# 2. Opérations connexes

## 2.1 — VÉRIFICATIONS EN COURS DE BOBINAGE

Il n'est pas rationnel d'effectuer tout le bobinage d'une machine sans effectuer, à certains moments, la vérification du travail.

Ces vérifications permettent, d'une part, d'éviter toute erreur de montage, et, d'autre part, une économie de temps en cas de défaut.

Elles peuvent être effectuées :

— avant le montage des enroulements sur la machine ;

— après leur montage sur le circuit magnétique et avant l'exécution des connexions ;

— après avoir réalisé les connexions, c'est-à-dire lorsque le bobinage est complétement terminé.

### 2.11. — GÉNÉRALITÉS SUR LES ESSAIS A EFFECTUER SUR LES MACHINES

Les essais visent à la recherche de défauts ou à la mesure de grandeurs :

— coupure ;

— court-circuit entre sorties ;

— court-circuit entre spires ;

— masse franche ;

— résistance d'isolement ;

— rigidité diélectrique ;

— polarités ou connexions.

On utilise les moyens classiques de dépannage : lampe témoin et source de courant, ohmmètre, emploi de la haute tension (essai de rigidité diélectrique).

Il faut cependant signaler quelques particularités relatives à certains essais.

### *2.111. Coupure.*

La recherche peut être effectuée lorsque :

— la bobine n'est pas montée sur le circuit magnétique. On utilise le courant continu ou alternatif ; en cas de non-coupure, seule la résistance du fil conducteur diminue l'éclat de la lampe ;

— la bobine est montée sur le circuit magnétique. On emploie de préférence le courant continu (faible tension). Dans le cas de l'utilisation du courant alternatif, la réactance de la bobine peut limiter le courant à une valeur très faible, insuffisante pour faire rougir le filament. On emploie alors un ampèremètre ou l'on se fie aux étincelles de rupture.

### *2.112. Court-circuit entre spires.*

Il est assez difficile à déceler. La meilleure solution consiste à faire fonctionner cette spire en secondaire fermé de transformateur — ou d'autotransformateur — et de constater les effets produits.

En cas de défaut :

— l'intensité du primaire est assez élevée ;

— la spire chauffe et l'isolant fume ;

— la spire en court-circuit est le siège d'un courant induit qui émet un flux alternatif et peut faire fonctionner un appareil.

### *2.113. Masse franche.*

Plusieurs moyens peuvent être envisagés :

— en cas de défaut sur une machine possédant plusieurs enroulements, déconnecter ces derniers et les essayer séparément à l'aide d'une lampe témoin ;

— les enroulements étant sous tension, relier une borne d'un voltmètre à la masse, l'autre étant successivement connectée aux points A, B, C, D, E, facilement accessibles. Le minimum de déviation indique la proximité du défaut (*fig.* 1) ;

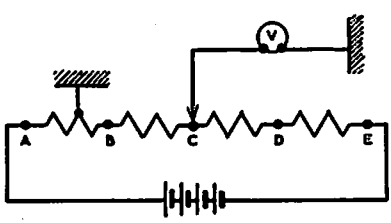



*Fig.* 1.

Recherche d'une masse sur un inducteur à quatre bobines. Le minimum de déviation indique la proximité de la masse.

— application d'une faible tension entre le bobinage et la masse. Des étincelles se produisent à l'endroit du défaut et permettent ainsi de l'identifier.

### *2.114. Mesure de la résistance de l'isolement.*

Elle doit être effectuée entre les différents enroulements et entre les enroulements et la masse : elle ne doit pas être inférieure — sur une machine neuve ou réparée — à 1 000 Ω/V, avec un minimum de 250 000 Ω.

Cet essai doit être effectué en courant continu (ohmmètre à magnéto) ; en cas d'utilisation du courant alternatif la capacité entre les bobinages, ou entre les bobinages et la masse, modifie les résultats.

L'humidité étant souvent responsable d'un affaiblissement de la résistance, il y a lieu d'étuver la machine en cas de défaut.

