plein champ ou shunté.

Le passage des crans se fait automatiquement sans aucune action du conducteur sous un courant de reprise bien déterminé.

L'appareil qui règle le passage des crans est le "relais d'accélération".

Ce relais est réglé pour commander le circuit permettant le passage des crans pour la valeur du courant de reprise qu'on s'est fixée ou qui est réglable par le conducteur (locomotive).

26.03. Comparaison des 2 méthodes de commande.

Cas des automotrices.

La commande automatique est de loin la plus intéressante; elle s'est largement répandue; toutes les automotrices de la S.N.C.B. en sont équipées.

Cette commande présente l'avantage de donner les démarrages les plus rationnels puisque la valeur du courant de reprise, donc le réglage du relais d'accélération, a été calculé après une étude du problème; on ne laisse rien au gré du conducteur. De plus, cette valeur ayant été fixée une fois pour toutes, le passage d'un cran au suivant se fera toujours pour la même valeur du courant de reprise. Les démarrages se feront donc toujours dans les mêmes conditions. De plus, la durée de marche sur un cran déterminé aura été étudiée de façon à éviter tout échauffement excessif des résistances de démarrage.

Dans le cas des automotrices, on peut fixer une fois pour toutes le courant de reprise, donc en fin de compte l'effort de démarrage parce que la charge est faible vis-à-vis de la tare et que par conséquent la charge remorquée est sensiblement constante.

Exemple : Une automotrice double type 1939 a une masse de 110 t
110 t. La masse complète : voyageurs, bagages, eau, sable,
outillage s'élève à 18 tonnes,

soit $\frac{100 \times 18}{110} = 16,5 \%$ de la tare.

Le masse varie donc entre 110 et
128 t seulement, soit de 16,5 % au maximum.

Cas des locomotives.

Avec locomotives, le problème est complètement différent : la charge remorquée est essentiellement variable; la locomotive peut ne remorquer qu'elle-même (locomotive à vide); elle peut, par contre, remorquer des trains de marchandises très lourds. Entre ces 2 limites extrêmes, on peut trouver toutes les charges intermédiaires.

Il importe donc que le conducteur puisse agir à son gré sur l'effort moteur de sa locomotive suivant la charge remorquée.

De plus, dans une locomotive, on prend des rapports "Effort par moteur/charge par essieu" beaucoup plus élevés que dans une automotrice, ce qui fait que l'on est beaucoup plus près de la limite d'adhérence et qu'on risque beaucoup plus facilement de dépasser la limite d'adhérence. L'adhérence variant fortement avec les conditions atmosphériques, il faut pouvoir doser l'effort moteur de façon à rester en-dessous de la limite d'adhérence quelles que soient les conditions atmosphériques.

Les considérations développées plus haut expliquent que la commande manuelle se soit largement répandue dans le passé. Cependant, depuis 1950, la commande automatique s'est largement développée.

Toutes les locomotives de la S.N.C.B. sont équipées de la commande automatique.

La commande automatique doit cependant être perfectionnée par rapport à ce qui existe sur les automotrices. En effet, vu la nécessité d'avoir un effort de démarrage ajustable suivant la charge remorquée et les conditions atmosphériques, le conducteur doit pouvoir régler à distance le courant de reprise, donc le relais d'accélération.

A cet effet, on peut disposer :

soit de plusieurs relais d'accélération réglés d'avance à des valeurs différentes et d'un commutateur que le conducteur manoeuvre pour utiliser l'un ou l'autre relais selon ses besoins, soit d'un seul relais dont le conducteur fait varier à distance la valeur de réglage (toutes les locomotives)

Cette seconde méthode est la meilleure; elle permet, comme en commande manuelle, de démarrer avec n'importe quel effort; par contre, elle présente l'avantage de libérer le conducteur des sujétions de la commande manuelle.

Toutefois, dans certains cas spéciaux, il est nécessaire d'avoir une commande cran par cran. Pour cette raison, la meilleure solution pour les locomotives est la commande automatique avec relais d'accélération réglable d'une façon continue et avec possibilité de commande cran par cran.

27e leçon.

27.01. Processus d'affaiblissement du champ des moteurs de traction.

Nous avons déjà montré l'intérêt de l'affaiblissement du champ des moteurs de traction et le mode d'affaiblissement.

Nous avons vu que les 2 courbes économiques donnant la vitesse en fonction du courant pour plein champ et champ affaibli sont évidemment différentes.

Comment va-t-on passer de l'une à l'autre ?

La solution qui vient immédiatement à l'esprit est de procéder comme pour l'élimination des résistances de démarrage. Pour éliminer celles-ci, on a vu qu'un relais d'accélération réglé à une valeur de courant appelée courant de reprise "I reprise" commandait automatiquement l'élimination d'un tronçon de résistance lorsque le courant tombait à la valeur "I reprise".

On pourrait se servir du même relais pour passer sur la courbe avec champ affaibli quand le courant tombe à "I reprise", l'affaiblissement du champ ayant été préalablement commandé.

Malheureusement, quand on trace les courbes plein champ et champ affaibli (avec les degrés de shuntage couramment utilisés en traction), on constate que ces 2 courbes sont assez distantes l'une de l'autre et que le courant I obtenu au passage du cran, dépasse largement le courant maximum autorisé I_{max} . (fig. 27.01)

On ne peut donc utiliser cette méthode telle quelle; on peut la perfectionner et la rendre satisfaisante en créant des crans intermédiaires (fig. 27.02).

Comme on le voit, on atteint ainsi la courbe champ affaibli après passage des crans intermédiaires sous la commande des relais d'accélération et sans dépasser à aucun moment le courant maximum autorisé.

Ces crans intermédiaires sont obtenus en réintercalant temporairement un tronçon de la résistance de démarrage en même temps qu'on affaiblit le champ, résistance que l'on élimine ensuite par paliers.

Cette méthode présente l'avantage de ne pas exiger de matériel supplémentaire pour le passage des crans d'affaiblissement du champ; par contre, le fait de réintroduire des résistances de démarrages lors de l'affaiblissement du champ alourdit le schéma d'asservissement basse tension.

2. Une seconde méthode consiste à ne pas prévoir de crans intermédiaires, mais d'utiliser un relais supplémentaire "le relais de shuntage" comme on l'appelle, réglé à une valeur "I shuntage" inférieure à "I reprise" (fig. 27.03).

Lors de la commande de l'affaiblissement du champ, le courant descend au-delà de "I reprise" jusqu'à atteindre la valeur de réglage "I shuntage" du relais de shuntage.

A ce moment, l'affaiblissement du champ s'effectue et le courant maximum obtenu ne dépasse pas la valeur du courant maximum autorisé I max.

Cette dernière méthode est utilisée sur trois types d'automotrices; sur tout le reste du matériel (automotrices et locomotives), c'est la première solution qui est d'application (le problème ne se pose pas pour les locomotives équipées d'une commande manuelle).

27.02. Elimination des moteurs de traction.

En cas d'avarie à un moteur de traction (masse, court-circuit, etc....), il est logique de prévoir l'élimination de ce moteur; ceci permet de continuer avec les moteurs sains et évite ainsi une détresse.

Les équipements électriques des automotrices et locomotives électriques de la SNCB sont tous composés de 4 moteurs de traction.

Faut-il permettre l'élimination d'un quelconque des 4 moteurs de traction ou éliminer les moteurs par groupe de 2, vu que les moteurs sont toujours liés électriquement par groupe de 2 (puisque 3000 V à la ligne et 1500 V comme tension nominale du moteur) ?

L'élimination par moteur individuel conduit à un appareil d'élimination, un éliminateur de moteur de traction comme on l'appelle, compliqué puisqu'il doit autoriser plusieurs combinaisons; par contre, cette méthode a le privilège de conserver 3 moteurs en service et par là de réduire l'effort de démarrage à 75 % seulement de sa valeur normale.

L'élimination par groupes de 2 moteurs conduit à un appareil d'élimination moins compliqué puisqu'il n'y a que 2 combinaisons; par contre, on réduit de 50 % l'effort de démarrage.

La solution d'élimination par groupe de 2 moteurs est généralisée sur les automotrices; en effet, dans une automotrice qui n'est amenée qu'à se remorquer elle-même, sans plus, on installe une très grande puissance dans le but d'assurer un effort de démarrage important et par là une grande accélération; dans ces conditions, la réduction de moitié de la puissance par élimination d'un groupe de 2 moteurs permet encore de se tirer d'affaire (et c'est la seule chose qu'on demande à ce moment) moyennant bien

entendu des restrictions de circulation éventuelles. En outre, dans beaucoup de cas, plusieurs automotrices sont accouplées, ce qui minimise encore l'effet de l'élimination de 2 moteurs.

La solution d'élimination par moteur individuel est généralisée sur les locomotives; une locomotive étant appelée à remorquer des charges très lourdes, il peut arriver qu'avec 75 % de l'effort de démarrage on puisse s'en tirer alors qu'on n'y parviendrait pas avec 50 %: on prend donc son parti de la complication de l'appareil d'élimination et on adopte la solution d'élimination par moteur individuel.

Du point de vue schéma, certaines précautions doivent être prises:

- L'éliminateur des moteurs de traction n'étant pas un appareil de coupure doit être manoeuvré à vide et hors tension. Ce sera un appareil manuel (et non automatique) dont la manoeuvre exige l'arrêt préalable du véhicule et l'abaissement préalable des pantographes, ce qui donne la certitude que l'appareil sera manoeuvré à vide et hors tension;
- Le schéma avec moteurs éliminés doit être tel que les relais de protection et d'accélération restent en service;
- Dans la méthode d'élimination par moteur individuel, il faut:

- Empêcher l'élimination de plus de 2 moteurs. En effet, si l'on pouvait éliminer 3 moteurs, le moteur restant serait soumis à 3000 V alors que sa tension nominale est de 1500 V.

Les éliminateurs, dont il sera question plus loin, montreront comment on empêché l'élimination de plus de 2 moteurs.

- Empêcher le fonctionnement en couplage série parallèle ou le rendre inoffensif.

En effet, avec 1 moteur éliminé et 3 moteurs en service, si le couplage série parallèle était normalement autorisé, lors du passage à ce couplage, l'un des moteurs serait soumis à 3000 V alors que sa tension nominale est de 1500 V.

Pour éviter cela, on prévoit dans le circuit d'asservissement une disposition qui empêche la progression en couplage série parallèle dès qu'un moteur est éliminé et cela, quelle que soit la position du manipulateur.

4.

La fig. 27.04 donne la disposition adoptée en principe sur toutes les automotrices lors de l'élimination d'un groupe de moteurs.

On remarquera que l'un au moins des relais à maxima de protection (RMI dans le cas présent) est resté en circuit de même que le relais d'accélération Racc. qui continue à commander le démarrage automatique.

Dans le couplage série, le contacteur S est seul fermé; à la transition, le contacteur O est seul fermé; dans le couplage série-parallèle, les contacteurs P et G sont seuls fermés : quoique réalisé différemment, le couplage des moteurs n'a pas varié, les bornes A et B de l'éliminateur n'étant pas reliées.

L'équipement automatique effectue donc tous les crans série et série-parallèle comme si tous les moteurs étaient en service mais, du point de vue H.T. les couplages série et série-parallèle sont exactement les mêmes et équivalent au couplage série parallèle normal (2 moteurs en série sous 3000 V).

Il est à remarquer que, lorsque dans un train de plusieurs automotrices accouplées, un groupe de moteurs est éliminé sur une des automotrices, il est dangereux de rester avec le manipulateur sur la position série.

En effet, supposons que:

- La vitesse atteinte par l'automotrice à la fin du couplage série, toutes résistances éliminées soit de 25 km/h;
- La vitesse atteinte par l'automotrice à la fin du couplage série-parallèle toutes résistances éliminées soit de 50 km/h;

Si, par exemple, on commande le couplage série et qu'on roule à 40 km/h par exemple:

- Sur les automotrices dont tous les moteurs sont en service, les résistances de démarrage sont éliminées depuis que l'automotrice a atteint la vitesse de 25 km/h;
- Sur l'automotrice dont un seul groupe de 2 moteurs est en service les résistances de démarrage sont toujours en service.

Elles ne seront éliminées complètement que lorsque l'automotrice atteindra la vitesse de 50 km/h.

Ces dernières résistances vont rester trop longtemps en service, chose pour laquelle elles ne sont pas conçues: on risque de les brûler.

La fig. 27.05 donne le schéma classique d'élimination d'un moteur de locomotive: le schéma d'asservissement est conçu de façon à ne jamais permettre la réalisation du couplage série-parallèle: donc les contacteurs CL2 et G ne peuvent jamais se fermer (en commande automatique).

27.03. Protection des circuits H.T.

L'ensemble des circuits de traction et auxiliaires H.T. d'une automotrice ou locomotive électrique requiert une protection efficace contre les courts-circuits en général et contre diverses autres choses particulières à la traction.

Les courts-circuits sont fréquents en traction par suite de la présence des moteurs de traction sous le châssis du véhicule, donc exposés aux intempéries et fortement sollicités du point de vue étanchéité, quoi qu'on fasse. En outre, pour les automotrices, la même situation existe pour l'appareillage.

Comme dans toute installation électrique, il y aura un appareil de coupure conditionné en conséquence (disjoncteur ou interrupteur général) et qui effectuera la coupure sous la commande des relais de protection.

Dans certains cas, précisés plus loin, un fusible H.T. réalise la protection et concentre donc en un seul appareil la fonction coupure et relais.

27.04. Disjoncteur ou interrupteur principal.

Sur les locomotives, la protection générale des circuits H.T., traction et auxiliaire, est assurée par un disjoncteur ultra rapide.

Seuls, les circuits du voltmètre H.T. et du relais de potentiel ne sont pas protégés par le DUR. La raison en est que le courant pris par ces circuits est très faible; s'ils étaient alimentés après le disjoncteur, il pourrait se faire que seuls ces circuits consomment du courant (les autres circuits auxiliaires H.T. et le circuit de traction ayant été coupés par leurs contacteurs respectifs); lors de la coupure normale du disjoncteur, celui-ci couperait donc un courant extrêmement faible: or, si d'une part un disjoncteur ne peut couper de façon satisfaisante qu'un courant maximum déterminé, il ne peut d'autre part couper de façon satisfaisante qu'un courant minimum donné: en deçà le soufflage magnétique devient insuffisant, l'arc se maintient et brûle les contacts.

6. Le parafoudre et le parasurtension sont également branchés en amont du disjoncteur. Le parafoudre doit écouler vers la terre les ondes d'origine atmosphérique et leur interdire l'accès du véhicule, tandis que le parasurtension perce à la masse en cas de mise sous tension accidentelle de 25 KV ou 15 KV.

Sur les automotrices, un interrupteur général ou rupteur, formé d'un ensemble de plusieurs contacteurs, assure la protection du circuit de traction seulement.

Pourquoi cette différence entre équipement d'une automotrice et de locomotive ?

Le disjoncteur constitue un appareil très encombrant qu'il serait malaisé de disposer sur une automotrice, celle-ci étant réservée par priorité au transport de voyageurs ce qui n'est pas le cas de la locomotive.

En outre, le prix élevé du disjoncteur ne justifie son emploi que pour la protection d'un équipement de prix proportionnellement élevé.

Ces 2 raisons font que le disjoncteur, à la S.N.C.B., n'est d'application que sur les locomotives et non sur les automotrices.

27.05. Fusible général H.T.

Les automotrices de la S.N.C.B. sont équipées d'un fusible général H.T. qui assure la protection depuis l'endroit où il est placé jusqu'aux différentes protections divisionnaires (relais à maxima et fusibles divisionnaires H.T.).

Sur les locomotives, cet appareil n'existe pas: le disjoncteur occupe dans le schéma, à peu de choses près, le même emplacement que le fusible général donc les protections assurées par le fusible général de l'automotrice, le sont par le disjoncteur de la locomotive.

A première vue, il semble que l'on aurait pu se passer du fusible général H.T. et compter sur les disjoncteurs de sous-station pour assurer la protection contre les défauts survenant en amont des protections divisionnaires; il est à remarquer toutefois qu'entre l'automotrice et la sous-station, il peut y avoir une distance assez grande surtout si, comme cela peut arriver, une sous-station était hors service.

Dans ces conditions, la résistance de la ligne caténaire et du circuit de retour intervient et le courant qui s'établit peut atteindre une valeur inférieure à la valeur de déclenchement des disjoncteurs des sous-stations en service, nonobstant le fait qu'il y a un défaut sur une automotrice: le fusible général H.T. intervient dans ce cas et, par sa fusion, il isole le court-circuit de la ligne et évite de brûler la ligne caténaire.

QUESTIONNAIRE.

- 25.01 Faites le schéma de principe d'un circuit de traction qui est appliquée sur la majorité du matériel.
- 25.03 Comment réalise-t-on la ventilation des résistances de démarrage ?
- 26.01 Comment s'appelle le passage d'un couplage de moteur à un autre ?
- 26.01 Expliquez la méthode du pont par un schéma de principe.
- 26.01 Expliquez la méthode par mise hors circuit d'un groupe moteur par un schéma de principe.
- 26.02 Comment s'appelle l'appareil qui règle le passage des crans de démarrage ? Quel est le nom caractéristique du courant de réglage de cet appareil ?
- 26.02 De quelles manières est commandée l'élimination des résistances de démarrage ?
- 27.02 Quelle est la différence dans l'élimination des moteurs de traction entre automotrices et locomotives ? Pourquoi ?
- 27.02 Pourquoi est-il interdit de rester avec le manipulateur sur la position série lorsqu'un groupe moteurs de traction est éliminé à un train composé de plusieurs automotrices ?
- 27.04 Quels sont les circuits non protégés par le DUR ? Pourquoi ?
- 27.05 Quel est le rôle du fusible général HT ?

29e leçon.

29.01. Relais à maxima.

Sur les automotrices comme sur les locomotives, chaque groupe de 2 moteurs de traction est protégé par un relais à maxima qui mesure le courant parcourant les groupes de moteurs et provoque le déclenchement du rupteur ou du disjoncteur au cas où ce courant dépasse la valeur autorisée.

Sur le matériel effectuant la transition par la méthode du pont, chaque relais à maxima protège également la branche de rhéostat afférente au groupe de moteur correspondant (fig. 29.01).

Sur les automotrices qui n'effectuent pas la transition par la méthode du pont, un 3e relais à maxima appelé relais à maxima général RMG (fig. 29.02) assure la protection du rhéostat.

Sur les locomotives, ce 3e relais n'est pas nécessaire, attendu que le disjoncteur possède un déclenchement par surcharge directe à côté du déclenchement indirect par relais de protection (le rupteur d'automotrice n'a pas de déclenchement direct).

Sur les locomotives, existe un relais à maxima de chauffage du train : c'est la locomotive en effet qui alimente le chauffage électrique de toutes les voitures du train.

Ce relais à maxima protège tout ce qui se trouve en amont des protections divisionnaires des voitures (contacteurs, câbles, coupleur H.T. de chauffage entre voitures, etc...) et en cas de déclenchement provoque l'ouverture du disjoncteur.

29.02. Fusibles divisionnaires H.T.

Les circuits auxiliaires H.T. de l'automotrice : groupe moteur compresseur ou groupe moteur alternateur et chauffage, sont protégés par des fusibles divisionnaires H.T. : cela est indispensable, vu que le rupteur ne protège que le circuit de traction et qu'il n'est pas désirable d'assurer leur protection par le fusible général H.T. parce que, d'abord, il est d'intensité nominale beaucoup trop élevée et que, en cas de fusion, ce fusible général n'étant pas remplaçable par le conducteur, on serait en détresse.

Sur les locomotives, certains circuits auxiliaires H.T. sont protégés par des fusibles divisionnaires H.T.

Sur les locomotives polytension, les fusibles HT sont remplacés par des relais à maxima.

Les fusibles divisionnaires H.T. sont précédés d'une résistance de 1 à 2 ohms, appelée résistance de limitation. Le but de cette résistance est de limiter le courant de court-circuit et de soulager ainsi le fusible; en l'absence de cette résistance et en cas de court-circuit en aval du fusible, le courant peut théoriquement prendre la valeur infinie $\frac{3000 \text{ volts}}{0 \text{ ohm}}$ alors qu'avec une résistance de limitation de 1,5 ohm par exemple, le courant de court-circuit peut au maximum valoir : $\frac{3000 \text{ volts}}{1,5 \text{ ohm}} = 2000 \text{ Ampères.}$

29.03. Relais de potentiel ou relais tension nulle.

Lors d'une disparition ou d'une chute importante de la tension de la ligne de contact, l'automotrice ou la locomotive ralentit puisque l'effort moteur s'est annulé ou a été fortement réduit.

Il s'ensuit que la force contre-électromotrice des moteurs qui vaut, comme nous l'avons vu, $KN \Phi$ diminue vu que la vitesse N diminue.

Lors de la réapparition de la pleine tension de ligne, vu que la vitesse N a diminué, le courant I a augmenté.

Or ce courant peut atteindre des valeurs dangereuses sans pour cela atteindre la valeur de déclenchement des relais à maxima.

Afin d'éviter ces inconvénients, les automotrices et locomotives sont équipées d'un relais de potentiel encore appelé relais de tension nulle. Ce relais mesure la tension de ligne et déclenche le rupteur ou le disjoncteur, dès que cette tension descend en dessous d'un minimum.

Le réenclenchement du rupteur ou du disjoncteur n'est possible que pour autant que le système de démarrage soit revenu à sa position initiale; ceci oblige donc, après toute disparition ou chute brusque de la tension de ligne, de recommencer un démarrage complet, donc de réintercaler les résistances de démarrage et ainsi d'éviter tout courant dangereux.

29.04. Relais de pression (control switch).

Il n'est pas désirable de tractionner et de freiner simultanément.

En effet, si l'on freine, la vitesse N diminue et en conséquence le courant I augmente.

Ce courant n'atteint la valeur de déclenchement des relais à maxima qu'après plusieurs secondes (lorsque la vitesse N a suffisamment baissé).

Pour obtenir un déclenchement immédiat, au cas où par erreur le conducteur freine alors que son manipulateur est en position de traction et lors du fonctionnement du dispositif VA, du signal d'alarme, du dispositif d'arrêt automatique on a installé des relais de pression encore appelés "Control Switch".

Sur les automotrices, deux relais pneumatiques sont placés, l'un sur un cylindre de frein et l'autre sur la conduite du frein automatique. Sur les locomotives, un seul relais pneumatique se trouve sur la conduite du frein automatique.

Quand sur les automotrices, les moteurs sont alimentés pendant un serrage des freins l'un ou les deux relais pneumatiques coupent leurs contacts ce qui provoque l'ouverture de l'"interrupteur principal".

Sur les locomotives, le relais de pression ferme ses contacts quand la pression dans la conduite automatique diminue d'environ 1 bar.

La fermeture de ces contacts met sous tension la bobine commandant un relais auxiliaire, ce dernier ouvre des contacts qui ont pour effet de déclencher les contacteurs de démarrage, de couplage et de shuntage. L'effort de traction est coupé.

Les relais de Control-Switch jouent un double rôle, à côté de celui déjà mentionné, il empêche également le démarrage lorsque la conduite du frein automatique n'est pas remplie à la pression de régime (5 bar.)

Sur les locomotives un interrupteur basse tension sert à court-circuiter les contacts du relais en cas d'avarie.

Sur les automotrices un interrupteur basse tension sert à court-circuiter les contacts de l'un ou l'autre relais en cas d'avarie.

Sur les automotrices un SWC est branché sur un cylindre de frein parce que le frein de service normal est à commande électropneumatique. Il alimente les cylindres de frein sans créer de dépression dans la conduite du frein automatique.

30e leçon.

30.01. Relais différentiel.

Sur les locomotives, il est d'usage de compléter la protection par un relais différentiel. Ce relais provoque le déclenchement du disjoncteur en cas de masse sur les circuits de traction ou des services auxiliaires. Le schéma de principe du relais différentiel est représenté à la fig. 30.01 .

Pour la protection du circuit de traction, ce sont les 2 bobines LM-LN et GB-GA qui interviennent.

Ces bobines sont normalement parcourues par le même courant; en cas de masse sur le circuit de traction, tout ou partie du courant ne retourne pas par son retour normal TT: il en résulte un déséquilibre entre les courants parcourant les bobines LM-LN et GB-GA: cette différence commande le fonctionnement du relais.

Pour les circuits auxiliaires, le principe de fonctionnement est le même: ce sont alors les bobines UH-UL et IM-GA qui opèrent.

Le relais différentiel des circuits auxiliaires et de traction peut former deux relais séparés ou un relais unique.

La protection par relais différentiel pourrait aussi s'appliquer au circuit de traction des automotrices; sur les automotrices de la SNCB, elle a été réalisée sur les AM construites après 1962.

30.02. Relais de décel de patinage.

Le patinage d'un essieu étant susceptible de provoquer l'emballement et la destruction du moteur qui l'entraîne, il est courant de compléter la protection de la locomotive par des relais de décel de patinage.

Les dispositifs de décel de patinage traditionnels agissent par comparaison: ils comparent la vitesse des essieux ou toute grandeur qui leur est proportionnelle.

Ainsi, nous avons montré à l'article 21.01 qu'en cas de patinage, il y a déséquilibre dans la répartition des tensions aux bornes des moteurs, celle-ci étant proportionnelle à la vitesse des moteurs.

C'est sur la comparaison des tensions aux bornes des moteurs qu'est basé le principe des relais de décel de patinage des locomotives équipées d'un QDP (fig. 30.02).

2.

Ainsi, la tension U aux bornes du moteur M_1 fait circuler un courant dans la résistance r et la bobine du relais QDP.

Si la tension aux bornes du moteur M_2 est la même soit U , elle fait circuler le même courant dans r et la bobine QDP, mais en sens inverse. Cela étant, le courant total parcourant la bobine QDP est nul puisqu'il est la somme de deux courants égaux et de signe contraire.

Dès que la tension aux bornes des 2 moteurs est différente, ce qui se présente lors d'un patinage, les courants ne s'équilibrent plus et la bobine du relais QDP est parcourue par un courant d'autant plus élevé que les tensions des 2 moteurs sont différentes.

Ce courant permet l'enclenchement du relais dont les contacts commandent:

- l'allumage d'une lampe de signalisation avertissant le conducteur qu'il patine;
- l'arrêt de la progression de l'équipement de démarrage.

Cela ne suffit pas pour enrayer le patinage: aussi, a-t-on prévu également la régression automatique de l'équipement.

Tous les systèmes de décel de patinage agissant par comparaison sont entachés du même inconvénient: c'est qu'ils sont inopérants quand les moteurs comparés patinent simultanément: ainsi dans le cas de la fig. 30.02, si les moteurs M_1 et m_2 patinent simultanément, les tensions à leurs bornes sont égales: il ne passe aucun courant dans la bobine du relais QDP et celui-ci est inopérant.

Nous concluerons en disant que les systèmes de décel de patinage sont pour le conducteur un précieux auxiliaire, mais que la façon absolument certaine de détecter le patinage, c'est l'observation des ampèremètres de traction de façon à observer toute brusque chute du courant, signe certain du patinage (art. 21.01).

30.03. Système de détection ultra-rapide du patinage.

Principe.

Les locomotives électriques récentes (séries 26, 16 et 23 perfectionnées) sont équipées de dispositif électronique d'enrayage de patinage dont le temps de réponse est inférieur à la seconde.

A cette fin:

- on mesure l'accélération de la vitesse des roues; cette méthode est plus sûre que toute autre qui compare la vitesse de deux essieux différents;
- on utilise un dispositif électronique pour calculer l'accélération et déclencher les relais de décel patinage.

Les accélérations atteintes par la locomotive lors d'un démarrage normal sont généralement tout au plus égales à $0,5 \text{ m/s}^2$. Le dispositif est conçu pour ne pas intervenir pour des accélérations inférieures à cette valeur, mais d'intervenir sûrement si l'accélération est supérieure à $0,8 \text{ m/s}^2$ (réglage entre $0,5$ et $0,8 \text{ m/s}^2$).

D'autre part, le dispositif est complété par une protection contre la survitesse des moteurs de traction qui fait dans ce cas déclencher le DUR.

Sur chaque essieu est montée une dynamo tachymétrique ou un capteur statique placé sur le carter d'engrenage qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse (fig. 30.03). Cette tension est envoyée dans un circuit dérivateur qui calcule l'accroissement de la tension, donc de la vitesse, c.à.d. qui détermine l'accélération de l'essieu. Le signal fourni par le circuit dérivateur est amplifié et s'il atteint le seuil de fonctionnement du dispositif, le relais de décel patinage est enclenché.

En parallèle sur la dynamo ou le capteur statique est branché le relais de survitesse,

30.04. Techniques nouvelles utilisées pour retarder l'apparition du patinage ou pour l'enrayer.

Divers moyens sont mis en oeuvre sur la locomotive série 26 pour retarder ou enrayer un patinage naissant (en plus des moyens traditionnels).

1. Pour réduire la tendance au patinage.

a) Moyens mécaniques utilisés (fig. 30.04).

- les deux essieux d'un bogie sont solidarités mécaniquement de façon à parer aux réductions locales d'adhérence. C'est un bogie monomoteur;
- les charges sur les essieux d'un bogie sont égalisées en supprimant le cabrage du bogie par la traction basse.

b) Moyens électriques utilisés (fig. 30.05.).

- la marche en antipatinage proportionne l'effort d'un bogie à sa charge réelle afin de tenir compte de l'effet de cabrage de la caisse.

4.

Démarrage série: shuntage des inducteurs du moteur bogie
AV pour réduire l'effort de ce moteur.

Démarrage parallèle: shuntage des inducteurs du moteur bogie
AR pour augmenter l'effort de ce moteur.

- Possibilité de démarrage directement en parallèle.
Le rhéostat unique a pour résultat d'annuler l'effet d'élimination alternative de la résistance de démarrage et de régulariser le démarrage sur l'ensemble des moteurs.

2. Pour enrayer le patinage des essieux.

- a) Le moment moteur des essieux emballés est immédiatement réduit par la brusque introduction d'une résistance dans le circuit des moteurs entraînant les essieux, en couplage parallèle (en plus le JH recule);
- b) La diminution du couple des moteurs emballés est obtenu en shuntant leur induit par une résistance, en couplage série (en plus le JH recule).

30.05. Ventilation des moteurs de traction.

La puissance d'un moteur est directement fonction de son courant; le courant traversant un moteur est limité par l'échauffement qu'il provoque dans le moteur: au-delà des échauffements limites tolérés, les isolants perdraient leurs propriétés ce qui menacerait de destruction le moteur.

L'échauffement du moteur est fonction:

- Des pertes engendrées par le fonctionnement du moteur:
 - les pertes magnétiques et par courant de Foucault qui sont fonction de la tension du moteur;
 - les pertes par effet Joule qui sont fonction du carré qui parcourt le moteur;
- De la ventilation du moteur.

L'échauffement du moteur se stabilise au moment où la ventilation du moteur emporte un nombre de calories égal à celui qui naît du fait des pertes.

Dans les locomotives où la puissance demandée au moteur pour un encombrement donné est notablement plus élevée qu'en automotrice, on emploie, pour la ventilation, des ventilateurs perfectionnés disposés dans la caisse et soufflant dans le moteur au travers d'un soufflet. L'air nécessaire à la ventilation est puisé dans la caisse qui est alors percée d'ouïes de ventilation, c'est donc une ventilation forcée.

Dans une automotrice, où la puissance est beaucoup plus faible et où toutes choses égales le moteur est beaucoup plus petit, on peut donc disposer d'un encombrement beaucoup plus grand, ce qui permet d'inclure la roue de

ventilateur dans le moteur; certes, ce ventilateur inséré dans le moteur est beaucoup moins perfectionné que les ventilateurs séparés des locomotives et, en conséquence, la ventilation est beaucoup moins efficace mais, comme on dispose de beaucoup de place, on peut dimensionner le moteur en conséquence.

Le moteur autoventilé des automotrices présente l'avantage de limiter l'emballement du moteur en cas de patinage, l'énergie prise par la roue de ventilateur stabilisant le moteur à des vitesses non dangereuses.

30.06. Génératrices basse tension.

Les circuits de commande et d'asservissement et l'éclairage requièrent la présence d'une source basse tension.

A la SNCB, en traction électrique, la tension nominale des circuits basse tension est de 72 Volts avec possibilité de fonctionnement entre 60 et 100 volts.

La source basse tension est constituée par une batterie au cadmium-nickel fonctionnant en tampon avec une génératrice et un régulateur. L'ensemble se présente en principe comme l'indique la fig. 30.06).

Sur les automotrices et locomotives récentes la batterie d'accumulateurs alcalins est raccordée en tampon aux bornes d'un alternateur et d'un redresseur en pont de Graetz. La régulation de la tension est assurée par amplificateur magnétique par exemple.

En cas d'arrêt de la génératrice, c'est la batterie seule qui fournit tout le courant basse tension.

Lorsque la génératrice fonctionne, le régulateur contrôle sa tension et, à un moment donné, enclenche la génératrice en parallèle sur la batterie. A ce moment:

- La génératrice et la batterie fournissent conjointement l'énergie basse tension si la demande est forte;
- La génératrice fournit toute l'énergie basse tension et charge en outre la batterie si la demande est faible.

Comment est entraînée la génératrice.

Sur les locomotives, la génératrice est entraînée par courroie par l'un des groupes moteurs ventilateurs des moteurs de traction.

Comme les ventilateurs tournent en permanence, il en est de même de la génératrice.

6.

Sur toutes les automotrices construites avant 1965, un moteur H.T. indépendant entraîne à la fois le compresseur et la génératrice: un système d'asservissement a été spécialement étudié pour permettre la rotation du groupe si l'une des 2 machines le demande: compresseur ou génératrice sans entraîner de répercussion sur l'autre machine; ainsi:

- Si la demande d'énergie basse tension est élevée alors que la pression d'air comprimé est suffisante, le groupe continue à tourner permettant le débit de la génératrice mais le compresseur, qui tourne également, est mis à l'atmosphère automatiquement;
- Si on demande de l'air comprimé, le groupe tourne, permettant au compresseur d'alimenter les conduites d'air comprimé et le régulateur de tension règle le débit de la génératrice suivant l'état de charge de la batterie et la demande en énergie basse tension.

Les automotrices récentes ont été équipées d'un alternateur entraîné par un moteur HT indépendant.

30.07. Utilité de la basse tension.

L'alimentation en haute tension d'un équipement de traction électrique présente certaines difficultés:

- le danger de la haute tension ne permet pas d'effectuer les manoeuvres des appareils sans prendre des précautions spéciales;
- étant donné les encombrements importants de ces appareils, destinés à couper des puissances élevées, il n'est pas possible de les localiser dans un endroit où le conducteur peut facilement accéder pendant la marche du train;
- certains verrouillages dans la séquence de fonctionnement ne peuvent être réalisés mécaniquement car cette solution entraînerait des complications telles que le prix d'un équipement deviendrait prohibitif.

Pour ces raisons, entre les appareils haute tension et les organes de conduite, manoeuvrables par le personnel, doit exister un "intermédiaire". Cet intermédiaire est constitué par l'ensemble des "circuits d'asservissement" alimentés à la tension nominale de 72 volts.

Le choix de cette tension est basé sur la nécessité d'avoir d'une part, une tension suffisamment élevée pour compenser les chutes de tension de l'équipement et permettre le fonctionnement de l'éclairage fluorescent et, d'autre part, une tension ne présentant aucun danger pour le personnel.

C. 124.20.

30e leçon

30.08. Utilité de l'emploi de l'air comprimé.

Si l'utilisation de la basse tension remédie aux inconvénients signalés au paragraphe ci-dessus, son emploi crée un nouveau problème. En effet, étant donné le nombre d'appareils à commander et les efforts très importants nécessaires pour manoeuvrer certains de ceux-ci, on devrait disposer sur le véhicule d'une puissance BT beaucoup trop élevée. D'autre part, les moteurs et électro-aimants à basse tension de commande des appareils HT seraient eux aussi d'un encombrement inadmissible.

Les automotrices et locomotives électriques devant de toute façon comporter un équipement pneumatique prévu notamment pour le fonctionnement des freins, alimenté par un compresseur actionné par un moteur à HT, il était tout indiqué d'utiliser en apport cette énergie pneumatique et de réaliser un équipement "électro-pneumatique".

Dans ce cas, pour alimenter ou mettre à l'échappement les différents appareils à air comprimé, on fait usage d'un robinet à commande électromagnétique appelé "l'électrovalve".

30.09. Marche en unités multiples.

Les circuits d'asservissement sont mis judicieusement sous tension par le conducteur afin d'exciter des relais, des contacteurs ou des électrovalves par la manoeuvre d'appareils de commande simples tels que interrupteurs, bouton-poussoir, manipulateur, ...

Un train comportant plusieurs automotrices peut être conduit par un seul agent installé dans le poste de conduite avant, il suffit pour cela que chacun des circuits d'asservissement des différentes automotrices soit mis sous tension par le même appareil de commande. On réalise ce raccordement à l'aide d'un certain nombre de fils de train qui courent sur toute la longueur des automotrices et qui sont connectés entre voitures au moyen d'accouplements.

Un accouplement est constitué de deux boîtes d'accouplement fixées chacune au châssis d'une voiture sous la paroi d'about et d'un coupleur composé de deux têtes reliées par un câble à 33 conducteurs. Chaque tête de coupleur comporte un collecteur sur lequel sont fixés 30 lamelles de contact qui, lorsque la tête du coupleur est enfoncée dans la boîte fixe, prennent appui sur 30 segments correspondants.

Le coupleur est verrouillé en place dans la position "accouplement" par le couvercle de la boîte; d'autre part,

8.

la manoeuvre du couvercle actionne un interrupteur. Cet interrupteur est utilisé dans le circuit de signalisation des portes automatiques.

La marche en unité multiple ne nécessite pas obligatoirement l'alimentation des circuits d'asservissement des différentes automotrices par la batterie de la voiture de tête (fig. 30.07).

Certains circuits peuvent être mis sous tension par la batterie propre de l'automotrice, à l'intervention par exemple d'un relais dont l'excitation est obtenue au départ de la voiture de tête (fig. 30.08).

Indépendamment des "fils de train", l'automotrice comporte également des "fils de liaison" qui assurent les raccordements aux appareils d'une même automotrice. Le passage de ces fils de liaison entre les deux voitures d'une même automotrice est assuré par un coupleur de liaison.

Toutes les automotrices sont accouplables quelle que soit leur orientation.

31e leçon.

ETUDE DES APPAREILS ELECTRIQUES ET DE LEUR COMMANDE.

31.01 Electrovalve.

Pour commander à distance, électriquement, l'admission et l'échappement de l'air comprimé aux organes pneumatiques de l'appareillage, on se sert d'appareils appelés électrovalves.

Il existe des électrovalves type admission (admission d'air lorsqu'elles sont excitées) et des électrovalves type échappement (échappement de l'air lorsqu'elles sont excitées).

Les fig. 31.01 et 31.02 représentent une électrovalve "admission", en coupe, dans ses deux positions : excitée et désexcitée.

L'électrovalve est constituée comme suit :

- un corps en acier laminé (1) dans lequel sont forés les conduits à air comprimé et dans lequel sont chassés les sièges des valves (en laiton);
- un noyau magnétique (2) en acier doux, vissé dans le corps et portant la bobine d'excitation (3);
- une tige de valve d'échappement (4), en bronze, coulissant dans le noyau (2) et dont la base de forme conique, constitue la valve d'échappement;
- une armature mobile (5), en acier, qui commande la tige (4); elle est protégée par un couvercle en aluminium avec bouton d'essai à la main;
- la tige de soupape d'admission (8) (bronze) soudée dans cette soupape et actionnée par la tige de valve d'échappement (4);
- le ressort (6) de soupape d'admission, s'appuyant sur le bouchon de visite (7).

Lorsque la bobine est excitée, c'est-à-dire lorsqu'elle est parcourue par un courant, son noyau s'aimante, l'armature mobile (5) est attirée et pousse la tige (4) verticalement vers le bas. Dans son mouvement, celle-ci ouvre la valve d'admission, mettant en communication l'appareil avec l'arrivée d'air comprimé, tandis qu'elle ferme l'orifice d'échappement.

Lorsqu'on coupe le courant dans la bobine, la tige (4) sous l'action du ressort (6) reprend sa place au repos; l'alimentation de l'appareil est coupée et il est mis à l'échappement.

Les fig. 31.03 et 31.04 représentent une électrovalve type "échappement". On peut se rendre compte facilement que l'appareil est alimenté en air comprimé lorsque la bobine de l'électrovalve n'est pas excitée, tandis qu'il est mis à l'échappement lorsque l'électrovalve est excitée.

31.02 Pantographe.

Conditions de fonctionnement.

Le pantographe sert à la captation du courant.

Une captation correcte du courant à la plus grande importance pour la bonne conservation de la caténaire, et de l'appareillage des sous-stations et du matériel roulant.

La condition primordiale pour obtenir une bonne captation résulte dans le choix de la pression de contact entre frotteurs et ligne de contact. Cette pression doit être :

- faible pour réduire l'usure des fils de contacts;
- suffisante pour éviter des décollements;
- constante quelle que soit la hauteur de la caténaire;
- indépendante de la pression en air comprimé.

L'usure des fils de contact est influencée par la nature, la forme et la pression des frotteurs en contact avec eux.

Des décollements complets ou partiels entre fils de contact et frotteurs entraînent la production d'étincelles ou d'arcs qui détériorent les fils de contact, provoquent des déclenchements et sont susceptibles de causer des perturbations téléphoniques et radiophoniques.

La hauteur de la caténaire variant de 4,800 m à 6,500 m au-dessus du niveau du rail, le pantographe doit être conçu pour suivre ces variations de niveau tout en conservant une pression constante.

On distingue des pantographes qui s'élèvent sous l'action de l'air comprimé ou exclusivement sous l'action de ressorts. Les appareils employés sur le matériel de la Société Nationale utilisent l'air comprimé pour annuler l'action d'un ressort "abaisseur" de façon à permettre à des ressorts "élevateurs" de lever le pantographe. La pression au fil de contact est donc fournie par des ressorts et elle est de ce fait indépendante de la pression d'air comprimé.

Dans ce cas, le pantographe est dit du type à abaissement automatique par manque de pression d'air.

La masse du pantographe doit être faible en vue de réduire son inertie (cette ^{masse} varie entre 240 et 440 kgs); d'autre part, le pantographe doit être constitué de telle manière qu'en cas d'accident, ce soit le pantographe qui soit avarié et même détruit, et qu'ainsi la caténaire soit épargnée. Il est, en effet, plus facile et moins coûteux de remplacer un pantographe que de réparer une caténaire gravement avariée et de risquer une interruption du trafic de longue durée.

31.03 - Description du pantographe type ACEC.

Un pantographe se compose essentiellement :

- d'un bâti isolé monté sur le toit du véhicule et sur lequel sont fixés le moteur à air comprimé (5) et les ressorts élévateurs (2) commandant par bielles la rotation des deux axes principaux (1 et 1') fig. 31.05
- de deux polygones articulés constitués chacun de deux bras inférieurs et de deux bras supérieurs entretoisés par des croisillons. Les 4 bras inférieurs sont solidaires des axes (1 et 1').
- Les 4 bras supérieurs portent un archet, articulé en (3) et maintenu par des ressorts (4); ce montage élastique est nécessaire pour que l'archet puisse suivre les déformations de faible importance des fils de contact.

L'archet porte une raquette, (8) pourvue de deux ou de trois frotteurs en carbone, articulée sur l'archet et maintenue en bonne position par les ressorts (9).

Des connexions souples assurent le passage du courant aux articulations.

Le raccordement du cylindre (5) avec la conduite d'air comprimé doit être isolé soit par raccord en caoutchouc soit isolateur de traversée.

En admettant l'air comprimé dans le cylindre (5), le piston (6) est amené en fin de course et comprime le ressort abaisseur (7). L'action de celui-ci étant annulée, les ressorts élévateurs (2) lèvent le pantographe.

En mettant le cylindre à l'atmosphère, le ressort abaisseur (7), dont l'action est supérieure à celle des ressorts (2), ramène le pantographe en position abaissée.

A. Réglage de la pression du frotteur.

La tension des ressorts (2) détermine la pression au fil de contact.

Cette tension varie toutefois avec la position occupée par le pantographe : elle diminue avec la levée, mais cette diminution est compensée par le déplacement du bras de levier de commande, lequel augmente la longueur de ces bras de levier.

D'autre part, cette pression peut être réglée en agissant sur des vis prévues aux extrémités de ces bras.

Signalons également qu'à chaque hauteur du pantographe, la pression est différente suivant qu'elle est mesurée au cours de levage ou de l'abaissement du pantographe. Ce fait est dû aux frottements des articulations. L'influence de ces frottements est réduite en service par les vibrations subies en route.

Les déplacements d'air produits par le train influencent également la pression des pantographes dans une mesure variant avec leur distance de la tête du train et la vitesse.

Le pantographe utilisé sur le matériel de la Société Nationale réalise une pression au fil réglable entre 7 et 12 daN (tolérance + 15 %).

B. Frotteurs.

On fait ordinairement usage de frotteurs

- en cuivre rouge;
- en alliage d'aluminium ou en alliage de zinc;
- en laiton;
- en graphite.

Ce dernier type présente les avantages suivants :

- polissent les fils de contact;
- ne provoquent qu'une usure très réduite de ceux-ci;
- durent beaucoup plus longtemps que les autres frotteurs.

Les frotteurs en cuivre-acier présentent l'inconvénient suivant :

lors de la naissance d'étincelles des gouttes de métal fondu se forment à la surface de frottement et le contact frotteurs-fils de contact s'aggrave progressivement.

L'intervention régulière de l'atelier est requise pour corriger à la lime ces perlures. La généralisation de ce type de frotteur n'est pas à envisager.

Une autre solution est le frotteur "Kasperowski". Il s'agit d'un frotteur en carbone enrobé d'une gaine de cuivre de 2 mm épaisseur.

6.

Une bille en acier (5) repose sur un siège du corps de valve muni d'une rainure (6) et étrangle l'arrivée de l'air venant de l'électrovalve mais n'offre aucune résistance à l'échappement de l'air vers l'électrovalve.

Fonctionnement.

1° Le ralentissement de la montée du pantographe est provoqué par le passage de l'air dans des étranglements; quand l'électrovalve de pantographe est excitée, celle-ci envoie de l'air comprimé au cylindre de pantographe à travers la valve à échappement rapide. Cet air traverse successivement deux étranglements : le premier dans le siège de la bille (6) et le second dans le piston (2).