### *2.115. Essai de rigidité diélectrique.*

Il est satisfaisant si le bobinage peut résister pendant une minute à une tension égale à 2 U + 1 000 V, U étant la tension de fonctionnement, avec un minimum de 1 500 V. Cette tension doit être amenée progressivement afin d'éliminer le régime transitoire qui s'établirait en cas de mise sous tension brutale.

### *2.116. Recherche des polarités.*

◆ **Sur un inducteur, ou une bobine.**

Connecter l'enroulement à une source de courant continu à faible tension et vérifier avec une boussole.

◆ **Sur une bobine ou un stator.**

Lorsque deux enroulements doivent être connectés en série ou en parallèle, leur couplage n'est correct que si leurs flux sont additifs. Pour trouver le bon couplage :

— *connecter les enroulements* en série ;

— *appliquer une faible tension* alternative aux extrémités du couplage et mesurer l'intensité ;

— *inverser le couplage* de la deuxième bobine et mesurer l'intensité.

*Au couplage correct correspond l'intensité la plus faible.*

La *figure* 2 illustre la méthode de vérification du couplage de deux bobines.

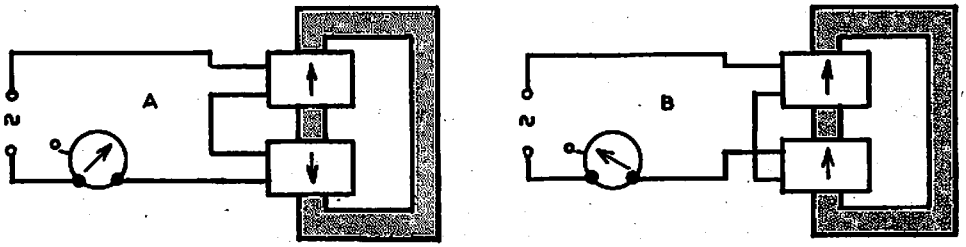



*Fig.* 2. — Vérification du couplage de deux bobines. Seul le montage B est correct.

## 2.12. — ESSAIS DES BOBINES

Voir tableau I.

## 2.13. — ESSAIS DES INDUCTEURS

Voir tableau II, page 100.

Lorsque le sens de rotation de la machine est connu, on peut également vérifier la polarité des pôles de commutation par rapport aux pôles principaux (*fig.* 3).

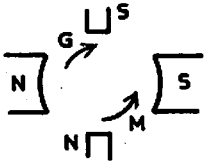



*Fig.* 3. — Pour une génératrice un pôle de commutation précède un pôle principal de même nom dans le sens de rotation.
Pour un moteur un pôle de commutation suit un pôle principal de même nom dans le sens de rotation.

## 2.14. — ESSAIS DES STATORS (Voir tableau III, page 101).

## 2.15. — ESSAIS DES INDUITS

### *2.151. Généralités.*

Les défauts à rechercher sont identiques à ceux déjà étudiés, à savoir :

◆ **Coupures** : le plus souvent elles sont localisées près du collecteur sur les petits induits bobinés à la main.

**TABLEAU I. — *Essais des bobines.***

| Stade du bobinage | Défauts à rechercher | Schémas | Observations |
|---|---|---|---|
| Avant leur montage sur le circuit magnétique. | Coupure. | | A la lampe témoin.<br>Courant continu ou alternatif. |
| | Court-circuit entre sorties. | A<br>B | Court-circuiter A et B. Se fier à l'éclat de la lampe. |
| Après leur montage sur le circuit magnétique. | Coupure. | | Lampe témoin sur courant continu très faible tension.<br>Sur alternatif, suivant réactance de la bobine, la lampe ne rougit pas.<br>Employer un ampèremètre. |
| | Court-circuit entre spires. | A | Connecter bobine sur faible tension alternative.<br>En cas de court-circuit l'intensité primaire est importante et la bobine chauffe. |
| | Masse. | A | Réunir les 2 sorties. |
| | Mesure Isolement. | | Réunir les 2 sorties.<br>Ohmmètre à courant continu. |

| Stade du bobinage | Défauts à rechercher | Schémas | Observations |
|---|---|---|---|
| Après leur montage sur le circuit magnétique | Essai de rigidité diélectrique. | | 2 U + 1 000 volts.<br>Temps de l'essai : une minute.<br>Elever la tension progressivement. |
| | Essai de polarités. | A<br>A<br>B | Sur courant alternatif faible tension.<br>Intervertir A et B.<br>Le bon couplage est indiqué par la plus faible intensité. |

◆ **Court-circuit entre les lames du collecteur, dû à un excès de soudure.**

◆ **Court-circuit entre spires.**

◆ **Masse ou défaut d'isolement.**

◆ **Inversion.** Deux cas peuvent se présenter :

— inversion de deux sorties dans les induits bobinés à la main ;

— inversion de deux sorties sur les induits à sections préfabriquées et lorsque le pas au collecteur est voisin de 1. La figure 4 montre que le courant ne s'inverse, dans la section en défaut, que dans le deuxième cas.

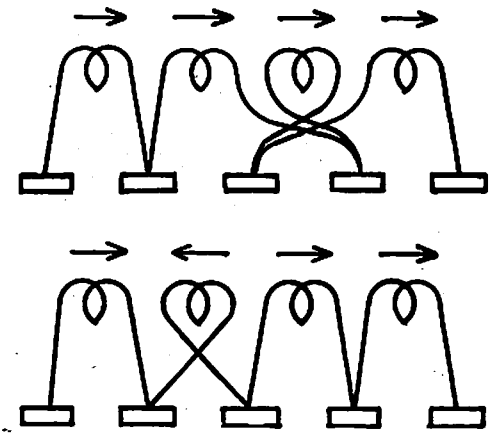


*Fig.* 4.
Bobinage des induits. Inversion des sorties.
Les flèches indiquent le sens du courant.

◆ **Inégalité de spires dans les sections.**

Les méthodes de recherche sont semblables à celles employées lors des précédents essais ; une attention particulière doit être apportée, avant le bobinage, à la vérification du collecteur.

Après la mise au collecteur, on effectue un essai au millivoltmètre et un essai au « grognard ».

◆ **Essai au millivoltmètre** (*fig.* 5).

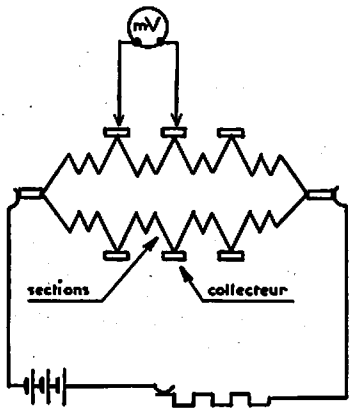


*Fig.* 5.

On peut déceler les défauts des sections en comparant leur résistance. Un faible courant parcourt les spires de l'induit et un appareil de calibre approprié (millivoltmètre de préférence ou milliampèremètre), branché en dérivation aux bornes de la section à essayer, permet de juger celle-ci. Il est donc utile, dans la plupart des cas, de respecter le pas au collecteur.

L'induit est monté sur un chevalet. L'alimentation se fait par deux frotteurs placés à 180° électriques ; le courant peut être réglé par un rhéostat.

Le même essai permet de déceler les coupures. L'induit est alimenté en courant continu et on mesure les chutes de tension de lame à lame. S'il n'y a aucune coupure dans la voie d'enroulement en cours d'exploration, un courant circule dans toutes les sections et les chutes de tension entre lames sont égales. Si, au contraire, une coupure affecte une section, il ne circule aucun courant ; les chutes de tension entre lames des sections bonnes sont nulles et l'appareil mesure la tension totale de la batterie entre les lames recevant la section coupée.

Le *tableau V* concerne l'essai des induits au millivoltmètre.

◆ **Essai au « grognard ».**

Il est surtout utilisé dans la recherche des courts-circuits.