La pression d'air applique la valve sur son siège, ce qui coupe toute communication entre le cylindre de pantographe et l'atmosphère.

2° Quand on désexcite l'électrovalve de pantographe, la valve d'échappement rapide laisse échapper l'air du cylindre de pantographe à l'atmosphère par une ouverture de grande section. Cet air traverse la valve d'échappement rapide en soulevant la bille. Le conduit de petit diamètre dans le piston provoque une perte de charge qui donne lieu à une différence de pression sur les deux faces du piston. Celui-ci se déplace et soulève la valve de son siège. L'air comprimé du cylindre de pantographe s'échappe alors directement à l'atmosphère par un orifice de grande section, sans passer par l'électrovalve de pantographe.

Consécutivement à cet échappement rapide de l'air, le piston se déplace rapidement dans le cylindre sous l'action du ressort d'abaissement entraînant la chute rapide du pantographe.

L'amortissement en fin de chute du pantographe (fig. 31.08) est réalisé par une aiguille (1) portée par le piston qui en pénétrant dans une buselure (2) étrangle à un moment donné l'échappement de l'air.

D'autre part, dès que l'aiguille étrangle l'échappement la chute de pression créée sous le piston de la valve d'échappement rapide réapplique ce piston sur son siège. Dès lors, l'échappement de l'air du cylindre n'est plus réalisée par l'orifice à grande section de la valve d'échappement rapide mais au travers du piston vers l'électrovalve de pantographe à section plus petite. Des butées élastiques reçoivent le pantographe au bas de sa course.

31.04 - Description du pantographe type Faiveley (fig.31.09)

Leur structure représentée sous forme simplifiée se compose :

- d'un bâti B portant les ressorts de levage R et l'arbre

Le cuivre assure une bonne captation tandis que le carbone sert principalement au graissage et au polissage.

Le frotteur comporte deux ou trois barres de graphite suivant qu'il est destiné respectivement aux automotrices ou aux locomotives. Ces barres de 30 x 30 mm de section sont assemblées par une disposition en queue d'aronde, comme figuré à la fig. 31.06

L'usure moyenne de ces frotteurs est de 3 mm par 10 000 km parcourus par automotrice et de 15 mm par 10 000 km parcourus par locomotives. Cette différence s'explique par le fait que l'usure "électrique" est nettement plus importante que l'usure "mécanique". En effet, la densité de courant dans les frotteurs est nettement plus importante sur les locomotives que sur les automotrices : une locomotive absorbe au démarrage environ 500 amp. tandis qu'une automotrice n'en absorbe qu'environ 200 amp. D'autre part, les temps de démarrage sont également plus longs pour les locomotives, notamment pour les services "marchandises".

Les intervalles entre graphite sont remplis de graisse, à l'effet de lubrifier le fil de contact.

La charge de graisse est d'environ 500 g. pour frotteurs d'automotrice et 1 kg pour frotteurs de locomotives.

C. Valve d'échappement rapide.

Rôle.

En complément des conditions à réaliser par le pantographe comme expliqué à l'article précédent, il est nécessaire que le fonctionnement du pantographe soit réalisé de façon que :

- la montée soit lente et régulière pour que le contact entre frotteur et ligne de contact soit obtenu sans chocs, afin d'éviter des battements;
- la descente s'effectue d'abord rapidement pour obtenir une coupure rapide, ensuite qu'elle soit freinée en vue d'amortir la pose du pantographe.

Ces deux conditions sont réalisées grâce au placement dans le circuit pneumatique entre le cylindre de commande du pantographe et l'électrovalve de pantographe, d'un organe dénommé "valve d'échappement rapide".

Description. (fig. 31.07)

La valve comporte un corps en bronze (1) dans lequel coulisse un piston (2) en duralumin. Ce piston, dont le corps est foré d'un trou de faible diamètre comporte un joint (3) qui est normalement appliqué sur le siège du manchon en laiton (4) et obture ainsi l'orifice d'échappement.

de commande A tournant sur des paliers à billes. Le bâti B est fixé sur des isolateurs de toiture I;

- du bras inférieur constitué, d'une part, d'un tube 1 de gros diamètre solidement fixé sur l'arbre de commande et, d'autre part, d'un tube 2 de diamètre réduit articulé au bâti;
- du bras supérieur constitué, d'une part d'un cadre 3 en forme de trapèze allongé dont la petite base est encastrée dans un levier coudé L et dont la grande base porte l'archet et, d'autre part, d'une bielle secondaire 4 articulée d'un côté sur le tube 2 et de l'autre côté sur le support d'archet qu'elle maintient vertical;
- d'une ou deux palettes fixées sur l'archet par l'intermédiaire de suspensions élastiques à ressorts.

Les cornes d'archet sont en tube d'acier ou en bois comprimé.

Les points d'articulation de tout le système sont pris de telle sorte que lorsque les bras pivotent sur leurs appuis l'archet se déplace sur une verticale.

Des connexions souples assurent le passage du courant aux articulations.

Fonctionnement.

Lorsque le moteur pneumatique M fixé sur la toiture est alimenté en air comprimé, le piston en se déplaçant comprime le ressort de descente D.

La bielle isolée, en suivant le mouvement, fait avancer la coulisse C qui libère le maneton E. Les ressorts de levage R en tirant sur le levier F obligent le bras inférieur à se lever. Le tube 2, par sa réaction sur le levier coudé L, fait soulever le bras supérieur 3 jusqu'au contact de l'archet avec la caténaire.

Le piston étant à fond de course, le maneton E peut se déplacer librement dans la coulisse V permettant au pantographe de suivre toutes les variations de hauteur de la ligne. Quand le cylindre moteur est mis à l'atmosphère, le ressort de descente D, plus puissant que les ressorts de levage R, tire, par la bielle isolée, sur le maneton E et fait descendre le pantographe. La levée du pantographe doit être assez lente pour éviter un contact trop violent avec la caténaire, tandis que la descente doit être rapide sans occasionner une chute brutale de l'archet sur les butées de repos. Ces conditions sont réalisées par la boîte à clapet disposée entre l'électrovalve de commande et le moteur pneumatique.

Boîte à clapet. - Montée du pantographe. (fig 31.10)

Un clapet P obture, sous pression d'un ressort R, réglable par la vis VR, la canalisation 2 vers le moteur pneumatique, tandis que l'air venant de l'électrovalve s'écoule d'une part vers le moteur en passant par l'orifice E dont l'ouverture est réglable par une vis à pointeau VP et, d'autre part, vient renforcer l'action du ressort R pour maintenir le clapet P sur son siège, ce qui coupe également la communication du cylindre panto avec l'atmosphère. On voit donc que la vitesse de déplacement du piston et donc aussi de la levée du pantographe est conditionnée par le débit de l'orifice E.

Descente.

Quand l'électrovalve est désexcitée, la pression qui règne dans le moteur pneumatique est supérieure à celle existant sous le clapet P. Celui-ci quitte son siège mettant le cylindre à l'atmosphère par un orifice de grande ouverture, ce qui permet au piston un déplacement rapide entraînant la descente aussi rapide du pantographe.

Mais dès que la pression de l'air dans le cylindre n'est plus suffisante pour combattre l'action du ressort R, celui-ci réapplique le clapet sur son siège et l'air restant dans le cylindre ne peut plus s'évacuer que lentement à travers l'orifice calibré E, vers le trou d'échappement de l'électrovalve désexcitée.

La vitesse du piston s'en trouve ralentie permettant à l'archet de venir se poser doucement sur les butées de repos.

QUESTIONNAIRE.

- 29.01 Quels sont les circuits protégés par relais à maxima ?
- 29.02 Quels sont les circuits auxiliaires HT protégés par fusibles ?
- 29.03 Quel est le rôle du relais de potentiel ?
- 29.04 Quel est le rôle du relais de pression ?
- 29.04 Sur quelle conduite sont branchés les "control-switch" aux automotrices ?
- 30.01 Dessinez le schéma de principe du relais différentiel et expliquez son fonctionnement.
- 30.02 Citez les défauts du relais de décel patinage basé sur la comparaison des tensions.
- 30.05 Comment est réalisée la ventilation des moteurs de traction des locomotives et des automotrices ?
- 30.06 Comment est entraîné le générateur pour charge batterie (AM et HLE) ?
- 30.09 Quelle différence y a-t-il entre les fils de train et les fils de liaison ?
- 30.01 Quelle différence existe-t-il entre une électrovalve type admission et une électrovalve type échappement ?
- 31.02 Quel est le principe de fonctionnement des pantogaphes ?
- 31.03 Quel est le rôle de la valve d'échappement rapide ?
- 31.04 Comment s'appelle la valve d'échappement d'un pantographe Faiveley ?

33ème leçon.

33.01 Circuit pneumatique du pantographe.

La fig. 33.01 représente le circuit de raccordement en air comprimé du pantographe.

En service normal, l'air comprimé est fourni au cylindre de pantographe par la conduite d'alimentation au travers de la valve de retenue, du robinet à 3 voies du dispositif de sécurité, du robinet d'isolement, de l'électrovalve de pantographe et de la valve d'échappement rapide (ou boîte à clapet panto Faiveley).

L'alimentation peut également s'effectuer au départ d'un réservoir nourrice ou d'une pompe à main (moto-compresseur) lorsque à la prise de service, la pression dans la conduite d'alimentation est insuffisante.

La valve ou clapet de retenue permet de réaliser d'une part l'alimentation du cylindre de pantographe et du réservoir nourrice par la conduite d'alimentation et, d'autre part, d'empêcher la vidange du réservoir nourrice vers la conduite d'alimentation lorsque l'alimentation du cylindre de pantographe est réalisée par ce réservoir nourrice. Cet appareil comporte un clapet levé par la pression d'air existante dans la conduite d'alimentation et maintenu sur son siège lorsque la pression du réservoir nourrice est supérieure à celle de la conduite d'alimentation.

Un robinet à pointeau permet d'isoler le réservoir nourrice dès que celui-ci a été rempli d'air comprimé à la pression de la conduite d'alimentation, de façon à constituer une réserve pour une mise en service ultérieure.

Lorsque la pression dans le réservoir nourrice est insuffisante (par suite de fuite ou d'un oubli de remplissage), la levée du pantographe peut s'effectuer grâce à une pompe à main branchée sur la même conduite c.à.d. avant le clapet de retenue. Cette pompe à main est pourvue d'une soupape de retenue empêchant la vidange de la conduite d'alimentation au travers de son cylindre.

Sur certaines automotrices et locomotives la pompe à main est remplacée par un petit compresseur actionné par un moteur à basse tension.

Un robinet d'isolement permet de couper l'alimentation en air comprimé du cylindre de pantographe pour sa mise "hors service".

L'électrovalve de pantographe est une électrovalve du type admission; son rôle est de permettre la commande à distance du pantographe.

Entre les clapets de retenue et les robinets d'isolement des pantographes est branché un organe appelé "robinet à 3 voies du dispositif de sécurité".

Ce robinet à commande manuelle permet de réaliser :

- dans une première position : l'alimentation directe entre l'électro-valve de pantographe et la valve d'échappement rapide ;
- dans une seconde position : la mise à l'atmosphère du cylindre de pantographe et l'isolement de la conduite d'amenée d'air venant de l'électro-valve de pantographe.

Ce robinet ne peut être changé de position qu'après avoir au préalable manoeuvré la serrure de verrouillage qu'il comporte à l'aide d'une clef spéciale. Le rôle de ce dispositif sera expliqué ultérieurement.

L'ensemble du circuit pneumatique du pantographe est complété par un manomètre branché de telle façon qu'il indique toujours la pression d'air dans la conduite de pantographe : que l'alimentation soit réalisée par le réservoir nourrice, la pompe à main ou la conduite d'alimentation.

33.02 Commande électrique du pantographe.

Rappelons que la commande électrique du pantographe se résume à l'excitation d'une électrovalve. Cette excitation doit d'une part être pouvoir être commandée de n'importe quelle cabine de conduite et d'autre part, il doit être possible d'éliminer un ou plusieurs pantographes en cas de nécessité. Nous examinerons séparément les réalisations sur les automotrices et sur les locomotives.

1° Cas des automotrices.

La fig. 33.02 représente la réalisation adoptée sur les automotrices. La tension positive de la batterie (borne CB) est amenée à la borne (CD) du bouton poussoir "pantographe" (ou interrupteur Faiveley) au travers du fusible général (f 1) et de l'interrupteur général (I 1). Quelle que soit la cabine de conduite occupée, la manoeuvre du bouton-poussoir "Pantographe" met sous tension positive le fil de train (30) qui au travers du fusible divisionnaire (f 15); (ou disjoncteur d 15) l'interrupteur d'élimination et de sélection (I 15) le sectionneur basse-tension du sectionneur de pantographe (S.P.) alimente l'électrovalve du pantographe choisi. L'autre borne de cette électrovalve étant raccordée au négatif batterie (fil 13).

Dans le cas de marche en unités multiples, le fil de train (30) excite les électrovalves de pantographes des automotrices accouplées au travers du fusible (f 15) et

de l'interrupteur (I 15) et du S.P. de chacune des automotrices respectives. Si le conducteur désire donc éliminer un ou les deux pantographes d'une automotrice, il manœuvre à cet effet, l'interrupteur (I 15) de cette automotrice.

A remarquer que la disposition adoptée ne permet pas normalement de brancher en parallèle les batteries des automotrices accouplées. En effet, le fil (30) ne peut être mis sous tension que par la batterie de l'automotrice d'où l'on conduit par la fermeture du bouton poussoir (ou interrupteur Faiveley) "pantographe". Or, la manœuvre de ce bouton poussoir nécessite le déverrouillage de la boîte à boutons poussoirs à l'aide de la clef de verrouillage que seul possède le conducteur; (il n'est donc pas possible normalement d'enclencher plusieurs boutons poussoirs "pantographes" sur plusieurs automotrices accouplées).

L'équipement HT d'une automotrice étant pourvu d'un "sectionneur de pantographe" dont le but est de permettre d'isoler électriquement un pantographe avarié par rapport à l'autre pantographe encore en service sur la même voiture, on complète ce dispositif d'élimination par un petit sectionneur B T inséré dans le circuit de l'électrovalve et dont la commande est jumelée avec celle du sectionneur HT. Sur les automotrices récentes, ce sectionneur BT court-circuite le disj. d 5 si l'interrupteur I 5 est laissé en mauvaise position.

Lorsqu'un pantographe est "éliminé" par la manœuvre du sectionneur HT, on a donc l'assurance qu'il ne peut plus être levé : l'alimentation BT de son électrovalve étant coupée.

D'autre part, pour des questions de sécurité, on asservit à la commande de l'interrupteur "pantographe" l'alimentation de certains autres interrupteurs tels que : compresseur, shuntage ... et c. Dans ce cas, l'interrupteur "pantographe" comporte un deuxième contact destiné à mettre sous tension positive le fil (CF) d'alimentation des autres interrupteurs.

2° Cas des locomotives.

La commande en unités multiples est réalisée sur les locomotives série 26 seulement.

L'interrupteur général est remplacé par un interrupteur Faiveley (ou un bouton-poussoir) appelé "Urgence". Sa fermeture permet l'alimentation positive de tous les interrupteurs Faiveley et notamment celui "pantographe" par la tension positive de la batterie CB au travers du fusible général (f 1).

Pour des questions de sécurité, on asservit également à la commande de l'interrupteur "pantographe" l'alimentation de certains autres interrupteurs tels que : compresseur-ventilateur DUR, etc... Cet asservissement peut se réaliser :

- comme sur les automotrices, en utilisant un interrupteur à deux contacts ;
- soit au moyen de deux interrupteurs Faiveley "urgence-pantos" manoeuvrés séparément ou simultanément (fig.^{33.03}).

La mise sous tension du fil CV alimente le circuit des électrovalves des pantographes au travers des fusibles de protection (f 11) et des interrupteurs d'élimination (I 2) en série (un dans chaque cabine) . Cette disposition est réalisée afin de pouvoir choisir ou lever l'un ou l'autre pantographe à partir de la cabine de conduite occupée.

RESISTANCES DE DEMARRAGE.

34.01 Généralités.

En dehors des conditions techniques auxquelles doivent répondre les résistance de démarrage, (voir à la 24e leçon), certaines considérations d'ordre technologique fixent les critères de fabrication de ces résistances.

En premier lieu, on recherche à obtenir un encombrement minimum. En effet :

- Sur les automotrices où ces résistances sont installées sous le châssis de la voiture, la distance disponible entre ce châssis et le gabarit de la voie est relativement réduite.
- Sur les locomotives : l'espace disponible dans la caisse est toujours limité.

Cet encombrement dépend :

- De la matière constitutive de l'élément résistant et de la température maximum que peut supporter cet élément sans détérioration ;
- De la surface de dissipation, compte tenu du mode de ventilation : naturelle ou forcée.
- Des conditions d'isolement : distance d'éclatement, ligne de fuite, etc...

Du point de vue matière de l'élément résistant, on distingue des résistances :

- En fonte (température max. admise 300°C).
- En nickel-chrome (température max. admise 450°C).
- Du type Calrod (température max. admise 600°C).

Une grande surface de dissipation est obtenue en façonnant l'élément sous forme de grilles, de rubans ou de tubes à ailettes.

Les résistances de démarrage sont des appareils à H.T., leur fixation nécessite donc un isolement spécial de façon à éviter des mises à la masse susceptibles d'amener des incidents en service. Notamment sur les automotrices où elles sont exposées aux éléments atmosphériques (pluie, neige, poussières) des dispositions spéciales sont prises, elles consistent en un double isolement.

La résistance est partagée généralement en 2 blocs correspondant respectivement à un groupe de deux moteurs

constamment branchés en série dans le circuit H.T. Chacun de ces blocs électriques est formé de plusieurs caissons ou blocs mécaniques, ceux-ci comportant un certain nombre d'éléments.

Chaque bloc électrique est isolé par une première série d'isolateurs (3000 V) et chaque caisson par une deuxième série d'isolateurs (1500 V) (fig. 34.01).

Effectivement, il existe même un troisième isolement constitué soit par des tubes en bakélite, micanite ... ou des stéatites au niveau des éléments, comme il sera expliqué dans la description des différents types.

34.02 Résistances en ruban de nickel-chrome (fig. 34.02)

L'ossature du caisson est constituée de quatre plats en acier (2) reliés par des tiges également en acier (3) garnies d'un tube isolant en micanite (5). Entre ces tiges (3) sont placés un certain nombre de supports en acier (10) maintenus à écartement par des rondelles isolantes (6), des rondelles en acier (8) et des entretoises en acier (9). Entre ces supports, la ligne de fuite est brisée à l'aide également de rondelles isolantes (6). Les supports (10) comportent à leur partie centrale des trous de ventilation.

Sur les supports sont placés des isolateurs cavaliers (11) en porcelaine ou stéatite comportant des rainures. Ces rainures, décalées de façon à constituer une spirale, reçoivent le ruban résistant nickel-chrome ou Alcrès (1). Un caisson peut être constitué de plusieurs étages d'éléments résistants comportant chacun deux, trois ou plus de supports.

La prise de courant est assurée par boulons et écrous en serrant contre le ruban résistant un soulier plat au moyen d'une pièce spéciale (13) en cuivre rouge. La déformation du soulier lors du serrage assure un contact parfait avec la pièce (13).

En variante, dans certaines réalisations, les supports (10) sont fixés sur les tiges (3) à l'aide de stéatite.

34.03 Résistances à grilles de nickel-chrome (fig. 34.03).

L'élément résistant (1) est constitué d'une grille en métal déployé : acier inoxydable au nickel-chrome (Brightray). Les 36 grilles constitutives d'une caisse sont connectées en série par soudure électrique par points : alternativement à la partie supérieure, puis à la partie inférieure : la sortie de la grille n° 1 avec l'entrée de la grille n° 2, la sortie de la grille n° 2 avec l'entrée de la grille n° 3 et ainsi de suite, l'ensemble se présentant sous la forme d'un accordéon.

La résistance de contact entre 2 grilles soudées par point est de l'ordre de 0,15 ohm.

Ces grilles sont enfilées sur des tiges (2) en acier, isolées par des tubes (3) en micanite, elles sont maintenues à écartement par des rondelles en micalex (4).

L'ensemble des grilles et des rondelles d'écartement enfilées sur les tiges (2) sont serrées entre 2 brides (5).

A l'une des extrémités de chacune des tiges on prévoit un dispositif de compensation de jeu constitué par des rondelles Belleville.

Extérieurement aux deux brides, deux flasques (6) en rôle servent à fixer le caisson par l'intermédiaire d'isolateurs en micalex (7).

La prise de courant s'effectue par un tube en cuivre (8) soudé sur une oreille (9) prévue à la grille.

Dans une locomotive, on a intérêt à concentrer l'appareillage en blocs amovibles afin de faciliter leur placement et leur câblage et l'entretien de la locomotive. Sur certaines de nos locomotives (séries 20, 22 et 23) les caisses de résistance du type à grille de nickel-chrome sont combinées dans un bloc unique (bloc JH) avec différents appareils.

Elles sont disposées de manière à permettre aisément leur refroidissement à l'aide de ventilateurs appropriés.

Les différentes caisses sont encore séparées entre elles par des panneaux isolants et résistants à la chaleur.

34.04 Résistances du type Calrod.

Les résistances de démarrage de ce type sont formées par un assemblage série-parallèle d'éléments blindés Calrod.

L'élément blindé Calrod est essentiellement constitué d'une résistance électrique en fil de nickel-chrome de la plus haute qualité, bobiné en spirale (fig. 34.04).

Cette résistance, reliée à chaque extrémité à des bornes appropriées, est placée au centre d'un tube métallique formant blindage extérieur qui assure la protection mécanique. Le tube est rempli de magnésie (oxyde de magnésium) soit par un procédé mécanique (Calrod), soit par un procédé chimique (Baker).

Dans le procédé mécanique, la spirale Ni-Cr étant placée sous une tige guide à l'intérieur du tube métallique, l'oxyde de magnésie est bourrée dans l'espace libre en même temps que l'on retire graduellement la tige guide.

Le tube subit ensuite un "rétreint" (diminution de diamètre) qui assure une parfaite répartition de la magnésie.

Dans le procédé chimique, l'élément Ni-Cr est centré dans le tube à l'aide d'un anneau de magnésium métallique, l'intérieur de la spirale étant comblé d'une matière inerte (sable). Le tube est ensuite passé en autoclave, ce qui a pour effet de transformer le magnésium métallique en magnésie.

Le tube extérieur peut être lisse ou garni d'ailettes embouties, il est soit en aluminium, en acier inoxydable ou en acier "phosphaturisé".

Les raisons qui ont fait préférer la magnésie à tout autre isolant sont, d'une part ses caractéristiques de bon isolant, même à des températures relativement élevées, et d'autre part, d'excellent conducteur de la chaleur, caractéristiques qui sont souvent opposées dans beaucoup d'autres matières isolantes.

Les éléments Calrod sont supportés de part et d'autre par des plaques supports isolantes et les connections de couplage sont réalisées par des plats en cuivre placés entre bornes. Généralement les éléments Calrod sont coudés en forme de U de façon à pouvoir placer les bornes d'entrée et de sortie d'un seul et même côté. Dans ce cas, un bout de tube droit est soudé sur la boucle arrière afin de réaliser un support; ce support joue librement dans la plaque support arrière de façon à permettre la dilatation de l'élément.

Les caissons constitués par l'assemblage série-parallèle d'un certain nombre d'éléments sont fixés sous le châssis de l'automotrice par l'intermédiaire d'un double isolement (3000 V + 1500 V).

La résistance de démarrage avec éléments Calrod (ou Baker) présente vis-à-vis des autres types de résistance des avantages indéniables qui sont :

- Une plus grande robustesse mécanique et électrique; en effet, le fil Ni-Cr est protégé par une enveloppe (tube d'acier) contre les détériorations et il est isolé de l'action des agents atmosphériques ;
- Un meilleur isolement, puisque la magnésie constitue déjà un premier isolement de l'élément sous tension ;
- Un prix de revient moins élevé, car il faut environ 5 fois moins de fil Ni-Cr que pour les résistances à grilles ou en rubans, et le fil Ni-Cr est très coûteux ; (la surface de rayonnement nécessaire au refroidissement de l'élément est donnée par le tube et les ailettes en acier, la conductibilité thermique de la magnésie étant très bonne) ;
- Un entretien aisé : remplacement rapide d'un élément défectueux. Pour localiser les éléments interrompus, il suffit de faire circuler un courant dans chacun de ceux-ci et de constater leur échauffement.

Autant que possible, dans une batterie de résistances de démarrage de ce type on essaie de n'utiliser que des éléments identiques de même valeur ohmique ce qui facilite encore l'entretien et réduit les dépenses pour pièces de réserve.

Le point faible de ces résistances se trouve dans les bornes de raccordement où des câbles d'assez forte section (50 mm²) doivent se raccorder à des bornes de diamètre réduit. On y remédie en utilisant la borne figurée à la fig. 34.05.

Celle-ci comporte une douille (2) en acier nickelé vissée sur la tige filetée (1) brasée au fil Ni-Cr. Cette douille porte une embase de façon à serrer l'isolateur en micalex (3) contre la bague en acier nickelé (4) soudée sur le tube de l'élément Calrod.

Cette borne présente les avantages suivants :

- Douille de plus gros diamètre pour recevoir le soulier du câble de raccordement ;
- Augmentation de la ligne de fuite entre élément sous tension et tube extérieur ;
- Bonne étanchéité qui empêche la magnésie d'absorber l'humidité.

34.05 Shunt inductif.

Le shunt inductif est intercalé en série avec la résistance de shuntage pour constituer avec celle-ci un circuit de shuntage à taux réglable des inducteurs des moteurs de traction. Il constitue en fait un self et se compose d'un circuit magnétique avec entrefer qui porte une bobine (fig.34.06).

Le circuit magnétique feuilleté est constitué de deux parties assemblées par boulons. Il est généralement à 3 branches afin d'en limiter l'encombrement.

Le noyau central porte la bobine faite d'un empilage de galettes qui sont constituées d'enroulements sur champ d'un plat de cuivre isolé entre chaque tour par une bande d'amiante ou de mica. Les différentes galettes sont raccordées en série par soudure et la bobine constituée est enrubannée de tirette d'amiante et de soie micassée avant d'être compoundée. Sur les extrémités de la bobine sont soudés les cosses de raccordement et celui-ci peut s'effectuer soit directement par souliers de câble, soit par l'intermédiaire d'isolateurs en porcelaine.

Le shunt inductif utilisé sur les automotrices ne comporte qu'un seul noyau sur lequel sont fixées les cornières de suspension (fig.34.07). Cette suspension est réalisée par interposition d'isolateurs, comme pour les résistances de démarrage.

MOTEURS DE TRACTION.

35.01 Caractéristiques générales.

Le moteur de traction est l'organe principal de l'équipement d'une automotrice ou d'une locomotive électrique. Il doit être suffisamment robuste pour résister à un service de traction intensif sans donner lieu à incident ou mise hors service prématurée.

La conservation des moteurs est d'autant mieux assurée que la température atteinte dans les enroulements et leurs isolants est plus réduite; c'est pourquoi, il y a, à ce point de vue, intérêt à utiliser des moteurs largement dimensionnés; toutefois, la tendance actuelle de réduire le poids des véhicules conduit à rechercher la réduction du poids grâce à l'augmentation de leur capacité thermique. A cet effet, on utilise des isolants spéciaux, capables de supporter des températures élevées, et que l'on refroidit par un système de ventilation approprié.

Du point de vue purement électrique, le moteur de traction doit être conçu de façon à supporter sans dommage des applications et des coupures de tension fréquentes, des surcharges momentanées, il doit avoir une commutation aussi bonne que possible.

Du point de vue mécanique, le moteur doit être capable de supporter tous les chocs et vibrations inhérents au déplacement du véhicule, d'accepter une survitesse momentanée et d'être étanche aux entrées d'eau, de neige et de poussières.

Comme la place disponible est limitée dans le bogie pour permettre l'installation du moteur, celui-ci devra être d'un encombrement minimum pour la puissance choisie.

D'autre part, le moteur doit répondre aux conditions imposées pour les services auxquels le véhicule est destiné, c'est-à-dire, qu'il doit être conforme aux caractéristiques imposées : vitesse-courant, vitesse-effort, puissance unihoraire, puissance continue et rendement.

Toutes ces conditions sont vérifiées lors des essais de réception dans les planchers d'essais des constructeurs par des agents spécialisés. Citons à titre documentaire quelques essais principaux qui sont effectués sur les moteurs de traction.

1° Vérification de l'échauffement des enroulements (en service unihoraire) :

Cette vérification s'effectue par la mesure de la variation de la résistance des enroulements entre les températures initiale et finale de l'essai.

2.

Les échauffements maxima admis sont les suivants :

enroulement d'armature (induit) 120° C
" de champ (inducteurs) 90° C

Ils concernent les isolants dits de "classe B" c'est-à-dire composés de mica, d'amiante et de toutes autres matières organiques analogues contenant une matière agglomérante, employé dans la fabrication des moteurs de traction.

2° Mesure de rendement :

On accouple deux moteurs d'un même type par leurs arbres d'induit, l'un fonctionnant en moteur et l'autre en génératrice; les pertes fournies par une source extérieure de courant permettent de calculer le rendement.

Le rendement varie peu avec la charge, il est en moyenne de l'ordre de 93 %.

3° Essai de rigidité diélectrique :

Le moteur étant chaud (après l'essai d'échauffement), on applique entre les enroulements et la carcasse une tension alternative de 8.750 volts pendant une minute.

4° Essai de démarrage :

Le moteur étant immobilisé pendant une minute, cet essai s'effectue à une intensité égale à 1,7 fois le courant unihoraire.

5° Essai de survitesse :

Effectué pendant deux minutes à 1,35 fois la vitesse du moteur correspondant à la vitesse maximum du véhicule.

Contacteurs haute tension.

35.02 Dispositifs destinés à favoriser l'extinction de l'arc.

L'interrupteur est un appareil destiné à interrompre des courants de faible intensité; pour couper des courants de forte intensité on utilise des appareils appelés : contacteurs.

A l'article 23.04, il a été énoncé les principes généraux qui régissent la coupure d'un circuit. Rappelons qu'un contacteur est déterminé par sa puissance de coupure. Cette puissance de coupure dépend de différents facteurs, notamment de la surtension à la coupure, de la rapidité de coupure et de la dissipation d'énergie.

La grande énergie dissipée dans l'arc exige que les contacteurs soient construits de façon spéciale pour ne pas être détériorés et munis de dispositifs pour favoriser le soufflage de l'arc.

Nous étudierons succinctement quelques-uns de ces dispositifs.

A. Cornes de soufflage.

Ce dispositif est basé sur le fait que l'on recherche à allonger l'arc pour favoriser son extinction.

Nous avons vu à l'article 23.05 que l'énergie dissipée dans l'arc sous forme de chaleur crée un courant d'air ascendant qui tend à entraîner et que de ce fait la longueur de l'arc était supérieure à la distance qui sépare les contacts.

L'arc est également allongé si l'on munit les contacts de "cornes de soufflage". Celles-ci sont constituées de plats en cuivre solidaires des contacts et placés de façon divergente (fig. ^{35.01}).

B. Soufflage magnétique.

Pour renforcer l'action du courant d'air chaud, les contacteurs comportent généralement une bobine de soufflage. Celle-ci parcourue par le courant du contact crée une force qui entraîne l'arc à s'épanouir sur les extrémités des cornes de soufflage.

Cette force variant directement en fonction du courant qui traverse le contacteur (ampères-tours), l'arc sera mieux "soufflé" quand le courant sera plus élevé. Comme d'autre part, l'arc ne peut pas être soufflé trop énergiquement (risque d'accrochage aux pièces métalliques et en liaison avec la masse voisine du contacteur), chaque contacteur doit être muni d'une bobine de soufflage bien calibrée. C'est pour cette raison que parfois des contacteurs de même type sont équipés d'une bobine de soufflage différente suivant l'intensité du courant dans le circuit qu'ils commandent.

C. Boîte de soufflage.

Une disposition supplémentaire adoptée est de munir le contacteur d'une boîte de soufflage ou pareflamme qui consiste en une chambre étroite en matière réfractaire et isolante, ouverte généralement vers le haut ou latéralement. Cette boîte de soufflage est placée entre les pièces polaires et les doigts de contact de l'appareil. Elle est maintenue en place par un dispositif à verrou et elle est amovible afin de permettre la visite du contacteur.

Son rôle est de maintenir l'arc dans une enceinte bien délimitée de façon à éviter qu'il ne s'accroche à un point quelconque du contacteur ou de son support en liaison avec la masse.

D. Intercalaires des boîtes de soufflage.

Les boîtes de soufflage sont munies d'intercalaires ou fendeurs d'arc qui se plaçant entre les cornes de soufflage obligent l'arc soit à se diviser, soit à s'allonger en contournant ces intercalaires. Ceux-ci sont en matière réfractaire et isolante et sont fixés par vis aux joues de la boîte de soufflage.

E. Soufflage pneumatique.

Dans certains contacteurs à très grand pouvoir de coupure (disjoncteurs) on fait parfois usage de la pression d'air comprimé pour souffler l'arc.

35.03 Types de contacteurs.

La commande à distance des équipements de traction des automotrices et locomotives électriques est réalisée par une série de contacteurs, intercalés dans le circuit haute tension, qui fonctionnent dans un ordre donné.

Ces constacteurs s'ils procèdent des mêmes principes généraux énoncés plus haut, peuvent par contre être commandés de manière très différente.

On distingue :

- Les contacteurs à commande électropneumatique ;
- Les contacteurs à commande électromagnétique ;
- Les contacteurs à commande par arbre à cames.

35.04 Contacteurs à commande électropneumatique (fig. ^{35.04}).

L'excitation d'une électrovalve (1) permet l'admission de l'air comprimé dans un cylindre (2); l'air comprimé repousse le piston (3) et la tige de piston (5).

Dans son mouvement, la tige de piston (5) déplace la chape (7) en la faisant pivoter autour d'un axe (6) solidaire du support fixe (8); le déplacement de la chape entraîne celui du support (9) du doigt de contact mobile HT (10); lorsque ce dernier entre en contact avec le contact fixe HT (11), le support (9) pivote autour de l'axe (18) solidaire de la chape et entraîne la tige (12) qui comprime le ressort (19) assurant la pression des contacts.

Lorsque l'électrovalve (1) est désexcitée, le ressort de rappel (4) assure le retour en position normale du piston et de l'ouverture des contacts HT. Les contacts HT sont

enfermés dans une boîte de soufflage (15); la bobine de soufflage (13) assure le soufflage magnétique de l'arc vers les cornes de soufflage (14).

Lors de son mouvement, la tige de piston (5) entraîne un blochet isolant (16) sur lequel sont fixées des touches de contact en cuivre : le déplacement de ce blochet devant les doigts de contact (17) permet d'assurer certains verrouillages du circuit d'asservissement. Ces contacts BT sont appelés "interlocks", ils peuvent être soit du type "normalement ouverts" soit du type "normalement fermés" suivant la position qu'ils occupent quand le contacteur est ouvert.

Le fonctionnement de ces contacteurs est souvent réalisé de façon que l'arc se produisant à l'ouverture et à la fermeture n'attaque que les extrémités des contacts et n'affecte pas les surfaces conduisant le courant. Le profil des contacts et la cinématique du contacteur sont tels que les extrémités des contacts se touchent en premier lieu (fig. ^{35.03}) ensuite les contacts roulent l'un sur l'autre sous l'action d'un ressort, de sorte qu'au moment de la fermeture complète le contact final se porte sur la partie arrière du contact ou "talon" (fig. ^{35.04}). Au moment de l'ouverture, les extrémités des contacts se séparent en dernier lieu. Le roulement des contacts réduit au minimum toute usure d'ordre mécanique et empêche la soudure des contacts.

Ces contacteurs doivent pouvoir fonctionner sur le matériel roulant S.N.C.B. pour une tension minimum de 60 volts et une pression d'air minimum de 3,5 kg/cm².

Citons pour mémoire que certains contacteurs électropneumatiques peuvent être équipés d'un circuit magnétique de soufflage réalisé par des aimants permanents. Sur les locomotives électriques les contacteurs de ce type ont les aimants permanents peints en rouge afin de pouvoir les différencier.

35.05 Contacteurs à commande électromagnétique (fig. ^{35.05}).

Le contact mobile (1) est monté sur une armature mobile (2) attirée contre le noyau d'une bobine (3) alimentée en basse tension. La force d'attraction exercée sur l'armature mobile pour vaincre le ressort de rappel (4) est fonction des ampères-tours de la bobine (3).

Le contact mobile (1) roule sur le contact fixe (5) en comprimant le ressort (6), de façon que le contact final se porte sur le talon.

L'armature mobile (2) peut également commander une série d'interlocks.

Les contacteurs électromagnétiques sont utilisés sur les automotrices et locomotives électriques pour la commande des organes du circuit auxiliaire HT (compresseur, ventilateur).

La tension minimum prescrite pour leur fonctionnement est de 60 volts, pratiquement elle est de l'ordre de 45 à 50 volts. Ils sont prévus pour un courant maximum de 15 ampères, mais suivant leur utilisation ils sont équipés de bobine de soufflage différentes (soit 2, 7,5 ou 15 amp.).

35.06 Contacteurs à commande par arbre à cames.

Les contacteurs de ce type sont manoeuvrés mécaniquement par la rotation d'un arbre à cames actionné par un servo-moteur pneumatique ou électrique.

En principe, un contacteur comporte : (fig. 35.06)

- Un contact fixe en cuivre (1) fixé par vis sur un support en bronze ;
- Un contact mobile en cuivre (2) tourillonnant sur la rotule (3) d'un support en bronze.

Le contact mobile (2) porte un pivot (4) avec tige (5) recevant un ressort (6) qui assure la fermeture, et un galet (7) qui, actionné par la came (8) provoque la fermeture.

Les contacts fixes et mobiles en cuivre sont garnis à leur point de contact d'une pastille en argent (9) qui constitue la pièce d'usure et de remplacement.

Les contacts sont enfermés dans une boîte de soufflage mobile (10); l'arc est étouffé à la sortie de la boîte dans des tuyères plissées.

Le circuit magnétique de soufflage comporte une bobine de soufflage (12) avec ses deux fers de champ, montée sur le support de contact fixe et les contacts sont pourvus de cornes de soufflage.

Selon sa forme, la came peut :

- Pousser le galet (7), faire tourner le balancier (11) et le contact mobile (2) qui lui est solidaire autour de la rotule (3), ouvrant ainsi le contact et comprimant le ressort (5) ;
- Faire tourner le balancier (11) sous l'action du ressort (6) ; le contact mobile (2) tourne autour de sa rotule (3), le galet rentre dans une encoche de la came et le contacteur se ferme.

Ce type de contacteurs ne comporte pas d'interlocks commandés directement par son équipage mobile.

Il est plus aisé, dans ce cas, de placer en bout de l'arbre à cames et commandé simultanément par le servomoteur, un tambour comportant des segments en cuivre se déplaçant devant des balais appropriés : c'est le "tambour d'asservissement".

Par rapport aux commandes électromagnétiques et électropneumatiques, la commande par arbre à cames présente des avantages indéniables :

- a) Un même arbre à cames peut commander un grand nombre de contacteurs, et ce, pour une consommation d'énergie très réduite.

Citons par exemple que sous une tension nominale de 72 volts :

- 1° Une électrovalve consomme environ 0,15 ampère ;
 - 2° Une bobine de contacteur électromagnétique consomme environ 0,20 ampère ;
 - 3° Un servo-moteur électrique consomme environ 16 ampères, mais ce courant n'existe que pendant un court laps de temps : environ une seconde.
- b) La séquence de fonctionnement est toujours parfaitement réalisée; ce qui ne nécessite point des dispositifs de verrouillage (contrôle de l'ordre de fonctionnement) ;
 - c) Permet la possibilité de prévoir une commande manuelle de secours ;
 - d) Il est possible de concentrer les différents contacteurs dans un espace réduit ;
 - e) Simplifie les travaux d'entretien et donne une plus grande sécurité de marche.

Par contre, un équipement de ce genre nécessite une construction plus soignée et une mise au point plus délicate.

QUESTIONNAIRE.

- 33.01 Citez les appareils rencontrés dans le circuit pneumatique des pantographes.
- 33.02 Quel est le rôle du sectionneur B.T. (ou contact de court-circuit) jumelé à la commande du sectionneur HT pantographe d'une automotrice ?
- 33.03 Quelles sont les opérations à effectuer par un conducteur après l'ouverture d'un sectionneur SP (locomotives) pour éviter que le pantographe défectueux se lève ?
- 34.02/03/04 Citez les sortes de résistances de démarrage.
- 35.02 Citez les dispositifs destinés à favoriser l'extinction de l'arc.
- 35.03. Citez les types de contacteurs.
- 35.04/06 Dessinez le schéma de principe d'un contacteur H.T. et expliquez le fonctionnement.
- 35.06 Comment est réalisé le verrouillage électrique avec des contacteurs à commande par arbre à cames ?

37.01. Interrupteur principal des automotrices.

L'interrupteur principal ou "rupteur" est destiné à interrompre le circuit des moteurs de traction chaque fois que l'alimentation de ces moteurs doit être coupée pour des manoeuvres normales, en cas de surcharge, de baisse exagérée de tension ou en cas de fonctionnement du dispositif de veille automatique (relais "control-Switch"). La rupture du courant de traction ne doit ainsi pas être effectuée par les contacteurs du circuit de traction, elle est assurée par le rupteur qui est conçu spécialement à cet effet.

En principe, le rupteur est constitué de plusieurs contacteurs H.T. raccordés en série.

37.02. Rupteur ou interrupteur principal.

Ce rupteur est appliqué sur toutes les automotrices (sauf AM ex-types 35 (TAP) et 1953 MA).

Il est constitué de 4 contacteurs électropneumatiques connectés en série (fig.37.01).

Les quatre électrovalves de commande des contacteurs sont excitées simultanément et sous la dépendance des fils de contrôle 2 et 9 mis sous tension en même temps lorsque le manipulateur M2 est placé en position de marche.

Le relais Q 72 est mis sous tension par le fil 9 à condition que l'inverseur HT soit dans le sens de marche, correspondant à la manette d'inversion du manipulateur M1, qu'il y ait de la haute tension (RTN), que les relais de protection RMI et RMII soient enclenchés, que le contacteur du S.M. soit fermé (KSM) et pour certaines AM que le relais différentiel QD soit enclenché.

Les électrovalves des contacteurs RL 1 - RL 2 - RL 3 RL 4 sont mises sous tension ensemble par le fil 2 à condition, que le sectionneur des circuits d'asservissement soit fermé, que l'équipement JH soit en position normale 1; et pour le circuit de retour de ces 4 EV, que les cylindres de frein soient vides et que la conduite du frein automatique soit chargée à la pression de régime 5 kg/cm² (SWC 1 - SWC 2).

De cette façon tout fonctionnement de relais de protection (par exemple) coupe simultanément l'alimentation des 4 électrovalves du rupteur (par déclenchement du relais Q 72).

On a ainsi l'assurance d'une coupure simultanée des 4 électrovalves du rupteur qui, combinée avec une exécution parfaite des 4 contacteurs, engendre une ouverture simultanée des 4 contacteurs.

Il est en effet essentiel que les 4 contacteurs s'ouvrent simultanément; tout retard de l'un ou de plusieurs d'entre eux aurait pour effet de reporter toute la coupure sur les premiers contacteurs qui s'ouvrent et de dépasser leur puissance de coupure.

37.03. Eliminateurs des moteurs de traction des automotrices.

En principe, ce type d'éliminateur comprend :

- a) soit un tambour en matière isolante sur lequel sont fixés des segments de contact en cuivre et en regard desquels sont placés des doigts de contact HT (fig.37.02).

La rotation du tambour, commandée par une manette, assure l'élimination voulue, par ex.

- groupe I éliminé
- groupe II "
- les deux groupes éliminés (remorque comme véhicule).

- b) soit deux sectionneurs quadripolaires (fig.37.03).

Ces sectionneurs peuvent occuper les positions suivantes :

- l'un verticale barreau isolant en haut, l'autre verticale barreau isolant en bas : les deux groupes moteurs de traction sont en service.
- le déplacement de l'un ou de l'autre sectionneur dans les gachés du milieu assure l'élimination de l'un ou de l'autre groupe de moteurs.
- quand les deux sectionneurs sont placés horizontalement, les deux groupes sont éliminés. (Remorque comme véhicule).

Les sectionneurs sont maintenus dans cette position par un dispositif de blocage.

37.04. Eliminateurs des locomotives.

Locomotives séries 22, 23, 25.

Chacune de ces locomotives est pourvue de 4 éliminateurs identiques : un par moteur.

Un éliminateur comprend 4 doigts à rotule (1) reposant sur un contact fixe en cuivre (2).

L'ouverture des contacts est réalisée à l'aide de cames (3) montées sur un axe hexagonal (4) manoeuvré à la main à l'aide d'une manivelle (5).

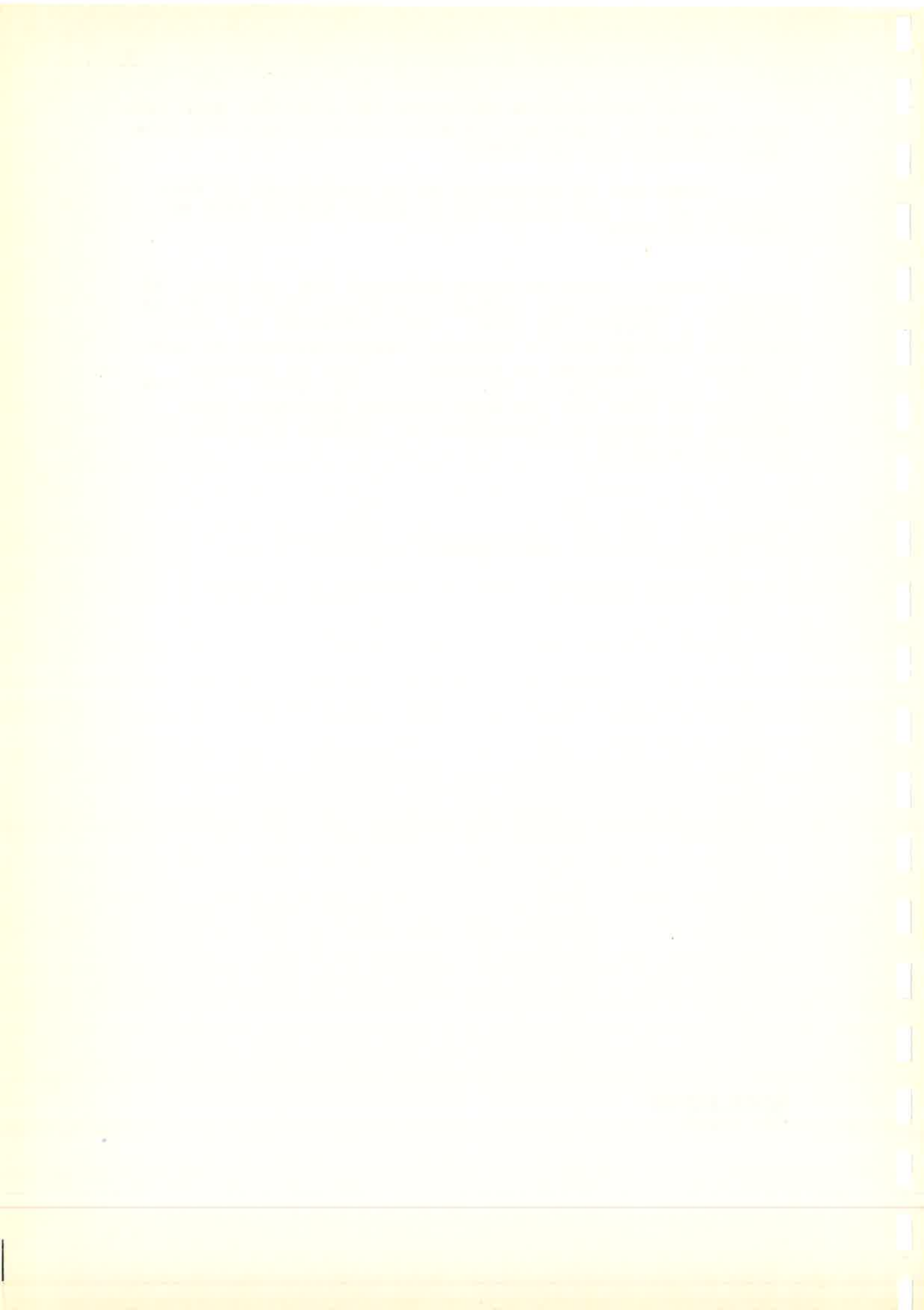
Cours 124.20.

37e leçon.

Cette manivelle de manoeuvre est amovible, mais elle est étudiée de façon qu'elle soit rendue prisonnière lorsque l'éliminateur est ouvert.

Comme sur la locomotive on ne dispose que de deux manivelles, il est impossible d'isoler plus de deux moteurs à la fois.

L'arbre à cames actionne également des contacts d'interlocks : contacts par tambour d'asservissement ou petits contacts à commande par cames. Ces interlocks ont leurs contacts insérés dans le circuit d'asservissement de façon à limiter le démarrage en commande normale au couplage "série" lorsque l'un des éliminateurs est ouvert. Sur les locomotives série 23, ils sont utilisés également pour empêcher la marche en "récupération" lorsque l'un des moteurs est éliminé.



38.01. Systèmes de commande des contacteurs.

Pour démarrer une automotrice ou une locomotive électrique, après avoir appliqué la tension aux bornes des moteurs, il faut éliminer progressivement la résistance de démarrage jusqu'à la position "fin" du couplage série, procéder au changement de couplage "série" à série-parallèle en réintégrant la résistance de démarrage et de nouveau éliminer la résistance de démarrage jusqu'à la position finale du couplage "série-parallèle", puis éventuellement procéder au shuntage des moteurs de traction.

Ces modifications dans le circuit de traction s'effectuent par l'intermédiaire d'une série de contacteurs que l'on ouvre et que l'on ferme dans un ordre voulu.

Cette "séquence" de fonctionnement des contacteurs peut être commandée de différentes façons.

On distingue :

- La commande par tambour d'asservissement, celui-ci étant actionné soit manuellement (controller BT), soit par un servo-moteur pneumatique;
- La commande par arbre à cames, entraîné par un servo-moteur pneumatique ou électrique.

Avant d'étudier en détail le principe de fonctionnement de ces différents systèmes, nous signalerons pour mémoire la commande par controller à action directe, qui est utilisée couramment en tramways.

38.02. Controller à action directe.

Dans ce système, on n'utilise généralement pas de contacteurs. Le wattman commande directement les modifications du circuit de traction à l'aide d'un "controller".

Cet appareil est constitué essentiellement d'un tambour en matière isolante sur lequel sont fixés des segments en cuivre. Sur ces segments frottent des doigts de contact auxquels sont raccordés les câbles du circuit de traction. Suivant la position occupée par le tambour (actionné par une manette) et, compte tenu de la forme donnée aux segments, on ferme ou on ouvre les différents circuits (fig.38.01).

Lorsque le véhicule comporte deux cabines de conduite, un controller doit être installé dans chacune des cabines. Les deux controllers sont alors raccordés en parallèle.

La manette de commande du controller est généralement amovible de façon que la manoeuvre de démarrage ne puisse s'effectuer simultanément des 2 cabines : il n'existe alors qu'une seule manette par véhicule.

Ce système de démarrage par controller à action directe n'est pas utilisé pour des tensions supérieures à 1000 volts. On lui reproche en effet :

- 1° De mettre à portée du conducteur des appareils à haute tension où peuvent circuler des courants élevés;
- 2° D'exiger un câblage important : (fortes sections de câbles, isolés à HT) d'où prix prohibitif de l'équipement;
- 3° D'avoir une puissance de coupure relativement peu élevée. Pour l'améliorer, on pourrait munir ce controller de pareflames, de bobine de soufflage et l'équiper de contacts à rupture brusque. Dans ce cas, l'encombrement de l'appareil ne permettrait plus son placement dans la cabine de conduite.
- 4° De ne pas permettre la commande automatique;
- 5° De rendre quasi impossible la commande en unités multiples; celle-ci nécessiterait en effet des coupleurs encombrants pour les câbles HT entre véhicules.

38.03. Commande par tambour d'asservissement.

Si au lieu d'installer un controller à HT dans la cabine de conduite, nous y installons un controller BT dont les contacts commandent à distance l'ouverture ou la fermeture d'une série de contacteurs HT, nous réalisons un système de commande simple et qui ne possède aucun des inconvénients signalés pour le controller HT.

Ce controller BT ou "Tambour d'asservissement" pourra être actionné manuellement par le conducteur lorsque l'on ne désire pas effectuer la commande automatique ou, dans le cas contraire, être actionné par un servo moteur.

En cas de commande uniquement manuelle, ce tambour d'asservissement constitue "en fait" le "manipulateur".

La fig. 38.02 schématise une telle réalisation. Celle-ci est appliquée sur les locomotives série 29.

Suivant la position qu'occupe le tambour, la tension positive d'asservissement excite une ou des électrovalves de commande des contacteurs électropneumatiques : ceux-ci se ferment. La forme donnée aux segments du tambour fixe donc la séquence de fonctionnement des contacteurs. Toutefois, il est à craindre que par suite d'une avarie aux circuits d'asservissement (mauvais contact électrique, fil cassé...) ou un fonctionnement mécanique défectueux de l'un ou l'autre contacteur, la séquence ne soit pas respectée d'une façon absolue. Citons, par exemple, le cas où les contacteurs d'élimination des deux premiers échelons de la résistance de démarrage ne se ferment pas.

Lors de la fermeture du contacteur du 3^e échelon, non seulement on constatera une pointe de courant (élimination en un cran de 3 gradins de résistance) importante, mais l'accélération s'effectuera brutalement (confort des voyageurs). Pour être certain que la séquence de fonctionnement des contacteurs sera bien respectée, on "verrouille" ces contacteurs l'un par rapport à l'autre. Ce verrouillage est possible grâce à la présence d'interlocks ou contacts BT commandés par le mécanisme du contacteur.

On distingue des interlocks normalement ouverts (NO) c'est-à-dire "ouverts" quand le contacteur est déclenché et "fermés" quand le contacteur est enclenché et des interlocks normalement fermés (NF) c'est-à-dire "fermés" quand le contacteur est déclenché et "ouverts" quand le contacteur est enclenché.

Dans l'exemple, cité ci-avant, pour éviter que le contacteur du 3^e échelon ne s'enclenche avant le contacteur du 2^e échelon, il suffit de munir ce dernier contacteur d'un interlock NO que l'on insérera dans le circuit d'alimentation de l'électrovalve du contacteur du 3^e échelon.

Cette disposition, qui semble simple de prime abord, présente l'inconvénient de compliquer les circuits d'asservissement, donc d'augmenter les risques d'avaries et de rendre le dépannage plus difficile.

38.04. Servo-controller à commande électropneumatique ACEC - Description et fonctionnement (fig.38.03).

Le tambour à touches de contact (1) est actionné par un servo-moteur pneumatique par l'intermédiaire d'un pignon (2) et d'une crémaillère (3).

Le servo-moteur est constitué de deux cylindres de diamètres différents avec pistons différentiels (4 et 4').

Le grand piston (4) mis sous pression à l'intervention de l'électrovalve (5) tend à manoeuvrer le tambour (1) dans le sens "progression", tandis que le petit piston (4') toujours sous pression ramène le tambour à la position 0 quand le grand cylindre est mis à l'échappement.

Un dispositif à cliquet (6) permet d'effectuer la rotation du tambour : "cran par cran". Ce cliquet immobilise le tambour en bloquant la roue à rochets (7).

Le soulèvement du cliquet qui libère la roue à rochets est produit par la tige du piston se déplaçant dans un cylindre à air comprimé (8) alimenté par l'électrovalve (9). Le cliquet se lève lorsque l'électrovalve est alimentée. Lorsque l'électrovalve n'est pas alimentée, le cylindre est mis à l'échappement et son piston revient sous l'action du ressort (10).

Pour assurer la progression, cran par cran du servo-moteur, il faut donc :

- Exciter l'électrovalve (5)
- Exciter et déexciter alternativement l'électrovalve (9)

Pour assurer la régression du servo-moteur, il suffit d'interrompre le circuit de l'électrovalve (5).

Pour assurer la progression automatique et cran par cran du servo-controller, l'alimentation de l'électrovalve (9) est assujettie à la fermeture du contact du relais d'accélération (11).

Toutefois on adjoint au relais d'accélération, une bobine de levage qui est alimentée un instant pendant la progression d'un cran au suivant.

De ce fait le relais d'accélération ouvre son contact à chaque cran et le servo-moteur pneumatique séjournera ainsi sur chaque cran aussi longtemps que le relais d'accélération ne se sera pas refermé, c'est-à-dire aussi longtemps que le courant de reprise ne sera pas atteint.

39e leçon.

39.01. Commande par arbre à cames.

Dans ce système, les différents contacteurs sont manœuvrés mécaniquement par la rotation d'un arbre à cames.

Rappelons brièvement leur fonctionnement.

Le contact mobile (1) du contacteur fixé sur un levier (2) monté sur un support isolé (3) (fig. 39.01). Il porte à son extrémité un galet (4) qui roule sur la périphérie de la came (5) en matière isolante. A l'autre extrémité, se trouve le contact. Entre l'articulation et le contact agit un ressort de rappel (6) qui pousse constamment le galet contre la came. Quand le galet descend une pente de la came, le ressort fait pivoter le support de contact mobile dans le sens d'une fermeture des contacts. Quand le galet aborde une rampe de la came, le support pivote dans l'autre sens à l'encontre du ressort et les contacts souvrent.

Le profil des cames est taillé de manière à réaliser aux divers crans la séquence de fonctionnement des contacteurs.

Cette commande des contacteurs par cames présente l'avantage de lier rigidement entre eux les mouvements des contacteurs. Elle assure donc un verrouillage inviolable entre les contacteurs : chacun coupe le courant dans des conditions bien déterminées, ce qui dispense d'utiliser des interlocks.

C'est le système le plus utilisé sur le matériel de traction électrique de la S.N.C.B.

L'arbre à cames est actionné par un servo-moteur électrique.

39.02. Systèmes de démarrage par arbre à cames commandés par servo-moteur électrique.

Ces systèmes comprennent :

- un arbre à cames commandant l'ouverture et la fermeture des contacteurs haute tension;
- un mécanisme de commande de l'arbre à cames.

Sur le matériel de la S.N.C.B. c'est le système JH (Jeumont-Heidman) qui a été adopté.

Il équipe toutes les locomotives et toutes les automotrices sauf hle série 29 et automotrices ex. types 1939, 1953 Marelli et 35 (TAP).

39.03. Mécanisme de commande de l'arbre à cames système JH.

Le système de commande de l'arbre à cames comporte (fig. 39.02) :

Un plateau (1) portant une couronne dans laquelle sont taillées autant de rainures radiales équidistantes que l'arbre à cames comporte de crans; le plateau est calé en bout d'arbre de ce dernier.

Vis-à-vis de ce plateau est placé un servo-moteur électrique (3) dont l'arbre porte une manivelle (4). Le bouton de la manivelle porte à son tour un galet (5) qui s'engage tangentiellement dans les rainures du plateau; il actionne également par une bielle (6) un second galet (6) qui assure le verrouillage du plateau.

Quand le servo-moteur fait un tour, le plateau est saisi par le galet de la manivelle et déverrouillé par la bielle (fig. 39.03); ensuite il est entraîné d'une dent (fig. 39.04), reverrouillé et abandonné par la manivelle (fig. 39.05).

Le plateau est ainsi saisi à vitesse nulle, accéléré, puis arrêté par la manivelle, le galet de verrouillage ne faisant que fixer le plateau préalablement immobilisé.

L'arrêt du servo-moteur, lorsqu'il a immobilisé et verrouillé le plateau, est obtenu par freinage électrique; un ressort empêche d'autre part tout mouvement spontané et intempestif.

Le servo-moteur actionne, en même temps, un petit contacteur dit autorupteur (14) dont le rôle est d'assurer l'alimentation directe du servo-moteur dès que le galet de la manivelle est engagé dans une rainure du plateau. On a ainsi l'assurance que tout cran commencé doit obligatoirement s'achever.

39.04. Principe de fonctionnement du servo-moteur JH.

Le moteur du JH est un moteur shunt possédant deux inducteurs (a) et (b) utilisés alternativement pour chaque sens de marche du moteur (fig. 39.06).

Les inducteurs consomment un courant du même ordre de grandeur que l'induit.

Examinons d'abord un schéma très simple du JH dans lequel nous introduirons successivement les différents éléments constituant le JH.

Fig. 39.06

La position du relais d'inversion E détermine le sens de rotation en branchant l'induit en parallèle avec l'un ou l'autre des circuits inducteurs (a ou b).

La fermeture du relais d'alimentation F fait démarrer le servo-moteur dans le sens choisi par le relais E.

L'ouverture du relais F déclenche le freinage électrique du servo-moteur, l'induit débitant du courant dans l'un des inducteurs (a ou b) suivant la position du relais E.

Le moteur électrique comporte encore un relais flux (Φ). Ce relais ferme le circuit de l'induit et ne permet au moteur de démarrer que lorsque le flux des inducteurs atteint une valeur suffisante pour assurer le freinage de l'induit, dès que le relais F s'ouvre. Le contact du relais flux s'ouvre en fin de freinage lorsque le flux est tombé en dessous de cette valeur.

Fig. 39.07

L'autorupteur A se ferme dès que le galet de la manivelle du servo-moteur s'engage dans une rainure du plateau calé en bout de l'arbre à cames.

En shuntant le relais F, il assure l'achèvement intégral de tout passage de cran ayant reçu un commencement d'exécution. En court-circuitant la résistance branchée en série avec le contact du relais F, il achève le démarrage du servo-moteur.

Fig. 39.08

Le servo-moteur est contrôlé par deux fils d'asservissement :

- le fil m qui commande la progression du servo-moteur;
- le fil n qui commande la régression du servo-moteur.

En excitant le fil m le relais de verrouillage V basculant à l'encontre du ressort, ferme le contact alimentant la bobine $m_2 m_3$ du relais d'inversion E et la bobine r_{13} du relais d'alimentation F. Le moteur démarre dans le sens de progression.

En excitant le fil n, le relais de verrouillage V obéissant à son ressort de rappel ferme le contact alimentant la bobine $n_5 n_7$ du relais d'inversion E et la bobine r_{13} du relais d'alimentation F. Le moteur démarre dans le sens régression.

Fig. 39.09

En plus de la bobine r_{13} , le relais d'alimentation F porte deux autres bobines :

- la bobine EC EF est une bobine de maintien parcourue par le courant du servo-moteur, quand l'autorupteur est ouvert; elle empêche de pouvoir commander l'ouverture de F par la désexcitation de la bobine r_{13} .
- la bobine EC.ED est une bobine d'arrachement parcourue par le courant du servo-moteur, quand l'autorupteur est fermé; elle commande l'ouverture de F dès que la bobine r_{13} n'est plus excitée.

Par l'action combinée de ces deux bobines, les contacts du relais F se trouvent soulagés du soin de couper le courant du moteur; cette coupure est effectuée par l'autorupteur.

Fig. 39.10

Les relais V et E possèdent chacun deux bobines de maintien EI.EK, EO.EP; EI.EK, EN.EO parcourues par le courant de l'un ou de l'autre des deux inducteurs du servo-moteur. Elles maintiennent les armatures basculantes des deux relais dans la position acquise aussi longtemps que l'inducteur est parcouru par du courant, c'est-à-dire aussi longtemps que le servo-moteur n'a pas terminé une manoeuvre complète de démarrage et de freinage de l'induit. Ces bobines ont pour but d'assurer le freinage total et l'arrêt du servo-moteur avant de pouvoir l'alimenter pour la rotation dans le sens inverse de celui dans lequel il est lancé.

Fig. 39.11

L'alimentation par le fil m de la bobine du relais F passe par les contacts m.1 m.2 d'un relais d'accélération G. Ce relais possède une bobine ED, EG qui, parcourue par le courant du servo-moteur, attire l'armature et ouvre le contact; il possède en outre deux bobines de maintien parcourues par chacun des courants des deux groupes de moteurs de traction. Ce relais ne permet la progression du servo-moteur que lorsque le courant dans les deux groupes de moteurs est tombé en dessous d'un minimum réglable.

39.05. Résumé d'une manoeuvre de progression du servo-moteur.

Une manoeuvre de progression d'un cran du servo-moteur est réalisée suivant les divers stades indiqués ci-après :

1^{er} stade. Le relais d'accélération B retombe, ferme le contact m.1 m.2. Si le fil m est alimenté, le relais F bascule et provoque le démarrage du servo-moteur comme expliqué à la fig. 39.08

2e stade. L'auto-rupteur A se ferme assurant l'achèvement intégral du passage du cran comme expliqué à la fig. 39.07. En même temps la bobine ED-EG du relais G parcourue par le courant d'alimentation du servo-moteur, coupe le courant au contact m.1 m.2. La bobine r₁₃ du relais F n'étant plus alimentée permet à la bobine d'arrachement EC-ED parcourue par le courant du servo-moteur d'ouvrir le contact EF-EE (voir fig. 39.09).

3e stade. Dès que l'arbre à cames a terminé le passage du cran, l'auto-rupteur A s'ouvre et comme le contact EF-EE du relais F est ouvert, il coupe le courant d'alimentation du servo-moteur.

Deux cas se présentent :

1r cas : le courant dans les moteurs de traction dépasse la valeur pour laquelle le relais G est réglé; l'armature du relais G reste au collage, le contact m.1 m.2 est coupé. Le servo-moteur n'étant plus alimenté freine son mouvement (voir fig. 39.06) et s'arrête.

2e cas : le courant dans les moteurs de traction est inférieur à la valeur pour laquelle le relais G est réglé; l'armature du relais G retombe, ferme le contact m.1 m.2. Nous nous retrouvons dans la situation du 1r stade; le servo-moteur continue sa progression pour commander un nouveau passage de cran.

39.06. Cylindre d'asservissement.

L'arbre à cames entraîne dans son mouvement un cylindre d'asservissement qui agit sur le circuit de commande.

L'axe de ce tambour est soit dans le prolongement de l'arbre à cames, soit commandé par l'intermédiaire d'engrenages. L'asservissement comporte un cylindre garni de touches de cuivre et une série de doigts de contact en acier.

Le nombre de positions du cylindre d'asservissement correspond au nombre de positions de l'arbre à cames.

Remarque.

Sur les locomotives, le nombre de contacteurs étant beaucoup plus élevé que sur les automotrices, un seul arbre à cames est insuffisant, on en utilise donc plusieurs. Ainsi par exemple, la locomotive ~~type~~ 22 est équipée de 2 arbres à cames actionnés par des servo-moteurs différents :

6.

- le 1^{er} arbre appelé JH1 commande les contacteurs de couplage et de résistance;
- le 2^e arbre appelé JH2 commande les contacteurs de shuntage des moteurs de traction.

Dans le cas d'un équipement comportant plus d'un arbre à cames, il est nécessaire de verrouiller ceux-ci réciproquement afin d'avoir la certitude que la séquence de fonctionnement sera bien respectée. Ce verrouillage est réalisé électriquement par des contacts des tambours d'asservissement.

QUESTIONNAIRE.

- 37.02 De quoi se compose le rupteur ou interrupteur principal ?
- 37.02 A l'aide du schéma, citez toutes les causes de déclenchement du rupteur ou interrupteur principal.
- 37.03 Comment est constitué l'éliminateur des moteurs de traction des automotrices ?
- 37.04 Pourquoi le passage au couplage S.P. est-il interdit ou impossible, quand un moteur de traction est éliminé sur une locomotive ?
- 38.03 Comment est réalisé le verrouillage réciproque des contacteurs à commande électro-pneumatique ?
- 38.03 Qu'entend-on par interlock NO et interlock NF ?
- 39.02 Citez les deux parties principales du système de démarrage par arbre à cames.
- 39.04 Quelles sont les particularités propres au moteur JH ?
- 39.04 A quoi sert:
a) le relais flux;
b) l'autorupteur.
- 39.06 Quel est le rôle du tambour d'asservissement JH ?
- 39.06 Combien d'arbres à cames existent-ils sur une locomotive et quels contacteurs commandent-ils ?

41e leçon.

41.01. Inverseur de marche.

L'inversion du sens de marche s'obtient soit en inversant les connexions aux bornes de l'induit, soit en inversant les connexions aux bornes des inducteurs. C'est cette dernière méthode qui est utilisée sur tout le matériel de la S.N.C.B.

L'inversion du sens de marche doit s'effectuer à l'arrêt.

D'autre part, l'inverseur de marche n'étant pas un appareil de coupure, sa manoeuvre s'effectue toujours quand les circuits HT ne sont pas sous-tension : des verrouillages dans les circuits d'asservissement empêchent toute fausse manoeuvre.

La manoeuvre de l'inverseur est automatique; toutefois, il est possible de l'effectuer manuellement en cas d'avarie. Pour éviter toute fausse manoeuvre, la commande à distance nécessite l'utilisation d'une "manette d'inversion" verrouillée par le manipulateur en position de marche. Chaque locomotive ou automotrice est souvent pourvue d'une manette à 2 positions différentes : l'une pour le sens de marche "avant" et l'autre par le sens de marche "arrière".

Il est très important également que la manoeuvre d'inversion s'effectue correctement, c'est-à-dire que les connexions soient bien établies sans mauvais contact. Dans le cas contraire l'appareil serait rapidement détérioré par les arcs et coups de feu qui naîtraient inévitablement. Pour éviter cela, on prévoit également des verrouillages dans les circuits d'asservissement; ceux-ci ne permettent le démarrage de l'automotrice ou de la locomotive que lorsque l'inversion est bien réalisée. De plus, un index indique la position occupée : sens I ou sens II. Lors d'une commande d'inversion effectuée manuellement il est nécessaire que le conducteur s'assure de la position correcte de l'appareil.

Le matériel de traction électrique de la S.N.C.B. est équipé de différents types d'inverseurs que nous pouvons classer en deux catégories :

- inverseurs à commande par moteur électropneumatique;
- inverseurs à commande par moteur électrique.

Nous décrirons ci-après le principe de fonctionnement de chacun de ces types.

41.02. Inverseur de marche à commande par moteur électropneumatique.

Quel que soit le type de construction (ACEC, Marelli; etc), le principe de fonctionnement de ces inverseurs est identique.

Il se compose (fig. 41.01) de deux flasques (1) en tôle d'acier, liées entre elles par quatre entretoises (2) et par deux supports isolés (3); sur lesquels sont fixés les doigts de contact haute tension (4) et basse tension (5).

L'arbre (6) tournant dans les paliers (7) logés dans les flasques (1) porte le tambour d'inversion (8) en matière isolante, ainsi qu'un tambour auxiliaire (9). Le tambour d'inversion porte des segments sur lesquels appuient les doigts de contact haute tension (4).

L'arbre est commandé par la fourche (10) (ou engrenages) qui est entraînée par la tige commune (11) des deux pistons (12). Ceux-ci se déplacent dans les cylindres (13) qui sont fixés sur une des flasques (1).

Le déplacement du piston est obtenu par l'action de l'air comprimé admis dans le cylindre par l'une ou l'autre extrémité grâce à l'excitation judicieuse de l'une des électrovalves (14).

La manette (15) permet de manoeuvrer l'inverseur à la main si la commande automatique est défectueuse.

41.03. Inverseurs de marche à commande par moteur électrique.

Ce type d'inverseur équipe les automotrices et locomotives munies d'un système de démarrage JH, il fait partie intégrante de celui-ci.

Il se compose de 2 flasques (1) entretoisés par 2 supports isolés (2) (fig. 41.02). Chacun de ces supports porte 4 doigts (3) à haute tension du type à rotule analogue aux contacts mobiles des contacteurs, et plusieurs doigts basse tension (4). Ces doigts de contact s'appuient sur un tambour (5) en matière isolante portant des touches de contact en cuivre (6).

L'arbre (7) de ce tambour tourne dans des paliers logés dans les flasques.

La pression des doigts principaux sur les touches de contacts est réalisée par un ressort (8).

Le tambour peut prendre 4 positions : sens II - sens I - sens II - sens I.

Le mécanisme d'entraînement du tambour, monté en bout d'arbre est actionné par le servo-moteur JH. Ce tambour est entraîné de $1/3$ de tour, toujours dans le même sens, par l'arbre à cames lorsque celui-ci se déplace en arrière de la position initiale :

de la position 1 à -1 sur les automotrices;
de la position 0 à -2 sur les locomotives.

L'inversion du sens de marche est donc obtenue en imposant à l'arbre à cames par un asservissement convenable :

- le mouvement 1, - 1, 1, - 1, 1 pour les automotrices;
- le mouvement 0, -2, 0, -2, 0 sur les locomotives.

Cette différence tient du fait de la réalisation de l'entraînement du tambour d'inversion exécutée différemment sur l'automotrice et sur la locomotive.

A. Cas des automotrices (fig. 41.03).

Dans son mouvement, 1 - 1, l'arbre à cames entraîne un levier (1) portant à son extrémité un manchon (2). Ce manchon agit par l'intermédiaire d'une bielle (3) sur le cliquet (4) qui pousse de $1/8$ de tour la roue à rochets (5) calée sur l'arbre du tambour d'inversion. Lorsque l'arbre à cames revient à la position 1, levier, bielle et cliquet reprennent leur position initiale sous l'action du ressort (6), l'inverseur restant dans la position acquise.

Le renouvellement du mouvement 1, - 1 de l'arbre à cames provoquera à nouveau la rotation de $1/8$ de tour du tambour d'inversion qui, à ce moment, a accompli une inversion complète.

L'arbre à cames revenant sur la position 1, levier, bielle et cliquet reprennent leurs positions initiales, et le mécanisme de commande de l'inverseur se trouve en bonne position pour une nouvelle inversion. Le mouvement du cliquet (4) est, comme celui de l'arbre à cames, d'abord accéléré, puis retardé. Pour que le tambour inverseur suive exactement ce mouvement sans prendre d'avance, il suffit de le freiner suivant un couple au moins égal au couple d'inertie. Ce couple est obtenu par un frein à bandes (9) réglable par ressort (fig. 41.02).

B. Cas des locomotives (fig. 41.04).

L'arbre à cames du JH1 entraîne par un maneton (1) la tête de bielle (2) guidée dans une rainure par l'intermédiaire du levier de réglage (3); la tête de bielle se prolonge par une tige (14) fixée par un tendeur (5).

Cette tige transmet alors le mouvement à un flasque mobile (6) qui agit sur le cliquet (7) lequel pousse la roue à rochet (8) calée sur l'arbre du tambour de l'inverseur. Lorsque l'arbre à cames revient à zéro, tête de bielle, tige, bielle et cliquet reprennent leur position initiale sous l'action du ressort (9).

41.04. Manipulateurs.

Pour commander le fonctionnement (ouverture et fermeture) des différents contacteurs qui assurent le démarrage et la marche de l'automotrice ou de la locomotive, le conducteur dispose d'un "combinateur" ou "manipulateur" installé dans chacune des cabines de conduite.

Ce manipulateur remplace en quelque sorte toute une série d'interrupteurs, dont les manoeuvres individuelles seraient compliquées pour le conducteur étant donné la fréquence de ces manoeuvres. D'autre part, la concentration en un seul appareil de différentes commandes permet de prévoir des "verrouillages mécaniques" entre elles à l'effet d'empêcher toute fausse manoeuvre.

Le manipulateur étant l'organe principal de la conduite, il était tout indiqué de le faire intervenir dans le dispositif de sécurité dit "de veille automatique".

On distingue 2 catégories principales de manipulateur utilisés sur le matériel de traction électrique de la S.N.C.B.

41.05 Manipulateur des automotrices.

Le manipulateur comporte (fig.41.06):

- a) La manette principale (2) non amovible commandant le tambour principal (3) fixé sur l'axe (1).

Elle peut occuper les positions : 0 - manoeuvre - série - série parallèle.

6.

Elle détermine la position finale que l'équipement doit atteindre automatiquement en progression.

Le shuntage des moteurs de traction est commandé par un interrupteur de commande séparé.

Pour modifier le couplage ou supprimer le shuntage il faut d'abord ramener le manipulateur à zéro.

- b) Le tambour inverseur (4), commandé par la manette d'inversion amovible (5) en forme de fourche est à deux utilisations différentes : l'une pour le sens de marche avant et l'autre pour le sens de marche arrière.

Une des faces de la manette d'inversion peut occuper les positions : 0 et avant; l'autre face peut occuper les positions : 0 et arrière.

La manette d'inversion ne peut être enlevée qu'en position zéro.

Dans les positions "avant" et "arrière", la valve pilote du dispositif de veille automatique est ouverte ce qui oblige à maintenir la pédale en position équilibre (après réarmement).

La manette principale ne peut être manoeuvrée que si la manette d'inversion est sur une position "avant ou arrière".

La manette d'inversion ne peut être remise en position 0 lorsque la manette principale est sur une position de marche.

41.06 Manipulateur des locomotives avec démarrage automatique (fig.41.07).

Ce manipulateur comporte :

une manette de sens de marche;

une manette des vitesses;

une manette de réglage d'effort.

- Le tambour d'inversion peut occuper 3 positions : avant - 0 - arrière.

Ce tambour d'inversion est commandé au moyen d'une manette de sens de marche amovible en forme de fourche. Elle ne peut être enlevée qu'en position 0.

Cours 124.20

41e leçon.

Sur les locomotives série 26, le tambour d'inversion peut occuper 5 positions AV S; AV P; O; AR S; AR P commandé au moyen de deux manettes de sens de marche. Ces manettes servent donc également pour le choix de couplage.

Comme sur les automotrices, dès que la manette de sens de marche est placée sur une position autre que O, l'axe du tambour commande l'ouverture d'une valve pilote du dispositif de veille automatique. L'intervention du conducteur est nécessaire pour neutraliser le fonctionnement du dispositif.

La manette de sens de marche doit être sur une position de marche AV ou AR pour pouvoir manoeuvrer la manette de vitesse et sur certaines hle la manette de réglage d'effort.

Pour que la manette de sens de marche puisse être ramenée à O, la manette des vitesses et sur certaines locomotives la manette de réglage d'effort doivent se trouver en position O.

- La manette des vitesses se présente sous forme d'un volant tronqué.

Elle fixe la position finale que l'équipement doit atteindre automatiquement en progression comme en régression.

Ce volant peut occuper plusieurs positions :

- 0 : arrêt (équipement de démarrage sur 0)
- 1 - 2 ou 3 positions de manoeuvre
- la position série plein champ
- trois positions série-shuntage
- la position série-parallèle plein champ
- quatre ou cinq positions série parallèle shuntage.

Le degré de shuntage peut être différent d'une locomotive à l'autre; il varie de 28 % à 74 %.

La manette des vitesses des locomotives série 26 ne possède pas de position de couplage. Il existe une position repère "plein champ". C'est la manette de sens de marche qui détermine le couplage S ou P.

Il n'existe aucun verrouillage mécanique entre la manette des vitesses et la manette de réglage d'effort.

- Une butée effaçable empêche le passage direct par inadvertance du volant sur les positions différentes afin de limiter les conséquences graves d'un patinage au démarrage.

Cette butée est inopérante lors du retour du volant à zéro.

La manette des vitesses des locomotives série 23 comporte en plus des organes habituels ceux destinés à la commande du freinage par récupérations

- position SR (marche en récupération série) ou la position SPR (marche en récupération série parallèle).

Chacun des couplages ne peut être obtenu que directement à partir de la position zéro.

Le passage direct de S à SP ou de SP à S sans retour préalable à zéro est sans effet.

- La manette de réglage d'effort se présentant sous forme d'un levier à boule permet :

- a) sur positions autre que 0, la progression automatique de l'équipement de démarrage jusqu'à la position finale déterminée par la manette des vitesses (ou manette de sens de marche h1e série 26) et avec effort constant.
- b) accélérer le passage des crans, tout en augmentant l'effort en tirant sur la manette d'effort.
- c) de ralentir la cadence de passage des crans et de diminuer l'effort en remontant la manette d'effort vers 0.
- d) d'arrêter la progression du démarrage; il faut ramener la boule de la manette d'effort à 0.
- e) de provoquer la régression de l'équipement et diminuer instantanément l'effort de traction en poussant sur la boule de la manette d'effort.

La régression se fait aussi longtemps qu'on appuie sur la boule jusqu'au 1er cran manoeuvre.

- f) le démarrage manuel (cran par cran) jusqu'à la position finale déterminée par la manette des vitesses (ou manette d'inversion h1e série 26) en agissant uniquement sur la manette d'effort (voir d))
- g) sur locomotives série 23, de régler l'effort de freinage en récupération. Elle influence le réglage de l'excitation indépendante de la génératrice du groupe de récupération.

42.01. Disjoncteur ultra rapide (DUR).

Sur les locomotives, la protection générale des circuits H.T., traction et auxiliaires, est assurée par un disjoncteur ultra rapide (D.U.R.) type S.E.M.

Seuls les circuits des voltmètres H.T. et du relais de tension nulle ne sont pas protégés par ce disjoncteur; le parafoudre et le parasurtension sont également placés avant le disjoncteur, de façon que les décharges atmosphériques ou les surtensions soient détournées vers la terre.

Si une avarie ou une masse se produit dans ces circuits, le disjoncteur ultra rapide de la sous-station doit déclencher; toutefois le voltmètre H.T. et le relais de tension nulle peuvent être isolés par le sectionneur SA.

Si le parafoudre est avarié la locomotive doit être considérée comme étant en détresse vu que la sous-station déclenchera en permanence lors de la levée des pantographes.

Le parasurtension "Soulé" est éliminé en ouvrant le sectionneur H.T. du pantographe II, en outre le robinet d'isolement est fermé et les interrupteurs correspondants doivent être ouverts.

Le D.U.R. étant un appareil encombrant qu'il serait malaisé de disposer sur une automotrice, seuls les locomotives en sont équipées; en outre il protège un équipement coûteux.

Le rôle du disjoncteur est de protéger l'ensemble des circuits H.T. Il doit donc assurer cette protection en ouvrant le circuit H.T., c'est-à-dire en déclenchant lorsque

- a) Le courant total des circuits H.T. atteint une valeur dangereuse pour l'équipement. Ce déclenchement "direct" est obtenu par un dispositif électromagnétique comportant une bobine série, "la bobine de déclenchement", traversée par le courant total du circuit à protéger (circuits traction et auxiliaire).
- b) Le courant d'un circuit (ou d'une partie des circuits) à protéger dépasse lui-même une valeur limite.

On comprend aisément que, le DUR étant réglé pour un courant total relativement élevé (+ 1400 Amp.), une surcharge dans un des circuits ne provoquerait pas nécessairement son déclenchement, surtout si à ce moment les autres circuits consomment peu ou pas de courant.

2.

On obvie à cet inconvénient grâce à la présence des relais de protection (RM1 - RM2 - RD ou QD) qui assurent le déclenchement "indirect" du DUR.

- c) Quand la tension en ligne disparaît ou descend en dessous d'une valeur déterminée le DUR doit déclencher également; ce déclenchement indirect est occasionné par le relais de tension nulle (R.T.N.)
- d) Lors du fonctionnement du dispositif de la veille automatique ou d'un freinage d'urgence (contact de frein) le DUR déclenchera pour des raisons de sûreté (déclenchement indirect).

Ces déclenchements indirects sont obtenus en coupant l'alimentation d'une bobine de maintien.

42.02. Description du disjoncteur (fig.42.01).

Le disjoncteur comporte en principe :

- a) un noyau magnétique fixe (N) sur lequel sont placées 2 bobines :
 - une bobine de maintien (M) alimentée à basse tension;
 - une bobine H.T. (S), traversée par le courant total du circuit à protéger (bobine de déclenchement).
- b) une armature mobile (L) pivotant autour du point (O) porte le levier (B) sur lequel est fixé le contact (C').

Ce levier (B) peut pivoter autour du point (H), tandis qu'un puissant ressort (R), réglé à 130 kg, et fixé au levier (B) en dessous du point (H), maintient le DUR en position ouverte ou le fait déclencher quand l'alimentation de la bobine de maintien est interrompue ou quand le courant dans la bobine S dépasse une valeur déterminée.

- c) La partie pneumatique de ce DUR est composée d'un cylindre (A) dans lequel le piston (P) est ramené à sa position initiale sous l'action du ressort (r).

Seulement pendant l'enclenchement du DUR l'air comprimé est admis temporairement de façon que le piston se déplace vers la droite.

Dans le circuit de la bobine M se trouvent les contacts des différents relais de protection, de sorte que le fonctionnement de ces relais interrompt l'excitation de la bobine de maintien et le DUR déclenche. Dans un cas pareil il s'agit d'un déclenchement indirect. Quand le DUR est enclenché et que les moteurs de traction, compresseurs, ventilateurs, etc. sont alimentés, un courant traverse la bobine S qui tend à annuler la force magnétique de la bobine de maintien M, vu que ces bobines sont en opposition.

Toutefois ce courant devra atteindre une valeur assez élevée (+ 1400 Amp.) avant que le DUR déclenche.

Cette valeur ne sera atteinte que lorsque les relais de protection ne fonctionnent pas à cause d'avarie ou lorsque une masse se produit entre le DUR et le relais différentiel.

Dans le présent cas il s'agit d'un déclenchement direct.

42.03. Fonctionnement du DUR.(fig. 42.02 - 42.03 - 42.04 - 42.05)

Le contact C' est porté par un levier mobile B, à faible inertie, pivotant autour de l'extrémité H de l'armature L pivotant elle-même autour du point fixe solidaire du bâti.

En dessous du point H il y a un puissant ressort de rappel R qui fait pivoter le levier B et l'armature L autour de l'axe O. De ce fait, le levier B trouve un appui contre le levier Z (le disjoncteur est déclenché).

En déplaçant un piston P dans le cylindre à air comprimé A tout en sollicitant un ressort de rappel r, un levier Z pivote autour de l'axe fixe Q et déplace le levier B.

Deux groupes de contacts auxiliaires ou d'interlocks (DUR.1 et DUR.2) sont commandés respectivement par les leviers B et Z.

L'enclenchement du DUR s'opère en deux phases :

Première phase.

En fermant pendant un petit instant l'interrupteur "réarm." l'électrovalve EV sera excitée, l'air comprimé admis dans le cylindre repousse le piston P qui comprime le ressort r.

La tige du piston fait pivoter le levier Z autour de l'axe Q, entraînant les interlocks DUR.2 ce qui, dans la première partie de la course du piston, fait pivoter le levier B autour du point H et bande le ressort R.

Pendant la seconde partie de la course du piston, l'ensemble constitué par le levier B et l'armature L pivote autour de l'axe O, ce qui amène le contact mobile à quelques millimètres du contact fixe Ø; l'armature est appliquée contre le noyau de la bobine de maintien.

L'un des interlocks DUR.1, manoeuvre par le levier B, ferme à ce moment le circuit de la bobine de maintien, et l'armature L est maintenue par attraction magnétique contre le noyau de la bobine de maintien.

Deuxième phase :

En lâchant le bouton-poussoir "réarmement" l'électrovalve est désexcitée et l'air comprimé du cylindre est mis à l'atmosphère de façon que sous l'action du ressort r, le piston P reprend sa position initiale emmenant le levier Z qui commande les interlocks DUR 2.

Le ressort R qui avait été bandé dans la 1ère phase, fait brusquement pivoter le levier B autour de l'extrémité de l'armature L de façon que le contact mobile C est appliqué sur le contact fixe C = le DUR est fermé.

Si la bobine B.T. est interrompue ou que le courant dans la bobine H.T. atteint une valeur trop grande, le DUR déclenchera en un temps excessivement court (1/100 s).

42.04. Schéma de principe de commande du disjoncteur (fig.42.06).

Pour exciter l'électrovalve d'enclenchement EV, le conducteur doit manoeuvrer les interrupteurs "urgence", "pantographes" et "DUR".

Le contact d'un relais Q 72 permettra d'alimenter la bobine de maintien pendant la phase du réenclenchement du DUR.

La bobine de ce relais est alimentée par les contacts du dispositif de veille automatique, du C.R.M. et ceux des relais de protection.

L'emploi de ce relais (Q 72) permet de prémunir les contacts des relais de protection contre les avaries - dues à la self-induction -, si ces relais venaient à couper la bobine M.

Quand on ferme l'interrupteur "réarmement" et pour autant que le contact B (contact de sécurité sur J.H. ou sur le tambour de commande en position de repos) soit fermé, la tension positive de la batterie est appliquée au fil 13 b au travers l'interlock A du DUR.1.

Cet interlock est fermé lorsque le disjoncteur est déclenché.

Le contact B est un verrouillage électrique; ce contact est fermé quand l'équipement de démarrage se trouve au cran 0 et ouvert sur toutes les autres positions.

Il empêche donc l'enclenchement du DUR si l'équipement n'est pas revenu à sa position initiale.

Dès que l'électrovalve EV est excitée, la première phase d'enclenchement s'opère et les interlocks du DUR.2 sont entraînés : l'interlock Q se ferme, shuntant l'interlock A du DUR.1 pour maintenir l'excitation des EV quand le contact A s'ouvre.

Pendant la 2e partie de la course du piston les interlocks DUR 1 sont commandés. Le contact A s'ouvre mais le contact C se ferme et la bobine de maintien M est alimentée au travers du contact du relais Q 72 pour autant que tous les contacts de sécurité soient fermés.

Dès que le conducteur lâche l'interrupteur "réarmement" l'excitation du fil 13 b, donc de l'électrovalve EV est coupée. Les contacts du DUR se ferment comme mentionné plus haut tandis que la tige du DUR 2 revient à sa position initiale.

Le DUR reste enclenché sous l'action de la bobine de maintien; dès qu'un des contacts de sécurité (p. ex. CRM - RTN - QD et autres) s'ouvre ou que le conducteur ouvre un des interrupteurs "urgence", "pantographes" ou "DUR" le relais Q 72 ne sera plus alimenté de façon que la bobine M n'est plus excitée et le DUR déclenche.

43.01. Rôle et classification des relais.

Le relais est un appareil qui sert à transmettre dans un autre circuit l'effet d'une manoeuvre exécutée dans un premier circuit. Ainsi, par exemple, on l'utilisera pour créer une modification d'alimentation d'un circuit basse-tension consécutive à la manoeuvre d'un appareil HT ou pour couper simultanément différents circuits à l'aide d'un seul appareil.

D'après leur conception, on distingue :

- Les relais à action intermittente qui reprennent leur position initiale dès que la cause de leur fonctionnement a disparu.
- Les relais à action permanente, qui restent en position de fonctionnement après que la cause de ce fonctionnement a disparu. Ces relais comportent soit un dispositif mécanique de blocage, soit une bobine de maintien ou encore un contact d'auto-excitation.
- Les relais temporisés à l'ouverture ou à la fermeture. Cette temporisation est obtenue grâce à une minuterie ou à des artifices spéciaux (bilames, noyau secondaire..).

43.02. Relais à maxima des automotrices (voir article 29.01).

1. Description.

Le relais à maxima type SEM décrit ci-dessous équipe toutes les automotrices construites avant 1962.

Il se compose (fig. 43.01) d'une bobine de déclenchement (1) parcourue par le courant HT.

Cette bobine est montée sur un noyau (2) qui porte l'armature (3) mobile autour d'un axe (4).

La position de cette armature peut être réglée par le ressort (5) dont la tension est ajustée au moyen de la vis (6). Cette armature agit sur un système de déclic par l'intermédiaire de galets (7) sur le loquet (8). Ce loquet actionne un levier (9) qui est relié par une barre en matière isolante (10) à l'armature (11) du mécanisme de réarmement.

Celui-ci se compose essentiellement d'une bobine (12) et de son armature (11) mobile autour de l'axe (13). Cette armature est munie d'une plaque isolante sur laquelle sont fixés deux doigts de contact mobiles (15) vis à vis de deux doigts de contact fixes (19). Le raccordement de la bobine HT se fait par les cosses (22).

2. Fonctionnement.

Lors du passage, dans la bobine HT de déclenchement (1), d'un courant dépassant la valeur de réglage du relais, l'armature (3) est attirée et agit sur le système de déclic par l'intermédiaire des galets (7) sur le loquet (8).

Celui-ci libère le levier (9) de la butée et déclenche par gravité. Le levier relié à la barre isolée (10) entraîne l'armature (11) du mécanisme de réarmement et provoque l'ouverture des contacts (19) de contrôle portés par ce mécanisme. Ceux-ci restent ouverts jusqu'à ce que le levier (9) soit ramené à sa position initiale, ce que l'on obtient par l'excitation momentanée de la bobine de réarmement (12). Le point de déclenchement de ces relais est réglé par le ressort (5) de l'armature.

En cas de déclenchement par relais à maxima, le conducteur peut le réarmer à partir de sa cabine de conduite; en pressant le bouton poussoir "réarmement", le relais à maxima est à nouveau fermé et permet de tractionner si, bien entendu, la cause du déclenchement a disparu.