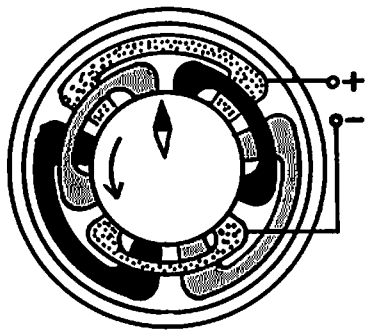
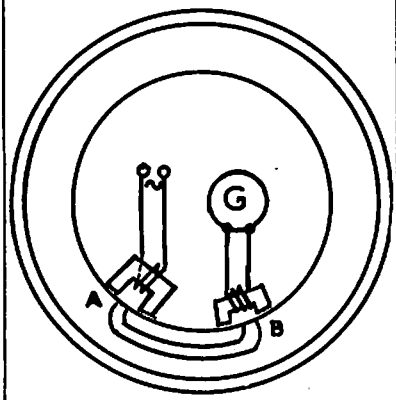
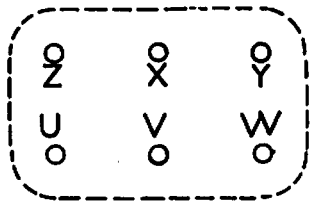
Il se compose d'un circuit magnétique ouvert possédant un enroulement faisant fonction de primaire ; les tôles de l'induit posé sur le « grognard » ferment le circuit magnétique. Les sections jouent le rôle de secondaire.

Lorsqu'une section est en court-circuit — provoqué par la réunion accidentelle de deux lames au collecteur — un courant alternatif circule dans cette section et le flux créé par celui-ci peut faire vibrer une lame d'acier placée sur un faisceau de la section en défaut (*fig.* 6).

**TABLEAU II. — *Essais des inducteurs.***

| Stade du bobinage | Défauts Vérifications | Schémas | Observations. |
|---|---|---|---|
| Avant leur montage sur le circuit magnétique. | Court-circuit entre spires. | | Transformateur d'essais à circuit magnétique ouvrable.<br>En cas de court-circuit : Intensité importante ;<br>— échauffement des inducteurs. |
| Après leur montage sur le circuit magnétique. | Essai de polarités. | | Déterminer le sens du courant dans les bobines.<br>Connecter provisoirement.<br>Brancher une source de courant continu à très faible tension.<br>Vérifier avec une boussole. |
| Après leur montage sur le circuit magnétique | Masse. | | La plus faible déviation indique la proximité du défaut. |
| | Essai de polarité d'un pôle auxiliaire. | | Ce pôle doit s'opposer au flux créé par l'induit.<br>Effectuer une connexion provisoire.<br>Brancher l'inducteur et vérifier les polarités.<br>Brancher l'induit seul en respectant le sens de courant donné par le couplage ; vérifier les polarités.<br>Le couplage est exact si l'aiguille dévie en sens inverse. |

**TABLEAU III. — *Essais des stators***
***(après le montage des enroulements sur le circuit magnétique).***

| Défauts Vérifications | Schémas | Observations |
|---|---|---|
| **Essais de polarités.** |   | En cas de doute et d'impossibilité de suivre les connexions :<br>— coucher le stator sur le côté ;<br>— connecter chaque enroulement sur une source à courant continu de très faible tension ;<br>— passer une boussole à l'intérieur du stator, contre les tôles. |
| **Court-circuit entre spires.** |   | Essai sur un stator assez important.<br>Emploi d'un grognard c'est-à-dire d'une bobine alimentée en courant alternatif. Cette bobine est appliquée sur une encoche A de la section à essayer.<br>Si une spire est en court-circuit elle est parcourue par un courant induit dont les effets magnétiques peuvent :<br>— entraîner l'attraction d'un réglet placé sur l'encoche B ;<br>— créer une f.é.m. dans une deuxième bobine placée sur B. Cette tension peut être décelée par un galvanomètre, un écouteur ou un amplificateur. |
| **Recherche de connexions.** |   | En cas d'inversion dans une entrée et une une sortie, et dans l'impossibilité de suivre les connexions, 5 opérations (au maximum) sont nécessaires :<br>Inverser UX puis essayer ;<br>— si l'essai est négatif, rebrancher UX comme précédemment ;<br>— inverser VY puis essayer ;<br>— si l'essai est négatif rebrancher VY comme précédemment ;<br>— inverser WZ. Essayer. Bon résultat. |

Pour les essais de coupure, court-circuit entre sorties, masse, la mesure de l'isolement, les essais de rigidité diélectrique, se reporter aux essais effectués sur les bobines.