Il est intéressant de connaître lequel des relais à maxima a provoqué le déclenchement. Ceci constitue en effet un guide précieux dans la recherche des causes de déclenchement. Dans ce but, un indicateur optique (20) a été placé sur le relais; il consiste en un simple volet, levé lorsque le relais est enclenché, qui s'abaisse lors du déclenchement et sur lequel le réarmement n'a aucune action.

43.03. Relais à maxima des locomotives et AM construites à partir de 1962.

En principe, ce relais (fig.43.01) se compose d'une armature (1) et de 2 noyaux. L'un des noyaux porte une bobine basse tension dite bobine de maintien (2); l'autre porte une bobine haute tension (3) (qui peut n'être qu'une spire de câble). Lorsque cette dernière bobine est parcourue par un courant supérieur à l'intensité de réglage, le flux parcourant l'armature (1) crée un champ magnétique suffisant pour attirer la palette (4) pivotant autour du point B. Cette palette pousse alors la tige (5) qui, à son tour, commande le levier (6) qui pivote autour du point A.

Le levier (6) porte, à l'une de ses extrémités 2 contacts. Un de ces contacts coupe l'alimentation de la bobine d'un relais auxiliaire qui à son tour coupe la bobine de maintien du DUR et provoque le déclenchement de celui-ci; l'autre permet d'alimenter une lampe de signalisation et de prévenir ainsi le personnel de la cause du déclenchement.

Cours 124.20

43e leçon.

Dès que le relais a fonctionné, c'est la bobine de maintien (2) qui, alimentée également par le contact de signalisation, maintient le relais dans cette position.

Un ressort (7) ramène le levier (6) dans sa position normale dès que cesse l'alimentation de la bobine de maintien.

Un capot transparent protège les contacts.

43.04. Relais de potentiel (voir article 29.03).

Presque tout le matériel de traction est équipé du relais de potentiel type SEM décrit ci-dessous.

1. Description.

Ce relais (fig. 43.03) comporte un support en fonte (A) portant un noyau (N) sur lequel est enroulée une bobine (B) alimentée en série avec une résistance de limitation, par la ligne de contact.

Le support (A) porte une armature (E) mobile autour d'un axe (O). Un dispositif de réglage relie le support (A) au talon de l'armature. Des contacts CC' montés sur un axe (I) sont suspendus au support par des biellettes (b); un ressort de rappel (r) maintient l'écartement entre le support (A) et l'axe (I).

2. Fonctionnement.

Pour une certaine valeur du courant d'alimentation de la bobine B, donc de la tension de ligne, l'armature (E) est attirée et colle au noyau (N).

Dans son déplacement, l'extrémité de (E) a chassé vers la gauche l'axe (I) (support des contacts mobiles) en comprimant le ressort (r), ce qui provoque la fermeture des contacts CC'.

Lors d'une chute importante ou de disparition de la tension de ligne, l'armature (E) revient en position initiale et les contacts CC' s'ouvrent provoquant le déclenchement du disjoncteur ou du rupteur des automotrices.

43.05. Relais différentiel (voir article 30.01).

Ce relais est appliqué sur toutes les locomotives ainsi que sur les automotrices construites à partir de 1962.

Ce relais est du même type que les relais à maxima décrits à l'article 43.02.

43.06. Relais à maxima de chauffage des locomotives.

Le relais à maxima de chauffage des locomotives

séries 20 et 25 est identique à celui décrit à l'article 43.02.

Le relais à maxima de chauffage des locomotives séries 22 et 23 comporte : (fig. 43.04) une armature (1) et un noyau mobile (2) normalement rappelé vers le bas par un ressort (3).

Un levier (L), portant 2 touches de contact (c') décalées l'une par rapport à l'autre, peut basculer autour de l'axe (0) lorsqu'il est sollicité par la tige (5).

En regard de ces touches de contact mobiles sont placés 4 doigts de contacts (c).

Lorsque la bobine (4) est parcourue par un courant supérieur à l'intensité de réglage, le noyau (2) est soulevé et vient pousser la tige (5); celle-ci pousse alors sur le levier (L) et le fait pivoter autour de l'axe (0); 2 des doigts de contact (c) initialement court-circuités par une des touches (c') sont alors coupés; de ce fait, le disjoncteur déclenche; par contre, l'autre touche (c') va court-circuiter les 2 autres doigts de contact (c) et permettre l'alimentation d'un relais auxiliaire qui allumera une lampe de signalisation.

Dans son mouvement, le levier (L) entraîne une tige (t) qui comprime un ressort (R); une douille (d) limite la course de la tige et empêche de ce fait les touches (c') de dépasser leurs positions et de buter au retour contre les doigts (c), ce qui bloquerait le relais.

Une fois que le relais a fonctionné, le ressort (3) ramène le noyau (2) vers le bas; le ressort (R) ramène les contacts dans leur position initiale; la lampe de signalisation reste toutefois allumée par suite de l'automatisme du relais auxiliaire de signalisation. Le réglage du relais s'effectue par le ressort (3) commandé par l'écrou (6) qui en tournant engendre un mouvement vertical de la tige filetée (7). Une vis (8) permet de bloquer le relais dans la position de réglage désirée.

43.07. Relais de pression ou "Control-switch". (fig. 43.05)

Dans l'art. 29.04 est expliqué le but et le branchement sur les conduites du relais de pression.

Le fonctionnement est le suivant :

L'air comprimé est admis dans l'espace limité par le diaphragme (D) (en caoutchouc toilé résistant à l'huile). Il en résulte une certaine déformation transmise par un poussoir (P) à un levier (L) prenant appui en (A).

Un ressort antagoniste (R) dont la tension est réglable par la vis (V) permet de faire varier la valeur de la pression d'air pour laquelle le diaphragme se déforme.

Le mouvement du levier agit par l'intermédiaire de la butée (B) sur le dispositif des contacts à rupture brusque établi suivant le principe du ressort de basculement désaxé.

Dès que l'amplitude du mouvement du levier est suffisante pour faire passer le centre du ressort (K) au-dessus de l'axe de la lame flexible (F), le ressort fera renverser la courbure de la lame, entraînant l'ouverture des contacts (C).

La pression d'air commandant l'ouverture des contacts est réglée par la vis (V) tandis que la vis (Rd) permet de régler l'écart entre les pressions d'air d'ouverture et de fermeture.

43.08. Relais d'accélération type JHC des automotrices et locomotives équipées d'un système de démarrage du type JH.

En principe, ce relais (fig.43.06) est un inverseur monopolaire, constitué par un balancier (1) sollicité soit à droite, soit à gauche, par un ressort (2), et un circuit magnétique excité par un jeu de bobines (3).

L'action du ressort et du jeu de bobines permet de manoeuvrer l'inverseur en fonction de quantité de paramètres traduits chacun par l'excitation d'une bobine.

Le relais fonctionne sans aucun graissage grâce au jeu ménagé sur l'axe du fléau; étant donné la faible amplitude du mouvement, ce jeu est choisi de manière que le fléau roule sur son axe sans frotter.

Remarque.

Les relais type F-E-V utilisés pour la commande du servo-moteur JH sont du même type que celui décrit à l'article ci-dessus.

43.09. Relais de génératrice. (RG).

Sur certaines automotrices doubles, le moteur qui entraîne le compresseur, entraîne également la génératrice

La commande du groupe moteur générateur compresseur doit permettre :

- de faire tourner le compresseur lorsque la pression dans les réservoirs principaux tombe en-dessous de 7 bar ; ce qui s'obtient grâce à la présence d'un régulateur de pression (RP).

6.

- de maintenir en service la génératrice lorsque la charge de la batterie est insuffisante, même si la pression en air comprimé est suffisante; ce qui s'obtient grâce à la présence d'un relais de génératrice (RG).

Le relais RG comporte deux bobines (fig.43.07) :

- la bobine d'enclenchement 32^e-13, branchée en parallèle avec la bobine d'une électrovalve inverse;
- la bobine de maintien A1-D2 parcourue par le courant de charge de la batterie.

En fermant l'interrupteur "compresseur", le conducteur applique la tension positive sur le fil 32. Dès lors, la fermeture du contact du régulateur de pression RP entraîne l'alimentation :

- de la bobine d'enclenchement 32^e- 13 du relais RG;
- de l'électrovalve inverse.

Le régulateur de pression RP ferme son contact dès que la pression dans les réservoirs principaux atteint 7 bar ; il l'ouvre dès que la pression est de 9

La bobine 32^e- 13 étant excitée, le relais RG s'enclenche et ferme son contact 32 - CM, ce qui entraîne l'alimentation du contacteur HT de commande du groupe.

L'alimentation de l'électrovalve inverse ferme la communication avec l'atmosphère du cylindre haute pression du compresseur.

Lorsque la pression dans les réservoirs principaux atteint 9 bar, , le contact du régulateur RP s'ouvre mais le groupe ne s'arrête pas nécessairement.

En effet, lorsque le groupe s'est mis à tourner parce qu'il y avait insuffisance d'air, la génératrice charge la batterie et la bobine A1-D2 du relais RG est parcourue par un courant qui est fonction de l'état de charge de la batterie; cette bobine n'est pas capable, seule, d'enclencher le relais RG mais une fois celui-ci enclenché, elle est capable de le maintenir fermé pour autant que le courant qui la traverse dépasse 20 ampères. Le groupe continuera donc à tourner pour permettre la charge de la batterie.

Le contact du régulateur RP étant ouvert, l'électrovalve inverse n'est plus excitée et le cylindre haute pression du compresseur est mis à l'atmosphère, ce qui évite à la pression d'air de monter dans les réservoirs principaux.

45.01 Caractéristiques des fusibles HT.

Il existe également, des fusibles à HT destinés à protéger certains circuits auxiliaires, tels ceux des groupes moteur alternateur charge batterie, groupes moteurs compresseur et chauffage; sur les automotrices un fusible général protège même l'ensemble des circuits à HT.

Les fusibles à HT sont réalisés différemment de ceux à BT. En effet :

- la présence de la HT exige un isolement spécial, compte tenu des distances d'éclatement et ligne de fuite à respecter;
- la puissance coupée par un fusible qui fond est relativement élevée, elle doit être coupée rapidement.

Pour fixer les idées examinons le cas, par exemple, d'un fusible de 10 Ampères sous 3000 Volts. Lorsque ce fusible fond, il coupe une puissance au moins égale à 30 kW. Si à ce moment, les deux parties du fil fusible restent à très peu de distance l'une de l'autre, un arc va jaillir entre elles. Si cet arc se maintient, il endommagera le coupe-circuit.

Celui-ci étant un appareil coûteux, il est tout indiqué de prévoir un dispositif capable d'effectuer une coupure nette en un "temps de fusion" très court.

Ce temps de fusion varie en fonction du courant circulant dans le fusible : il diminue au fur et à mesure que ce courant augmente. Comme pour les fusibles à BT, le fusible à HT est caractérisé par son "intensité nominale" et doit pouvoir satisfaire à certaines conditions techniques et technologiques imposées.

Du point de vue technique, le fusible doit subir avec succès les différents essais suivants :

- 1° Essai continu avec un courant ayant une intensité égale aux $10/9$ de l'intensité nominale, poursuivi jusqu'à l'équilibre des températures, sans provoquer la fusion de l'élément fusible.

Les maxima de température que le fusible peut atteindre dans ses diverses parties sont ceux compatibles avec sa bonne conservation, eu égard à la nature des matériaux dont il est constitué et le fusible ne doit subir aucune déformation ou altération susceptible de nuire à son bon fonctionnement ultérieur.

2° Essai avec un courant d'intensité égale à 1,6 fois l'intensité nominale : la fusion devant se produire en moins d'une heure.

3° Essai poursuivi jusqu'à la fusion avec un courant d'intensité croissante, augmentant régulièrement toutes les 5 minutes de 1/5 de l'intensité nominale, l'intensité initiale étant l'intensité nominale.

Cet essai a pour but de comparer entre plusieurs éléments fusibles d'une même fabrication la similitude des temps de fusion.

4° Essai sous court-circuit franc.

Pour ce dernier essai qui doit être réalisé avec des machines de grande puissance (4 000 kW), le temps maximum de coupure entre le moment où le courant s'établit et celui où le courant est coupé doit être au maximum de 60 millièmes de seconde.

Après chacun des essais n° 2, 3 et 4 ci-dessus, le fusible essayé doit être dans un état tel qu'on puisse en déduire que son remplacement en service courant ne présenterait pas de difficulté.

De plus, chacune des coupures doit s'effectuer pratiquement sans bruit, ni fumée, ni projection.

Du point de vue technologique le fusible doit :

- être conçu de façon à être isolé pour la HT : on utilise généralement à ce sujet des isolateurs en porcelaine montés sur une dalle en matière isolante (bakélite-compound..) et comportant des gâches qui reçoivent les pièces de contact du corps du fusible, celui-ci étant également en matière isolante;
- permettre un remplacement aisé de l'élément fusible.

Pratiquement le fusible qui réaliserait parfaitement toutes ces conditions n'existe pas. Nous étudierons chaque type de fusible à HT utilisé sur notre matériel et montrerons les avantages et inconvénients de chacun d'eux.

45.02 Fusible général à HT des automotrices.

L'utilité de ce fusible a été expliquée à l'article 27.05. Le fusible type SEM équipe toutes les automotrices; il se compose essentiellement (fig.45.04) d'un cylindre en matière isolante (1) à chaque extrémité duquel est fixée une chambre à expansion (2). Celles-ci comportent les bornes (3) auxquelles aboutissent les connexions extérieures et qui amènent le courant aux extrémités de l'élément fusible.

Le fusible proprement dit est constitué par un cylindre en étain pur, de dimensions et de résistance électrique appropriées. Il est relié de part et d'autre, par l'intermédiaire de manchons, à des câbles en cuivre munis de bornes pour la fixation aux chambres à expansion.

Les fusibles et câbles sont enroulés d'un ruban en amiante et enfermés dans un tube en fibre. Lorsque le fusible entre en fusion par suite du passage d'un courant exagéré, il se produit un arc. Mais les gaz dûs à la formation de celui-ci produisent une haute pression qui assure un soufflage énergétique de l'arc.

L'ensemble décrit ci-dessus est monté sur un support muni d'isolateurs. Un couvercle en permali sert de protection et l'ensemble est placé dans un coffre sous la voiture (sur le toit des automotrices T.A.P. 35).

La fig. 45.02 donne la courbe de ce fusible d'intensité nominale de 300 Ampères; sa capacité de rupture est de 1500 Ampères sous 3300 Volts. La résistance de l'élément fusible est de l'ordre de 0,00010 ohms.

Ce fusible présente l'inconvénient d'exiger pour son remplacement un travail assez conséquent, qui ne peut être fait qu'en atelier. Sa fusion occasionne donc la détresse de l'automotrice.

Il est à remarquer que cette fusion ne se produit que très rarement, (étant donné qu'il ne protège que les circuits en amont des autres fusibles divisionnaires) et qu'en conséquence cet inconvénient n'a qu'une importance toute relative.

45.03 Coupe-circuit fusible à expulsion type MF (GECO).

Ce type de coupe-circuit est le plus utilisé sur notre matériel.

Le corps du fusible est constitué (fig. 45.04) d'un tube en papier bakéliné (1) à l'intérieur duquel est placé un tube en fibre, aux extrémités sont visées la tête (2) et le raccord hexagonal (3), tous deux en laiton. Sur ce raccord hexagonal (3) vient se fixer la chambre à expulsion (4) en acier fermée par le bouchon conique (5).

Le corps du fusible est placé verticalement dans des gâches (6) (fig. 45.05) montées sur des isolateurs (7) en porcelaine. Ces gâches assurent le contact à la tête (2) et au raccord (3). Dans le corps du fusible, se place l'élément fusible (8). Celui-ci est fixé d'une part (fig. 45.06) sur la pièce de contact (9) dont l'extrémité conique s'introduit dans la tête (2) à laquelle elle est fixée par le boulon (10) et d'autre part, à la connexion (11). Un tendeur (12) est monté aux mêmes fixations que l'élément fusible, il est isolé de la cordelière par une pièce isolante (13). Son rôle est d'éviter de tendre l'élément fusible sous l'action du ressort (14) placé entre les griffes de contact (15 et 16) et l'embase intérieure du raccord (3). Ces griffes de contact comportent deux griffes fixes (15) et une griffe mobile (16) qui peut se rabattre pour permettre lors du montage le placement du ressort (14). Ces griffes qui prennent contact sur l'alésage intérieur du raccord (3) ont leurs extrémités arrondies de façon à coulisser librement.

Lorsque l'élément fusible fond, l'arc qui prend naissance détruit également le tendeur; dès lors sous l'action du ressort (14), la connexion (11), la partie de l'élément fusible qui y est fixée, les griffes de contact et le ressort lui-même sont projetés violemment dans la chambre à expulsion. La coupure s'effectue donc rapidement et l'arc ne se maintient qu'un très court instant au droit de l'élément fusible.

Pour remettre le fusible en état, il suffit donc de replacer un nouvel élément fusible et un tendeur. Ce remplacement exige l'utilisation d'un outillage spécial.

En cas de fusion sous court-circuit franc, il arrive fréquemment que le dispositif d'expulsion : connexion - griffes et ressort, soit également détérioré.

Ces coupe-circuits sont utilisés pour des éléments fusibles, calibrés de 2 à 20 Ampères sous 3000 volts. On les utilise même (en y apportant une petite modification : tendeur non isolé) pour une intensité nominale de 45 Amp. sous 3000 Volts.

Lorsqu'un fusible HT fond, le conducteur est autorisé à le remplacer dans certaines conditions prévues par les règlements. Il utilise à cet effet, un des fusibles de réserve prévus sur le matériel et veille spécialement à engager parfaitement ce fusible dans ses gâches.

45.04 Généralités sur les batteries d'accumulateurs.

On distingue 2 types de batteries d'accumulateurs :

- les batteries au plomb,
- les batteries alcalines.

Avant d'entamer l'étude de ces batteries, rappelons quelques notions techniques.

Une batterie d'accumulateurs est constituée d'un certain nombre d'éléments groupés en série ou en parallèle.

L'opération pendant laquelle on emmagasine de l'énergie dans l'accumulateur s'appelle la charge. Celle-ci est réalisée automatiquement sur notre matériel à l'intervention d'une génératrice entraînée par un moteur à HT.

L'opération pendant laquelle on utilise l'énergie emmagasiné à l'état potentiel dans l'accumulateur s'appelle la décharge. Au cours de cette opération la batterie alimente les différents circuits d'asservissement.

La capacité nominale d'une batterie d'accumulateurs est la quantité d'électricité qu'on peut lui emprunter jusqu'à épuisement, dans des conditions bien déterminées. Elle s'exprime en ampères-heures.

La force contre électromotrice d'un accumulateur est la différence de potentiel à ses bornes à circuit ouvert, c'est-à-dire lorsqu'il n'est ni en charge, ni en décharge et, par conséquent, ne débite aucun courant.

La tension de l'accumulateur est la différence de potentiel à ses bornes en circuit fermé, c'est-à-dire quand il est en charge ou en décharge. A ce moment, l'élément est traversé par un courant d'intensité I (dont le sens diffère selon que l'élément est en charge ou en décharge). La chute de tension rI constitue donc la différence existant entre les valeurs de la force contre électromotrice et de la tension de cet accumulateur (r étant la résistance interne de celui-ci).

Un élément d'accumulateur comprend essentiellement :

- deux électrodes (positive et négative) constituées généralement par deux groupes de plaques indépendants l'un de l'autre;
- l'électrolyte qui baigne les électrodes;

- le bac, qui reçoit les plaques et l'électrolyte.

Comme les accumulateurs alcalins sont seuls utilisés sur notre matériel, nous n'étudierons les accumulateurs au plomb que pour permettre la comparaison des avantages et des inconvénients des deux types et montrer ainsi les raisons qui ont décidé à préférer l'utilisation des accumulateurs alcalins.

46.01. Charge de l'accumulateur au plomb.

Considérons un élément déchargé complètement, la tension à ses bornes est de 1,8 volt. Si l'on trace un diagramme (fig. 46.01) représentant la variation de la différence de potentiel aux bornes de l'élément en fonction du temps, on constate que celle-ci s'élève rapidement jusqu'à 2,1 volts, ensuite elle augmente lentement pendant un certain nombre d'heures pour atteindre 2,3 à 2,4 volts; vers la fin de la charge, elle monte à nouveau rapidement jusqu'à 2,7 volts et reste constante à cette valeur.

Les caractères distinctifs de la fin de charge sont :

- la différence de potentiel aux bornes est de 2,7 volts;
- la densité de l'électrolyte, qui augmente progressivement au cours de la charge, a atteint sa valeur maximum (24° à 27° Baumé);
- l'électrolyte est laiteux et bouillonne aux électrodes;
- les plaques positives sont onctueuses et de couleur brun rouille tandis que les plaques négatives sont spongieuses et de couleur gris métallique.

Aussitôt la charge arrêtée, la tension aux bornes tombe en quelques secondes à la valeur normale de 2,1 V.

Si l'on trace des courbes de charge correspondant à différentes intensités I du courant de charge, on constate que la durée totale de la charge est d'autant plus courte que l'intensité est plus grande. Par contre, l'importance relative de la période de bouillonnement, qui commence au moment où la d.d.p. aux bornes de l'élément atteint 2,4 volts, devient de plus en plus grande. Or, dès ce moment, une partie seulement du courant est consacrée à la charge, tandis que l'autre décompose l'électrolyte et désagrège la matière active des plaques. On en conclut que le rendement et l'efficacité de la charge sont d'autant meilleurs que l'intensité du courant de charge est faible, c'est-à-dire que la charge est plus lente.

En pratique, le courant de charge doit être d'environ 1/10 de la capacité.

46.02. Décharge de l'accumulateur au plomb.

Lors de la décharge d'un accumulateur au plomb, la tension aux bornes descend rapidement de 2,1 volts à 2 V, pour rester ensuite sensiblement constante pendant un certain temps; puis elle s'abaisse lentement jusqu'à 1,8 volt. A ce moment, il convient d'arrêter la décharge, sinon on constate une chute très rapide jusqu'à zéro.

2.

Les caractères distinctifs de la fin de la décharge sont :

- la différence de potentiel aux bornes est de 1,8 volt;
- la densité de l'électrolyte, qui diminue lentement au cours de la décharge, est d'environ 20° Beaumé.

Lorsque la décharge est prolongée trop longtemps, les plaques se recouvrent de sulfate de plomb. Ce phénomène porte le nom de "sulfatation". Il se produit également lorsqu'un accumulateur reste trop longtemps inactif, surtout s'il n'est pas chargé et amène la mise hors service de l'élément.

La décharge d'un accumulateur est d'autant plus rapide que l'intensité du courant de décharge est plus grande. Sur la fig. 46.02, nous avons représenté des courbes de décharge correspondant à différentes valeurs du courant de décharge.

La capacité d'un accumulateur au plomb varie avec la durée de la décharge : elle augmente lorsque la durée de la décharge est longue, elle diminue lorsque cette durée est réduite. C'est la raison pour laquelle des batteries d'accumulateurs au plomb équipant des automotrices ou des locomotives doivent être surdimensionnées de façon à leur permettre de débiter des courants relativement élevés, à certains moments : par exemple lors des démarrages.

46.03. Constitution et fonctionnement de l'accumulateur alcalin.

Dans un élément d'accumulateur alcalin, l'électrode positive est constituée par de l'oxyde de nickel; l'électrode négative est constituée soit par de l'oxyde de fer (accumulateurs au fer-nickel), soit par de l'oxyde de cadmium (accumulateurs au cadmium-nickel).

L'électrolyte est de la potasse caustique dissoute dans de l'eau distillée.

Pendant la charge, l'oxyde de fer (ou de cadmium) de la cathode cède de l'oxygène qui se combine avec l'oxyde de nickel de l'anode, et inversement pendant la décharge. Dans un élément chargé, les matières actives en présence sont donc : à la cathode, du fer (ou du cadmium) finement divisé, à l'anode, du peroxyde de nickel.

Contrairement à ce qui se passe dans l'accumulateur au plomb, l'électrolyte ne prend aucune part aux réactions chimiques et il sert uniquement de liquide conducteur, en transposant l'oxygène d'une électrode à l'autre.

Sa densité reste pratiquement constante, quel que soit l'état de charge de la batterie (24 à 27° Beaumé).

46.04. Construction des accumulateurs alcalins (fig. 46.03).

La matière active des plaques négatives (oxyde de fer ou de cadmium selon le cas) est contenue dans de petites boîtes rectangulaires en tôle d'acier finement perforée (4) fixées dans un cadre en acier (5).

La matière active des plaques positives (couches alternées d'hydrate de nickel et de nickel en grains) est contenue dans des tubes perforés en acier (1) aplatis à leurs extrémités et montés dans un cadre en acier (3); les tubes sont renforcés par des anneaux d'acier (2).

On adopte aussi parfois pour les plaques positives le même mode de construction que pour les plaques négatives. Les batteries sont dites alors à plaques positives planes tandis que dans le premier cas elles sont dites à plaques positives tubulaires.

Les plaques positives d'une part, et les négatives d'autre part, sont enfilées sur deux tiges en acier (6) qui portent les bornes. L'isolement des plaques entre elles est assuré par des tiges en ébonite (7). Le bac est en acier nickelé doublé d'une feuille en ébonite (8). Tous les joints sont soudés. Le couvercle, généralement soudé au bac, comporte une ouverture centrale pour le remplissage, fermée par un bouchon à soupape (9); en outre, des ouvertures y sont ménagées pour le passage des bornes (10) fixées avec interposition de matière isolante.

La formation des plaques est artificielle.

Les éléments sont groupés dans des caisses en bois pour constituer les batteries.

46.05. Charge et décharge des accumulateurs alcalins (fig. 46.04).

Les courbes de charge et de décharge de l'accumulateur alcalin sont nettement différentes de celles de l'accumulateur au plomb : comparer à ce sujet les courbes des fig. 46.01 et 46.02.

On remarque notamment que la diminution de la tension au cours de la plus grande partie de la décharge (de 1,3 à 1 volt) est plus importante qu'avec l'accumulateur au plomb.

La tension moyenne par élément est : pendant la charge de 1,7 volt; pendant la décharge de 1,2 volt. On arrête généralement la décharge à 1 volt.

La charge d'une batterie alcaline peut s'effectuer sans précaution spéciale, par exemple à tension constante. Les charges rapides conviennent aussi bien que les charges lentes. Il n'est pas nécessaire de réduire le courant en fin de charge.

Le bouillonnement de l'électrolyte n'indique nullement la fin de la charge. Une surcharge à courant normal n'est jamais nuisible et elle est préférable à une charge incomplète. La fin de charge est donc indiquée par la tension de 1,8 volt aux bornes des éléments sous courant normal de charge. Au repos, après la charge complète, la tension tombe rapidement à 1,55 volt par élément et après quelques heures n'atteint plus que 1,4 volt.

46.06. Entretien des accumulateurs alcalins.

L'entretien d'une batterie alcaline consiste uniquement à vérifier périodiquement le niveau de l'électrolyte et à rétablir éventuellement celui-ci en ajoutant de l'eau distillée.

La densité de l'électrolyte diminue lentement par l'usage; aussi doit-on le remplacer tous les deux ou trois ans, suivant le service de la batterie, quand sa densité est descendue à 20° Beaumé environ.

Les batteries tenues en réserve ne demandent aucun entretien, à condition d'être tenues à l'abri de la gelée. En effet, les éléments d'accumulateurs alcalins se conservent indéfiniment, même quand ils sont déchargés. Aucun danger de sulfatation n'est à craindre.

Il faut prendre garde de ne jamais verser dans un accumulateur alcalin de l'acide sulfurique, même fortement dilué, ce qui le détériorerait irrémédiablement. A cet effet, il y a lieu de ne pas employer des appareils (tuyaux, entonnoirs...) ayant servi pour les batteries au plomb.

D'autre part, l'agent chargé de la manipulation des batteries alcalines doit veiller à sa propre sécurité, en prenant certaines précautions, à savoir :

- ne jamais fumer, approcher des flammes ou provoquer des étincelles près d'une batterie. Il y a danger d'explosion.
- manipuler l'électrolyte et les éléments avec précaution car la peau et les vêtements sont attaqués : utiliser des gants en caoutchouc et se laver les mains avec de l'acide borique. En cas de brûlures de la peau ou des vêtements, couvrir les parties atteintes avec de la poudre de borax.

Pour les yeux, laver abondamment avec une solution d'acide borique à 2 % et rincer à l'eau propre.

46.07. Avantages des accumulateurs alcalins.

- 1° Ils sont plus robustes, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique. Leurs plaques et le bac métallique ne souffrent pas des manipulations brusques et des chocs inévitables sur le matériel roulant;

- 2° Ils demandent beaucoup moins d'entretien; quand ils ne sont pas en service, ils peuvent être conservés sans surveillance. Rappelons que pour les batteries au plomb tenues en réserve, afin d'éviter la "sulfatation" il faut les conserver à l'état chargé et pour cela leur donner périodiquement (une fois par mois) une charge d'égalisation;
- 3° Ils peuvent être chargés ou déchargés très rapidement sans risque d'être endommagés. Cette qualité est primordiale sur le matériel roulant où les courants de charge et de décharge sont essentiellement variables;
- 4° Leur durée de vie est de loin supérieure.

Inconvénients des accumulateurs alcalins.

- 1° Le pourcentage de la variation de la tension pendant la décharge est plus grand qu'avec l'accumulateur au plomb. Toutefois, cet inconvénient n'est pas grave sur le matériel roulant car les différents appareils sont conçus pour fonctionner dans des limites (60 à 100 volts) qui couvrent ces variations de tension;
- 2° La force électromotrice par élément étant plus faible (1,2 volt en moyenne), il faut un plus grand nombre d'éléments pour une tension déterminée;
- 3° Leur prix d'achat est très élevé.

47ème leçon.

47.01 Dispositif de veille automatique.

La conduite des automotrices et locomotives électriques par un seul agent nécessite la présence, sur ce matériel, d'un dispositif provoquant l'arrêt du véhicule en cas de suppression du contrôle du conducteur. Ce dispositif dit de "veille automatique" a un double effet :

- interrompre automatiquement l'alimentation des moteurs de traction par déclenchement : des rupteurs de ligne sur les automotrices ou du D.U.R. sur les locomotives ;
- provoquer l'arrêt du véhicule par application du frein quelques secondes après ce déclenchement en mettant à l'échappement la conduite générale du frein automatique.

Le dispositif de veille automatique est mis en service lorsque l'on place la manette d'inversion du manipulateur sur une position de marche avant ou arrière.

Le dispositif de V.A. comprend :

- un robinet d'isolement avec contacts électriques
- une valve d'urgence
- un réservoir de temporisation
- une valve pilote
- une pédale à zone d'équilibre
- un limiteur de temps
- un signal acoustique
- une électrovalve inverse
- un panneau à relais.

47.02 Description des appareils communs aux différents dispositifs.

A. Valve d'urgence (fig. 47.01).

La valve d'urgence se compose d'un corps en fonte (1) muni d'un filtre à air (2) en laiton qui est maintenu en place par le bouchon (3). Un piston (6) en bronze faisant corps avec la soupape (5) est logé dans la partie intérieure de l'appareil et comporte un trou calibré "c". Un couvercle (4) en bronze assure la fermeture de la soupape. Le ressort de rappel (10) est placé entre le piston (6) et le couvercle (4).

Un bouchon d'échappement (9) se trouve placé à la partie inférieure de la valve.

Fonctionnement.

Lorsque la navette d'inversion est sur une position de marche et que la pédale est libérée ou le dispositif V.A. n'est pas réarmé, l'EVIVA est ouverte et laisse échapper

l'air du réservoir de temporisation à l'atmosphère par le limiteur de temps (Am uniquement). Après un certain temps, la pression dans la valve d'urgence côté réservoir de temporisation devient telle que le piston est refoulé par la pression de la conduite du frein automatique en comprimant le ressort. Dès lors, la conduite du frein automatique se vide à l'atm. et les freins s'appliquent.

En mettant la manette d'inversion à zéro ou en réarmant le dispositif, l'EVIVA est excitée et l'échappement à l'atmosphère est fermé. L'air soulève le piston de la valve d'urgence encore quelques instants et continue à s'échapper par l'orifice d'échappement; l'équilibre s'établissant par l'orifice calibré C, le ressort refoulera finalement le piston sur son siège.

B. Réservoir de temporisation.

Le réservoir est constitué d'un corps en acier complètement soudé. Un bouchon de purge est prévu à la partie inférieure, tandis que l'orifice supérieur comporte un tube soudé qui se prolonge jusqu'au milieu du corps afin d'obtenir une détente régulière du volume d'air comprimé.

La capacité de ce réservoir est d'environ 3 dm³.

C. Valve pilote (fig. 47.02).

La valve pilote se compose d'un corps (1) en fonte dans lequel se déplace un piston (2) comportant la soupape (6) en caoutchouc synthétique ramenée sur son siège par l'action du ressort de rappel (3), s'appuyant sur le bouchon en laiton (4). Celui-ci assure l'étanchéité de la valve grâce à la présence du joint en plomb (5).

Des conduits (7 et 8) prévus pour raccords coniques sont forés de part et d'autre de la soupape. Elle est commandée par la manette d'inversion.

D. Pédale du type à zone d'équilibre (fig. 47.03).

La partie visible de l'appareil se compose d'une pédale pivotante 2 sur une charnière qui agit sur une tige de commande 3. Des microswitch sont actionnés par cames (4) articulées à la tige de commande.

La pédale peut occuper trois positions :

- 1) libre : un ressort pousse la pédale dans cette position lorsqu'elle est libérée.
- 2) équilibre : la sensation de la zone d'équilibre est marquée par le levier 6.

3) enfoncée : c'est le réarmement du dispositif, elle ne doit être maintenue qu'un instant dans cette position puis ramenée en position d'équilibre.

La plaque à bornes 8 (non visible) assure les connexions des différents fils et microswitch.

E. Limiteur de temps.

Le rôle du limiteur de temps est de permettre le réglage de la section du passage de l'air de façon à en limiter le débit. Il consiste simplement en un corps en acier sur lequel viennent se visser les raccords coniques et un orifice réglable par vis. Après réglage, la tête de la vis est bloquée par un coup de pointeau entre "chair et cuir" et une coiffe vissée empêche le dérèglement ultérieur.

47.03 Fonctionnement du dispositif de veille automatique (automotrices) (fig. 47.04).

Lorsque la manette d'inversion est placée dans la position de marche "Avant" ou "Arrière", la valve pilote est ouverte.

L'air du réservoir de temporisation s'échappe à l'atmosphère via l'EVIVA.

Le ronfleur V^A , alimenté par le d.02, IC "frein", d.VA, contact 101 - 102 du tambour inverseur B.T. et le microswitch (contact 102 - 103) de la pédale en position 1 (libre), fonctionne.

Pour éviter que la valve d'urgence fonctionne et que la conduite générale du frein auto. se vide, le conducteur enfonce un instant la pédale dans la position 3 (réarmement). Le contact du microswitch (102 - 105) se ferme et le relais RHM 60 sec. est alimenté.

Les contacts de ce relais (104 - 106) se ferment et 104-103 s'ouvrent coupant alimentation ronfleur.

La pédale doit être placée dans la position 2 (équilibre) ainsi le contact 102 - 104 alimente l'EVIVA.

Après 60 sec. le relais RHM 60° déclenche et ouvre le contact 104 - 106 et ferme le contact 104 - 103.

Le ronfleur fonctionne et l'EVIVA n'est plus alimenté (l'air s'échappe à l'atm.).

Le conducteur sera obligé d'enfoncer la pédale et doit la remettre en équilibre, sinon la conduite principale du frein autom. se vide (valve d'urgence) et les switch-control coupent alimentation B.T. des contacteurs de ligne (traction coupée).

47.04 Fonctionnement du dispositif de veille automatique des séries 22 - 23.

L'équipement pneumatique est représenté à la fig. 47.05.

Le circuit d'asservissement basse tension est représenté à la fig. 47.06 avec la manette d'inversion en position 0.

Pour pouvoir enclencher le DUR, il faut que le relais RVA 4" soit enclenché; c'est réalisé par la bonne position 83 qui alimente le RVA 4" via le contact frein (83-81) l'interrupteur I 5 (81 - 81 A) les contacts des manettes d'inversion cab. I - cab. II à zéro (81 A - 81 B - 121). La bonne position CG alimente le RAVA via le disjoncteur FDVA les contacts de l'interrupteur I 5 (CG 2 - CG 1) et le contact fermé du RVA 4" (CG 1 - CG 3).

Les contacts de ce relais RAVA sont insérés dans le circuit du DUR (81 - 12) et le circuit d'alimentation de l'EVIVA (CG 1 - 249).

Quand on place la manette d'inversion en position de marche le contact 81 A - 81 B ou 81 B-121 est interrompu; de ce fait le RVA 4" n'est plus alimenté. Au même moment, le signal acoustique fonctionne par les contacts CG 1 - 246 a (manette d'inversion en position de marche) et le micro-switch (246a-247) de la pédale en position 1 (libre).

Si le conducteur ne réagit pas dans le délai de 4 secondes le RVA 4" déclenche; l'alimentation du Q 72 est interrompue, le DUR déclenche; et les EVIVA ne sont plus alimentées. De ce fait, l'air s'échappe à l'atmosphère ce qui produit le fonctionnement de la valve d'urgence (conduite du frein automatique se vide).

Pour éviter que le dispositif VA fonctionne, le conducteur doit endéans 4 secondes enfoncer un instant la pédale (position 3). Cette manoeuvre fait fonctionner des micro-switch dont un alimente le relais RR 60" (CG 1 - 246A-RR). Ce relais avec ses contacts NO et NF réalise le raccordement 120-121 et interrompt les contacts 120-x.

La pédale est ramenée en position équilibre (2). Les contacts 246a-120 alimente, via les contacts fermés 120-121, le relais RVA 4".

En position d'équilibre, la bobine du relais RR 60S n'est plus alimentée et après environ 60 secondes, ce relais déclenche. Le contact 120-x se ferme et le signal acoustique fonctionne. Le conducteur doit réarmer le relais RR 60S sinon le DUR déclenche avec application du frein automatique.

47.05 Mise hors service du dispositif de veille automatique.

- a) fermeture du robinet d'isolement.
Cette manoeuvre provoque le fonctionnement permanent du signal acoustique. C'est dans le but d'éviter de circuler avec un engin qui a son dispositif VA éliminé.
- b) manoeuvre de l'interrupteur I 5 (hle) ou déclenchement du disjoncteur d VA (am).
Cette opération annule le fonctionnement du signal acoustique et s'ajoute à la fermeture du robinet d'isolement.

En cas de circulation avec le dispositif de V.A. éliminé, il faut respecter les instructions réglementaires pour ce cas.

47.06 Essai du dispositif VA.

Avant de procéder à cet essai, il est nécessaire que l'engin soit en ordre de marche.

a) automotrice.

1. Placer la manette d'inversion en position de marche : la pédale étant libérée (par 1) le signal acoustique fonctionne et après environ 3 secondes la conduite automatique se vide avec application des freins (à contrôler aux manomètres cylindres de frein).
2. Réarmer le dispositif VA et ramener la pédale en position d'équilibre : 60 s après cette manoeuvre, le signal acoustique fonctionne suivi à environ 3 s de l'application du frein automatique.

b) locomotive.

1. Mettre hors service les circuits auxiliaires.
Placer la manette d'inversion en position de marche, la pédale étant libérée ; le signal acoustique fonctionne, après 4 secondes environ le DUR déclenche et les freins automatiques s'appliquent (à contrôler au manomètres cylindres de frein).
2. Réarmer le dispositif VA, remplir la conduite du frein automatique et enclencher le dur.
Après 60 secondes, le signal acoustique fonctionne suivi à environ 3 secondes du déclenchement DUR et application des freins automatiques.

47.07 Equipements supplémentaires combinés au dispositif V.A.

Sur automotrices et locomotives électriques, le sifflet de l'indicateur de vitesse est branché sur la conduite pneumatique du dispositif VA.

Le franchissement d'un crocodile sous tension positive, déclenche le fonctionnement du sifflet. Si le conducteur ne réarme pas le sifflet de l'indicateur de vitesse, la conduite automatique se vide avec application du frein et le switch-control coupera la traction.

Sur les locomotives : si le conducteur oublie de mettre le frein direct en service dans la cabine occupée, dès que la manette d'inversion est mise en position de marche, il y a vidange de la conduite du frein automatique avec les mêmes effets que ci-dessus.

Cette disposition est prise pour éviter de démarrer précipitamment.

Cours 124.20
47ème leçon

QUESTIONNAIRE.

- 45.03 Citez le type de fusible HT employé et expliquez brièvement son principe de fonctionnement.
- 47.01 Citez les appareils constituant le dispositif V.A. ?
- 47.02 Dessinez le schéma de principe de la valve d'urgence et expliquez son fonctionnement.
- 47.03/04 Quand le dispositif V.A. fonctionne, que se passe-t-il
a) sur une automotrice ?
b) sur une locomotive ?
- 47.05 Comment isole-t-on le dispositif V.A. défectueux
a) sur une automotrice ?
b) sur une locomotive ?
- 47.06 Comment essaye-t-on le fonctionnement de la V.A.
a) sur une automotrice ?
b) sur une locomotive ?

49.01. Dispositif de sécurité.

La tension de 3000 volts est extrêmement dangereuse. Tout contact soit direct, soit par l'intermédiaire d'un objet quelconque avec une pièce soumise à cette tension est mortel.

En vue d'éviter ces accidents, l'appareillage haute tension monté sur les automotrices et locomotives doit être rendu inaccessible. A cette fin, il est logé dans des coffres et armoires fermés à clés.

Sur les automotrices, exception est faite pour l'appareillage qui n'est mis sous tension que lorsque l'automotrice roule (résistances de démarrage et de shuntage par exemple) puisqu'alors il est impossible d'y accéder quand il est sous tension.

Sur les locomotives, l'accès aux pièces sous tension des moteurs auxiliaires haute tension logés dans la caisse doit également être rendu inaccessible. Les trappes de visite de ces moteurs sont également verrouillées par clés.

Les automotrices sont pourvues d'une seule clé de verrouillage tandis que les locomotives en comportent quatre identiques.

Cette ou ces clés font partie d'un "dispositif de sécurité" conçu de telle façon que lorsque le conducteur a une clé en mains, il a l'assurance que la commande de l'abaissement des pantographes a été exécutée et qu'il n'y a donc plus normalement de haute tension sur le véhicule.

49.02. Dispositif de sécurité des automotrices.

a) le dispositif de sécurité des automotrices construites avant 1953 comporte uniquement un robinet à 3 voies intercalé dans la conduite pneumatique d'alimentation des pantographes.

Ce robinet à 3 voies (fig. 49.01) permet :

- dans la position ouverte de mettre en communication les deux cylindres des pantographes avec la conduite d'alimentation.
- dans la position fermée de mettre en communication les deux cylindres des pantographes avec l'atmosphère, toute communication avec la conduite d'alimentation étant coupée.

Ce robinet comporte :

- une serrure (1) dans laquelle on introduit la clé d'accès aux armoires à HT;

2.

- un robinet à 3 voies (2) manoeuvré par la manette (3);
- solidaire de la carotte du robinet, un secteur (4) comportant une encoche (5) destinée à recevoir le penne de la serrure (1).

La clé ne peut être enlevée que lorsque le penne est engagé dans l'encoche du secteur, c'est-à-dire lorsque la manette de robinet à 3 voies est en position horizontale, ce qui correspond à la mise à l'atmosphère des cylindres de pantographes.

La manoeuvre du robinet n'est possible qu'après effacement du penne de la serrure obtenu par rotation de la clé. Dans la position "alimentation des cylindres de pantographes", la clé est verrouillée.

- b) Le dispositif de sécurité des automotrices construites à partir de 1953 est plus perfectionné.

Il comporte :

- un robinet à 3 voies intercalé dans la conduite pneumatique d'alimentation des pantographes;
- un dispositif de mise à la terre de l'équipement électrique HT.

Comme cette mise à la terre doit s'effectuer normalement lorsque les circuits sont hors tension, ce sectionneur fait partie d'un dispositif comportant également des verrouillages assurant : l'un, la fermeture de l'alimentation pneumatique des pantographes et, l'autre, l'interruption du circuit d'alimentation BT des électrovalves de pantographes.

Le robinet à 3 voies (fig. 49.02) comporte :

- une première serrure dans laquelle on introduit la clé (A) de la boîte à interrupteurs verrouillés.
- une deuxième serrure dans laquelle s'engage une manette (B). Cette manette commande le robinet à 3 voies proprement dit. Elle peut occuper 2 positions :
 - a : qui correspond aux pantographes abaissés (communication des cylindres des pantographes avec l'atmosphère). Dans cette position la manette B peut être enlevée.
 - b : qui correspond aux pantographes levés; (communication entre la conduite d'alimentation et les cylindres des pantographes). Dans cette position la manette B est verrouillée.

L'ordre de ces manoeuvres est indiqué à la fig. 49.03.

Une fois ces manoeuvres effectuées, les pantographes sont abaissés, vu que :

- l'interrupteur verrouillé "pantographe" a dû être remis en position "ouvert" pour permettre d'enlever la clé A de la boîte d'interrupteurs verrouillés dont on s'est servi sur le robinet à 3 voies; on a donc coupé le circuit d'alimentation des pantographes ce qui, normalement, provoque l'abaissement des pantographes;
- les cylindres des pantographes ont été mis à l'atmosphère ce qui assure l'abaissement des pantographes même si, électriquement, pour une cause anormale, les circuits des pantographes n'avaient pas été coupés.

Lorsqu'on désire relever les pantographes, il faut remettre la manette B en position b.

49.03. Dispositif de mise à la terre.

Ce dispositif comporte 3 serrures (fig. 49.04)

- dans la première, on introduit la clé A de la boîte à interrupteurs verrouillés, que l'on vient de retirer du robinet à 3 voies.

Cette clé peut occuper 3 positions : 1, 2 et 3.

- dans la seconde, on introduit la manette B qu'on a retirée du robinet à 3 voies.

Cette manette peut occuper les deux positions O et T; elle ne peut être engagée et enlevée qu'en position O; en position T, elle est verrouillée.

La manoeuvre de O à T de cette manette B commande la mise à la terre de l'équipement électrique HT par l'intermédiaire d'un sectionneur;

- dans une troisième, est emprisonnée une clé C qui peut occuper 2 positions : 4 et 5.