### *2.152. Essais et recherches de défauts (voir tableau IV).*

**TABLEAU IV. — *Essais des induits.***

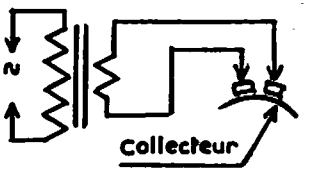
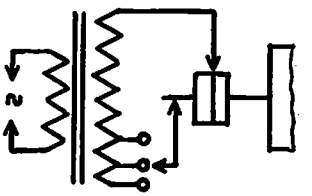
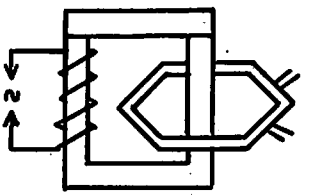
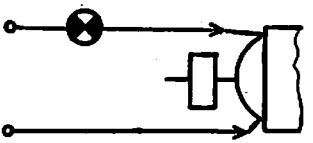
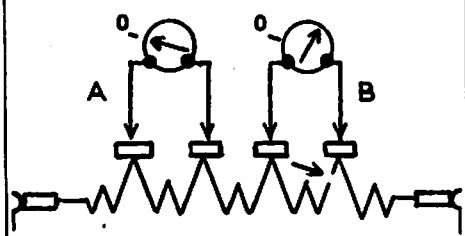
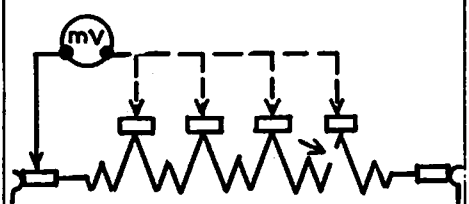
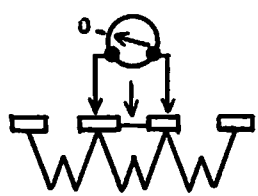
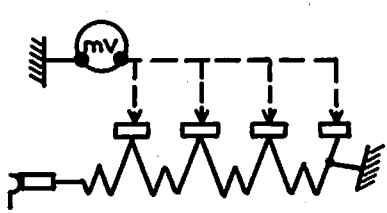
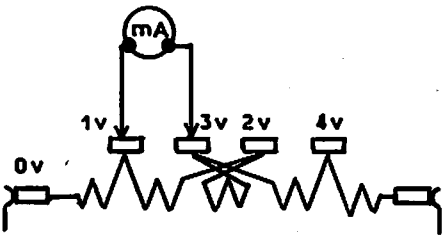
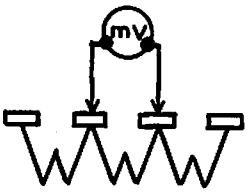
| Stade du bobinage | Eléments | Défauts Vérifications | Schémas | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Avant le montage des enroulements sur le circuit magnétique. | Collecteur. | Court-circuit entre lames. |   | A la lampe témoin ou avec une très faible tension (grande intensité). En cas de court circuit par soudure, celle-ci fond instantanément. |
| | | Masse. Défaut d'isolement. Rigidité diélectrique. |   | Court-circuiter toutes les lames par un conducteur et essayer à la lampe témoin.<br>Terminer par un essai haute tension. |
| | | Position. | La vérifier par rapport aux encoches. Voir les repères effectués ou les tableaux destinés à cet effet. | |
| | Sections préfabriquées. | Court-circuit entre spires. |   | Essai avec un transformateur à circuit magnétique ouvrable.<br>En cas de court circuit :<br>— l'intensité est importante ;<br>— la section chauffe et est soumise à une force électrodynamique. |
| Après le montage des enroulements sur le circuit magnétique et avant d'effectuer la mise au collecteur. | | Recherche des connexions. |  | Essai à la lampe témoin. Dans le cas d'un enroulement continu, couper les boucles. |
| | | Pour les essais de coupure, court-circuit entre sorties, masse, la mesure d'isolement, les essais de rigidité diélectrique, se reporter aux essais effectués sur les bobines. | | |

**TABLEAU V. — *Essais des induits.***
***Essai au millivoltmètre sur un induit dont le pas au collecteur est égal à 1.***

| Défaut à rechercher | Schémas | Observations |
|---|---|---|
| Coupure. |  | A. Sur une voie d'enroulement, la déviation est nulle sur toutes les lames, sauf sur celles raccordées à la section en défaut, B, où elle est maximale. |
| |  | En plaçant une borne du millivoltmètre fixe sur un balai frotteur et en déplaçant l'autre, la déviation maximale indique le passage de la coupure puisqu'on mesure alors la tension de la source.<br>La flèche indique le défaut. |
| Court-circuit. |  | Court-circuit entre lames : déviation nulle.<br>Court-circuit entre spires : déviation plus faible. |
| Masse |  | Une borne de l'appareil est reliée à la masse et l'autre est déplacée sur toutes les lames.<br>La déviation minimale indique la proximité de la masse. |

| Défauts à rechercher | Schémas | Observations |
|---|---|---|
| Inversion sur des induits bobinés à la main. |  | Lorsque deux sections sont en série, la déviation est plus grande.<br>Cet essai doit être pratiqué avec un milliampèremètre à cadre avec le 0 au milieu. Supposons un potentiel 0 au frotteur de gauche et chute de tension de un volt par section ; l'appareil indique nettement l'inversion du potentiel. |
| Inégalité des nombres de spires. |  | Manque de spires : déviation plus faible.<br>Excès de spires : déviation plus grande. |

Il existe des montages plus complexes dans lesquels une deuxième bobine est le siège d'une f.é.m. induite que l'on détecte avec un appareil de mesure (*fig.* 7).

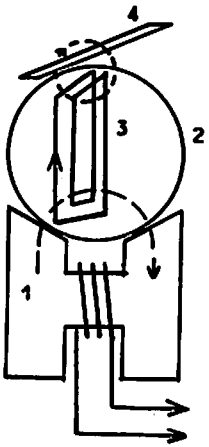



*Fig.* 6.

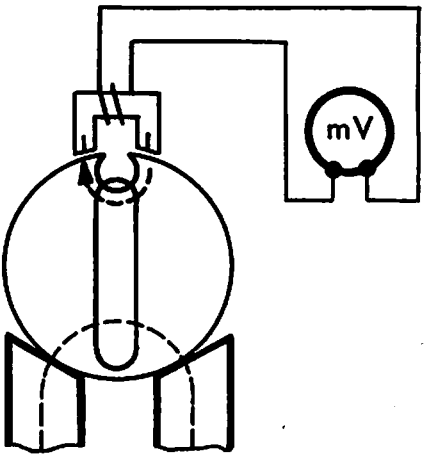



*Fig.* 7.

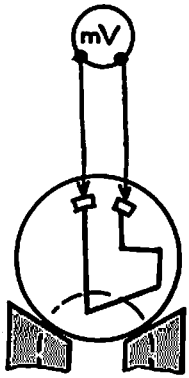



*Fig.* 8.

— *Recherche des coupures au « grognard ».*

En connectant un millivoltmètre sur deux extrémités d'une section, non en défaut, l'appareil indique une faible f.é.m. On peut se servir de cette propriété pour déceler les coupures. L'appareil doit être connecté suivant le pas au collecteur, et, pour éviter toute erreur d'interprétation, l'induit doit être tourné de la valeur de ce pas à chaque essai de façon à ce que la section à vérifier reçoive toujours le même flux (*fig.* 8).

Mais, comme pour l'essai au millivoltmètre, l'induit le plus facile à dépanner est celui où le pas au collecteur est égal à 1 (voir tableau VI).

### *2.153. Compléments sur les essais des induits.*

Les essais au millivoltmètre et au « grognard » sont incomplets ; on peut leur reprocher :

— de ne déceler que les masses franches et l'impossibilité de signaler les défauts d'isolement ; ceux-ci sont détectés à l'ohmmètre et par l'essai de tenue diélectrique. Toutes les lames sont court-circuitées par un conducteur et l'essai s'effectue entre la masse et le collecteur ;

— la difficulté de repérer une inversion des conducteurs d'une section préfabriquée lorsque le pas au collecteur est voisin de 1. Cette erreur peut être décelée à la suite de l'essai au millivoltmètre, l'induit étant posé sur le chevalet et toujours sous tension. Une boussole placée à proximité des faisceaux indique le sens du courant, puis l'induit est tourné assez lentement ; en cas d'inversion, l'aiguille pivote de 180° (*fig.* 9).