En position 4, la clé C est bloquée.

En position 5, elle peut être retirée et engagée. Cette clé C donne accès aux coffres et armoires HT.

La manoeuvre de mise à la terre s'effectue dans l'ordre indiqué à la fig. 49.05.

49.04. Dispositif de sécurité des locomotives.

Pour les locomotives séries 22 à 26 ce dispositif se compose :

- du robinet à 3 voies;
- du dispositif de mise à la terre comme sur les automotrices;
- d'une boîte à clés.

Cette boîte à clés est nécessaire du fait que sur les locomotives on dispose de 4 clés des serrures des compartiments HT et que leur placement dans le sectionneur de mise à la terre compliquerait la réalisation de cet appareil. D'autre part, comme nous le verrons, cette boîte à clés permet également de réaliser d'autres fonctions.

49.05. Boîte à clés du dispositif de sécurité des locomotives (séries 22 à 26).

Cette boîte comporte (fig. 49.06)

- une serrure dans laquelle s'engage la clé C retirée du dispositif de mise à la terre. Cette clé peut occuper les 2 positions 1 et 2;
- une manette fixe D pouvant occuper 2 positions 1 et 2. Cette manette commande un tambour permettant de court-circuiter le contact du relais de tension nulle lors de l'essai à blanc;
- une clé de chauffage E donnant accès aux coupleurs de chauffage du train et pouvant occuper 3 positions En - 0 - Hors. Cette clé commande un second tambour avec touches de commande pour l'asservissement du chauffage du train;
- une manette fixe S qui commande le sectionneur de mise à la terre du circuit de chauffage du train.

Cette manette peut occuper les deux positions suivantes :

- à la terre : qui correspond au sectionneur de chauffage fermé (sur la fig. position repérée F)
- en service : qui correspond au sectionneur de chauffage ouvert (sur la fig. position repérée 0)
- 4 clés qui donnent accès aux compartiments HT, poste de visite des moteurs auxiliaires H.T. et échelle d'accès à la toiture.

Ces clés peuvent occuper 2 positions :

- Position inclinée à 135° sur l'horizontale qui correspond à la position verrouillée;

- position horizontale qui correspond à la position libre : dans cette position les clés peuvent être enlevées.

Pour enlever une ou plusieurs des clés d'accès à la H.T., on procède dans l'ordre indiqué à la fig. 49.07.

Pour remettre la boîte à clés en position normale, la manoeuvre se fait exactement dans l'ordre inverse.

En plus du verrouillage des 4 clés d'accès aux armoires H.T. et aux trappes de visite des moteurs auxiliaires la boîte à clés remplit les deux fonctions suivantes :

- permettre l'essai à blanc;
- permettre l'accès aux coupleurs de chauffage, sans qu'il soit nécessaire d'abaisser les pantographes; il suffit que les contacteurs de chauffage soient ouverts et le sectionneur de chauffage (Sch) à la terre.

L'accès aux coupleurs de chauffage se fait au moyen de la clé de chauffage E (RIC).

Pour retirer la clé d'accès aux coupleurs de chauffage on procède comme suit, toutes les clés et manettes du dispositif de sécurité étant dans la position normale (pantographes levés) :

- Amener la clé de chauffage E de la position "En" à la position 0; la lampe de signalisation de la boîte à clés s'allume les contacteurs de chauffage sont ouverts;
- Amener la manette S du sectionneur de chauffage de la position "en service" à la position "à la terre";
- Amener la clé E de la position 0 à la position "hors". La lampe de signalisation s'éteint et la clé de chauffage peut être retirée.

Les opérations de remise en position normale (chauffage en service) se font exactement dans l'ordre inverse.

49.06. Conclusions.

Lorsque le conducteur a en main une clé d'accès aux armoires à appareillage H.T., aux portes de visite des moteurs auxiliaires H.T., il a l'assurance que les pantographes sont abaissés et qu'ils ne peuvent être relevés étant donné que le robinet à 3 voies est bloqué.

De plus il est assuré que l'équipement H.T. est mis à la terre et qu'il ne peut être coupé de la terre vu que les manettes de commande du sectionneur sont bloquées.

Toutefois, tout dispositif de sécurité si bien étudié soit-il, peut pour une cause fortuite, être défaillant; aussi est-il prescrit aux conducteurs de s'assurer de visu, que les pantographes sont bien abaissés avant d'effectuer la manoeuvre du dispositif de sécurité. Les prescriptions du Fasc. 11 doivent être respectées.

Les clés d'accès à la H.T. ne peuvent être retirées des serrures des armoires et coffres d'appareillage, portes de visite des moteurs auxiliaires H.T. et échelle d'accès à la toiture que pour autant que ces armoires et portes de visite soient refermées et l'échelle remise en place.

Tout agent qui constaterait une "défaillance de l'un des appareils de sécurité" doit sans tarder en avvertir le répartiteur M.A. afin que celui-ci puisse immédiatement prendre les dispositions nécessaires pour y remédier.

Toute manoeuvre ayant pour but de paralyser un dispositif de sécurité monté sur un véhicule, dispositifs destinés à protéger non seulement les agents eux-mêmes mais les usagers des trains, constitue en même temps qu'un danger mortel, une faute d'une extrême gravité pouvant entraîner la révocation des agents fautifs.

50.01. Description et fonctionnement des appareils pneumatiques de la commande électropneumatique des portes et marchepieds.

En vue de réduire les temps d'arrêt et d'accroître ainsi les vitesses commerciales sans supplément de consommation et également pour une question de sécurité des usagers, les portes de toutes les automotrices électriques sont commandées automatiquement. Cette commande automatique est du type "électropneumatique".

Le schéma pneumatique de la commande d'une porte et marchepied comporte (fig. 50.01)

1° Un moteur différentiel (1) dont la tige de piston commande l'ouverture et la fermeture de la porte par l'intermédiaire de tringles et leviers. L'air comprimé de la canalisation d'air primaire, toujours sous pression, pénètre dans le corps du cylindre entre les deux pistons.

En l'absence d'air secondaire, l'effort sur le piston de grand diamètre est plus important que celui exercé sur le piston de faible diamètre; l'ensemble constitué par les 2 pistons et les pièces qui leur sont solidaires se déplace vers la droite et occupe la position dessinée sur la figure.

Ce déplacement correspond à la fermeture de la porte.

Lorsque la canalisation d'air secondaire est mise sous pression, l'effort sur le piston de grand diamètre est alors équilibré par l'effort de l'air secondaire et, sous l'effet de l'effort exercé par l'air primaire sur le piston de petit diamètre, l'ensemble constitué par les deux pistons se déplace vers la gauche. Ce déplacement correspond à l'ouverture de la porte.

La porte va donc s'ouvrir ou se fermer suivant que la canalisation d'air secondaire est mise sous pression ou à l'échappement, la canalisation d'air primaire étant constamment sous pression.

Lors de la fermeture, l'air secondaire s'échappe du cylindre en 2 phases :

- D'abord par un orifice de grand diamètre (pendant les 2/3 de la course environ) ce qui donne un mouvement rapide à la fermeture;
- Ensuite par un orifice de petit diamètre, ce qui achève la fermeture à une allure assez lente, permettant à un voyageur coincé de se dégager.

2° A certaines automotrices, un cylindre moteur de marchepied (2) dont la tige de piston commande par l'intermédiaire de tringles et leviers, soit l'abaissement et le relèvement du marchepied pivotant, soit la sortie et l'effacement du marchepied glissant, suivant le cas.

Ce cylindre porte un ressort qui repousse le piston.

En cas d'ouverture de la porte, la canalisation d'air secondaire est mise sous pression, l'air comprimé pénètre dans le cylindre, repousse le piston qui comprime le ressort provoquant ainsi la sortie ou l'abaissement du marchepied.

En l'absence d'air secondaire, le ressort repousse le piston provoquant ainsi la rentrée ou le relèvement du marchepied. A noter que lors de la manoeuvre de fermeture, l'air comprimé emmagasiné dans le cylindre s'échappe par un trou calibré, de façon à ce que la manoeuvre du marchepied soit relativement lente.

3° Un distributeur (3) équipé de 2 électrovalves (4), dont le rôle est de mettre soit sous pression soit à l'atmosphère la canalisation d'air secondaire.

L'ensemble formé par les 2 pistons et son tiroir est mobile. Le déplacement du tiroir vers la gauche (fig. 50.01) met la lumière de la canalisation secondaire en communication avec la lumière d'échappement par l'évidement interne du tiroir, ce qui provoque la vidange à l'atmosphère de la canalisation d'air secondaire.

Le déplacement du tiroir vers la droite découvre la lumière de la canalisation d'air secondaire qui est ainsi mise sous pression par l'air comprimé qui remplit la partie centrale du corps de cylindre.

Le déplacement vers la gauche ou vers la droite de la partie mobile est assuré par l'excitation de l'une ou l'autre des électrovalves (4). L'air comprimé arrivé en permanence dans le corps de chaque électrovalve.

Quand les 2 électrovalves ne sont pas excitées, l'air remplit non seulement la partie centrale du corps du distributeur, mais aussi les parties arrière des pistons. Toutes les pressions sur l'ensemble mobile s'annulent donc et il reste immobile là où il se trouve.

L'excitation d'une des électrovalves ferme l'arrivée d'air comprimé dans le corps de cette électrovalve et met à l'atmosphère la partie arrière du piston correspondant. Les efforts sur l'ensemble mobile ne s'équilibrent pas et celui-ci se déplace du côté de l'électrovalve excitée. L'excitation de l'électrovalve étant supprimée, la pression d'air s'exerce à nouveau des 2 côtés du piston mais l'ensemble mobile reste immobile et le restera jusqu'à ce que l'autre électrovalve ait été excitée.

4° Une valve de fermeture (5).

Cette valve est un robinet à 3 voies muni d'un contact électrique.

Dans la position dessinée à la fig. 50.01, qui est la position normale, cette valve établit une liaison pneumatique entre le distributeur et les cylindres de porte et marchepied; d'autre part, aucun contact électrique n'est établi.

La rotation de cette valve met sous tension d'une part le fil de train de commande des électrovalves de fermeture et établit d'autre part une arrivée directe d'air secondaire sur les cylindres de porte et de marchepied d'où l'on commande la valve de fermeture.

50.02. Fonctionnement de la commande électrique des portes.

Le fonctionnement de l'installation est le suivant : (fig. 50.02).

1° L'ouverture des portes est commandée par le conducteur à l'aide de boutons-poussoirs ou d'interrupteurs Faiveley.

L'inverseur de marche étant placé sur une position de marche AV ou AR, en fermant par exemple l'interrupteur "ouverture droite", le conducteur met sous tension positive le fil de train 40 au travers du fusible f 4, de l'interrupteur I₃ et du contact CP-43 du tambour d'inversion. Dès lors, les électrovalves d'ouverture des portes de droite sont alimentées par le fil 40 au travers du fusible f 40 sur toutes les voitures accouplées, Les tiroirs des distributeurs se déplacent et mettent en communication avec l'arrivée d'air comprimé les cylindres des portes (et des marchepieds).

A remarquer que les marchepieds sortent, mais que les portes ne s'ouvrent effectivement que si le voyageur manoeuvre la clenche de la porte de l'intérieur ou de l'extérieur de la voiture.

Le moteur de marchepied fonctionne rapidement, le clapet se trouvant dans sa culasse permettant l'arrivée d'air rapide; le moteur de porte fonctionne avec un certain retard dû à une valve de réglage incorporée dans ce moteur. Le marchepied est donc complètement sorti avant que la porte ne s'ouvre.

2° La fermeture de toutes les portes du train est commandée par le chef de train à l'aide d'une des valves à contact se trouvant au-dessus de chacune des portes.

La manette d'inversion se trouvant sur une position de marche, la borne + CP alimente positivement la borne et le fil de train 43 puis par le fusible f 45 si le chef-garde manoeuvre une quelconque des valves à contacts (interrupteurs de fermeture), il alimente alors les relais de fermeture RFP de toutes les voitures accouplées, par le fil 44 au travers des fusibles f 44.

4.

Sur chacune des voitures, le relais RFP, qui a sa borne 43A sous tension positive depuis le fil CP et fusible f 43, en se fermant établit le contact 43A-43B et toutes les électrovalves de fermeture sont mises sous tension. A remarquer que le relais RPF de la voiture fourgon comporte un second contact (43B - 44C) d'alimentation des électrovalves de fermeture des portes de fourgon.

Les portes se ferment car les moteurs de toutes les portes sont mis à l'échappement, sauf celle où le chef-garde effectue la manoeuvre. En effet, d'après ce qui a été dit à la leçon précédente, en actionnant la valve de fermeture avec le robinet à 3 voies incorporé, le chef-garde rétablit l'arrivée d'air comprimé dans les moteurs de sa porte et de son marchepied et ceux-ci restent ouverts.

En refaisant en sens inverse la manoeuvre de la valve de fermeture, le chef-garde rétablit la communication entre les moteurs de sa porte et le distributeur mis à l'échappement par suite de la première manoeuvre et la porte se ferme.

A la fermeture, la porte se ferme rapidement; le marchepied suit avec un certain retard provoqué par le clapet qui se trouve dans la culasse du moteur.

50.03. Signalisation de la fermeture des portes.

Chaque porte est équipée d'un contact de fin de course fermé lorsque la porte est complètement fermée.

Lorsque toutes les portes d'une même voiture sont fermées, un relais de signalisation RSP est alimenté par le fil 43 (inverseur en position de marche) au travers du fusible f 45 et les contacts de fin de course en série. Si la porte, près de laquelle le chef de train effectue la manoeuvre est encore ouverte, le chef de train peut néanmoins court-circuiter la fin de course de sa porte en poussant sur le bouton-poussoir de signalisation placé au-dessus de la valve de fermeture.

La fermeture de tous les relais de signalisation de toutes les voitures accouplées va provoquer l'allumage d'une lampe de signalisation installée sur le pupitre du conducteur, suivant le circuit : CP - contact CP - 43 de la manette d'inversion en position de marche - fusible f 42 - lampe de signalisation - contact 42E - 42D de la manette d'inversion en position de marche - contacts 42D-42K du couvercle rabattu sur le coupleur en place dans sa boîte de repos - contact 42K-42A de la boîte d'accouplement de droite dont le couvercle est fermé - contact 42A-42B des relais de signalisation (en série) des deux voitures - contact 42B-42K de la boîte de repos couvercle rabattu sur le coupleur en place - 42K-42D de la boîte d'accouplement de droite dont le couvercle est fermé - contact 42D-13 de l'inverseur de la cabine arrière en position zéro.

(L'autre fiche du coupleur n'est normalement jamais utilisée, de ce fait le couvercle est bloqué).

Cours 124.20.
50e leçon.

En cas d'accouplement de plusieurs automotrices, la continuité du circuit est assurée par les contacts des boîtes d'accouplement d'extrémité du train dont seuls les couvercles peuvent être refermés, la continuité étant assurée d'une automotrice à l'autre par le fil 42.

L'allumage de la lampe de signalisation (de couleur blanche) constitue l'information "opérations terminées".

LES GENERATRICES A COURANT CONTINU.

51.01. Généralités concernant les génératrices à courant continu.

Une génératrice ou dynamo à courant continu est une machine qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique sous le forme de courant continu. Sa construction est entièrement analogue à celle d'un moteur à courant continu; une dynamo peut travailler, sous certaines conditions, comme moteur et, inversement, un moteur peut, dans des conditions déterminées, fonctionner comme dynamo.

51.02. Induction de courant électrique - Théorie simplifiée.

Quand un conducteur électrique, par exemple un barreau, d'une longueur l , se déplace dans un champ magnétique H avec une intensité de flux B , il naît alors dans ce barreau une force électromotrice E (fig. 51.01) dirigée suivant la règle de la main droite. La puissance de cette force électromotrice E est directement proportionnelle à :

- l'intensité du flux B
- la vitesse V avec laquelle le barreau se meut dans le champ;
- la longueur l du barreau qui se trouve dans le champ.

De là, la relation :

$$E = k.B.l.V \quad (1)$$

Le mouvement rectiligne du barreau peut être remplacé par un mouvement circulaire autour d'un axe qui lui est parallèle.

Si ce barreau a été placé sur un induit et tourne dans un champ magnétique constant (fig. 51.02) dont les lignes de force passent perpendiculairement dans l'induit, la relation (1) reste valable; nous en concluons qu'aussi longtemps que B , l et V restent constants, il est engendré dans le barreau une tension E constante, soit donc une tension continue.

Considérons cependant une rotation complète du barreau qui se trouve, suivant la figure 51.02, perpendiculairement sur le plan du dessin de telle façon que nous n'en puissions voir qu'une coupe et examinons dans quel sens circulera le courant.

A gauche de la ligne médiane bb , le barreau se meut de bas en haut de telle façon que la direction donnée au champ (de gauche à droite) fait pénétrer la f.é.m. dans le plan du dessin (loi de la main droite).

A droite de la ligne médiane, le barreau se meut de haut en bas et, suivant la même loi de la main droite, la f.é.m. sort du plan du dessin.

La direction "entrant dans le plan du dessin" est indiquée par une croix, la direction "sortant du plan du dessin" par un point.

Dans le barreau considéré, il est donc engendré une f.é.m. qui, par suite de rotation, changea 2 fois de direction, le changement de direction se produit chaque fois que le barreau franchit la ligne médiane bb.

En réalité, plusieurs barreaux se trouvent répartis sur le contour de l'induit (fig. 51.03) qui sont tous reliés en série de telle sorte que la longueur l , dans la relation (1), est fortement augmentée, de même que la f.é.m. totale E produite.

Dans chacun des barreaux, qui se trouvent à gauche de l'axe bb, naît une f.é.m. qui pénètre dans le plan du dessin; dans chacun des barreaux, qui se trouvent à droite de l'axe, naît une f.é.m. qui sort du plan du dessin. Lors du passage de chaque barreau par delà l'axe bb, le sens de la f.é.m. intéressée change chaque fois. Les barreaux de l'induit forment ensemble un circuit fermé dont une moitié produit une f.é.m. de direction déterminée et l'autre moitié une f.é.m. de sens contraire.

Cela est représenté de façon réelle par la figure 51.04 qui présente le développement d'un induit. Les conducteurs y sont désignés par des lignes pleines, les liaisons par des pointillés.

On constate que les forces électromotrices, à gauche et à droite de l'axe bb, sont contraires et se rencontrent au point B₁ où naît donc un potentiel positif.

Par contre, en B₂, les deux f.é.m. partent chacune dans une direction distincte et il y naît un potentiel négatif.

En utilisant les points B₁ et B₂ comme bornes de courant de la dynamo, l'induit est divisé en 2 branches reliées en parallèle : B₁ et B₂ se trouvent sur la ligne d'axe bb et sont donc fixes par rapport à la machine. Vu que l'induit tourne, on doit prévoir un contact glissant pour la prise de courant; cela se réalise par le collecteur.

51.03. Le collecteur.

Le collecteur est un cylindre placé sur l'axe de l'induit et consistant en un certain nombre de lamelles de cuivre qui sont isolées l'une de l'autre et de l'induit.

On prévoit autant de lamelles que de barreaux et l'entrée de chacun de ces barreaux est reliée à une lamelle (fig. 51.03). Sur la ligne bb (appelée également ligne neutre), un balai est placé aux points B_1 et B_2 qui frotte sur le collecteur; ces balais forment les bornes B 1 et B 2 de la machine.

Il est évident qu'au moment où la direction de la f.é.m. va changer dans un barreau, celui-ci passe automatiquement dans la branche contraire. Ce phénomène se produit simultanément sous les 2 balais de telle sorte qu'à gauche et à droite de l'axe bb il reste toujours le même nombre de conducteurs d'induit. Malgré le fait que l'induit tourne, on conserve donc la même représentation des f.é.m. comme représenté aux figures 51.03 et 51.04. Les balais B 1 et B 2 conservent en conséquence toujours le même potentiel de sorte qu'aux bornes B 1 et B 2 on peut recueillir une tension continue.

51.04. Les inducteurs de champ.

Dans l'exposé précédent, on a toujours supposé un champ magnétique constant qui produisait le flux nécessaire. Ce champ magnétique peut être engendré de différentes manières :

- par un aimant permanent; ce système ne peut fournir de grandes puissances et il n'est employé que pour de petites machines.
- par un électro-aimant. Ce dernier se compose de masses de fer qui forment les pôles de la dynamo et qui sont reliées à un anneau en fer qui sert en même temps de carcasse de dynamo. Sur ces pôles se trouvent des bobinages isolés au travers desquels on envoie un courant qui engendre le champ magnétique.

Ce bobinage est appelé inducteur. Il produit un champ magnétique qui sort du pôle Nord, traverse l'induit pour se fermer au travers du pôle Sud et de la carcasse de la dynamo.

Comme l'inducteur est parcouru par un courant continu, le flux engendré est également constant de sorte que, dans les pôles, il n'apparaît aucun courant de Foucault. Les pôles peuvent donc être construits en fer massif.

51.05. L'induit.

L'induit porte le bobinage d'induit et le collecteur. Il consiste en un nombre de plaques d'acier de grande perméabilité pour former une bonne conductibilité pour le flux magnétique produit par les inducteurs.

Cette grande conductibilité est nécessaire parce que le flux total doit traverser l'induit et donc les conducteurs d'induit. La partie du flux magnétique qui ne traverse pas l'induit ne recoupera pas, en effet, les conducteurs mobiles de l'induit et n'engendrera en conséquence aucune f.é.m.

Les différentes plaques d'acier sont isolées entre elles par une couche de vernis et fixées au moyen de boulons.

Toute cette masse est fixée sur un arbre dont les deux extrémités reposent en deux coussinets de la carcasse de la dynamo.

Sur la circonférence de l'induit, des rainures sont prévues longitudinalement pour y placer les conducteurs d'induit. Ces conducteurs appelés "bobines d'induit" sont reliés entre eux et avec le collecteur de manière appropriée.

Un induit, comme décrit succinctement ci-dessus, est appelé induit à tambour en opposition avec l'induit de la figure 51.03 qui était un induit à anneau.

Les premières machines étaient exécutées avec induit à anneau, cependant que les dynamos modernes possèdent toujours des induits à tambour car ces derniers assurent une meilleure conductibilité du champ magnétique, ils sont plus faciles à bobiner et comportent moins de conducteurs inactifs.

51.06. Nature de l'excitation de l'inducteur. - Types de dynamo.

Pour engendrer un flux, l'inducteur doit être parcouru par un courant, en d'autres mots, il doit être excité.

Suivant la nature de l'excitation, on distingue :

a) la dynamo à excitation indépendante.

dont l'inducteur est excité par une source de courant indépendante, par exemple par une batterie ou une autre source à courant continu.

Cette disposition nécessite la présence d'une source de courant étrangère ce qui est cause de ce que ce type de dynamo n'est que peu utilisé sauf dans des cas spéciaux où il s'indique, par exemple, de pouvoir influencer librement l'excitation de la dynamo.

b) la dynamo à excitation shunt.

La dynamo à excitation shunt possède un inducteur à auto-excitation. Les bornes de cet inducteur sont reliées

aux balais de telle sorte que l'induit est shunté par l'inducteur. Ce type présente une certaine analogie avec le précédent en ce qui concerne les caractéristiques de fonctionnement comme il sera démontré plus tard.

c) Dynamo à excitation série.

Dans ce type, une des bornes de l'inducteur est reliée à un balai. L'autre balai ainsi que l'autre borne de l'inducteur forment les 2 bornes propres de la dynamo. De cette façon, l'inducteur et l'induit sont couplés en série.

Comme nous le verrons plus loin, une dynamo à excitation compound, shunt et une dynamo à excitation série doivent disposer d'un certain magnétisme rémanent dans les pôles inducteurs pour pouvoir être excités en partant de l'arrêt.

d) Dynamo à excitation compound.

Cette dynamo est du type à auto-excitation et possède 2 bobinages inducteurs; l'un d'eux est couplé en série avec l'induit, l'autre en parallèle.

La dynamo à excitation compound réunit les qualités de la dynamo à excitation shunt et de la dynamo à excitation série.

QUESTIONNAIRE.

- 49.01. Quel est le but du dispositif de sécurité équipant nos engins moteurs électriques ?
- 49.02. Quelle clé faut-il pour manoeuvrer le robinet à 3 voies du dispositif de sécurité et que provoque la fermeture de ce robinet à 3 voies ?
- 49.03. De quoi se compose le dispositif de mise à la terre et quelle mesure de précaution faut-il prendre avant la manoeuvre ?
- 49.05. Quelles sont les fonctions de la boîte à clés ?
- 50.01. De quoi se compose l'équipement pneumatique des portes automatiques d'une automotrice ?
- 50.01. Pourquoi la porte, d'où le chef de train commande la fermeture, reste-t-elle ouverte tant que la clé reste en position de fermeture ?
- 50.01. Lorsque les deux électro-valves du distributeur de portes sont excitées simultanément, que se passe-t-il ?
- 50.02. a) Quelle est la batterie qui alimente les électro-valves d'ouverture des portes d'un train composé de plusieurs automotrices ?
- b) Quelle est la batterie qui alimente les électro-valves de fermeture des portes d'un train composé de plusieurs automotrices ?
- 51.06. Citez les types de dynamos que vous connaissez.
Dessinez le schéma de principe.

CARACTERISTIQUES DES DYNAMOS.

53.01 La dynamo à excitation indépendante.

Quoique ce type de dynamo ne soit que peu utilisé pour les raisons déjà énoncées plus haut, son étude en est néanmoins utile pour comprendre plus facilement le fonctionnement des autres types.

Considérons une dynamo à excitation indépendante (fig. 53.01). L'inducteur n'est représenté sur cette figure que par une seule bobine et est parcouru par un courant i fourni par une batterie (ou une autre source de courant), à travers une résistance de réglage.

Le courant i engendre dans l'inducteur un flux Φ qui a le sens désigné, en supposant l'inducteur enroulé dans le sens droit (règle du tire-bouchon).

Au moyen de la résistance de réglage r , le courant dans l'inducteur et donc également le flux d'induit peuvent être réglés.

L'induit est représenté par un cercle et les 2 balais par les petites surfaces B_1 et B_2 . Aux balais, est raccordé un voltmètre V qui mesure la tension aux bornes; de plus, on a prévu également un ampèremètre A pour mesurer le courant qui traverse le consommateur, représenté par la résistance R dès que l'interrupteur S est fermé.

53.02 La caractéristique magnétique.

Cette caractéristique, qui est commune à tous les types de dynamo et qui représente la f.é.m. engendrée à vide, en fonction du courant d'excitation est toujours mesurée avec la dynamo raccordée comme machine à excitation indépendante.

La relation (1) de la 51e leçon contenait :

$$e \text{ (volt)} = k \cdot B \cdot l \cdot V \quad (1)$$

dans laquelle :

B = l'induction, c'est-à-dire le flux par unité de surface qui est engendré par les inducteurs .

On en déduit que le flux $\Phi = B \cdot s$ (2), équation dans laquelle s représente la surface traversée par les lignes de force du champ magnétique.

l = la longueur du conducteur d'induit, soit donc de l'induit. L'induit comprend cependant plusieurs conducteurs d'induit (supposons : z) qui sont tous lde même longueur, de sorte que la f.é.m. totale $E = z \cdot e$;

V = la vitesse du conducteur d'induit, c.à.d. la vitesse périphérique de l'induit. Quand celui-ci tourne avec une vitesse de rotation de n tours par minute, la vitesse périphérique est de :

$$V = n \cdot 0 \quad (3), \text{ avec } 0 = \text{la périphérie de l'induit.}$$

$$\text{D'autre part, la surface } s = 1 \cdot \frac{0}{2} \quad (4).$$

De sorte que, compte tenu de (2), (3) et (4), la relation (1) peut être écrite :

$$E = z \cdot e = k \cdot z \cdot B \cdot l \cdot v = k \cdot z \cdot B \cdot l \cdot 0 \cdot n = k' \cdot \underline{B \cdot s} \cdot n = k \cdot \underline{\Phi} \cdot n \quad (5).$$

E est ici la f.é.m. totale engendrée dans l'induit.

De la relation (5), nous concluons que E est proportionnel au flux et à la vitesse de rotation.

Revenons à notre dynamo à excitation indépendante de la figure 53.01. En l'entraînant à vitesse constante, n = constante, l'équation (5) devient :

$$E = k'' \underline{\Phi} \quad (6)$$

La f.é.m. engendrée est proportionnelle au flux $\underline{\Phi}$. Ce dernier est déterminé par le courant d'excitation suivant la caractéristique magnétique de la dynamo (fig. 53.02).

Quand un courant de valeur i_1 est envoyé au travers de l'inducteur de la dynamo (réglable au moyen de la résistance variable r - fig. 53.01), il produit un flux qui possède par exemple une valeur $\underline{\Phi} 1$.

Aux bornes B1 et B2, une tension $E1$ est alors mesurée avec le voltmètre V . Nous remarquons que, lors de cette mesure, l'interrupteur S doit être ouvert pour qu'aucun courant ne puisse passer par R ; la dynamo tourne donc à vide et nous mesurons la tension appelée en marche à vide $E1$ qui correspond à un flux $\underline{\Phi} 1$, soit à un courant d'excitation i_1 . De cette façon, nous obtenons le point 1 de la caractéristique magnétique (fig. 53.02).

En diminuant la résistance r , le courant d'excitation i croît jusqu'à une valeur i_2 , à laquelle correspond une nouvelle valeur du flux ($\underline{\Phi} 2$) et de la tension en marche à vide ($E2$): de là, le deuxième point (2) de la caractéristique.

Par des mesures analogues, les points 3, 4 ... peuvent être déterminés, de telle sorte que nous obtenons finalement la caractéristique magnétique complète de la fig. 53.02 qui donne la variation de E en fonction du courant d'excitation.

La caractéristique montre que la variation de E pour de faibles intensités de courant est linéaire, c.à.d. que le flux et la tension croissent en proportion directe avec le courant d'excitation. A partir du point 2, la caractéristique n'est plus rectiligne mais présente une courbe. Celle-ci est due au fait que le fer des pôles inducteurs se sature; le flux, et donc aussi la tension aux bornes, s'accroît à partir de ce moment beaucoup plus lentement que le ferait prévoir l'accroissement du courant d'excitation.

De plus, lorsque l'inducteur n'est plus parcouru par un courant ($i = 0$), une faible tension (E_0) est cependant encore induite; celle-ci est due au magnétisme rémanent de l'inducteur.

Influence de la vitesse de rotation de l'induit.

Dans ce qui précède, la vitesse de rotation a été maintenue constante. Si, par contre, le courant d'excitation i reste constant, alors que la vitesse (n) est considérée variable, la relation (5) peut s'écrire :

$$E = k'' n \quad (7).$$

La tension aux bornes dépend uniquement de la vitesse de rotation vu que Φ reste constant, de même que le courant d'excitation i .

La tension aux bornes E varie de façon directement proportionnelle à la vitesse (fig. 53.03).

Pour chaque vitesse n de la dynamo, une caractéristique E en fonction de i peut être tracée.

Ces courbes ne diffèrent pas entre elles en ce qui concerne leur forme. Lorsque la courbe pour une vitesse déterminée a été fixée, celles pour toutes les autres vitesses peuvent facilement en être déduites (fig. 53.01); en effet, suivant la relation (7), nous avons :

$$E = k'' n \quad \text{et} \quad E' = k'' n', \quad \text{dans lesquelles}$$

E et E' sont les tensions qui correspondent respectivement à n et n' .

Nous pouvons donc écrire que :

$$\frac{E'}{E} = \frac{n'}{n} \quad (8)$$

Il suffit donc de multiplier les ordonnées par $\frac{n'}{n}$. On obtient ainsi, pour différentes vitesses, un nombre de courbes que l'on appelle "caractéristiques magnétiques de la dynamo" et dont quelques-unes sont représentées à la fig. 53.02 respectivement pour des vitesses n , n' et n'' .

53.03 La caractéristique interne.

Cette caractéristique représente la f.é.m. engendrée réellement dans l'induit en fonction du courant de charge. La f.é.m. a déjà été donnée par la relation (5) mais le flux à travers l'induit n'est plus le même en charge qu'en marche à vide car la réaction d'induit modifie le champ dans les pôles.

Quand la dynamo fournit du courant, le courant d'induit engendre en effet un flux dans l'induit qui s'ajoute à celui fourni par les inducteurs.

Cette particularité a pour conséquence un affaiblissement du flux total qui est engendré dans la machine.

Cet affaiblissement du flux occasionne une diminution de la f.é.m. générée E , qui devient E' (fig. 53.04).

Ce phénomène est appelé réaction d'induit et la diminution de la f.é.m. s'accroît à mesure que le courant augmente; de là, la courbe E' qui est appelée caractéristique interne.

53.04 La caractéristique externe.

La caractéristique externe d'une dynamo est le diagramme qui exprime la variation de la tension aux bornes U en fonction du courant de charge I fourni à l'utilisateur par la dynamo, la vitesse de la dynamo étant supposée constante.

Pour pouvoir tracer cette caractéristique, la dynamo doit être chargée en fermant l'interrupteur S de la fig. 53.01.

Quand la dynamo tourne, il circule dans le circuit un courant I qui peut être réglé par modification de R . En augmentant R , la charge de la dynamo peut être diminuée tandis qu'en diminuant R , la dynamo sera de plus en plus chargée jusqu'au cas extrême où $R = 0$ ce qui correspond au court-circuitage de la machine.

La courbe U de la figure 53.04 représente la caractéristique externe de la dynamo à excitation indépendante considérée. Elle a été établie à vitesse constante de la dynamo et à courant d'excitation i maintenu également constant.

Nous remarquons que la tension U mesurée aux balais par le voltmètre V , diminue dans la mesure où le courant absorbé augmente (mesuré au moyen de l'ampèremètre A) et cela indépendamment du fait que le courant d'excitation reste constant et que la f.é.m. induite E' ne diminue que légèrement avec la charge absorbée.

La raison de cette particularité est la suivante : le

courant I traverse le bobinage induit et comme celui-ci a une résistance déterminée r_a , il s'y produit une chute de tension égale au produit de r_a avec le courant I .

Comme la tension aux bornes n'est pas E' , mais U , il en résulte, suivant la loi d'Ohm :

$$U = E' - r_a I \quad (9).$$

La réaction d'induit pouvant être négligée pour des courants qui ne sont pas trop importants et la chute de tension dans l'induit étant faible à cause de la valeur minime de la résistance de l'induit, on peut en déduire que pour une dynamo à excitation indépendante, la tension aux bornes U reste relativement constante.

Si une tension rigoureusement constante est désirée, elle peut être obtenue de façon très simple, par le réglage du courant d'excitation au moyen de la résistance r (fig. 53.01).

Nous pouvons donc conclure qu'une dynamo à excitation indépendante est essentiellement une machine qui fournit une tension peu influencée par la charge.

Remarque.

Les caractéristiques magnétiques sont les mêmes pour toutes les dynamos quelle que soit la nature de l'excitation. En effet, ces diagrammes sont établis avec induit sans courant (dynamo déchargée) de sorte que la dynamo doit nécessairement être excitée de façon indépendante. Dans le cas d'une dynamo shunt ou série, l'inducteur est déconnecté et raccordé à une source de courant au travers d'une résistance de réglage.

La forme de la caractéristique magnétique dépend donc uniquement de la construction de la dynamo (saturation, perméabilité des noyaux, etc ...).

La caractéristique externe, au contraire, dépend essentiellement de la nature de l'excitation; ainsi, la valeur quasi constante de la tension aux bornes de la dynamo à excitation indépendante est due à son excitation constante.

DYNAMOS A AUTO-EXCITATION.

54.01

Une dynamo à auto-excitation est une dynamo qui fournit elle-même le courant d'excitation nécessaire pour l'alimentation de l'inducteur.

Nous avons déjà vu auparavant que, pour engendrer une f.é.m dans un induit tournant, un flux Φ est nécessaire; dans une machine à excitation indépendante, ce flux est obtenu par une installation indépendante : aimant permanent ou électro-aimant à excitation indépendante.

Dans les dynamos à auto-excitation, un certain magnétisme rémanent est nécessaire pour rendre possible l'auto-excitation. En effet, dans de telles dynamos, le courant produit par la dynamo est envoyé en partie (dynamo shunt) ou entièrement (dynamo série) au travers de l'inducteur. A l'arrêt, la dynamo n'engendre évidemment aucune f.é.m et aucun courant ne traverse le consommateur qui y serait éventuellement raccordé, ni l'inducteur qui, en conséquence, ne produirait aucun flux.

S'il n'y avait aucun magnétisme rémanent ($\Phi = 0$), la machine ne produirait aucune tension non plus lors de sa mise en marche vu l'absence d'un champ magnétique ; par manque de tension, aucun courant ne circulerait dans les inducteurs qui, par conséquence, ne produiraient aucun flux magnétique.

Supposons au contraire - comme c'est d'ailleurs le cas dans la réalité, - que les inducteurs possèdent un magnétisme rémanent provenant par exemple d'une excitation précédente; à partir du moment où l'induit commence à tourner, ce faible flux produit une f.é.m dans l'induit et un courant traversera l'inducteur.

Deux cas peuvent se présenter :

- a) la direction du courant dans l'inducteur est telle qu'il provoque un flux qui est dirigé en sens contraire de celui du magnétisme rémanent est affaibli ainsi que la f.é.m générée et le courant qu'elle produit.

Si on continuait à laisser tourner la machine dans ces circonstances, le magnétisme rémanent, ainsi que la tension et le courant, s'affaibliraient davantage, jusqu'à disparition complète; après un court laps de temps, nous nous retrouverions donc dans le cas défavorable d'une dynamo sans magnétisme rémanent. On peut rétablir le magnétisme rémanent en raccordant, pendant un certain temps, l'inducteur à une source de courant étrangère.

Si, lors de la mise en marche d'une dynamo à autoexcitation, on constate une chute de tension aux bornes, cela signifie que le flux produit par l'inducteur est dirigé en sens contraire à celui du magnétisme rémanent. On doit donc arrêter immédiatement la dynamo et interchanger les connexions de l'inducteur; la dynamo se trouvera alors dans le cas favorable ci-après :

- b) la direction du courant dans l'inducteur est telle qu'elle produit un flux dans le même sens que celui du magnétisme rémanent.

Dans ce cas, le magnétisme rémanent est renforcé; il en résulte une f.é.m générée qui devient de plus en plus grande; le courant augmente également et produit à son tour un plus grand flux.

Théoriquement, le flux et la f.é.m pourraient donc croître sans limite. Tel n'est pas le cas par suite de la saturation des noyaux des pôles.

54.02

La dynamo série.

La figure 5401 représente schématiquement une dynamo - série; l'inducteur, l'induit et l'utilisateur (R) sont tous raccordés en série. L'inducteur est donc parcouru par le courant total fourni par la dynamo. Il suffit, en conséquence, de prévoir à l'inducteur un petit nombre d'enroulements en gros fil pour produire la force magnétomotrice nécessaire.

Il en résulte que la résistance r de l'inducteur est très réduite.

- a) la caractéristique magnétique.

Celle-ci est déterminée comme il fut décrit dans la leçon précédente soit avec l'inducteur déconnecté et alimenté par une source de courant indépendante. Elle présente la même forme que celle de la dynamo à excitation indépendante.

- b) la caractéristique interne.

Etant donné que dans la dynamo-série le courant d'excitation est le même que le courant de charge, la caractéristique interne peut être déduite de la caractéristique magnétique; pour cela, il suffit pour chaque valeur de courant de charge (= courant d'excitation), de retirer de la f.é.m E , la diminution de tension provoquée par la réaction d'induit; nous obtenons de cette façon, la caractéristique interne E' de la figure 54.02.

c) la caractéristique externe.

La caractéristique externe peut être déduite de la caractéristique interne de la même façon que pour la dynamo à excitation indépendante.

Considérons à la figure 54.01 la dynamo-série, raccordée à l'utilisateur R. D'après la loi d'ohm, on peut écrire :

$$U = IR \text{ (10) et } U = E' - (ra + rv) I \text{ (11)}$$

dans lesquelles : ra = résistance de l'enroulement d'induit
rv = résistance de l'inducteur.

La relation (11) est représentée par la courbe U (caractéristique externe) de la fig. 54.02 ; elle est déduite de la courbe E' en y retirant le produit de ra + rv avec le courant I.

On appelle point de fonctionnement de la dynamo, le point P de la courbe U où un équilibre s'établit : en P, la tension U et le courant I ont une valeur telle qu'il est satisfait aux deux relations 10 et 11. P est le point d'intersection de la droite $U = IR$ avec la courbe $U = E' - (ra + rv) I$.

Supposons maintenant un consommateur avec une résistance plus grande R1; la droite $U = IR1$ sera plus inclinée et coupera la caractéristique externe de la dynamo en un point P1 (fig. 54.02).

On remarque que P1 coïncide avec la tension U1 et le courant I1 qui sont tous deux considérablement plus faibles que la tension et le courant obtenus avec un utilisateur R.

En conséquence, la dynamo-série est une machine qui fournit une tension U qui dépend essentiellement de la charge.

La tension ne restera plus ou moins constante que lorsque le circuit magnétique est fortement saturé (la caractéristique externe étant alors plus horizontale).

Mise en court-circuit de la dynamo-série.

En cas de mise en court-circuit, la résistance R de l'utilisateur est égale à zéro. Cela signifie pour la dynamo-série un courant très important qui est inadmissible pour la machine. La dynamo-série ne peut donc jamais être mise en court-circuit et doit être protégée par des fusibles.

Relation des puissances.

La puissance cédée par la dynamo est égale au produit de la tension par le courant débité, soit donc de U par I.

En multipliant les 2 membres de la relation (11) par I, nous obtenons :

$$U I = E' I - (r_a + r_v) I^2 \quad (12).$$

Cette égalité exprime que la puissance UI cédée aux bornes de la dynamo est égale à la puissance E'I fournie par la dynamo, diminuée de la puissance absorbée par les résistances internes $r_a + r_v$. Cette dernière se perdra comme effet "Joule" et constitue la cause de l'échauffement de la dynamo.

Pour maintenir ces pertes par effet Joule, aussi faibles que possible, r_a et r_v doivent être réduites; pour obtenir ce résultat, les enroulements de l'inducteur et de l'induit ne comprennent qu'un petit nombre de spires en gros fil.

54.03 La dynamo-shunt.

La figure 54.03 représente schématiquement une dynamo shunt qui, au moyen de l'interrupteur S, peut être raccordée à un utilisateur R.

L'induit et l'inducteur sont raccordés en parallèle de sorte que l'inducteur est soumis à la tension totale de la dynamo.

D'autre part, le courant d'induit I_a fournit aussi bien le courant d'excitation i_v que le courant de consommation I, de sorte que :

$$I_a = i_v + I \quad (13)$$

Pour que la machine soit utilisée à plein rendement, i_v doit être faible par rapport à I et l'inducteur devra donc comporter un grand nombre d'enroulements en fil mince, de sorte que la résistance r_v de l'inducteur soit très grande.

Grâce au grand nombre d'enroulements, la force magnétomotrice produite est suffisamment grande en dépit du faible courant d'excitation.

a) Caractéristique magnétique.

Elle est la même que la caractéristique magnétique de la dynamo indépendante ou série. Contrairement à cette dernière, la dynamo-shunt s'excite également en marche à vide, c'est-à-dire avec circuit de charge ouvert (interrupteur S ouvert), l'inducteur étant en effet toujours raccordé à l'induit. Cette connexion correspond donc à celle d'une dynamo-série court-circuitée. A cause de la grande résistance de l'inducteur, le courant reste néanmoins assez faible.

b) Caractéristiques interne et externe.

Lorsque la dynamo est raccordée à un utilisateur extérieur R, l'induit alimentera aussi bien l'inducteur que l'utilisateur et nous obtenons la relation des courants comme ci-dessus (13).

D'autre part, la loi d'Ohm nous donne la tension aux bornes de la dynamo :

$$U = E' - I a. r_a = E' - (I + i_v) r_a \quad (14).$$

E' est ici la f.é.m qui est engendrée dans l'induit, compte tenu de la réaction d'induit.

Les caractéristiques interne et externe ont la forme représentée à la fig. 54.04.

A vide ($I = 0$), la tension aux bornes U est approximativement égale à la f.é.m induite E' car la chute de tension dans l'induit est peu importante, le courant étant très faible.

Lorsqu'une charge R est installée aux bornes de la dynamo et qu'on augmente le courant d'utilisation I en diminuant la valeur de R, la tension U diminuera pour les raisons suivantes :

- 1) à cause de la réaction d'induit qui fait diminuer la f.é.m induite E' par rapport à la tension à vide E nous obtenons ainsi la caractéristique interne E' .
- 2) à cause de la chute de tension $(I + i_v) r_a$ dans l'induit qui croît avec le courant : nous obtenons la caractéristique externe U.
- 3) la décroissance de U pour les raisons énoncées ci-dessus, provoquera une diminution de courant d'excitation i_v . En effet, suivant la loi d'Ohm, on obtient dans l'inducteur : $U = i_v. r_v \quad (15)$.

Si la résistance r_v de l'inducteur reste constante, il est évident que i_v va décroître quand U diminue. Cette décroissance de i_v a cependant pour conséquence une diminution du flux donc de la f.é.m induite E' et par suite également de U.

De cette diminution de U, en cas de courant de charge croissant, il résulte que pour une valeur de R devenant de plus en plus petite, le courant I ne croîtra pas indéfiniment, mais atteindra une valeur maximum (fig. 54.04) pour décroître ensuite en même temps que le courant d'excitation i_v et la tension U, lors de la diminution de la valeur de R.

Dans le cas extrême de court-circuit de la dynamo, R est égal à 0 ce qui signifie que l'inducteur est court-circuité et ne peut plus être parcouru par un courant. Comme aucun flux n'est plus produit, on devrait s'attendre à ce qu'aucune f.é.m ne soit engendrée dans l'induit. Toutefois, les pôles inducteurs conservent toujours un certain magnétisme rémanent engendrant dans l'induit une f.é.m qui fait passer un courant I_1 dans le circuit formé par l'induit et le court-circuit : ce courant de court-circuit se perdra entièrement dans l'enroulement d'induit comme perte par effet Joule.

Etant donné que le magnétisme rémanent ne produit qu'un faible flux, ce courant de court-circuit est également réduit, tel qu'il est d'ailleurs indiqué à la fig. 54.02.

La dynamo-shunt est donc une génératrice à courant continu qui peut être court-circuitée sans danger. Ce court-circuitage ne peut cependant être appliqué brusquement mais doit s'effectuer graduellement.

En effet, si nous devons court-circuiter brusquement la dynamo, le flux produit dans les noyaux des pôles n'aurait pas le temps de décroître de sorte que l'importante tension U produirait dans l'induit un courant exagéré et dangereux.

En conséquence, il est désirable de protéger également la dynamo-shunt par des fusibles.

La caractéristique de la dynamo-shunt présente donc la forme indiquée à la fig. 54.04. En pratique, uniquement la partie supérieure en est utilisée (partie AB). Dans cette partie, la tension aux bornes U reste passablement constante (la diminution de U entre charge nulle et pleine charge atteint 15 à 20 %); la dynamo-shunt présente donc approximativement la même caractéristique que la dynamo à excitation indépendante.

Pour maintenir la tension U parfaitement constante, on prévoit, tout comme pour la dynamo à excitation indépendante, une résistance de réglage r_r dans le circuit de l'inducteur en vue de pouvoir adapter l'excitation, et donc le flux, à la charge.

Dans ce qui précède, nous avons toujours supposé que la vitesse de la dynamo était constante, et que par conséquent, la tension E dépendait seulement du flux dans les inducteurs. Si l'on augmente ou diminue la vitesse n de la dynamo, comme pour la dynamo à excitation indépendante, la tension aux bornes va augmenter ou diminuer. Chaque modification de tension a cependant pour suite une modification proportionnelle du courant d'excitation qui, à son tour, va influencer la f.é.m E produite.

On peut en déduire que la tension d'une dynamo-shunt est plus influencée par les variations de vitesse que celle d'une dynamo à excitation indépendante.

55.01. La dynamo compound.

Ce type de dynamo est une combinaison d'une dynamo-série et d'une dynamo-shunt, c'est-à-dire que le type compound possède une excitation série et une excitation shunt (fig. 55.01) dans le but de réunir, dans une seule machine, les avantages des 2 types.

En effet, comme la caractéristique-série a une allure montante et la caractéristique shunt une allure descendante, il doit probablement être possible de combiner les deux caractéristiques de façon à obtenir une caractéristique plate. Suivant la connexion et la valeur des inducteurs série et shunt, on distingue plusieurs cas :

a) Les inducteurs série et shunt engendrent un flux de même sens.

Cependant que suivant la caractéristique shunt, le flux et donc aussi la tension baissent dans la mesure où le courant croît, le flux de l'excitation série augmente avec le courant d'excitation de sorte que ce dernier compense automatiquement la diminution de flux du champ shunt. De plus, l'excitation série peut être fixée de telle sorte qu'elle compense aussi bien la chute de tension dans l'induit que la réaction d'induit. Il en résulte que la dynamo peut fournir une tension U parfaitement constante, indépendante du courant (fig. 55.02 - courbe 1). Une telle machine est appelée dynamo-compound.

Si, toujours par champ dirigé de même sens, l'on renforce encore l'excitation série par rapport à l'enroulement shunt (en augmentant le nombre d'enroulements série), le champ série devient prédominant par rapport au champ shunt; il en résulte que la tension fournie s'élève dans la mesure où le courant débité augmente (courbe (2), figure 55.02).

Une telle machine est appelée une dynamo hypercompound.

b) Champ série et champ shunt sont de sens opposés.

Si, dans la figure 55.01, nous permutons les connexions de l'enroulement série, nous obtenons la disposition de la fig. 55.03, où le champ série et le champ shunt sont de sens contraires.

L'excitation série contrecarre l'excitation shunt et un flux, qui est la différence entre les flux shunt et série, traverse l'induit.

Si le courant I est très faible, le champ shunt prédomine de telle sorte qu'en cas de charge nulle ($I=0$) la machine débite une tension à vide qui est égale à celle de la dynamo-shunt. Quand la machine est en charge, le courant I croît et avec un courant débité en augmentation accroît la valeur du flux série tandis que le flux shunt diminue (par réaction d'induit). Le flux résultant à travers l'induit décroît donc rapidement, fait diminuer la f.é.m. induite et, par suite, également la tension U aux bornes.

Comme résultat, nous obtenons une caractéristique décroissant très rapidement comme représenté par la courbe 3 de la figure 55.02. On appelle une telle machine une dynamo hypocompound.

Conclusion : par la combinaison d'une excitation shunt et d'une excitation série, on peut, à volonté, influencer la caractéristique externe d'une génératrice à courant continu selon l'application désirée.

L'application de la dynamo compound ordinaire s'impose étant donné que le fait de pouvoir disposer d'une tension indépendante du courant est le but de toute fourniture d'électricité.

La dynamo hypercompound est utilisée pour l'alimentation d'une longue ligne où se produisent de fortes chutes de tension.

La tension de la dynamo hypercompound, qui croît avec l'augmentation de courant, compense les chutes de tension dans la ligne qui augmentent aussi avec le courant.

La génératrice hypo-compound est utilisée pour des applications spéciales, par exemple, sur les locomotives diesel-électriques pour transmettre aux roues, par voie électrique, la puissance mécanique du moteur diesel. Dans ce but, on désire que la génératrice fournisse une puissance constante vu que le moteur diesel travaille à puissance constante. Une puissance constante signifie que la caractéristique externe de la génératrice doit se développer de façon telle que $U I = \text{constante}$. Cette courbe est une ligne pointillée, représentée à la fig. 55.02.

Etant donné que la caractéristique de la dynamo hypocompound se rapproche le plus de la courbe recherchée $U I = \text{constante}$, elle est utilisée dans la transmission électrique des locomotives diesel.

55.02. La réaction d'induit.

Comme il le fut exposé précédemment, le courant d'induit engendre, quand la dynamo est connectée à un utilisateur extérieur, une force magnétomotrice qui se combine avec

celle de l'inducteur. Le flux de champ, et donc aussi la f.é.m., est ainsi affaibli.

Ce phénomène, appelé la réaction d'induit, peut être expliqué de la manière suivante : Si les balais se trouvent exactement sur la ligne neutre $b b$, le courant d'induit produit un flux qui est indiqué sur la fig. 55.04 (règle du tirebouchon). Le flux Φ est donc affaibli par le flux d'induit dans les parties 1 et renforcé dans les parties 2 des pôles. A première vue, on pourrait penser que le flux total reste inchangé et il en serait ainsi si les pôles ne se saturaient pas. Etant donné cependant que les pôles d'une dynamo se saturent toujours, le flux, dans les points 2, ne pourra plus augmenter tandis que, dans les points 1, il diminue. En conséquence, il y aura donc un affaiblissement du flux total et une diminution de la f.é.m. induite dans l'induit.

Pour éviter cette réaction d'induit, on prévoit souvent dans les têtes des pôles des enroulements compensatoires qui sont parcourus par le courant de l'induit dans le sens opportun pour créer un flux opposé à celui engendré par les conducteurs d'induit (fig. 55.04).

Le courant de l'induit produit dans l'induit même un flux Φ_d (appelé flux transversal) qui est dirigé perpendiculairement au flux de champ. Φ_d s'ajoute vectoriellement au flux de champ Φ pour réaliser un flux total Φ_t (fig. 55.04). Ce flux résultant est dirigé obliquement par rapport au flux de champ Φ de telle sorte que la ligne neutre, qui se trouve perpendiculairement au flux total Φ_t , s'est également déplacée et occupe la position $b'b'$ de la fig. 55.04.

Les balais doivent donc également être déplacés pour les ramener sur la nouvelle ligne neutre $b'b'$; il en découle la disposition de la fig. 55.05. En traçant une ligne imaginaire $b''b''$, symétrique par rapport à $b'b'$, on a divisé l'enroulement d'induit en 2 parties :

- les conducteurs d'induit contenus dans la partie ab et dc . Suite à l'inclinaison du balais, le courant ne peut ici engendrer aucun flux transversal Φ_d . Par contre, le flux Φ_1 transporté par ces conducteurs est dirigé dans le sens longitudinal de la dynamo et opposé au flux de champ Φ . L'induit n'est donc pas traversé par le flux de champ total mais, à cause de ce qu'on appelle la réaction d'induit, par un flux amoindri $\Phi - \Phi_1$. Cette diminution est très importante surtout quand la dynamo est peu saturée;
- les conducteurs d'induit contenus dans la partie ad et bc . Ici le courant engendre encore toujours comme représenté à la fig. 55.04 un flux transversal Φ_d qui, ajouté au flux de champ $\Phi - \Phi_1$, donne le flux total décalé Φ_t . La ligne des balais $b'b'$ se trouve verticalement sur Φ_t .

55.03. Moyens de compenser la réaction d'induit.

Comme nous l'avons dit plus haut, le renforcement asymétrique ou l'affaiblissement des inducteurs de champ sont annulés par des enroulements de compensation qui ne sont cependant utilisés que pour de grosses machines.

Le déplacement de la ligne neutre est évité en prévoyant des pôles de compensation qui annulent le flux transversal d'induit Φ_d . Ces pôles de compensation sont placés suivant la ligne neutre initiale $b b$ (fig. 55.06) et engendrent un flux Φ_h qui est égal mais opposé au flux transversal de l'induit Φ_d . Le bobinage des pôles de compensation est parcouru par le courant de l'induit d'où il découle que Φ_h et Φ_d croissent tous deux avec le courant d'induit et chacun compense donc toujours quelle que soit la charge de la dynamo.

Par cette compensation, Φ_d , et donc aussi Φ_1 , disparaissent de telle sorte qu'aucun décalage de balais n'est nécessaire.

55.04. Couple de forces antagoniste de la dynamo.

Pour faire tourner l'induit d'une dynamo, une petite force est nécessaire aussi longtemps que la dynamo ne fournit aucun courant. Cependant, quand l'induit transporte du courant, nous nous trouvons dans le cas d'un champ magnétique (celui des inducteurs de champ) avec densité de flux B , dans lequel se trouve un conducteur qui transporte un courant I et nous savons que ce champ magnétique exerce une force sur le conducteur transportant du courant, dirigée suivant la règle de la main gauche. En l'appliquant sur l'induit d'une dynamo, nous remarquons que cette force F est de sens contraire à la direction du mouvement n de la dynamo (fig. 55.07).

Cette force est directement proportionnelle au flux et au courant ($F = B \cdot l \cdot I$), de telle sorte qu'elle augmente avec la charge. Il en résulte que pour faire tourner une dynamo en charge, une puissance mécanique, proportionnelle à la charge électrique, est nécessaire.

55.05. Réversibilité des génératrices à courant continu = fonctionnement comme moteur.

Les dynamos et les moteurs à courant continu sont en principe construits de la même manière. Une dynamo peut donc fonctionner comme moteur quand nous appliquons une tension à ses bornes. Supposons, en effet, que la dynamo de la fig. 55.07 soit raccordée à une source de courant de telle façon que le courant dans l'induit ait la direction indiquée sur la figure et engendre un flux dans les inducteurs suivant la même direction indiquée; le flux de champ exerce sur les conducteurs d'induit une force F

suivant le sens indiqué sur la figure, et la machine commence à tourner comme moteur. Ce sens de rotation du moteur est dirigé contrairement au sens de rotation en tant que dynamo.

Inversement, un moteur peut être utilisé comme dynamo quand nous tournons l'induit dans le sens opportun et prenons certaines précautions pour les raccordements entre induit et inducteur.

55.06. Façon simplifiée pour retrouver le sens de rotation et le montage d'une machine à courant continu fonctionnant comme moteur ou comme dynamo.

Si nous considérons la fig. 55.07 nous remarquons que, en travaillant comme dynamo, le flux transversal de l'induit $\vec{\Phi}$ d avec son pôle nord est poussé vers le pôle nord du champ. Comme ce sont des pôles de même nom et qu'ils se repoussent l'un l'autre, une force est nécessaire pour vaincre cette répulsion. De cette manière, nous retrouvons l'expression "couple de forces antagonistes" de la dynamo.

Quand la machine travaille comme moteur, les courants et les flux sont engendrés par une source de courant étrangère. Le flux transversal de l'induit $\vec{\Phi}$ d essaie maintenant de se diriger suivant le flux de champ $\vec{\Phi}$, c'est-à-dire que le pôle sud de l'induit est attiré par le pôle nord de l'inducteur de champ et ce phénomène provoque la rotation de l'induit.

En résumé, l'induit peut être considéré comme un solénoïde qui est enroulé à droite et parcouru par un courant qui produit un flux dont le sens est donné par la règle du tirebouchon (fig. 55.08).

Le fonctionnement comme moteur se produit quand la machine est raccordée à une source de courant et que le sens de rotation est : induit-pôle sud vers champ-pôle nord (flèche m de la fig. 55.08).

Le fonctionnement comme dynamo se produit quand l'induit est orienté dans le sens : induit-pôle nord vers champ-pôle nord (flèche g de la fig. 55.08).

55.07. Applications.

a) Machine série à courant continu (fig. 55.08).

La machine passe automatiquement du fonctionnement comme moteur au fonctionnement comme génératrice quand le sens de rotation de l'induit est inversé. C'est, entre autre, le cas quand un véhicule de traction, dont l'inverseur se trouve sur une position de marche, est mis en mouvement dans le sens de marche opposé et le circuit fermé.

La machine série, si elle est déconnectée de la source de courant, ne fonctionnera pas comme génératrice lorsque l'induit est entraîné dans le même sens à moins que les connexions de l'induit ou de champ n'aient, en même temps, été interchangées (fig. 55.09).

b) Machine shunt à courant continu (fig. 55.10).

La fig. 55.10 représente une machine shunt qui charge, comme dynamo, une batterie d'accumulateurs.

Les sens de rotation du courant et de l'induit sont ceux de la figure. Pour charger les accumulateurs, la tension de la dynamo doit être plus élevée que celle des accumulateurs. Si, pour une raison quelconque, la tension de la dynamo devient inférieure à celle des accumulateurs, ceux-ci commenceront à alimenter la dynamo; le courant I se renverse et la machine est entraînée, comme moteur, par les accus. Le sens de rotation reste cependant le même car le flux de l'induit est renversé (fig. 55.11).

c) Freinage électrique.

La réversibilité des machines à courant continu est appliquée pour freiner électriquement les moteurs électriques. C'est le couple antagoniste du moteur travaillant comme dynamo qui occasionne le freinage. On peut absorber l'énergie électrique fournie dans des résistances de charge (freinage rhéostatique) ou bien la renvoyer au réseau (freinage à récupération). Dans ce dernier cas, une tension aux bornes constante est nécessaire de sorte que pour faire freiner un moteur série en récupération, celui-ci est commuté comme machine-shunt.

55.08. Montage des dynamos.

Les dynamos peuvent être couplées en série ou en parallèle selon qu'une tension élevée ou un courant important est désiré. Néanmoins, certaines conditions doivent être prises en considération. Prenons comme exemple, le montage en parallèle de dynamos-série. La fig. 55.12 représente les dynamos D 1 et D 2 montées en parallèle dont les induits sont mis en mouvement par le même axe. Si les deux machines sont identiques, elles fournissent la même tension et il ne se produit rien. Cependant, il existe toujours de petites différences qui feront que les 2 tensions ne seront pas exactement les mêmes. Supposons que la tension aux bornes de D 1 soit un peu plus élevée que celle de D 2; il circulera alors dans les spires de D 2 un courant i qui est fourni par D 1 (représenté par de petites flèches et ligne pointillée). Ce courant est antagoniste au courant I fourni par D 2 et occasionne donc l'excitation de D 2. Il en résulte que la tension de D 2 est encore plus petite ainsi que le courant I fourni par D 2.

Ce phénomène se continue de telle sorte que i devient plus grand que I ; le flux de champ ainsi que le flux de l'induit changent de polarité de telle sorte que la machine D 2 travaille encore bien comme dynamo mais se met en série avec D 1 par le renversement du sens de son courant. Toutefois, les 2 machines fournissent maintenant du courant sur un court-circuit d'où risques d'échauffement exagéré.

Application. Dans un véhicule de traction électrique et dans une locomotive diesel électrique, il y a souvent 2 moteurs couplés en parallèle. Quand un véhicule est remorqué dans une direction opposée à celle fixée par l'inverseur de marche, les moteurs travaillent comme dynamos-série. Quand celles-ci sont couplées en parallèle, le phénomène dont question ci-dessus peut se produire et faire brûler les moteurs. Il suffit, pour cela, d'une petite vitesse du véhicule par suite de la caractéristique série montante.

QUESTIONNAIRE.

- 53.02. - Qu'est-ce que la caractéristique magnétique d'une dynamo ?
- Comment est-elle déterminée ?
- Énoncez la formule donnant la valeur de la force électromotrice induite.
- À flux constant comment peut-on faire varier la tension ?
- 53.03. - Qu'est-ce que la caractéristique interne d'une dynamo ?
- Comment s'appelle le phénomène qui fait baisser la force électromotrice à mesure que I augmente ?
- 53.04. - Qu'est-ce que la caractéristique externe d'une dynamo ?
- Quelle est la méthode la plus utilisée pour obtenir une tension constante ?
- 54.01. - Quels types de dynamos à auto-excitation connaissez-vous ?
- Que fait-il pour rendre possible l'auto-excitation ?
- 54.02. - Comment est déterminée la courbe magnétique d'une dynamo série ?
- La dynamo série peut-elle être court-circuitée ?
- 54.03. - Quelle partie de la dynamo shunt est parcourue par le courant d'excitation et par le courant de consommation ?
- La dynamo shunt s'excite-t-elle à vide ?
- 55.01. - Qu'appelle-t-on (dynamo hypercompound ?
(dynamo hypocompound ?
- Citez une application de la dynamo hypercompound et hypocompound.
- 55.03. Que prévoit-on pour éviter la réaction d'induit ?
- 55.05. Comment faire pour utiliser un moteur comme dynamo ?

57e leçon.

Généralités sur le freinage électrique.

57.01 Les principes de fonctionnement du moteur à courant continu et en particulier du moteur série ont été expliqués dans des leçons précédentes.

Nous avons notamment rappelé que (fig. 57.01) si un conducteur situé dans un champ magnétique H est parcouru par un courant I , le conducteur sera soumis à une force f .

Le sens et la direction de la force f sont obtenus par la règle des 3 doigts de la main gauche (fig. 57.02) dans l'hypothèse où les 3 éléments:

Champ H : figuré par l'index
Courant I : figuré par le médium
Force f ou mouvement: figuré par le pouce,

sont perpendiculaires deux à deux.

Cela étant, si on considère (fig. 57.03) un moteur bi-polaire par exemple, dont le champ est orienté comme indiqué et qu'on envisage le conducteur "a" de l'induit, ce conducteur sera sollicité par la force f .

Un raisonnement semblable pouvant être fait avec chacun des conducteurs, on voit que finalement l'induit du moteur va tourner dans le sens indiqué par la flèche.

Dans le cas particulier du moteur série, on constate (fig. 57.04) que si, sans rien changer au moteur, on inverse la tension d'alimentation de l'ensemble: induit + inducteur, le sens de la force n'a pas changé.

Pour inverser le sens de la force, il faut inverser soit le sens du courant d'induit, soit le sens du champ.

Cela étant, si l'on considère un véhicule électrique animé d'une certaine vitesse pour exercer électriquement un effort de freinage, donc un effort s'exerçant en sens inverse de la vitesse acquise, il faut:

1. tout d'abord qu'il circule un courant dans ce moteur;
2. que le courant se soit inversé par rapport au fonctionnement en moteur, le flux ayant conservé son sens.

Les moteurs sont dès lors devenus des génératrices.

Tout en exploitant un principe commun à celui exposé ci-dessus, il y a deux méthodes différentes de freinage électrique:

2.

1. Freinage rhéostatique.

Dans ce cas, le moteur devenu génératrice débite du courant sur des résistances.

Cette méthode présente l'inconvénient de transformer l'énergie électrique obtenue aux dépens de la force vive du train en pure perte en chaleur dans des résistances.

Elle présente par contre l'avantage de permettre à tout instant le freinage électrique quelle que soit la charge de la ligne caténaire et même s'il n'y a pas de tension à la caténaire.

2. Freinage par récupération.

Dans ce cas, le moteur devenu génératrice débite du courant sur la ligne.

Cette méthode présente l'avantage de transformer l'énergie électrique obtenue aux dépens de la force vive du train, en énergie utile absorbée par d'autres trains travaillant en traction, d'où une économie sensible d'énergie.

Elle présente par contre, l'inconvénient de ne permettre le freinage électrique que s'il y a de la tension en ligne et si la charge de la ligne est suffisante.

En effet, avec nos sous-stations équipées de redresseurs, le courant ne peut s'inverser en sous-station et, en conséquence, le train récupérant ne peut renvoyer le courant à la centrale via la sous-station; il ne peut que le renvoyer aux trains circulant en traction dans son voisinage.

Le freinage électrique, rhéostatique et par récupération, permet d'éviter pour les voitures et wagons comme pour le véhicule moteur:

- les usures importantes des sabots de frein et des bandages de roue;
- les échauffements élevés des bandages de roues (avec toutes leurs conséquences) résultant de l'usage fréquent et prolongé du frein pneumatique sur les lignes accidentées;
- les incidents afférents à l'usage du frein pneumatique.

57.02. Freinage rhéostatique - Excitation.

Sur un véhicule comportant des moteurs de traction série, le schéma de freinage le plus simple correspond à l'utilisation de ces moteurs en génératrice série débitant sur une résistance R convenable comme indiqué à la fig.

57.05.

Ce mode d'excitation très utilisé en tramways en raison de sa simplicité, présente toutefois plusieurs inconvénients dont notamment le délai d'excitation. L'autoexcitation en génératrice série, quelle que soit la vitesse du train, soulève des difficultés qui peuvent être très réduites par l'injection temporaire, dans les inducteurs, d'un courant prélevé sur une batterie ou une source auxiliaire.

Mais puisqu'on doit pratiquement avoir recours à une source étrangère, pourquoi ne pas l'utiliser pendant toute la durée du freinage ? Pourquoi même ne pas chercher à lui donner une caractéristique spéciale qui libère de tout souci du côté appareillage ?

L'avantage commun à toutes les solutions à excitation séparée réside dans la suppression du délai d'amorçage inévitable avec l'autoexcitation. Chaque seconde perdue pour l'établissement de l'effort de freinage correspond à 120 km/h à un allongement du parcours de 33 m sans freinage.

Le schéma le plus simple (fig. 57.06) consiste à alimenter les inducteurs par une batterie ou une excitation fournissant un courant i , les induits débitant un courant I sur une résistance R .

57.03. Freinage rhéostatique - Propriétés.

Si dans le schéma figure 57.06, nous supposons que l'on maintient le courant i , donc le flux Φ constant et la résistance R constante, on peut dire que:

- La fem E est proportionnelle à la vitesse N .

En effet, on a $E = K N \Phi$

où K : constante de la machine

Φ : constant puisque i est constant.

- Le courant débité I est proportionnel à la vitesse N .

En effet, on a $I = \frac{E}{R}$

où R est constant,

dont I est proportionnel à E donc à N .

- L'effort de freinage est proportionnel à la vitesse N .

En effet, on a $C = K' I \Phi$

où K' : constante de la machine

Φ : constant

I : proportionnel à N .

4.

Donc, à excitation constante et à résistance constante, l'effort de freinage décroît avec la vitesse.

Pour maintenir l'effort de freinage à une valeur élevée lorsque la vitesse décroît, on peut:

- soit renforcer le courant d'excitation i tout en laissant R constant; on est limité par des considérations de saturation ou de puissance d'excitation;
 - soit réduire la résistance R et laisser l'excitation constante;
 - soit conjuguer les 2 méthodes précédentes.
-

58e leçon.

58.01. Freinage rhéostatique - Schéma de principe.

1. Méthode par variation d'excitation.

Cette méthode est utilisée dans les locomotives Diesel électrique CC type 203 (fig. 58.01).

Lors du freinage rhéostatique, les inducteurs des 6 moteurs sont connectés en série et alimentés par la génératrice principale: la source auxiliaire d'excitation existe donc déjà à bord de la locomotive.

Les induits sont couplés 2 par 2 en série et débitent sur des résistances égales et de valeur constante R.

On fait varier le flux des inducteurs en faisant varier l'excitation indépendante de la génératrice principale qui, pendant le freinage rhéostatique tourne à vitesse constante.

Sur ces locomotives le frein rhéostatique est conçu uniquement comme freinage de maintien en vue de retenir, de maintenir à vitesse constante les lourds trains de marchandises lors de la descente des longues pentes.

2. Méthode par variation de résistance.

La fig. 58.02 représente un diagramme de freinage réalisé suivant ce processus.

Comme pour l'effort de traction au démarrage, on voit que l'on parvient à maintenir l'effort de freinage sensiblement constant jusqu'à une certaine vitesse (de N_0 à N_1 sur la figure) en réduisant "par crans" la résistance R.

Mais comme on ne peut indéfiniment réduire R, à partir d'une certaine vitesse (N_1 sur la figure) l'effort diminue avec la vitesse.

Ainsi, quelle que soit la méthode employée, il apparaît que le frein rhéostatique est un mauvais frein d'arrêt, puisqu'à partir d'une certaine vitesse on ne peut plus agir ni sur le flux, ni sur la résistance et en conséquence l'effort de freinage décroît avec la vitesse et ce d'autant plus que la vitesse décroît.

Le freinage rhéostatique considéré comme freinage d'arrêt doit donc toujours, pour être satisfaisant, être combiné avec un freinage pneumatique sous peine de donner des distances d'arrêt considérables.

2. Dans ce cas, le freinage rhéostatique constitue en fait, un freinage de ralentissement, le freinage pneumatique lui apportant l'appoint nécessaire pour provoquer l'arrêt.

58.02 Effort de traction et de freinage.

Nous savons que l'effort de freinage du frein pneumatique est très grand.

Considérons un train de voyageurs de 520 t remorqué par une locomotive d'une masse de 80 t.

Si on veut obtenir une distance de freinage valable, il faut alors considérer une décélération de, par exemple, 1 m/s².

L'effort de freinage est donné par:

$$\begin{aligned} P &= m \times a \\ &= (520 + 80) \times 1 = 600 \text{ kN} \\ &= 60 \text{ 000 daN} \end{aligned}$$

Evaluons et soustrayons de ce résultat la valeur de la résistance au roulement

$$\text{à } 120 \text{ km/h } r = 10 \text{ daN/t}$$

$$R = 600 \times 10 = 6 \text{ 000 daN}$$

L'effort de freinage nécessaire atteint donc:

$$P' = 60 \text{ 000} - 6 \text{ 000} = 54 \text{ 000 daN}$$

Notre locomotive peut développer un effort de traction (et aussi de freinage) de 20 000 daN à une vitesse maximale de + 50 km/h.

Ceci pour 2 raisons:

- 1° la puissance est limitée;
- 2° la limite d'adhérence est dépassée.

La force de freinage devra donc également être limitée dans le but d'éviter une avarie aux moteurs de traction.

Nous constatons qu'un freinage électrique peut être utilisé uniquement pour freiner la masse propre de la locomotive.

Par ex.: 80 t à 120 km/h

$$\begin{aligned} P &= m \times a \\ &= 80 \text{ 000} \times 1 = 80 \text{ 000 kN} \\ &= 8 \text{ 000 daN} \end{aligned}$$

(duquel nous devons encore soustraire une résistance au roulement de + 800 daN).

- à 120 km/h, nous pouvons encore développer une telle puissance
Le puissance est donc

$$\begin{aligned} N &= \frac{80 \text{ 000} \times 120}{3,6} \text{ Nm/s ou joules} \\ &= 2660 \text{ kW} \end{aligned}$$

Cette force de freinage pourra aussi être utilisée, par exemple, pour maintenir le train à une vitesse réduite lors de la descente d'une longue pente.

Evaluons sur quelle pente notre train pourrait être maintenu à la vitesse d'équilibre de 120 km/h (résistance au roulement = 10 daN/t)

$$8 \text{ kN} = (520 + 20) (10 - i)$$

$$\text{d'où } i = 23 \text{ daN/t}$$

Cela correspond à une pente de 23 mm/m.

58.03 Conclusion.

Le frein rhéostatique en traction électrique est insuffisant pour assurer l'arrêt des trains sur les distances normales d'arrêt.

Son emploi est destiné à maintenir la vitesse des trains sur les pentes et pour obtenir de faibles décélé-rations.

Pour assurer l'arrêt, le frein rhéostatiques sera combinée avec le frein pneumatique.

58.04. Freinage par récupération - schéma.

Considérons un moteur série (fig. 5803) alimenté à la tension U ; sur la figure sont indiqués les sens de la fem E , du courant I , de la vitesse N et du couple moteur C .

Lors de la marche en récupération, les connexions réalisées seraient celles de la fig. 58.04: les connexions de l'inducteur ont été inversées pour que le champ H garde son sens malgré l'inversion du courant ce qui provoque l'inversion du couple qui devient ainsi un couple de freinage.

La fem E du moteur est maintenant devenue la fem E de la génératrice: c'est la différence $E-U$ entre la fem E de la génératrice et la tension U de la ligne caténaire qui va provoquer le courant récupéré.

58.05. Intérêt de la récupération.

Nous avons dit plus haut que la récupération possédait sur le freinage rhéostatique l'avantage de permettre une récupération d'énergie. Voyons quelle est l'ampleur de cette récupération d'énergie.

Appelons:

- P : le poids d'un train, locomotive comprise
- r : la résistance au roulement en palier
- i : la résistance due à la rampe
- F : l'effort de traction de la locomotive

A la montée, lorsque la locomotive maintient le train à l'équilibre sur la rampe, on a:

$$F = P (i + r)$$

Si cela se produit à une vitesse V , la puissance mécanique débitée par la locomotive est alors de

$$F = P (i + r) \times V$$

Appelons:

- W : puissance électrique nécessaire
 U : tension d'alimentation
 I : courant absorbé (pour la traction, auxiliaires non compris)
 η : rendement des moteurs de la locomotive

$$\text{On a } W = UI = \frac{P (i + r) \cdot V}{\eta}$$

A la descente de la même pente de déclivité i , la puissance mécanique récupérable, développée par la gravité du train vaut

$$P (i - r) \times V$$

Cette puissance mécanique convertie en énergie électrique W' par les génératrices de la locomotive vaut:

$$P (i - r) V \times \eta' = U' I' = W'$$

Raisonnons à titre documentaire sur un exemple numérique illustrant le cas de la ligne Bruxelles-Luxembourg:

$$i = 16 \text{ mm/m}$$

$$r = 3 \text{ N/kN}$$

$U' = 1,1 U$ (on pourrait montrer que pour bien récupérer, il faut développer une tension U' supérieure d'environ 10 % à la tension U de la ligne caténaire)

$\eta = \eta' = 0,90$ (les rendements sont sensiblement les mêmes en moteur et en génératrice).

Calculons les rapports des puissances électriques développées W à la montée du train et récupérée à la descente du même train sur la même pente.

On a:

$$\begin{aligned} \frac{W'}{W} &= \frac{U' I'}{UI} = \frac{P (16 - 3) V \times 0,9}{\frac{P (16 + 3) \cdot V}{0,9}} \\ &= \frac{13 \times 0,9 \times 0,9}{19} = 0,55 \end{aligned}$$

d'où $U' I' = 0,55 UI$.

En gros, on voit que deux trains de poids P chacun, descendant une pente de déclivité $i = 16 \text{ mm/m}$ peuvent récupérer suffisamment d'énergie que pour faire monter un train de même poids P à la même vitesse sur la même rampe, sans prélever d'énergie à la sous-station.

58.06. Instabilité de la génératrice série en récupération.

Si on appelle r la résistance totale de la machine, on peut écrire:

- fonctionnement en moteur

$$U = E + r I \quad (1)$$

La tension de la ligne caténaire U équilibre la fem des moteurs et la chute ohmique.

- fonctionnement en génératrice

$$E = r I = U \quad (2)$$

La fem des génératrices diminuée de la chute ohmique équilibre la tension de la ligne caténaire.

La formule (2) peut encore s'écrire:

$$E - U = r I$$

ou
$$I = \frac{E - U}{r}$$

au moment où la locomotive fonctionne en récupération $E > U$ et on renvoie le courant I sur la ligne.

Mais dans un réseau de traction, la tension U de la ligne caténaire subit de fréquentes variations pouvant atteindre quelques centaines de volts, c.à.d. des variations du même ordre de grandeur que celle de la différence $E - U$.

Il pourrait donc se faire que U augmente brusquement et devienne supérieur à E : $U > E$.

Le courant I va s'inverser (fig. 58.05) et la machine va rester génératrice (puisque I et H changent de sens) mais la fem va changer de sens (vu que le sens de rotation n'a pas changé et que le champ a changé de sens) et devient $-E'$.

Le nouveau courant qui prend naissance vaudra donc:

$$I' = \frac{-E' - U}{r}$$

Comme E' et U sont de même sens, I' sera énorme et les protections de machine vont entrer en jeu et séparer la machine de la ligne: le freinage est supprimé.

Pour faire du freinage de récupération dans des conditions convenables, il faut séparer les inducteurs de l'induit et les alimenter par une source séparée. De ce fait, le flux n'est pas influencé par les variations du courant débité et ne peut notamment s'inverser si le sens du courant dans l'induit change; le flux et par là, la fem de la génératrice est indépendante des variations du courant débité.

59.01. Schéma de récupération des locomotives série 23.

Nous venons de voir qu'il était désirable lors du fonctionnement en récupération de séparer l'induit des inducteurs et d'alimenter ces derniers par une source auxiliaire; cette source auxiliaire consiste sur les locomotives série 23 en un moteur alimenté à 3000 V entraînant une génératrice (encore appelée excitatrice).

Ce groupe moteur génératrice a reçu le nom de groupe de récupération.

Ainsi donc lors de la marche en récupération, les moteurs de traction qui fonctionnent normalement à excitation série (fig. 59.04 pour un moteur) sont transformés, par une modification convenable de leurs connexions, en génératrices à excitation indépendante (fig. 59.02): pour une génératrice.

La modification des connexions se fait, automatiquement, à vide, en portant simplement le manipulateur sur une position de marche "récupération".

L'enroulement indépendant de l'excitatrice est alimenté par la batterie au travers d'un rhéostat commandé par le conducteur; ce rhéostat permet de faire varier l'excitation de l'excitatrice et par là, la tension du moteur de traction fonctionnant en génératrice.

Lorsque la tension du moteur fonctionnant en génératrice est égale à la tension de la ligne, le contacteur CL se ferme automatiquement sous le contrôle d'un relais qu'on appelle relais d'accrochage: à ce moment, il n'y a pas de débit de courant vu que l'on a à faire à deux tensions égales et en opposition; si l'on excite davantage l'excitatrice, la tension du moteur fonctionnant en génératrice va devenir supérieure à la tension de la ligne et on va débiter un courant en sens inverse du courant de traction, donc un courant récupéré.

Ce courant va provoquer un effort de sens inverse de l'effort développé en traction donc un effort de freinage au lieu d'un effort moteur: la locomotive va retenir le train qui descend la pente.

Le raisonnement précédent a été fait avec un seul moteur: en réalité, la locomotive possède 4 moteurs (fig. 59.03).

Lors du fonctionnement en récupération, les inducteurs des 4 moteurs sont groupés en série et alimentés par l'excitatrice; les induits des moteurs sont groupés.

2.

- En série aux faibles vitesses: (35 à 70 km/h). A ce moment en effet, la vitesse du moteur est faible donc la force électromotrice du moteur fonctionnant en génératrice est également faible et on doit additionner les f.e.m. des 4 machines pour que la tension totale ait une valeur supérieure à celle de la ligne;
- En série parallèle aux vitesses élevées (70 à 130 km/h).

On remarquera alors qu'en traction on doit toujours utiliser successivement les couplages série et série parallèle, il y a lieu au moment de la mise en service de la récupération de choisir judicieusement le couplage à adopter en se basant sur la vitesse du train comme indiqué ci-dessus; le changement de couplage en récupération n'est possible qu'à vide: on doit chaque fois ramener le manipulateur à zéro pour faire le changement de couplage.

59.02. Dispositifs de stabilisation.

Afin d'éviter que les fluctuations normales de la tension de ligne ne provoquent de brusques variations du courant récupéré (et par suite, de l'effort exercé sur le train) que le conducteur serait dans l'impossibilité de corriger par la manoeuvre du rhéostat d'excitation de la génératrice, on utilise des dispositifs de régulation automatique, qui réduisent notablement les à-coups qui pourraient se produire.

a) Excitation anticompond de la génératrice.

L'excitation de l'excitatrice comporte non seulement un enroulement indépendant, mais également un 2^e enroulement: il s'agit d'un enroulement anticompond. Le flux développé par cet enroulement, dans lequel circule le courant récupéré (fig. 59.04) étant en opposition avec celui produit par l'autre enroulement de l'excitatrice, toute augmentation (par exemple) du courant récupéré entraîne une réduction du flux, donc de la f.e.m. de l'excitatrice. Il s'ensuit une réduction du courant circulant dans les inducteurs, donc du flux et par là une réduction de la f.e.m. des moteurs de traction travaillant en génératrice, donc finalement une diminution du courant récupéré.

b) Résistance tampon.

Une partie de la résistance de démarrage (environ 1,5 ohm) reste constamment en service pendant la marche en récupération; elle permet de limiter en amplitude les variations du courant récupéré.

59.03. Dispositifs de sécurité.

a) Neutralisation du frein.

Pendant le fonctionnement de la locomotive en récupération, les freins à air comprimé du train restent en état de marche et prêts à être utilisés en cas de besoin.

Pour empêcher toutefois qu'une application intempestive de ces freins pendant le fonctionnement en récupération ne produise un enrayage des essieux moteurs de la locomotive (donc un court-circuit entre ligne de contact et rail au travers des induits immobilisés), on a intercalé dans la tuyauterie d'alimentation de chaque cylindre de la locomotive, une électrovalve, appelée électrovalve de neutralisation qui, pendant le fonctionnement normal de la récupération, supprime toute arrivée d'air au cylindre de frein et met celui-ci à l'atmosphère.

b) Raté de récupération.

Afin de prévenir tout risque d'emballement du train sur les fortes déclivités dans le cas où, pour une cause quelconque, le freinage par récupération cesserait de fonctionner, on a installé sur les locomotives un dispositif désigné sous le nom de dispositif de raté de récupération et destiné à provoquer automatiquement le serrage des freins du train.

Un relais spécial dénommé relais de raté de récupération est prévu à cet effet.

Le relais de raté de récupération est actionné:

- en cas de surtension aux bornes des moteurs décelée par un "relais de surtension" (réglé à environ 3800 volts);
- en cas d'inversion du courant dans les moteurs décelée par un "relais de retour de courant".

L'enclenchement du relais de raté de récupération provoque:

- L'ouverture du contacteur CL de manière à séparer les moteurs de traction de la ligne;
- La suppression du courant d'excitation des inducteurs de moteurs de traction afin d'éviter l'apparition à leurs bornes, à circuit ouvert, de toute tension dangereuse (coupure de l'excitation indépendante de l'excitatrice);
- La fermeture d'une électrovalve appelée électrovalve d'arrêt d'alimentation qui supprime l'alimentation en

air comprimé de la conduite générale du frein automatique par le robinet de mécanicien;

- L'ouverture de l'électrovalve de neutralisation, rétablissant alors l'alimentation en air des cylindres de frein pour permettre le freinage;
- = L'ouverture d'une électrovalve appelée électrovalve de freinage branchée sur la conduite générale du frein automatique ce qui provoque une dépression dans celle-ci et par suite le serrage effectif des freins de l'ensemble du train (locomotive comprise).

L'orifice d'échappement de l'électrovalve de freinage est muni d'un sifflet afin que le conducteur soit immédiatement prévenu de la substitution du freinage pneumatique au freinage électrique, qui vient de se produire.

Pour reprendre en main la locomotive après un raté de récupération, il suffit de ramener le volant du manipulateur à zéro.

Remarque: A la boîte Faiveley, il existe un interrupteur de commande repéré "Récupération". Il sert à neutraliser momentanément l'action du relais retour de courant afin de franchir un palier situé entre deux pentes et sans manoeuvrer le manipulateur.

Comme la vitesse du train diminue les "dynamos" sont transformées en moteurs à excitation indépendante donc l'intensité de traction doit être limitée obligatoirement.

QUESTIONNAIRE.

- 57.01. Quelles sont les conditions pour transformer un moteur série en génératrice ?
- 57.01. Quelle est la différence entre le freinage rhéostatique et le freinage par récupération ?
- 57.01. Quels sont les avantages et inconvénients du
a) freinage rhéostatique ?
b) freinage par récupération ?
- 58.01. Quels sont les procédés qui pourraient être utilisés pour maintenir l'effort de freinage lorsque la vitesse diminue ?
- 58.06. Comment doit être couplé un moteur de traction pour faire du freinage par récupération ?
- 59.01. De quoi se compose un "groupe de récupération" d'une locomotive de la série 23 ?
- 59.01. Lors du fonctionnement en récupération, comment sont accouplés les moteurs de traction fonctionnant comme génératrice ?
- 59.02. Quel est le but des dispositifs de stabilisation ?
- 59.03. Pourquoi le frein de la locomotive est-il neutralisé lors du freinage par récupération ?
- 59.03. Quand fonctionne le relais de raté de récupération ?

THEORIE DU COURANT ALTERNATIF.

Considérant que pour l'électrification des lignes de la S.N.C.B. on applique exclusivement le système à tension continue sous 3000 V, il est possible que la connaissance de la théorie du courant alternatif semble accessoire ou secondaire. Cependant, cette connaissance s'impose pour l'étude de l'équipement des locomotives polytensions qui sont appelées à fonctionner en courant alternatif. En outre, elle nous permettra de mieux comprendre certains phénomènes quand on discutera le fonctionnement du dispositif de traction des automotrices à thyristors.

61.01 - Courant continu et courant alternatif.

1 - Un courant continu est un courant dont le sens et la grandeur ou la valeur restent constants dans le temps. Dans un diagramme "temps-courant", il est représenté par une ligne droite parallèle à l'axe du temps (fig. 61.01 a).

Un courant continu peut être produit par une source à tension continue, cela veut dire une source de tension dont la tension aux bornes conserve la même polarité ainsi que la même grandeur (la borne positive reste la borne positive et la borne négative reste la borne négative).

2 - Par contre dans un diagramme "temps-courant" un courant alternatif est un courant représenté par une sinusoïde. Le sens et la grandeur d'un courant alternatif varient continuellement et d'une façon périodique, ce qui signifie qu'un courant alternatif est composé d'une succession de cycles égaux (fig. 61.01 b).

Si par exemple, la branche AB (fig. 61.02) est parcourue par le courant alternatif de la fig. 61.01 b, on peut décrire la séquence comme suit :

- a) au moment où $t = 0$, le courant dans la branche est zéro, ensuite il commence à circuler dans le sens de A vers B
- d'abord l'intensité croît très vite, ensuite de plus en plus lentement et atteint sa valeur maximum au moment où $t = T/4$.
 - à partir du moment où $t = T/4$ le courant de A vers B va en diminuant, d'abord lentement puis de plus en plus vite et devient de nouveau 0 au moment $t = T/2$.
- b) le courant dans la branche AB est redevenu zéro au moment où $t = T/2$; à partir de ce moment, il recommence à circuler mais de B vers A.
- d'abord l'intensité de B vers A croît rapidement, ensuite de plus en plus lentement pour atteindre sa valeur maximum au moment où $t = 3 T/4$

- à partir du moment où $t = 3 T/4$ le courant de B vers A va en décroissant, d'abord lentement, puis de plus en plus vite et redevient zéro au moment où $t = T$.

c) à ce moment, nous sommes à nouveau arrivés à la situation initiale. On dit qu'on a parcouru un cycle au complet. Ce cycle est suivi par un nouveau cycle identique au premier, etc., etc.

D'une façon analogue, nous pouvons déterminer une source de tension alternative comme une source de tension dont la polarité ainsi que la valeur varie continuellement et cela d'après une sinusoïde comme décrit plus haut. Une source de tension alternative est représentée comme l'indique la fig. 61.03.

Si nous raccordons une résistance ohmique pure aux bornes d'une source de tension alternative alors nous obtenons un courant alternatif dont la valeur est donnée par la loi d'Ohm. Les deux valeurs sont représentées à la fig. 61.04

$$i = \frac{e}{R}$$

Convention.

Dans l'exposé suivant, nous représenterons les valeurs *instantanées* par des minuscules et les valeurs *efficaces* (à déterminer plus tard) par des majuscules.

La formule $i = \frac{e}{R}$ détermine le rapport fixe entre la tension à un moment bien précis et le courant à ce même moment.

Définitions.

1 - Période d'un courant alternatif (ou d'une tension).

La durée d'un cycle du courant alternatif de la fig. 61.01 b comprend T secondes. Cette durée porte le nom de "période" du courant alternatif.

En général, on représente la période par le symbole T .

2 - La fréquence d'un courant alternatif (ou d'une tension).

Le nombre de cycles qu'un courant alternatif parcourt par seconde s'appelle la fréquence (symbole f).

La fréquence est liée à la période par le rapport

$$f = \frac{1}{T}$$

La fig. 61.05 représente deux courants alternatifs i_1 et i_2 , le premier (fig. 61.05 a) à haute fréquence (période courte), l'autre (fig. 61.05 b) à basse fréquence (période longue).

L'unité de fréquence porte le nom de "cycle seconde" communément appelé "Herz".

3 - Valeur maximum (appelée aussi "amplitude").

Le courant alternatif de la fig. 41 b atteignait sa plus grande valeur au moment où $t = T/4$ pour un sens et au moment où $t = 3 T/4$ pour l'autre sens; Ces valeurs maxima (qui sont d'ailleurs numériquement égales dans les deux sens) s'élèvent à I_{\max} . Cette valeur I_{\max} est la valeur au sommet (ou valeur maximum ou amplitude) du courant alternatif.

Convention : Nous représenterons la valeur maximum par une majuscule suivi de l'indice "max", p. ex. I_{\max} , E_{\max} .

Une grandeur alternative (soit un courant, soit une tension) peut être déterminée en indiquant sa fréquence (ou période, ce qui revient au même) ainsi que son amplitude.

Cependant, il n'est pas pratique de donner l'amplitude; au lieu de celle-ci, on donnera la valeur efficace d'une grandeur alternative.

4 - Valeur efficace

Par définition, on évalue la valeur efficace d'un courant alternatif à la valeur d'un courant continu qui en circulant dans une certaine résistance dégagerait le même "Effet Joule" (quantité de chaleur) que le courant alternatif en question.

On peut démontrer que :

$$I \text{ (valeur efficace) } = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{\max}.$$

D'une manière analogue, la valeur effective d'une tension alternative trouve son expression par :

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 E_{\max}.$$

Afin de définir une tension alternative, on parlera par exemple d'une tension alternative 220 V 50 Hz (voir fig. 41b)

- (220 V égale la valeur effective
- (50 Hz représente la fréquence

5 - Valeur moyenne

L'emploi de la valeur moyenne est utile pour l'étude du redressement des courants alternatifs.

Si nous prenions en considération la valeur moyenne d'un courant alternatif pour la durée d'une période complète T , nous constaterions que l'alternance positive compense-rait l'alternance négative. La valeur moyenne pour une période complète T est toujours 0 pour un courant alternatif sinusoïdal.

C'est la raison pour laquelle, on détermine toujours la valeur moyenne pour une demi-période (par ex. de 0 à $T/2$).

On peut démontrer que la valeur moyenne $I_{\text{moy.}}$ est égale à :

$$I_{\text{moy.}} = \frac{2}{\pi} I_{\text{max.}} = 0,636 I_{\text{max.}}$$

Cette valeur moyenne est aussi égale à la hauteur du rectangle OABC, ayant $T/2$ comme base et dont la surface est égale à celle de la demi-onde ODC (fig. 61.06).

61.03 Déphasage entre deux grandeurs en courant alternatif :

En courant alternatif, on parlera seulement d'un déphasage ou d'un décalage entre deux grandeurs pour autant qu'elles aient la même fréquence.

Prenons, comme exemple, deux courants alternatifs i_1 et i_2 ayant la même fréquence f (fig. 61.07). Nous supposons que leurs amplitudes diffèrent par. ex. $I_{\text{max } 1}$ et $I_{\text{max } 2}$ (cela n'a d'ailleurs pas d'importance pour bien comprendre la notion "déphasage"). Les deux ondes ont la même fréquence et par conséquent une même période. Tout ceci ne signifie pas encore que leurs points "zéro" correspondants coïncident dans le temps.

-(Par points "zéro" correspondants, on doit comprendre le passage des courants à leur valeur zéro, valeur qui est située sur le même flanc de l'onde, soit en croissant, soit en décroissant).

Plusieurs cas peuvent se présenter.

- 1 - Il n'y a pas de déphasage au cas où les points "zéro" correspondants coïncident (fig. 61.08 a). On dit que le déphasage est de 0 seconde, ou que les deux ondes sont "en phase".
- 2 - Si les points "zéro" correspondants se suivent à un intervalle de temps d'une demi-période (fig. 61.08 b), nous disons que les deux ondes sont en opposition. Leur déphasage est égal à une demi-période $T/2$.
- 3- i_1 est en avance sur i_2 , quand les points "zéro" de i_1 tombent avant les points "zéro" correspondants de i_2 (fig. 61.08 c). On dit qu'il y a un déphasage de x secondes entre i_1 et i_2 de façon que i_1 avance de x secondes sur i_2

- 4 - i_1 est en retard sur i_2 , quand les points "zéro" de i_1 tombent après les points "zéro" correspondants de i_2 (fig. 61.08 d). On dit qu'il y a un déphasage de x secondes entre i_1 et i_2 de façon que i_1 retarde de x secondes sur i_2 .

Remarques importantes :

- a - Le déphasage entre deux grandeurs en courant alternatif n'est généralement pas exprimé en secondes; de ce fait, on ne parlera pas d'un déphasage de x secondes. Pratiquement, le déphasage s'exprime en fraction de la période T .

Par exemple, le déphasage du cas 2 est égal à une demi-période $T/2$.

Pour les exemples 3 et 4, on parlera d'un déphasage de $T/4$, etc...

Considérant que, pour des grandeurs en courant alternatif, on détermine toujours la fréquence, le déphasage exprimé en secondes fixe clairement la situation.

- b - De plus, on peut exprimer le déphasage en un certain nombre de degrés ou de radians (unités de vitesse angulaire). La façon d'établir le rapport entre les unités de temps et de vitesse angulaire n'est pas expliqué présentement.

Il suffit de retenir que la période T , quelle que soit sa grandeur, est égale à 360° ou 2π radians.

Dans ces conditions, un laps de temps $T/2$ sera égal à un angle de 180° ou π rad, un temps de $T/8$ égalera un angle de 45° ou $\frac{\pi}{4}$ rad, etc....

Par conséquent, on parle d'un angle de déphasage φ (en degré ou en rad.).

- c - Envisageons maintenant le fig. 61.08 d, on peut dire aussi bien que i_1 retarde de $T/4$ sur i_2 ^{que} i_2 avance de $3 T/4$ sur i_1 . En effet, on peut comparer le point zéro de i_1 avec le point zéro correspondant de i_2 pouvant être situé avant ou derrière le point envisagé de i_1 .

Pratiquement, on fera toujours la comparaison avec le point zéro correspondant le plus proche, ainsi le déphasage sera toujours inférieur à $T/2$ (ou à 180° ou à π rad.).

SELF-INDUCTION.62.01. La notion "self-induction" - Self-induction en courant continu.

Envisageons sur la fig. 62.01 une bobine AB qui possède une résistance ohmique R. En fermant la clef ou l'interrupteur S, on applique une tension continue E à ses bornes. En fermant l'interrupteur, on constate que le courant n'atteindra pas immédiatement la valeur $I = \frac{E}{R}$ (loi d'Ohm). Il augmentera progressivement pour atteindre finalement cette valeur, en d'autres mots, il y a un phénomène transitoire.

Ceci peut s'expliquer de la manière suivante. Dès que le courant commence à circuler, un champ magnétique s'établit et cela aussi bien à l'intérieur de la bobine qu'au-tour d'elle. Par conséquent, il y a une variation du flux magnétique étant donné qu'avant la fermeture de S, il n'y avait pas de flux. Cette variation du flux induit une force contre-électromotrice dans les spires de la bobine.; La valeur de cette f.c.e.m. dépend de la vitesse avec laquelle le flux change de valeur, c.à.d. du rapport $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

Dans cette expression, $\Delta \Phi$ représente la variation du flux dans l'intervalle du temps Δt .

En valeur absolue, cette tension vaut:

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (\text{volts par spire})$$

Disons maintenant que la bobine comprend un nombre N de spires, alors la f.e.m. de self-induction devient:

$$e = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Cette tension est toujours orientée de façon à entraver la variation du courant. Au moment de la fermeture de l'interrupteur S, nous constatons que le courant a une tendance à croître. Le sens de la f.c.e.m. dans la bobine est tel que, si elle se trouvait seule dans le circuit, elle y ferait circuler un courant dans le sens opposé.

L'accroissement du courant est donc freiné par la self-induction. De ce fait, le courant n'atteindra pas immédiatement sa valeur normale $\left(\frac{E}{R}\right)$ comme ce serait le cas dans une résistance ohmique pure. Il augmentera progres-

2.

sivement conformément à la courbe de la fig. 620 2 jusqu'à ce qu'il atteigne cette valeur.

Quand le courant aura atteint la valeur $I = \frac{E}{R}$, il restera inchangé et la bobine se comportera comme une résistance ohmique R . Si nous ouvrons maintenant l'interrupteur S , nous constatons que le champ magnétique a une tendance à disparaître en même temps que le courant. Cette disparition engendre de nouveau une variation du flux de façon à induire une nouvelle fois une f.e.m. dans les spires de la bobine, mais de sens contraire.

En conformité avec le principe cité plus haut, il est évident que la f.c.e.m. essayera de contraindre la variation du courant qui est ici en décroissance. Si la f.c.e.m. se trouvait seule dans le circuit, elle provoquerait un courant qui circulerait dans le même sens que celui qui vient de disparaître. Elle essaye donc d'entretenir le courant. Le courant continuera à circuler pendant un laps de temps très court, mais diminuera très vite jusqu'à zéro (fig. 620 3).

Ce phénomène est la cause de l'apparition d'étincelles à l'ouverture des interrupteurs ou de sectionneurs incorporés dans des circuits inductifs, c.à.d. ceux qui comprennent beaucoup de bobines. Il faut donc équiper les contacteurs d'un dispositif pour éteindre l'arc à leur ouverture (bobine de soufflage, cornes, air comprimé, etc....).

Nous récapitulons: La f.c.e.m. de self-induction se manifeste à chaque variation du courant (et par conséquent aussi du champ magnétique) et essaye de retarder cette variation.

- Pour une augmentation du courant, celle-ci sera freinée par la f.e.m. de self-induction;
- Pour une diminution, elle tentera d'entretenir le courant.

62.02. Coefficient de self-induction.

Plus haut nous avons vu que la f.e.m. induite dans une bobine qui comprend N spires est exprimée par:

$$e = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Cependant, en général on exprime la f.e.m. de self-induction en fonction de la variation du courant, ce qui donne:

$$e = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

L représente le "coefficient de self-induction" dont l'unité est le "Henry".

Le coefficient L comprend l'influence du nombre de spires N et aussi de la reluctance (résistance magnétique) du circuit magnétique. Ainsi est-il évident qu'une bobine comprenant beaucoup de spires et munie d'un noyau en fer doux possèdera un coefficient de self-induction L fort élevé.

62.03. Self-induction en courant alternatif.

Remplaçons dans la fig. 62.01 la source de tension continue par une source de tension alternative avec fréquence f. Nous voyons qu'avec une tension continue, la self-induction jouait uniquement un rôle à la fermeture et à l'ouverture du circuit. Pour une tension alternative, nous savons que la valeur de la tension varie continuellement.

Par exemple, si la fréquence f est égale à 50 Hz, la tension oscillera 100 fois par seconde entre sa valeur minimum et sa valeur maximum; ce phénomène de self-induction se manifesterait donc 100 fois par seconde. Il est évident qu'en nous basant sur la loi de Lenz, la self-induction entravera continuellement la variation du courant.

En fait, on freine le courant parcourant la bobine et son amplitude sera moins élevée que dans le cas d'une résistance ohmique pure. L'amplitude sera d'autant plus petite que le coefficient de self-induction L et la fréquence f sont plus élevés. En effet, quand la fréquence d'un courant alternatif augmente, il en résulte que la croissance du courant Δi (ou du flux magnétique $\Delta \Phi$) doit s'effectuer dans un laps de temps Δt plus court. Ainsi la f.e.m. induite (force freinant) dans la bobine $e = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$ sera aussi beaucoup plus grande.

On peut démontrer que pour une tension appliquée de forme sinusoïdale (fréquence f, valeur effective E) on obtient un courant également de forme sinusoïdale ayant la même fréquence f et une valeur effective

$$I = \frac{1}{2\pi fL} \cdot E.$$

Pour une résistance ohmique pure, on aurait trouvé:

$$I = \frac{1}{R} \cdot E.$$

C'est pour cette raison que l'on donne à la grandeur $X = 2\pi fL$, le nom de la résistance apparente ou réactance de la bobine.

Comme une résistance ohmique, elle est exprimée en Ω

La réactance d'une bobine est d'autant plus grande, que son coefficient de self-induction ainsi que la fréquence de la tension appliquée sont plus élevés. Pour un courant continu en particulier, $f = 0$ et $X = 0$. Un courant continu ne ressent pas la résistance due à la self-induction.

62.04. Déphasage dû à la self-induction.

Quand on branche un circuit sur une source de tension continue, nous avons vu plus haut qu'il s'écoulera toujours un certain temps avant que le courant atteigne sa valeur normale (fig. 62.02). Ce temps d'un ordre de grandeur de micro ou de millisecondes, dépend du coefficient de self-induction du circuit.

Quand on branche un circuit inductif (par ex. une bobine) sur une source de tension alternative, nous obtenons, aux bornes de ce circuit, une tension qui dans le temps varie d'après une sinusoïde (fig. 62.04). Le courant qui circulera dans le circuit sera un courant alternatif ayant la même fréquence f . Cependant, au moment où la tension atteint sa valeur maximum (p. e. 100 V) le courant n'est pas encore arrivé à son maximum (10 A) un peu plus tard. De la même façon et toujours sous l'influence de la self-induction, nous remarquons quand la tension est arrivée à sa valeur 0, le courant n'y est pas encore et qu'elle atteint seulement cette valeur un peu plus tard.

Nous constatons qu'il y a un décalage entre l'onde de la tension et celle du courant. Pour le cas de la fig. 62.04, ce décalage est d'environ un $1/8$ e d'une période (45° ou $\frac{\pi}{4}$ radiant). De plus, nous constatons que les passages par le point zéro de l'onde du courant suit aux passages par le point zéro correspondant de l'onde de la tension.

Le courant retarde sur la tension.

La self-induction provoque donc un retardement du courant sur la tension.

Au cas où la charge dans le circuit est formée par une self-induction pure (sans résistance ohmique), le déphasage ou décalage du courant est de 90° ou $\frac{\pi}{2}$ radiant.

Si au contraire, il y a une résistance ohmique non négligeable, le déphasage sera d'autant plus faible que la résistance ohmique (R) est plus importante comparativement à la résistance apparente de la self-induction ($X = 2 \pi fL$).

Par exemple celui-ci n'aura que 7,5 A et atteindra seulement la valeur maximum

62.05. Récapitulation.

1. Dans chaque circuit électrique on trouve une self-induction dans une mesure plus ou moins grande. La self-induction sera plus grande à mesure que le circuit contient plus de bobines et, en particulier, quand ces bobines sont formées de beaucoup de spires et qu'elles sont munies d'un noyau en fer. La self-induction d'un circuit est déterminée par son coefficient de self-induction L qui est exprimé en "Henry".

2. Par self-induction d'un circuit, on comprend la particularité qui essaye de s'opposer aux variations du courant. Un courant naissant est freiné, tandis qu'un courant qui disparaît est maintenu pendant un certain temps. La cause de cette particularité se trouve dans la soit-disante "f.e.m. de self-induction" qui naît dans les spires d'une bobine et qui a une polarité telle qu'elle veut toujours empêcher les variations du courant

$$e = L. \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

3. En courant alternatif en particulier, le courant sera limité par la self-induction (son amplitude ou sa valeur efficace sera inférieure à celle d'un circuit comprenant une résistance ohmique de même valeur mais sans self-induction). De plus, on obtiendra un décalage entre les ondes du courant et la tension. Un courant alternatif rencontre donc une plus grande résistance.

La résistance apparente $X = 2\pi f.L$ porte le nom de réactance.

CAPACITE.

63.01. Les notions "condensateur" et "capacité".

- En principe, un condensateur se compose de deux surfaces conductrices, séparées par une matière isolante. Chacune des deux surfaces forme une des bornes du condensateur (fig. 63.01).
- En raccordant les deux bornes d'un condensateur avec une source de tension continue (tension égale à E) (fig. 63.02), on constate qu'un certain nombre d'électrons quitteront l'armature ou plaque qui est raccordée à la borne positive (+) et qu'un nombre égal d'électrons s'écouleront vers l'armature en communication avec la borne négative (-). Ce mouvement des électrons cesse dès que la différence de potentiel entre les deux armatures est égale à E. Sur chaque armature s'établit donc une charge, de grandeur égale, mais de signe contraire.

Les armatures conservent leur charge après déconnection du condensateur de la source de tension.

- La charge emmagasinée sur chacune des armatures (Q Coulomb) est proportionnelle à la tension (E Volts) appliquée entre les armatures.

En d'autres mots, le rapport

$$C = \frac{Q}{E}$$

est une constante et porte le nom de capacité du condensateur. La capacité est exprimée en Farad
(1 mF = 10^{-3} F; 1 μ F = 10^{-6} F; 1 pF (picofarad) = 10^{-12} F).

63.02. Fonctionnement d'un condensateur en courant continu (fig. 63.03 et 63.04).

Après la fermeture de l'interrupteur S, T restant ouvert, nous raccordons les bornes d'un condensateur (de capacité C) à une source de courant continu (de tension E), nous remarquons que l'aiguille de l'ampèremètre A dévie légèrement; une certaine quantité d'électricité de Q Coulomb a été emmagasinée dans le condensateur. La déviation de l'ampèremètre a été provoquée par le courant de charge du condensateur (circulant du pôle positif de la batterie à l'armature a et de l'armature b au pôle négatif).

Le diagramme de la fig. 63.04 montre l'évolution de la tension e aux bornes du condensateur en fonction du temps; Nous constatons, qu'au début de la charge, cette tension augmente très vite, puis de plus en plus lentement jusqu'à la valeur finale, celle-ci est égale à la tension E de la source. En ce qui concerne le courant de charge, au début, il est grand (limité uniquement par la résistance du circuit),

2.

puis il diminue rapidement selon l'augmentation de la tension aux bornes du condensateur (fig. 63.04). Au bout d'une fraction de seconde, le courant de charge devient 0. On dit que le condensateur est chargé.

En ouvrant maintenant l'interrupteur S, il ne se passera rien. Le condensateur reste chargé à la tension E. Si l'on ferme l'interrupteur T, pendant que S reste ouvert, nous constatons que l'ampèremètre A dévie légèrement, mais dans le sens opposé. Le courant observé est le courant de décharge i' du condensateur, il circule de l'armature a à l'armature b en passant par l'interrupteur T. Les variations du courant de décharge sont représentées à la fig. 63.04. Ici aussi, c'est uniquement la résistance du circuit qui limite la valeur maximum du courant.

La tension e' descend rapidement de E vers 0 pendant la décharge.

63.03. Fonctionnement d'un condensateur en courant alternatif.

Raccordons maintenant un condensateur de capacité C à une source de tension alternative (valeur efficace de la tension égale à E et la fréquence à f) (fig. 63.05). L'évolution de la tension est représentée par un trait plein sur la fig. 63.06.

Nous nous proposons de déterminer l'évolution du courant.

Admettons que la tension est positive quand la borne A est positive, alors la borne B est négative. En outre, nous appelons le courant dans le condensateur positif quand il ~~circule~~ de A vers B. D'après la fig. 63.05, la tension est positive pendant la première demi-période. Commençons nos observations au moment où la tension est au maximum (c.-à-d. quand $t = \frac{T}{4}$). A ce moment là, le courant de charge est égal à 0 (point 1 de la fig. 63.06) car le condensateur est chargé au maximum de sa tension. A partir de ce moment, la tension de la source diminue et puisque la tension du condensateur suit celle-ci, il se décharge à travers la source. Il se crée un courant de décharge dans la branche du condensateur, qui coule de B vers A, donc dans le sens négatif. Ce courant atteindra sa valeur maximum (négative) quand la tension de la source est devenue 0. (point 2 de la fig. 63.06). Ensuite la tension de la source augmente dans le sens négatif : la borne B devient positive tandis que A devient négative et la différence de potentiel grandit jusqu'à sa valeur maximum (négative). A ce moment, le courant de charge (circulant en sens négatif, de B vers A) est redevenu 0 (point 3 de la fig. 63.06). Puis la tension décroît à nouveau de sa valeur maximum négative à zéro et le condensateur se décharge à nouveau avec un courant de décharge dont le sens est de A vers B. Ce courant redevient maximum au moment où la tension disparaît (point 4 de la figure 63.06).

Nous pouvons continuer ainsi et nous voyons que l'évolution du courant se déroule d'après une sinusoïde dont les maxima coïncident avec le passage de la tension par ses points zéro.

Il y a donc un déphasage de $1/4$ de période entre le courant et la tension, l'on peut dire que le courant avance de $1/4$ de période. Si dans le circuit étaient insérées des résistances, l'avance de phases serait inférieure à 90° . Le déphasage est déterminé par le rapport mutuel des valeurs R et C et de la fréquence f de la tension appliquée.

63.04. Résistance apparente d'un condensateur.

Tandis qu'en courant continu un condensateur absorbe seulement du courant pendant une fraction de seconde en fermant ou en ouvrant le circuit; en courant alternatif, il se charge et se décharge f fois par seconde. Si on incorpore, à un endroit quelconque, un ampèremètre dans le circuit d'un condensateur (fig. 63.07), il indiquera un courant alternatif d'une fréquence f . Ce courant alternatif n'est autre que l'oscillation des mouvements de charge, qui charge et décharge alternativement le condensateur.

Remarque importante.

Bien qu'il n'y ait évidemment pas de transport matériel des charges électriques à travers le diélectrique d'un condensateur, on mesurera cependant un courant alternatif à un point quelconque du circuit en y intercallant un ampèremètre. Eventuellement, on peut employer ce courant pour alimenter un moteur à courant alternatif ou pour faire fonctionner un transformateur ou encore un autre appareil à courant alternatif. Le tout se passe comme si le courant alternatif traversait le condensateur. C'est pour cette raison que l'on dit généralement, qu'un condensateur conduit le courant alternatif.

La présence d'un condensateur dans un circuit présente une certaine résistance au passage d'un courant alternatif. La valeur effective du courant I est liée à la valeur effective de la tension par le rapport :

$$I = \frac{E}{X}$$

(comme le rapport $I = \frac{E}{R}$ existe entre le courant et la tension pour une résistance ohmique pure R).

Nous appelons X la "résistance apparente" ou "capacité" du condensateur. On peut démontrer que

$$X = \frac{1}{2 \pi f C}.$$

(f = fréquence de la tension appliquée
(C = capacité du condensateur.

4.

Le rapport entre le courant et la tension devient alors

$$I = (2 \pi f C) E.$$

Le courant mesuré dans un circuit qui contient uniquement une source de courant alternatif et un condensateur (fig. 63.07) sera d'autant plus intense que la fréquence f de la tension appliquée et la capacité C du condensateur seront plus grandes. En d'autres mots, la résistance apparente du condensateur sera d'autant plus faible.

Remarque.

- Une self-induction oppose à un courant alternatif une forte résistance, quand la fréquence est grande

$$X = 2 \pi f L.$$

- Une capacité oppose une grande résistance au passage d'un courant alternatif, quand la fréquence est basse

$$X = \frac{1}{2 \pi f C}.$$

Pour un courant continu en particulier, $f = 0$; d'où la résistance devient :

pour une self-induction : $X = 2 \pi f L = 0.$

pour une capacité : $X = \frac{1}{2 \pi f C} = \infty$ (infini).

Une self-induction ne présente pas de résistance à un courant continu. Contrairement, un condensateur ne laisse pas passer le courant continu.

Récapitulation.

1 - Un condensateur bloque un courant continu. D'autre part, on peut faire circuler un courant alternatif dans un circuit qui comprend un condensateur (l'explication du phénomène est donnée dans la "remarque importante" du n° 63.04).

2 - La résistance apparente (capacitance) d'un condensateur comparativement à un courant alternatif est d'autant plus grande que la fréquence f et la capacité C sont plus faibles.

3 - De plus, un condensateur provoque un déphasage entre l'onde de la tension et celle du courant. Le courant dans une capacité pure raccordée à une tension alternative est en avance d'un quart de période ($T/4$) ou de 90° ou de $\pi/2$ radian sur la tension.

QUESTIONNAIRE

- 61.02 En Belgique, la tension du réseau est pratiquement partout une tension alternative effective de 220 V, la fréquence est de 50 Hz.
- Quelle est la période de cette tension alternative ?
 - Quelle est son amplitude ?
 - Quelle est sa valeur moyenne ?
- 61.03 Que veut-on dire lorsqu'on exprime qu'un courant alternatif i_1 (fréquence f) retarde sur un courant alternatif i_2 (fréquence f) ?
Quand ce retardement est égal à $\frac{\pi}{4}$, quelle est alors sa valeur exprimée en degré et en radian ?
- 62.01 Expliquez, dans le cas de la fig. 62.01, pour quelle raison le courant i n'atteint pas immédiatement la valeur $\frac{E}{R}$ lorsque l'on ferme la clef S et pourquoi il ne tombe pas tout de suite à 0 en ouvrant la clef S.
- 62.03 Expliquez comment on parvient à l'expression "résistance apparente" ou "réactance" d'une self-induction.
Pour quelle raison cette résistance apparente est-elle plus grande pour un courant alternatif à haute fréquence que pour un courant alternatif à basse fréquence ?
- 62.03 Quelle sera la valeur effective du courant quand on branche une source de tension alternative (tension effective 10 V, fréquence 100 Hz) sur une bobine dont le coefficient de self-induction est de 1 Henry ?
- 63.02 Donnez la description du phénomène qui se produit quand on court-circuite les deux bornes d'un condensateur chargé. Dessinez le déroulement de la tension et du courant.
- 63.02 Le dispositif d'une automotrice à thyristors comprend quelques condensateurs à forte capacité. Il est insuffisant d'abaisser les pantographes pour pouvoir toucher en toute sécurité ce dispositif. Quelle peut en être la raison ? Que faut-il faire de plus ?
- 63.04 Comment dit-on qu'un condensateur laisse passer un courant alternatif ?

65.01. L'impédance d'un réseau (ou consommateur).

Dans les 62e et 63e leçons il était question déjà de la "résistance apparente" d'une bobine et d'un condensateur. Ce n'est rien d'autre que le rapport $X = E/I$ (exprimé en Ω).

E = la valeur efficace de la tension aux bornes (Volts).

I = la valeur efficace du courant qui circule dans l'élément (Ampères).

La "résistance apparente" ou "réactance" d'une bobine ayant un coefficient de self-induction L (Henry) s'élève à (fig. 65.01 a)

$$X = \frac{E}{I} = 2 \pi f.L. \text{ (ohm).}$$

La "résistance apparente" ou "capacitance" d'un condensateur ayant une capacité C (Farad) s'élève à (fig. 65.01 b)

$$X = \frac{E}{I} = \frac{1}{2 \pi f.C.} \text{ (ohm)}$$

La fig. 65.01 c représente un réseau, c'est-à-dire un accouplement quelconque de résistances ordinaires, de bobines et de condensateurs, possédant deux bornes A et B. Si on appelle E la valeur efficace de la tension appliquée à ces bornes (fréquence f Herz) et I la valeur efficace du courant absorbé par le réseau, nous avons par définition le rapport

$$Z = \frac{E}{I} \text{ (ohm)}$$

qui est la "résistance apparente" ou "impédance" du réseau à la fréquence f Herz (parfois on l'appelle aussi "résistance pour courant alternatif").

L'impédance d'un réseau est déterminée par les valeurs de R , L et C , dont il est composé, par la manière dont ces éléments sont raccordés entr'eux et par la fréquence f de la tension appliquée.

Cependant, du fait que les bobines (selfinduction) et les condensateurs (capacités) provoquent des déphasages entre l'onde de la tension et celle du courant, il est évident que les règles simples que l'on applique pour des réseaux à courant continu, ne contenant que des résistances ohmiques pures, ne sont pas valables en courant alternatif. En particulier, les règles applicables aux groupements de résistances ohmiques ordinaires en série et en parallèle ne sont pas valables pour les résistances apparentes de bobines et de condensateurs.

Ces règles sont les suivantes :

- 1 - La résistance totale d'un accouplement de résistances ohmiques ordinaires en série est égale à la somme de chacune des résistances

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

- 2 - La résistance totale d'un accouplement en parallèle de résistances ohmiques ordinaires est donnée par la relation :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Un exemple démontre beaucoup mieux que ces règles ne sont pas toujours valables pour les "résistances apparentes" ou "impédances" en courant alternatif.

65.02. Exemple.

La fig. 65.02 représente un réseau très simple, formé par un raccordement en série de deux impédances Z_1 et Z_2 , chacune d'une valeur de 5Ω par exemple (pour la fréquence envisagée). Nous désirons déterminer l'impédance Z du réseau.

Ceci peut s'effectuer en admettant qu'un courant alternatif i (d'une valeur efficace I et d'une fréquence de f Herz) circule dans le réseau; ensuite en déterminant la chute de tension que ce courant provoque entre les bornes; finalement en faisant le rapport entre les valeurs efficaces de la tension e et du courant i .

$$Z = \frac{E}{I} \text{ (ohm).}$$

A chaque instant, la chute de tension e est égale à la somme des tensions appliquées en Z_1 et Z_2 , naturellement en tenant compte du signe.

- 1 - Les impédances Z_1 et Z_2 sont toutes les deux des résistances ohmiques R_1 et R_2 (fig. 65.03a).

La fig. 65.03b représente le courant alternatif i supposé parcourir le réseau. Les tensions e_1 et e_2 , aux bornes de Z_1 et Z_2 sont en phase avec le courant i , du fait que Z_1 et Z_2 sont des résistances ohmiques ordinaires. Leur valeur efficace E_1 et E_2 se chiffre pour les deux par $Z_1 \cdot I = 5 I$ (Volts). Ces deux tensions partielles sont représentées en pointillés sur la fig. 65.03c. On obtient l'onde de tension résultante e en faisant la somme de e_1 et e_2 et puisqu'elles sont en phase, nous concluons que la valeur efficace est égale à $10 I$ (Volts). Cette tension figure également à la fig. 65.03c par une ligne pleine.

Dans ce cas nous avons :

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{10 I}{I} = 10 \Omega$$

Pour des résistances ohmiques en série, nous avons donc $Z = Z_1 + Z_2$, du fait que toutes les valeurs alternatives sont en phases.

2 - Les impédances Z_1 et Z_2 sont formées respectivement par une résistance ohmique R et un condensateur C (fig. 65.04a).

La façon d'opérer est la même que celle sous 1. Cependant l'onde de la tension e_2 (fig. 65.04c) retarde de 90° sur l'onde du courant i . Les valeurs efficaces E_1 et E_2 sont toujours égales à $5 I$, car on suppose les impédances Z_1 et Z_2 toujours égales à 5Ω .

Si on constitue e_1 et e_2 afin de déterminer e , on constate, qu'à cause du déphasage entre e_1 et e_2 , on obtient une valeur efficace E de e qui est plus petite que $10 I$, comme sous 1.

On peut calculer que $E = 5 \sqrt{2} I = 7,07 I$ (Volts).
Par conséquent

$$Z = \frac{E}{I} = 7,07 \Omega$$

3 - Conclusion.

En courant alternatif, il n'est plus possible de traiter les "résistances apparentes" ou "impédances" des éléments constitutifs d'un réseau électrique comme des résistances ohmiques ordinaires. En effet, on est obligé de tenir compte du déphasage entre les tensions et les courants différents.

A l'entrée du réseau (bornes A B) se crée un déphasage entre la tension d'alimentation e et le courant absorbé i , en général, celui-ci est indiqué par la lettre grecque φ ("phi"). Dans l'exemple sous 2, il est possible de calculer que le déphasage est égal à 45° (ou $\frac{\pi}{4}$ ou encore $\frac{T}{8}$) en considérant que le courant i avance de 45° sur la tension e .

L'impédance Z , ainsi que l'angle de déphasage φ , sont déterminés par les éléments constitutifs du réseau, par leur raccordement et par la fréquence f de la tension appliquée.

Remarque importante.

Quand on dit d'un appareil, qu'il possède une impédance Z et un angle de déphasage φ , on doit également spécifier

la fréquence pour laquelle ils sont valables, sinon ces données sont sans signification.

La variabilité de Z et φ en fonction de f est à attribuer au fait qu'effectivement la fréquence figure dans la résistance apparente des bobines et des condensateurs (voir 65.01).

65.03. Détermination préalable de Z et de φ pour un appareil ou une installation.

La détermination préalable de Z et de φ d'un réseau donné, nécessite l'introduction de la notion "représentation vectorielle" d'une valeur en courant alternatif, il n'en sera pas question dans ces leçons. Jusqu'à présent, on a toujours employé l'expression "appareil" ou "réseau", ce qui sousentendait un raccordement quelconque de résistances ohmiques R , de bobines L et de condensateurs C .

Un réseau ou ^{une} installation peut être n'importe quel appareil, alimenté par une tension alternative (moteur, appareil de chauffage, lampe, etc...) ou bien une installation comprenant plusieurs de ces appareils. Dans la pratique, il est important de caractériser un tel appareil ou une telle installation.

Comment peut-on y procéder ?

Cela est possible en indiquant la valeur de Z et de φ . Si l'on connaît ces éléments, il est possible de préciser le courant I absorbé par l'appareil pour une tension déterminée E . En outre, comme nous le verrons dans le point suivant, de connaître la puissance transformée dans l'installation.

En général, on caractérise un appareil en indiquant le courant qu'il absorbe lorsqu'il est alimenté sous une tension bien déterminée (cela revient à indiquer son impédance et son facteur de puissance).

65.04. Facteur de puissance d'un appareil ou d'une installation. - $\cos \varphi$.

Au lieu de caractériser un appareil ou une installation en donnant la valeur de φ , on emploie la fonction $\cos \varphi$.

La valeur de cette fonction est comprise entre 0 et 1. On peut la rechercher dans des tableaux, donnant pour chaque valeur d'angle, la valeur correspondante de la fonction $\cos \varphi$.

Ainsi

$$\cos 0^\circ = 1$$

$$\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$$

$$\cos 90^\circ = 0.$$

La fonction décroît d'une façon continue de 1 à 0, au fur et à mesure que φ augmente de 0 à 90°.

Exemple :- Au cas où un appareil est formé par une résistance ohmique pure R, le déphasage entre l'onde de la tension et celle du courant est égal à 0° et son $\cos \varphi = 1$.

- Si l'appareil comprend uniquement une self-induction ou une capacité, $\varphi = \pm 90^\circ$ et $\cos \varphi = 0$.

- Pour l'appareil de l'exemple de 65.02 - 2 (une résistance de 5Ω en série avec un condensateur d'une impédance de 5Ω également) le φ est égal à 45° et son $\cos \varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$

C'est la valeur de $\cos \varphi$ qu'on appelle "facteur de puissance".

65.05. La puissance en courant alternatif (fig. 65.05).

Quand on raccorde un appareil ou une installation à une tension alternative d'une valeur efficace E, d'une fréquence f, si l'on admet qu'il absorbe un courant efficace I qui est déphasé de l'angle φ , comparativement à l'onde de la tension (soit avancé, soit retardé), on peut prouver que la puissance dissipée dans cette installation est égale à

$$P = E \times I \times \cos \varphi.$$

En exprimant E en Volts et I en Ampères, on obtient P en Watts (1 kW = 1000 W).

Il est important que le $\cos \varphi$ d'un appareil ou d'une installation se situe aussi près que possible de 1; dans ces conditions, les pertes par effet Joule (pertes perdues sous forme de chaleur) dans les conducteurs et les appareils seront les plus faibles pour une certaine puissance à fournir. Le rendement deviendra plus avantageux au fur et à mesure que le $\cos \varphi$ s'approchera de l'unité (en d'autres termes quand le déphasage entre la tension appliquée et le courant absorbé est le plus faible).

La puissance P , calculée de cette façon, représente la soit disant "puissance active". C'est la puissance dans sa signification classique; à savoir, la puissance qui est transformée en énergie utile dans l'installation ou dans l'appareil (énergie mécanique dans un moteur, énergie calorifique dans un appareil de chauffage, énergie de rayonnement dans une lampe, etc...)

Exemple : Retournons à l'exemple 65.02 - 2 (fig. 65.04a).

Pour la fréquence employée, cet appareil possède une impédance de $7,07 \Omega$. Supposons que nous l'alimentions avec une tension alternative d'une valeur efficace de 100 V. Il absorbera alors un courant $I = \frac{E}{Z} = \frac{100}{7,07} =$

14,12 A valeur efficace.

Le $\cos \varphi$ était de 0,707.

La puissance absorbée dans ces conditions est égale à $P = E \times I \times \cos \varphi = 100 \times 14,12 \times 0,707 = 1000 \text{ W (ou 1 kW)}$.

Comment cette puissance est-elle transformée ?

Cette puissance est transformée intégralement sous forme de chaleur radiante dans la résistance R . Au condensateur, on ne fournit pas de puissance du fait que la tension e_2 à ces bornes est déphasée de 90° comparativement au courant i qui y circule. Par conséquent, en ce qui concerne le condensateur, le $\cos \varphi$ est égal à 0 ainsi que la puissance absorbée. La tension e_1 , appliquée aux bornes de la résistance, est en phase avec le courant i ; par conséquent, le $\cos \varphi$ est égal à 1 pour la résistance.

En supposant que la résistance R soit un appareil de chauffage, celui-ci dégagera une quantité de chaleur correspondante à une puissance de 1 kW.

N.B. A l'opposé de la "puissance active", on entend parfois parler de la "puissance réactive" et aussi de la "puissance apparente".

- Par la "puissance réactive" on comprend l'expression : $E \times I \times \sin \varphi$ (exprimée en VA R = Volt-ampère-réactif).
- Par la "puissance apparente" on entend l'expression : $E \times I$.

Approfondir la signification de ces grandeurs ne fait pas partie du présent cours.

65.06. Le transformateur - Définition et principe de fonctionnement (fig. 65.06).

Pour le fonctionnement de l'équipement de traction de nos locomotives polytensions (séries 15-16-18), il y a notamment un appareil présentant une importance capitale, c'est le transformateur. Pour cette raison on en parlera.

1. Composition : Un transformateur comprend un noyau magnétique d'une perméabilité très élevée, il est composé de tôles très minces qui sont isolées entr'elles. Deux enroulements sont bobinés autour de ce noyau, le "primaire" UV ayant un nombre de spires n_1 et le "secondaire" uv ayant également un nombre de spires n_2 .

Au primaire, on amène une certaine puissance de courant alternatif (tension E_1 , courant I_1 et $\cos \varphi_1$); afin d'alimenter un récepteur V, on capte au secondaire une puissance de courant alternatif (tension E_2 , courant I_2 , $\cos \varphi_2$). A part les pertes, ces deux puissances sont égales, ce qui signifie que

$$E_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2.$$

Les éléments primaires (E_1, I_1 et $\cos \varphi_1$) sont différents des secondaires (E_2, I_2 et $\cos \varphi_2$). En effet le rôle du transformateur consiste à modifier les éléments : tension et courant, de façon à les rendre aptes à l'alimentation d'un récepteur présentant des caractéristiques bien déterminées. En général, le $\cos \varphi$ varie également, c'est un phénomène supplémentaire qui est indésirable dans certains cas (p.ex. pour les transformateurs de mesure).

2. Situations de fonctionnement (fig. 65.07).

- Un transformateur fonctionne à vide, quand ses bornes secondaires restent ouvertes donc quand aucun récepteur V n'y est raccordé. Alors le courant $I_2 = 0$ (fig. 65.07a).

- Un transformateur fonctionne en court-circuit, quand ses bornes secondaires sont courtcircuitées. Si dans ces conditions l'enroulement primaire UV était alimenté à la tension normale, il en résulterait dans le primaire aussi bien que dans le secondaire, une circulation d'un courant d'une très grande valeur qui détruirait le transformateur en très peu de temps. Un tel fonctionnement n'est donc seulement possible que pour une tension d'alimentation E_1 fortement diminuée (fig. 65.07b).

- On dit qu'un transformateur fonctionne sous charge normale, quand ses bornes secondaires sont raccordées à un appareil V dont l'impédance est suffisamment grande pour que le courant y soit maintenu à une valeur acceptable. La gamme de fonctionnement comprend toutes les situations comprises entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en court-circuit. Cependant, la charge d'un transformateur, dans des conditions normales, est telle qu'on

peut comparer son fonctionnement avec celui du fonctionnement à vide, l'approximation devient de plus en plus grossière au fur et à mesure que la charge augmente (fig. 65.07c).

3. Principe de fonctionnement. (fig. 65.07a).

Prenons comme point de départ le fonctionnement à vide. Si l'on applique une tension alternative E_1 (fréquence f) aux bornes du primaire, celui-ci absorbera un courant I_1 dont la valeur est déterminée par l'impédance du primaire, que nous assimilons à une bobine ayant un noyau en fer doux (coefficient de self-induction L_1).

L'impédance sera donc égale à

$$Z_1 = 2 \pi f \cdot L_1.$$

et l'on peut écrire

$$E_1 = Z_1 \cdot I_1 = 2 \pi f \cdot L_1 \cdot I_1. \text{ (Volts).}$$

Cependant le produit $L_1 \cdot I_1$ n'est rien d'autre que $n_1 \Phi$ (Φ étant le flux dans le noyau magnétique), voir explications au 62.02.

Il en découle que

$$E_1 = 2 \pi f n_1 \Phi \text{ (Volts)} \quad (1)$$

La tension E_1 peut être considérée comme la f.e.m. induite dans le primaire par le flux alternatif Φ dans le noyau. La f.e.m. induite par spire du primaire est égale à

$$\frac{E_1}{n_1} = 2 \pi f \Phi \text{ (Volts/spire).}$$

Le flux traverse également l'enroulement secondaire comprenant n_2 spires. En tenant compte que Φ est un flux alternatif ayant une même fréquence f que la tension appliquée E_1 , il est clair que ce flux variable va induire une tension alternative dans les spires du secondaire et que cette tension aura la même fréquence f .

Le flux Φ engendre, par spire du secondaire, une f.e.m. de la même grandeur que par spire du primaire à savoir $2 \pi f \cdot \Phi$ (Volt/spire) et puisque l'enroulement secondaire possède n_2 spires, la tension E_2 devient :

$$E_2 = 2 \pi f n_2 \Phi \text{ (Volts)} \quad (2)$$

En faisant le rapport entre la tension primaire et la tension secondaire on obtient :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{2 \pi f n_2 \Phi}{2 \pi f n_1 \Phi} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

C'est la formule de base du transformateur : la tension primaire E_1 se rapporte à la tension secondaire E_2 comme le nombre de spires primaires n_1 se rapporte au nombre de spires secondaires n_2 .

Remarques.

1 - L'expression (3) n'est qu'approximativement valable. Des différences trouvent leur origine dans les spires possédant une certaine résistance ohmique et d'une partie du flux ne suivant pas le circuit magnétique mais passant dans l'air. Les différences augmentent au fur et à mesure que la charge croît. Dans ce cas, les courants primaire et secondaire augmentent fortement. Cependant l'expression (3) reste valable pour des charges normales du transformateur (et certainement pour le fonctionnement à vide).

2 - Si le transformateur fonctionne en court-circuit, (comme prévu sous 65.06 -2., ceci ne peut se faire que sous une tension d'alimentation restreinte) alors les différences deviennent tellement importantes que l'expression (3) est totalement erronée.

Cependant, il est possible de fournir la preuve que pour le fonctionnement en court-circuit, l'expression suivante est valable.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

On tire profit de cette propriété dans le cas des transformateurs de mesure du courant (voir plus loin).

65.07. Transformateurs de puissance. (Transformateurs industriels).

Leur rôle consiste dans la transformation de puissances importantes à toutes sortes de fins industrielles. Lors de leur construction, on attribuera surtout une grande importance à obtenir un rendement aussi élevé que possible.

Le transformateur d'une locomotive polytension est un transformateur de puissance.

65.08. Transformateurs de mesure.

On emploie des transformateurs de mesure pour la transformation de courants ou de tensions à des valeurs aptes à être mesurées. En même temps, le fait d'intercaler un transformateur de mesure, le circuit de mesure est isolé du circuit de puissance; dans une installation à haute tension, on évite ainsi les difficultés dues aux mesurages sous haute tension ainsi que les dangers y afférents.

a - Transformateurs de mesure de la tension.

Dans ce cas, il est nécessaire d'obtenir un rapport aussi juste que possible entre la tension primaire et la tension secondaire, il est également indispensable que le déphasage reste faible (en vue des mesures de puissance).

Il faut veiller à respecter le plus possible le rapport

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

et le fonctionnement du transformateur doit s'approcher autant que possible du fonctionnement à vide. Chose possible du fait que le voltmètre, raccordé au secondaire, présente une grande résistance; par conséquent, le courant absorbé sera faible. Le primaire est raccordé entre la tension à mesurer (fig. 65.08).

b - Transformateurs de mesure du courant.

Les mêmes exigences sont nécessaires et pour les transformateurs de mesure de tension et pour les courants. En conséquence, il est indispensable de conserver le plus possible la validité du rapport

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

d'autre part le fonctionnement doit être aussi près que possible du fonctionnement à vide. C'est possible du fait que l'ampèremètre, raccordé au secondaire, n'a qu'une très faible résistance ohmique.

Le primaire est incorporé dans le circuit parcouru par le courant à mesurer (fig. 65.09).

Des transformateurs de mesure du courant sont prévus dans le schéma de traction des locomotives polytensions (partie alternative).

La représentation symbolique des différents types de transformateur figure à la fig. 65.10.

66e leçon.

GENERALITES SUR LES SEMI-CONDUCTEURS.

66.01. Définition.

Les semi-conducteurs sont des matières qui, à l'état pur, sont isolantes à basse température; par contre, à une température élevée, elles deviennent conductrices; en d'autres termes, leurs propriétés conductrices augmentent avec la température. Les semi-conducteurs principaux qu'on emploie à présent sont le germanium (symbole chimique Ge) et le silicium (symbole Si).

Rappelons que les corps isolants ou isolateurs empêchent le passage du courant (porcelaine, verre, mica, papier, etc...). Par contre, les corps conducteurs laissent passer le courant (principalement les métaux).

66.02. Explication simplifiée.

Afin de mieux comprendre ce qui suit, une certaine connaissance sur la structure des matières est nécessaire.

a) Dans la nature, on rencontre 2 sortes de matières, à savoir les matières ou corps simples et les matières ou corps composés. Ces derniers sont composés de corps simples, on peut les décomposer chimiquement en matières simples.

Les corps simples portent également l'appellation "d'éléments".

Exemples:

- l'eau est composé d'hydrogène et d'oxygène;
- le sel de ménage est composé de sodium et de chlore;
- l'alcool est composé d'hydrogène et de carbone.

L'eau, le sel de ménage et l'alcool sont des matières composées, l'hydrogène, l'oxygène, le carbone, le sodium et le chlore sont des corps simples ou des éléments.

Jusqu'à présent, le nombre d'éléments rencontrés dans la nature est de 102, deux parmi eux sont le germanium (Ge) et le silicium (Si).

b) Quand on divise un morceau d'un élément et on continue toujours cette division, on arrive à un certain moment que la particule obtenue n'est plus divisible. Cette particule porte le nom "atome" (ses dimensions sont d'ordre de grandeur d'un dix millionième de mm).

C'est la plus petite partie de cette matière qui en possède toutes les propriétés et c'est la composition qui détermine ces propriétés.

Puisque le nombre d'éléments connus est de 102, il y a également 102 types d'atomes.

c) Chaque atome peut être comparé au système planétaire en miniature (fig. 66.01). Il possède un noyau composé de particules chargées positivement (les protons) autour duquel gravitent, à très grande vitesse, un nombre égal de particules chargées négativement (les électrons). A part le signe, la charge du proton est égale à celle d'un électron. Puisque pour une situation normale leur nombre est égal, on peut dire qu'électriquement, l'atome est en équilibre (ou électriquement neutre).

Les électrons d'un atome gravitent autour du noyau sur des niveaux différents, appelés "couches" (fig. 66.02). En rapport avec la conductibilité de la matière, c'est la couche périphérique qui est prépondérante, elle contient de 1 à 8 électrons.

d) Dans certaines circonstances, il est possible qu'un ou plusieurs électrons se détachent de la couche périphérique et passent à un atome voisin. Un atome ayant perdu des électrons possède alors une charge positive et on l'appelle un "ion positif"; un atome ayant reçu des électrons s'appelle un "ion négatif".

Seulement, les électrons de la couche extérieure peuvent passer d'un atome à un autre et cela plus facilement selon qu'elle en contient moins. Ces électrons sont les sois-disant "électrons libres".

e) Admettons que nous branchons un certain volume d'une matière entre les bornes d'une source de tension continue (fig. 66.06). Les électrons libres sont attirés par le pôle positif (+). En premier lieu, ce seront les électrons libres se trouvant dans le voisinage du pôle + qui se détachent, ils disparaîtront dans la source de tension par la borne de raccordement. Les places devenues libres seront remplies par les électrons libres venant d'atomes plus éloignés, ils disparaissent alors à leur tour par la borne de raccordement. Finalement, les places vides dans les parages de la borne négative (-) seront occupées par les électrons venant de la borne négative de la source de tension. Le résultat final est une migration d'électrons de la borne - à la borne +, et ce mouvement s'appelle un "courant électrique".

f) Ce mouvement d'électrons est donc seulement possible pour autant que les atomes de la matière en question libèrent facilement leurs électrons libres et cela s'effectue plus facilement selon que le nombre d'électrons de la couche extérieure est plus petit.

Une matière dont les atomes n'ont que 1, 2 ou 3 électrons sur la couche extérieure formera un bon conducteur. C'est le cas pour tous les métaux. Les meilleurs conducteurs, l'or et l'argent, n'ont qu'un seul électron sur la couche extérieure.

Par contre, une matière possédant beaucoup d'électrons sur la couche extérieure, formera un bon isolant.

66.03. Semi-conducteurs.

Le Ge et le Si ont tous deux, 4 électrons sur la couche extérieure. On peut en déduire qu'ils ne seront ni bons conducteurs, ni bons isolants. Pour cela, on les appelle des "semi-conducteurs".

Quelle est maintenant la situation d'un cristal de Si ou de Ge pur ?

Les atomes ne sont pas disposés librement d'une façon quelconque, mais ils sont liés entre eux. Un électron libre d'un atome se mariera avec un électron d'un atome voisin; de cette façon, les 2 atomes sont liés ensemble. Chaque atome s'entourera de 4 autres puisque chacun d'eux possède 4 électrons sur sa couche extérieure. Par conséquent, chaque atome se rangera d'après un système géométrique, qu'on appelle le réseau cristallin. La fig. 66.04 représente cette situation en plan.

Les électrons qui assurent les liaisons sont liés entre eux par une ligne en pointillé. Cette structure s'étend, sans limites et dans tous les sens, dans ^{la} la masse du volume de cette matière semi-conducteur.

On constate que dans un réseau cristallin, les électrons ne montrent pas une tendance forte pour quitter leur place. Chacun d'eux occupe une place bien déterminée dans l'ensemble. C'est pour cette raison que les semi-conducteurs sont des mauvais conducteurs à température normale. Quand la température augmente, on aura un nombre d'électrons de plus en plus grand qui acquièrent suffisamment d'énergie pour se détacher. La conductibilité augmente avec la température. La fig. 66.05 illustre la résistance spécifique pour Si et Ge en fonction de $1/T$. (T = température absolue = $273 + t$ en $^{\circ}\text{C}$).

De tels semi-conducteurs sont appelés des "semi-conducteurs intrinsèques"; la conductibilité qu'ils acquièrent à une température plus élevée s'appelle "conductibilité intrinsèque".

66.04. Semi-conducteur du type n (fig. 66.06 a).

Un semi-conducteur de ce type est formé par un cristal de Si ou de Ge devenu impur par l'ajoute d'atomes possédant 5 électrons sur leur couche extérieure. Le nombre de ces

atomes est très faible comparativement au nombre d'atomes de base (1 pour 10 000 ou 1 pour 100 000). Les matières employées peuvent être par exemple, le phosphore, l'étain ou l'arsenic. Il est clair que lorsqu'un pareil atome est inséré dans un réseau cristallin de Si ou de Ge, il y restera un électron libre. Cet électron n'est lié nulle part et peut se libérer très facilement. Par cette opération, on a introduit artificiellement un certain nombre d'électrons libres, ce qui augmentera la conductibilité. De pareils atomes de pollution sont appelés "donners" (donneurs) puisqu'ils sont capables de céder des électrons. Quand un atome de la sorte a cédé un électron, il y restera un ion positif. De cette façon, nous rencontrerons, étendus dans cette masse cristalline, un certain nombre d'ions positifs des donneurs et un nombre égal d'électrons libres errant avec une charge négative. Le cristal reste donc électriquement neutre ou en équilibre (fig. 66.07 a).

66.05. Semi-conducteurs du type p (fig. 66.06 b).

C'est un semi-conducteur formé par un cristal de Si ou de Ge ayant été pollué avec des atomes d'une matière qui n'a que trois électrons sur sa couche extérieure. Il est évident que lorsqu'un pareil atome est inséré dans un cristal de Si ou de Ge, il y restera une place disponible pour un électron. Il se forme ce qu'on appelle un "trou". Eparpillé dans la structure cristalline, il y aura par ci par là des trous. Ces trous exercent une force attractive sur les électrons environnants et ces derniers auront une tendance de venir occuper la place de ce trou. Quand cela s'effectue, on obtiendra un autre trou qui naît à l'emplacement d'origine de l'électron. Ce nouveau trou peut être rempli par un autre électron, etc.... Ces trous changent en réalité sans cesse de place, ils errent à travers le cristal.

Quand on raccorde une tension continue à un morceau de cette matière, on constate que les trous se déplacent du + vers le -. Tout se passe comme si les trous étaient des porteurs de charges positives avec une charge égale à celle d'un électron. Ce mouvement des trous est donc un courant électrique. En le raccordant à une source de tension, le semi-conducteur type P laissera réellement passer le courant. La matière est devenue conductrice et les porteurs de charge sont les trous "positifs".

Les atomes d'impuretés de cette sorte portent le nom de "acceptors" (accepteurs) puisqu'ils sont capables d'accueillir des électrons. Quand un pareil atome a englouti un électron, il y reste un ion négatif. Par conséquent, nous rencontrerons dans la masse du cristal un certain nombre d'ions négatifs des "acceptors" et un nombre égal de trous errants positifs. Ici également, le cristal reste électriquement neutre ou en équilibre (fig. 66.07 b).

66.06. Récapitulation.

La théorie des propriétés des semi-conducteurs est relativement compliquée. Cependant, il suffit de retenir quelques règles générales:

1. Des cristaux de Si ou de Ge, complètement purs, présentent la prétendue "conductibilité intrinsèque"; la conductibilité est très faible à une température normale, mais croît considérablement avec la température. L'intérêt pratique de ces semi-conducteurs intrinsèques est très minime;
2. Des cristaux de Ge ou de Si du type n sont conducteurs de courant grâce à la présence d'un certain nombre d'électrons libres. Les électrons assurent le transport du courant à travers le cristal (dopés avec des donneurs);
3. Des cristaux de Ge ou de Si du type p sont conducteurs de courant grâce à la présence d'un certain nombre de trous qui sont à considérer comme des porteurs de charges positives (dopés avec des accepteurs);

La concentration en impuretés s'appelle le "dopage".

66.07. Définition d'une jonction p-n (fig. 66.08).

On dit qu'un cristal possède une jonction p-n, quand une de ces parties est du type p et l'autre est du type n. Il est à remarquer qu'il ne s'agit pas de 2 cristaux collés ensemble, mais d'un seul cristal ayant deux zones distinctes.

Dans la zone p on rencontre un excédent de trous positifs, dans la zone n un excédent d'électrons négatifs.

66.08. Description du processus de redressement d'une jonction p-n (fig. 66.09).

L'utilité pratique d'un cristal p-n est très importante. Ceci paraît clairement quand on y raccorde une batterie, donc une source de tension continue. On peut effectuer ce raccordement de 2 manières différentes: on branche le pôle - de la source à la zone n et le pôle + à la zone p ou inversement.

1. Le pôle - de la source est raccordé à la zone n et le pôle + à la zone p (fig. 66.09 a).

De la batterie on amène des électrons à la zone n qui devient négative comparativement à la zone p. Une grande force attractive apparaît entre les électrons de la zone n et les trous de la zone p. Cette force attractive fait passer les électrons de la zone n à travers la zone limite (jonction) tandis que les trous de la zone p arrivent dans la zone n. Les électrons, arrivant dans la zone p, sont

absorbés par le pôle positif de la batterie (de cette façon, il y a une création permanente de nouveaux trous qui se déplacent dans le sens opposé). Ainsi, nous pouvons constater qu'un courant électrique circule dans les conducteurs, le cristal et la batterie (dans le cristal, le courant circule à la fois sous forme de trous et d'électrons).

Le comportement du cristal branché de cette façon est celui d'un conducteur ordinaire, mais ne présentant qu'une résistance insignifiante. Le cristal est raccordé dans le sens de passage ou passant.

2. Le pôle - de la source est raccordé à la zone p et le pôle + à la zone n (fig. 66.09 b).

Par la force attractive que le pôle positif de la batterie exerce sur les électrons négativement chargés de la zone n, ceux-ci sont attirés vers la partie extérieure du cristal, donc dans le sens vers le raccordement avec le pôle positif. Le même phénomène se passe avec les trous de la zone p, ceux-ci émigrent également vers le pôle négatif. La jonction p-n se comporte à présent comme un isolateur, elle est branchée dans le sens de blocage ou bloquant.

Ainsi, on dispose, dans un cristal p-n, d'un accessoire qui laisse passer un courant continu dans un sens mais pas dans l'autre. Dépendant de sa composition, on l'appellera une "diode au germanium" ou une "diode au silicium."

66.09. Caractéristiques d'un redresseur à semi-conducteurs (fig. 66.10).

La fig. 66.10 illustre la caractéristique d'une jonction p-n. V est la tension appliquée (en volts) tandis que I est le courant qui traverse la jonction. Les deux valeurs sont positives pour le sens de passage et négatives pour le sens de blocage.

a) Caractéristique directe.

Pour le sens de passage, la cellule oppose une très faible résistance au passage du courant. Une tension de quelques volts seulement suffit déjà pour faire circuler un courant très important (ou, ce qui revient au même: le passage d'un courant très important ne créera qu'une faible chute de tension de quelques volts seulement).

L'angle α (alpha) de la fig. est une mesure pour la résistance de la cellule, elle dépend de:

- la résistance spécifique (résistivité) de la masse cristalline (en fonction des dopages) et de la résistance des contacts entre la cellule et les électrodes;
- de la masse du cuivre enveloppante.

b) Caractéristique inverse.

Quand on fait croître la tension inverse, la cellule ne laisse passer qu'un très faible courant (courant de fuite), ou en d'autres termes, la résistance est très grande pour le sens de blocage. Pour une certaine valeur de la tension V_d , il y aura claquage de la cellule, le courant passera sans limitation.

Dans un tel cas, la cellule est détruite en général. Cependant, ceci n'est pas toujours vrai, parfois la cellule peut se régénérer pour une tension décroissante. Pourtant, l'échauffement ne peut durer trop longtemps sinon la cellule sera détruite par l'effet thermique.

La tension de blocage est déterminée par la pureté de la matière. On peut atteindre les maximums suivants:

1000 V pour Si
150 V pour Ge

Description résumée d'un redresseur à semi-conducteurs.

Les cellules au Ge sont employées pour des tensions faibles ($V < 100$ V). La température de fonctionnement est limitée entre 65° et 70° C.

Les cellules au Si sont employées pour des tensions plus élevées. La température de fonctionnement peut atteindre 140° C.

Les deux types ne permettent qu'une faible surcharge.

En principe, les cellules sont construites de la façon suivante (fig. 66.11). Une pastille de Ge ou de Si (E) est soudée sur une base en cuivre (A) munie d'ailettes de refroidissement. Le diamètre varie entre 10 et 20 mm. Sur cette pastille, on en place une autre en idium (D), celle-ci formera, par diffusion, la partie du type p. Entre le cuivre et la pastille E, on ajoute une pastille G ayant un même coefficient de dilatation (par exemple: molybdène).

L'anode avec l'écrou de raccordement est formé par la partie B. L'ensemble de la cellule est obturé par un scellement c qui le rend étanche.

Dans les ponts redresseurs des locomotives polytension, on ne rencontre que des cellules au Si du fait qu'il s'agit ici de grandes puissances. La cellule redresseuse est aussi appelée "diode".

67ème leçon.

67.01 La diode à semi-conducteur comme cellule redresseuse (fig. 67.01).

Dans la leçon précédente, on a déjà fait allusion à la propriété de la diode à semi-conducteur, de laisser passer le courant seulement dans un sens et de le bloquer dans l'autre sens.

Quand on connecte une diode à une source de tension continue de façon que le pôle positif est raccordé à la zone p et le pôle négatif à la zone n, la diode n'offre presque pas de résistance et le courant qui circule dans le circuit est limité uniquement par la résistance externe du circuit. La source, de la fig. 67.01, possède une tension $E = 100$ volts et la résistance externe du circuit R est de 10Ω . Si la diode est raccordée comme décrit ci-dessus (fig. 67.01 a), nous aurons un courant I d'une valeur d'environ

$$I = \frac{E}{R} = \frac{100}{10} = 10 \text{ Ampères (loi d'Ohm).}$$

La diode est branchée dans le sens passant ou le sens direct.

Si par contre la diode est raccordée inversément dans le circuit (la zone p au pôle négatif et la zone n au pôle positif), la résistance est très élevée et elle ne laisse passer qu'un courant de fuite très faible (fig. 67.01 b). Elle est raccordée dans le sens de blocage ou sens inverse.

La caractéristique tension - intensité d'une diode est celle d'une jonction p - n, comme illustrée à la fig. 66.10.

L'utilisation d'un certain type de diode est limitée par :

1° l'intensité maximum autorisée : Si la diode est chargée au-dessus de cette limite, elle est thermiquement détruite.

2° tension inverse maximum : (tension de claquage) :

C'est la valeur V_d (fig. 66.10) de la tension inverse pour laquelle la diode est percée, c'est-à-dire, pour laquelle elle perd ses propriétés de blocage en laissant passer le courant sans limitation. Dans ces conditions, généralement la diode est thermiquement détruite.

La fig. 67.02 illustre la représentation symbolique d'une diode à semi-conducteur comme elle est employée dans les schémas.

Par analogie avec les électrodes correspondantes d'une diode à tube, on appelle la partie p "l'anode" et la partie n la "cathode".

67.02 Redressement d'une alternance d'un courant alternatif.

Le redressement monoalternance d'un courant alternatif peut être décrit comme suit. La fig. 67.03 représente une source de tension alternative (fréquence f , valeur efficace E), elle fournit un courant à un récepteur V avec insertion d'une diode D .

La diode est polarisée dans le sens direct pendant la demi-période ou alternance pour laquelle X est positif et Y négatif; elle est conductrice et sa résistance est à peu près 0. Le récepteur est parcouru par le courant dans le sens de A vers B .

Pendant l'alternance suivante, quand X est négatif et Y positif, la diode est inversement polarisée et elle bloque le courant. Le récepteur V reste sans courant.

A partir de ce moment, le cycle est répété. En ce qui concerne le récepteur V , le résultat est un courant pulsé (fig. 67.04) qui circule toujours dans le même sens (de A vers B).

Il est à remarquer que seulement une alternance sur deux est utilisée. C'est la raison pour laquelle on parle d'un "redressement mono-alternance". On a par contre un "redressement bi-alternance", quand on utilise les deux alternances d'un courant alternatif. Ce résultat est représenté à la fig. 67.05. Dans chaque alternance, on obtient dans le récepteur une pointe de courant identique circulant toujours dans le même sens.

67.03 Inconvénients du redressement mono-alternance par rapport au redressement bi-alternance.

1° Dans le premier cas, la valeur moyenne du courant redressé qui traverse le récepteur V (en supposant que celui-ci est formé par une résistance ohmique pure R) est de :

$$I_{\text{moy}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{E_{\text{max}}}{R}$$

Dans le deuxième cas, cette valeur moyenne sera le double, donc :

$$I_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_{\text{max}}}{R}$$

Dans le deuxième cas, il est possible de transformer complètement la puissance de la source en puissance de courant continu dans le récepteur V (en faisant exception du rendement du branchement de redressement).

Dans le premier cas, on ne peut utiliser que la moitié de cette puissance.

2° Remarquons d'abord que souvent le courant circulant dans le récepteur V (représenté aux fig. 67.04 et 67.05) est inapte pour l'alimentation d'un appareil à courant continu.

Il est bien vrai que c'est un courant qui circule toujours dans le même sens, mais il est loin d'être uniforme. Par conséquent ce n'est pas un courant continu parfait. Après le redressement du courant, il est généralement nécessaire de prévoir un dispositif d'égalisation (parfois on dit aussi "supprimer l'ondulation du courant" ou "lisser le courant".) Nous verrons plus loin comment cela s'effectue. Faisons remarquer seulement qu'il est beaucoup plus difficile de supprimer cette ondulation pour le redressement mono-alternance que pour le redressement bi-alternance. Ceci implique que dans le premier cas le dispositif de lissage doit être dimensionné beaucoup plus large afin d'obtenir un courant continu de la même qualité que dans le deuxième cas.

67.04 Redressement bi-alternance.

L'explication du "redressement bi-alternance" a été donné sous la rubrique 67.02. De quelle manière l'obtient-on? Généralement cela s'effectue au moyen d'un soi-disant "pont de Graetz" (fig. 67.06).

- X est positif et Y négatif pendant la première alternance. Le courant traverse successivement la diode D_1 , le récepteur V dans le sens de A vers B, la diode D_3 et arrive ainsi en Y.
- X est négatif et Y positif pendant l'alternance suivante. Le courant passe maintenant par la diode D_2 , le récepteur V dans le sens de A vers B, la diode D_4 et atteint en X.

Après cela les deux cycles se répètent. Pendant chaque alternance, le récepteur V est traversé par un courant circulant de A vers B, comme la fig. 67.05 l'illustre. On obtient en effet un redressement bi-alternance.

67.05 Lissage du courant continu pulsé.

Le courant continu pulsé que nous avons obtenu jusqu'à présent, est totalement inapte à l'alimentation de la plupart des appareils à courant continu. Ceci est le cas par exemple pour un moteur de traction à C.C. dont le courant consommé doit rester aussi uniforme que possible (une ondulation exagérée entraîne des difficultés de commutation). Puisqu'il n'est pas possible d'éliminer complètement l'ondulation, on se contente de déterminer un seuil au-dessus duquel cette ondulation devient inadmissible.

Le lissage s'effectue par insertion d'une bobine ayant un coefficient de self-induction L très élevé. En effet, comme décrit dans la 62e leçon, une self-induction s'oppose

toujours à chaque changement du courant, elle maintient le courant à une valeur constante (un courant croissant est freiné, un courant qui disparaît est entretenu pendant un certain temps).

L'effet d'insertion d'une self de lissage se traduit donc par un affaiblissement des ondulations du graphique représentatif du courant, comme la fig. 67.07 nous le montre.

Remarque :

L'emploi des selfs de lissage dans les schémas de traction ne se limite pas uniquement au lissage du courant continu par le redressement d'un courant alternatif. Comme nous le verrons plus loin - à l'occasion de la discussion des automotrices à thyristors - le dispositif de démarrage de ces automotrices fournit à la sortie un courant présentant un caractère très irrégulier. Dans ce cas, le courant de traction doit être lissé également.

67.06. Le transistor.

Le transistor est un élément semi-conducteur qui trouve principalement son application dans l'électronique. Comme tel, il est aussi appliqué dans les circuits de traction où on le trouve comme accessoire du dispositif d'antipatinage électronique, du dispositif de survitesse, etc. Puisque le conducteur n'a pas accès à cet appareillage, on omettra la discussion du transistor dans le cadre de ces leçons.

Citons seulement qu'un transistor est formé par un cristal semi-conducteur qui possède trois zones. Les différentes couches peuvent être p.n.p ou n.p.n (fig. 67.08). Selon le cas, on l'appellera un transistor p.n.p. ou un transistor n.p.n. Chacune de ses couches est connectée à un des raccords du transistor. Ces raccords sont appelés émetteur, base et collecteur.

Ils sont indiqués sur la fig. 67.08.

La fig. 67.09 illustre la représentation symbolique d'un transistor p.n.p. et d'un transistor n.p.n.

Un transistor peut servir comme interrupteur ouvert, interrupteur fermé, amplificateur de courant.

67.07 Schéma de traction des locomotives polytensions.

Plusieurs des appareils à courant alternatif, décrits ci-dessus, trouvent leur application dans le schéma de traction des locomotives polytensions. Prenons comme exemple le schéma de traction des locomotives de la série 15 (à trois tensions). Ces locomotives sont entre autres appelées à assurer des services sur le réseau de la S.N.C.F. (courant alternatif 25 kV - 50 Hz).

La fig. 57.10 montre en grandes lignes le schéma de traction qui est d'application pour ce mode de traction. Leurs moteurs sont des moteurs à C.C., cependant ils ont été spécialement conçus pour fonctionner avec du courant continu pulsé (pourtant la pulsation ne peut pas dépasser une certaine amplitude). Leur tension nominale est de 1500 V. Dans la conception originale on n'avait pas prévu le changement de couplage des moteurs pendant le démarrage. Ainsi dans le système 25 kV - 50 Hz, les quatre moteurs restaient en permanence couplés en parallèle. Par élimination progressive du rhéostat de démarrage on augmentait graduellement la tension aux bornes jusqu'à 1500 V.

Remarque : Actuellement, les locomotives de la série 15 ont été modifiées de manière à permettre le changement de couplage au démarrage. En 25 kV, le couplage passe de série-parallèle à parallèle, la tension aux bornes des moteurs est respectivement 750 et 1500 V, pour le régime plein champ.

Description de l'équipement de traction 25 kV - 50 Hz.

- 1° Par l'intermédiaire du contact du disjoncteur principal pour courant alternatif, la tension alternative (25 kV - 50 Hz) est appliquée sur la primaire du transformateur. Ce transformateur possède quatre enroulements secondaires : un pour le chauffage du train, un pour l'alimentation des groupes auxiliaires à courant alternatif et deux pour la traction (seulement ces deux derniers sont représentés sur le schéma). Les nombres de spires ont été calculés de façon que chaque secondaire-traction donne une tension de 1850 V - 50 Hz.
- 2° La tension de chaque secondaire est appliquée à un pont de Graetz qui redresse la tension alternative. A la sortie de chaque pont redresseur on obtient une tension continue ondulée d'une valeur moyenne de 1500 V.
- 3° L'ondulation du courant redressé est en grande partie supprimée à l'aide d'une self de lissage prévue à la sortie de chaque pont.
- 4° Le courant redressé et lissé alimente un groupe de deux moteurs, connectés en permanente en parallèle (du moins en ce qui concerne l'ancienne réalisation).

Remarque : Puisque l'emploi d'une diode est limité par le courant maximum autorisé et la tension de claquage, on est amené de placer, dans chaque branche du pont, un branchement en série-parallèle de plusieurs diodes au lieu d'une seule (le branchement en série afin de pouvoir bloquer la tension inverse, le branchement en parallèle dans le but de pouvoir laisser passer le courant total).

QUESTIONNAIRE.

- 65.02 Expliquez pourquoi, dans un branchement en série d'une résistance ohmique et d'une bobine, on ne peut pas additionner simplement les impédances de ces deux éléments afin de trouver l'impédance totale ?
- 65.06 De quelle façon obtient-on une tension dans le secondaire d'un transformateur, quand on alimente le primaire avec une tension alternative ?
- Qu'arrivera-t-il si on alimente le primaire avec une tension continue ?
- 66.04 Expliquez de quelle façon on rend passant un semi-conducteur du type n.
- 66.08 Pourquoi, une jonction p-n inversément polarisée, bloque-t-elle le courant électrique ? Expliquez comment on arrive à la caractéristique "courant - tension" d'une jonction p.n.
- 67.04 Comment arrive-t-on à un redressement bi-alternance ? Expliquez le fonctionnement du pont de Graetz.
- 67.05 Pourquoi est-il nécessaire d'insérer des selfs de lissage dans le schéma de traction d'une locomotive polytension ?

The first part of the report deals with the general conditions of the country, and the second part with the details of the various districts. The first part is divided into two sections, the first of which deals with the general conditions of the country, and the second with the details of the various districts. The second part is divided into three sections, the first of which deals with the details of the various districts, the second with the details of the various districts, and the third with the details of the various districts.

GENERALITES SUR LES THYRISTORS.

Jusqu'à présent les éléments semi-conducteurs suivants ont été évoqués :

- la diode : qui est composée d'une seule jonction p-n; elle trouve son application aussi bien dans des circuits électroniques qu'en courant fort.
- le transistor : formé par un enchaînement de deux jonctions p-n, placées dans l'ordre "p-n-p", ou "n-p-n"; par conséquent, il est à considérer comme un assemblage de deux diodes. Il ne trouve son application que dans des circuits électroniques.

A titre de rappel, la fig. 69.01 représente les deux éléments semi-conducteurs avec leurs connexions.

69.01. Détermination du thyristor.

Le thyristor est un élément semi-conducteur formé par un enchaînement de trois jonctions p-n, dont les différentes couches se suivent dans l'ordre "p-n-p-n" (fig. 69.02a). Il possède trois électrodes, dont deux à grande section, à savoir l'anode (a) et la cathode (c), nommés ainsi par analogie avec une diode ordinaire. La troisième présente une faible section et est appelée "électrode de commande" (on lui prête également l'appellation de "grille" ou "porte" et on l'indique par la lettre g). La fig. 69.02b montre la représentation symbolique de l'élément employée dans des schémas.

69.02. Propriétés du thyristor.

Le thyristor n'empêche pas seulement le passage du courant dans le sens de c vers a (donc pour la polarisation inverse du thyristor, ou - ce qui revient au même - quand on raccorde le pôle positif d'une source de tension en c et le pôle négatif en a) mais aussi dans le sens de a vers c (donc pour une polarisation directe ou en d'autres termes quand on raccorde le pôle positif en a et le pôle négatif en c).

Ainsi l'on peut dire que le thyristor barre le courant dans les deux sens en cas que g n'est pas raccordé ou si son potentiel est inférieur à celui de c. Pour permettre le passage du courant - pour une polarisation directe du thyristor - il faut mettre g sur un potentiel positif comparativement à c. Il suffit d'ailleurs de créer une faible différence de potentiel entre g et c. Une fois la conduction obtenue, nous constatons que la résistance devient pratiquement zéro pour le sens direct.

A partir du moment où l'état de conduction est obtenu, le rôle de l'électrode g est terminé, il n'est d'ailleurs pas possible de rendre au thyristor son état de blocage en faisant disparaître la tension de la grille g. Pour que le thyristor retrouve ses propriétés de blocage, il est nécessaire d'annuler la tension entre l'anode et la cathode ou bien d'inverser leur polarité.

L'action pour amener le thyristor à son état de conduction (en appliquant une tension en g) s'appelle "l'allumage du thyristor". Le ramener à son état de blocage (en annulant ou en inversant la tension entre a et c) s'appelle "l'extinction du thyristor".

De l'alinéa précédent, on conclut qu'il est possible d'allumer le thyristor en donnant une impulsion de courte durée à la grille g.

Tout ceci peut être mieux suivi et compris en étudiant la courbe caractéristique du thyristor.

69.03. Courbe caractéristique du thyristor (fig. 69.03).

a - Polarisation inverse : (à titre de rappel : pôle positif de la source en c et le négatif en a).

En appliquant une tension augmentant progressivement et de polarité donnée, entre l'anode et la cathode, on constate que le comportement du thyristor est identique à celui d'une diode inversement polarisée. Le courant est barré; seul un très faible courant de fuite coulera entre l'anode et la cathode. Pour une certaine tension V_i (l'indice i "inverse"), on obtient le perçage; pour une chute de tension, approximativement constante, dans le thyristor, on constate une très forte augmentation du courant, il est seulement limité par la résistance externe dans le circuit.

b - Polarisation directe : (à titre de rappel : pôle positif en a et pôle négatif en c).

En appliquant, entre l'anode et la cathode, une tension, augmentant progressivement et de la polarité donnée en toute absence d'un signal sur la grille g, on obtiendra, juste comme la polarisation inverse, rien qu'un faible courant de fuite. Au dessus d'une certaine tension V_d (indice d direct) du même ordre de grandeur que V_i , on constate : une chute de tension brusque (d'environ 1 à 2 V) accompagnée d'une forte augmentation du courant. A partir de ce moment, le comportement du thyristor est celui d'une diode directement polarisée.

Si par contre, on polarise la grille g positivement, comparativement à la cathode, on obtiendra le même phénomène, mais pour une tension V_a , beaucoup plus basse.

Une fois l'état de conduction acquis, l'influence de la grille g sur la caractéristique du thyristor, devient nulle. Le thyristor ne peut reprendre ses propriétés de blocage, qu'après annulation de la tension à ses bornes.

69.04. Principe de fonctionnement du thyristor.

Il n'est pas question d'approfondir le mécanisme, relativement compliqué, qui détermine le comportement du thyristor. Plus avant nous avons déjà vu qu'une région de blocage barre le courant. Dans le cas d'un thyristor, inversément polarisé, il y a deux zones de blocage et pour une polarisation directe il y a aussi une zone de blocage (celle du milieu). Il s'en suit, qu'en l'absence d'un signal sur la grille, le thyristor est bloquant dans les deux sens.

En appliquant un signal sur la grille g, on obtiendra le passage d'un courant de g vers c (polarisation directe de la zone de blocage inférieure). Ce passage du courant provoque à l'intérieur du cristal formant le thyristor, un regroupement des porteurs de charges (électrons libres et trous) entraînant l'effacement de la zone de blocage médiane. De cette manière il est donc possible d'amener un thyristor à son état de conduction.

69.05. Limitation du thyristor.

L'emploi du thyristor est limité par un certain nombre de conditions. Celles-ci sont :

1. Tension bloquée au maximum admissible dans le sens direct et le sens inverse :

Dans la fig. 69.03 ces deux valeurs ont été désignées par V_i et V_d . Il est plus difficile, dans la fabrication, d'obtenir un grand V_a qu'un grand V_i . En effet, dans le sens direct, il n'y a qu'une zone de blocage tandis que dans le sens inverse il y en a deux. Cependant il est possible, grâce à des artifices de construction (épaisseur déterminée des différentes couches, dopage varié en impuretés de ces couches) d'obtenir un V_d du même ordre de grandeur que V_i par exemple 1200 V.

2. Intensité maximum admissible :

L'intensité maximum admissible dépend de l'échauffement autorisé de la jonction (125° à 150°) et de là aussi indirectement du mode de refroidissement (refroidissement naturel par air ou par eau). On construit maintenant des thyristors pouvant supporter des courants de 300 A.

Nous avons déjà rencontré ces restrictions pour les diodes.

Pour les thyristors on doit en outre tenir compte de :

3. La vitesse d'accroissement du courant dans le thyristor.

Le passage du courant dans le thyristor est commandé par l'électrode de commande g. Il en découle évidemment que le courant trouvera d'abord son passage au voisinage de cette électrode et s'étendra ensuite progressivement sur la section entière du cristal. Au voisinage de g on remarquera une très forte densité de courant. Pour un accroissement très rapide du courant, on court le risque d'une augmentation locale inadmissible de la température. C'est la raison pour laquelle la vitesse d'accroissement doit être limitée. On fabrique maintenant des thyristors qui admettent une croissance du courant de 25 à 50 A/ μ s.

4. La vitesse d'accroissement de la tension.

Il est possible que le thyristor s'allume intempestivement ou spontanément, c'est ce qui arrive quand la tension à ses bornes augmente d'une façon trop brutale. On peut trouver une explication à ce phénomène dans l'effet de capacité entre les différentes zones du thyristor. La fig. 69.04 représente la protection classique contre les effets mentionnés sous 3 et 4. La self-induction L (qui peut être celle du câblage) joue un double rôle :

1. limiter la vitesse d'accroissement du courant. (En effet une self-induction entrave chaque variation du courant comme nous l'avons vu dans la 62e leçon. Il en résulte que dans ce cas l'accroissement du courant sera retardé).

2. empêcher une transmission brutale d'une surtension. En ce qui concerne la capacité C, elle laisse écouler la surtension afin que celle-ci n'apparaisse pas aux bornes du thyristor.

La résistance empêche la formation d'un circuit de résonance L.C.

5. Temps de recouvrement.

Afin d'éteindre un thyristor, il faut appliquer, pendant un certain temps (τ = tau), à ses bornes une tension inverse. Le temps minimum nécessaire pour éteindre le thyristor forme une de ses limitations. On parlera alors de "thyristors rapides" et de "thyristors lents" selon que le temps de recouvrement est faible ou grand. Des thyristors rapides peuvent posséder un temps de recouvrement τ de 25 μ s

Comme nous verrons plus tard, en traction à C.C., il est nécessaire d'employer des thyristors possédant un temps de recouvrement aussi bref que possible.

70e leçon.

APPLICATION DU THYRISTOR DANS LA TRACTION A C.C.

70.01 Généralités sur le démarrage en traction à C.C.

Nous avons déjà démontré, dans des leçons précédentes, que pour démarrer un moteur série en C.C., il est nécessaire de limiter la tension aux bornes du moteur afin d'éviter des intensités inadmissibles. Pendant le démarrage, la vitesse, ainsi que la f.c.e.m. sont en effet faibles et la seule limitation du courant est formée par la résistance interne du moteur (comme nous le savons, cette résistance est très faible, d'un ordre de grandeur de $0,5 \Omega$ environ).

Pendant le démarrage, on s'efforcera d'augmenter la tension aux bornes du moteur de manière à conserver un courant aussi uniforme que possible. Puisqu'on a intérêt à démarrer avec un effort de traction aussi grand que possible, il est évident qu'on essaiera de maintenir le courant à sa valeur maximum.

Pendant longtemps, la seule manière de démarrer, appliquée sur le matériel de traction de la S.N.C.B., était celle avec rhéostat (résistance de démarrage) fig. 70.01. Dans cette méthode, nous le savons déjà, le(s) moteur(s) est (sont) connecté(s) en série avec une résistance adéquate. Cette résistance est alors éliminée, cran par cran, au fur et à mesure que la vitesse augmente. La résistance de démarrage est complètement éliminée pour une vitesse déterminée et le moteur est alors alimenté à la pleine tension de la ligne.

Cette élimination peut s'effectuer manuellement sous le contrôle du conducteur (hle S. 29), ou automatiquement sous le contrôle d'un relais d'accélération (sur tous les autres types de matériel). Pour cette dernière manière d'élimination, la méthode avec JH est la plus appliquée. Ce n'est que sur les plus anciennes automotrices que nous rencontrons encore un système à commande pneumatique.

Dans un diagramme "Vitesse-Courant", on obtient alors la courbe bien connue en "dents de scie". Chaque dent correspond à l'élimination d'une portion du rhéostat de démarrage (fig. 70.02).

70.02 Principe d'un dispositif de démarrage à thyristors.

Dans un dispositif de démarrage à thyristors, le réglage de la tension aux bornes du (des) moteur(s) pendant le démarrage est basé sur une toute autre conception.

Dans ce genre de dispositif, on applique immédiatement à l'arrêt la pleine tension de la ligne, mais par intermittence, ce qui veut dire, à des intervalles de temps.

Dans un diagramme "Temps-Courant", on représente la tension aux bornes des moteurs comme à la fig. 70.03.

- La tension aux bornes des moteurs est égale à la pleine tension de la ligne de $t = 0$ à $t = T_e$.
- La tension aux bornes des moteurs est égale à 0 de $t = T_e$ à $t = T$.

Dans ces conditions nous avons une tension moyenne aux bornes des moteurs de :

$$U_{\text{moy}} = \frac{T_e}{T} \cdot U.$$

Le rapport $\frac{T_e}{T}$ est très important et reviendra souvent dans la discussion relative au dispositif de démarrage à thyristors. On l'appelle le "rapport de fonctionnement". En faisant varier le rapport de fonctionnement entre 0 et 1, on constate que l'on dispose d'un moyen pour régler la tension moyenne U_{moy} de 0 à U .

Dans la pratique, ceci s'effectue en tenant T à une valeur constante (T est égale à l'intervalle du temps entre deux applications successives de la tension aux bornes des moteurs), tandis qu'on fait varier T_e de 0 à T .

Un démarrage par un dispositif à thyristors est illustré par la fig. 70.04.

Si le moteur représentait une résistance ohmique pure, le courant absorbé présenterait les mêmes allures que la tension appliquée. (Fig. 70.05) en d'autres termes, le courant serait totalement inapte à l'alimentation d'un moteur à C.C. Il sera donc nécessaire, ce qui est d'ailleurs également le cas pour l'alimentation d'un moteur à C.C. par un redresseur, de lisser le courant, c'est-à-dire, de le rendre aussi uniforme que possible. Ceci s'effectue en insérant, en série avec le moteur, une self de lissage possédant un coefficient de self-induction convenable. Le résultat obtenu est un courant plus ou moins uniforme, dont l'intensité sera plus élevée selon que la valeur de la tension moyenne appliquée sera plus grande.

Par le réglage de la tension moyenne aux bornes des moteurs, on dispose donc d'un moyen réel pour contrôler le courant des moteurs pendant le démarrage.

70.03 Schéma de principe d'un dispositif de démarrage à thyristors.

Un dispositif de démarrage à thyristors est composé principalement des organes suivants :

- un "filtre d'entrée" branchement d'une self-induction L (λ) et d'une capacité C (γ). Son rôle sera expliqué plus tard.

71e leçon.

71.01. Généralités sur l'application des thyristors dans le "hacheur".

Comme nous l'avons vu dans la 70e leçon, la fonction du hacheur consiste à brancher et à débrancher périodiquement la tension de la ligne aux bornes des moteurs sous le contrôle d'un dispositif de réglage électronique.

D'autre part, il a été démontré dans la 69e leçon, qu'un thyristor se comporte en quelque sorte comme un interrupteur dont on peut obtenir la fermeture en appliquant une impulsion de tension à son électrode de commande g. Il s'ensuit qu'il est possible de faire usage des propriétés du thyristor pour la construction d'un hacheur.

La disposition la plus simple serait celle représentée à la fig. 71.01. Mais un schéma aussi simple est inutilisable en réalité du fait qu'il est impossible d'éteindre le thyristor en faisant disparaître la tension de son électrode de commande. Il est en effet nécessaire d'inverser la tension entre l'anode et la cathode, chose irréalisable dans le schéma de la fig. 71.01. Une fois allumé, le thyristor conserverait son état de conduction pour n'importe quelle tension de la grille.

Comparativement à ce qui se passe en traction à C.A., c'est l'extinction du thyristor qui forme la grande difficulté à son usage en traction à C.C. En traction à C.A., on dispose toujours de la demi-alternance négative pour obtenir l'extinction automatique du thyristor. Pour éteindre le thyristor en traction à C.C., il faut prévoir un artifice afin d'inverser la tension à ses bornes au moment propice (ce moment est déterminé par le réglage). C'est ainsi qu'on arrive au schéma de la fig. 71.02, dont la partie encadrée illustre le hacheur proprement dit. Tous les éléments qui ont été ajoutés au schéma de la fig. 71.01 sont destinés à réaliser l'extinction du thyristor Th 1 au moment utile. La branche composée par les éléments Th 2, D2, Sex, Cex, Rex et Dex est indiquée par l'appellation particulière de "circuit d'extinction".

71.02. Description du fonctionnement du hacheur.

Admettons qu'au moment initial $t = 0$, le thyristor principal Th 1 et le thyristor d'extinction Th2 sont éteints ; de plus, que le condensateur d'extinction Cex est déchargé. Supposons également que le coefficient de self-induction de la self de lissage est suffisamment grand pour nous permettre de considérer le courant des moteurs I_M comme une valeur constante.

Nous appelons I_1 , le courant capté de la ligne caténaire et I_2 le courant de charge de Cex. Quand ils suivent le sens des flèches de la fig. 71.02, nous les considérons comme positifs, ils sont dessinés comme tel sur la fig. 71.03. Les valeurs du potentiel des points A et C sont, en outre, fort intéressantes pour nous. Elles sont appelées respectivement V_A et V_C et sont considérées comme positives quand elles sont plus élevées que le potentiel du point 0 (retour du courant, potentiel du rail).

- a) Au moment où $t = 0$, on allume le thyristor Th 1, en donnant une impulsion à sa grille. Un courant de valeur constante $I_1 = I_M$ est capté à la ligne caténaire et circule dans le moteur (fig. 71.04 a).

$V_A =$ potentiel de la ligne caténaire

$V_C = 0$

$I_L = 0$

$I_1 = I_M =$ une valeur constante

- b) Au moment où $t = t_1$, le thyristor d'extinction Th 2 est allumé en appliquant une impulsion sur sa grille. Il va laisser passer un courant, à savoir, le courant de charge du condensateur d'extinction Cex. Ce dernier se charge à une tension d'environ le double de celle de la ligne caténaire ($V_C =$ environ 6000 V). Maintenant, le courant I_1 est composé par le courant du moteur I_M d'une valeur constante, majoré du courant de charge I_L du condensateur Cex. Le potentiel V_A est toujours égal à 3000 V (71.04 b).

- c) Au moment où $t = t_2$, le condensateur Cex est chargé à son maximum ($V_C \approx 6000$ V) et par conséquent I_L est devenu 0. Le courant I_1 est de nouveau égal au courant du moteur I_M et le potentiel V_A reste toujours aux environs de 3000 V (fig. 71.04 c);

- d) A partir du moment où $t = t_2$, le condensateur Cex commence à se décharger (maintenant I_L est négatif, donc en opposition avec le sens de la flèche) avec un courant de décharge qui va en augmentant. Ce courant passe par Sex, D2, les selfs de lissage et les moteurs d'où il retourne à l'armature négative (inférieure) du condensateur. Maintenant les moteurs sont alimentés par le courant I_1 , originaire de la ligne caténaire en passant par Th1 et par le courant de décharge I_L du condensateur Cex. Cependant, la somme de I_1 et I_L doit être égale à I_M étant donné que les moteurs n'admettent que ce courant I_M à valeur constante, en d'autres termes, au fur et à mesure que le courant I_L , originaire de Cex, augmente, il supplantera de plus en plus le cou-

- le "hacheur H", organe le plus important, son rôle consiste à brancher et à débrancher périodiquement la tension appliquée (tension de la ligne caténaire) sous une certaine fréquence. Ainsi on obtient aux bornes des moteurs une tension dont la forme est représentée par la fig. 70.03. On peut comparer un hacheur à un interrupteur qu'on ouvre et ferme périodiquement.
- les "selfs de lissage" (un par groupe de moteurs), dont la fonction a été définie au lit. 70.02.
- la "diode d'écoulement D" assurant que le courant continue à circuler dans les moteurs, pendant les intervalles de temps où l'interrupteur (hacheur) est ouvert.

En considérant le hacheur comme un interrupteur, nous décrirons son fonctionnement de la façon suivante :

- a - L'interrupteur est fermé au moment $t = 0$ (d'après la fig. 70.03). Les moteurs sont alimentés à la pleine tension de la ligne.
- b - On ouvre l'interrupteur au moment $t = T_e$. Le courant continuera à circuler dans le moteur, grâce à la présence des selfs de lissage, en empruntant le circuit formé par le moteur et la diode de découlement D.
- c - Au moment $t = T$, on ferme à nouveau l'interrupteur et on réapplique la tension de la ligne. Le cycle mentionné sous a et b se répète.

La self de lissage constitue l'organe assurant que le courant circulant dans le moteur reste à peu près constant. L'intensité du courant est déterminée exclusivement par la valeur moyenne de la tension appliquée (donc du rapport de fonctionnement) et par la f.c.e.m (donc de la vitesse) du moteur.

Réglage de la tension moyenne U_{moy} .

Le réglage de la tension moyenne aux bornes des moteurs peut être effectué de deux manières différentes :

- a - faire varier T_e tout en conservant T à une valeur constante
- b - faire varier T tout en conservant T_e à une valeur constante.

Dans le cas des automotrices thyristorisées de la SNCB, on applique la méthode mentionnée sous a : la valeur de T (donc la fréquence de hachage) est tenue constante, pendant que le réglage de T_e variera entre 0 et T en fonction de la vitesse du véhicule. En fait, on emploie 2 fréquences de hachage : une faible fréquence (grand T) pour une petite

vitesse et une plus forte fréquence (petit T) pour des vitesses plus élevées. Le but poursuivi est de pouvoir démarrer avec un effort de démarrage plus petit. En effet, dans la pratique, il n'est pas possible de diminuer arbitrairement la valeur de T_e . Il n'est donc pas possible que le rapport $\frac{T_e}{T}$ et conséquemment le courant de démarrage

(ou l'effort de traction) descende en dessous d'une valeur minimum. Le seul moyen possible pour diminuer d'avantage l'effort de traction au démarrage consiste donc dans l'application d'une valeur T plus grande pendant le démarrage, en d'autres termes une fréquence de hachage plus basse:

Rôle du filtre d'entrée.

Le rôle du filtre d'entrée (λ, Γ) consiste à limiter les surtensions à l'entrée du hacheur. Ces surtensions peuvent provenir :

- de la ligne caténaire elle-même, suite à certaines situations et de certaines manoeuvres.
- principalement du fonctionnement du hacheur même : chaque fois que l'interrupteur s'ouvre, il interrompt un circuit à forte self-induction (sous station, ligne caténaire, selfs de lissage, moteurs). Chaque fois, le courant aura une tendance à persister, à l'entrée du hacheur on aura chaque fois l'accumulation d'une certaine quantité de charge électrique; ce qui revient à dire qu'il y a création d'une surtension.

La présence de la self-induction λ , retardera la croissance de la surtension, la capacité Γ fonctionne comme tampon et absorbe chaque fois une partie de la charge électrique qui arrive, ce qui limite la surtension.

70.04 Caractéristiques d'un dispositif de démarrage à thyristors.

Un dispositif de démarrage à thyristors, en comparaison avec un dispositif de démarrage classique, présente les avantages suivants :

1. Un gain considérable d'énergie à chaque démarrage. Il n'y a plus de pertes dans les résistances de démarrage ($1/2$ ou $1/3$ de l'énergie totale absorbée pendant le démarrage). Ceci est surtout important pour les trains omnibus.
2. Un effort de traction uniforme en comparaison avec les automotrices classiques. Ceci représente un meilleur confort pour les voyageurs tandis que les risques de pivotage diminuent.