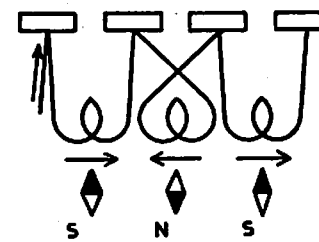



*Fig.* 9.

En ce qui concerne l'essai au millivoltmètre des enroulements ondulés, deux remarques peuvent être faites :

— les lames situées à 360° électriques d'un frotteur se trouvent au même potentiel ; donc, l'appareil de contrôle n'accuse aucune chute de tension bien que les sections en service soient sans défaut (1) ;

(1) Ces sections sont celles qui, dans les schémas développés, apparaissent mises en court-circuit par les balais de même polarité.

— un court-circuit sur deux lames prive de potentiel celles situées à 360° électriques, ce qui perturbe la lecture de l'appareil.

En principe à chaque type d'enroulement correspond un essai particulier.

Les induits munis de connexions équipotentielles se comportent comme s'ils étaient en court-circuit. Leur essai au grognard n'est possible qu'après dessoudage de la mise au collecteur.

**TABLEAU VI.** — *Essais des induits. Essai au « grognard ».*

| Défauts à rechercher | Schémas | Observations |
|---|---|---|
| Court-circuit aux lames. | | La lame d'acier vibre en passant sur la section en défaut. |
| Court-circuit d'une spire. | A<br>vers amplificateur | En passant sur la spire en court-circuit, le courant induit dans la bobine A fait fonctionner l'amplificateur. |
| Coupure. | 0 | En cas de coupure : aucune déviation de l'appareil. |
| Court-circuit aux lames. | 0 | En cas de court-circuit aux lames : aucune déviation de l'appareil. |
| Comparaison entre coupure et court-circuit. | 0 A<br>0 B | On utilise une section voisine sans défaut.<br>— A : coupure. Aucune déviation.<br>— B : court-circuit. Déviation normale pour une section. |
| Masse. | mV | A chaque essai l'induit doit être tourné d'un pas au collecteur.<br>La déviation minimale indique la proximité de la masse.<br>La flèche indique le défaut. |

## 2.2. — SÉCHAGE. IMPRÉGNATION

### 2.21. — GÉNÉRALITÉS

La durée de fonctionnement d'un bobinage exécuté dans les meilleures conditions serait assez courte ; en effet, celui-ci renferme de l'humidité qui sera la cause d'un prochain défaut d'isolement. D'autre part, il n'est pas armé contre la pénétration et l'attaque des agents atmosphériques et chimiques.

On va donc le protéger et prolonger sa vie par un étuvage et une imprégnation dans un vernis isolant, ce qui permet de :

— chasser l'humidité en suspens dans le bobinage ;

— renforcer l'isolation entre les conducteurs et entre ces derniers et la masse ;

— former à la surface du bobinage une couche protectrice contre les agents destructeurs ;

— améliorer la résistance mécanique de l'ensemble.

Ces deux opérations doivent, non seulement être exécutées après la réalisation du bobinage, mais renouvelées périodiquement, surtout si le milieu ambiant est chargé d'humidité ou de vapeurs corrosives.

### 2.22. — MÉTHODE GÉNÉRALE D'APPLICATION DES VERNIS

Bien que chaque vernis doive être appliqué suivant les indications du constructeur, on peut toutefois définir une méthode générale :

— étuvage et aspiration de l'humidité ;

— imprégnation ;

— égouttage, destiné à éviter un amas de vernis ;

— évaporation des solvants ;

— formation de la couche dure et protectrice sur la surface du bobinage ;

— finition.

Les variantes portent sur :

— le temps et la température d'étuvage qui dépendent des machines à imprégner ainsi que de la nature des guipages ;

— la façon d'appliquer le vernis qui est fonction du volume des pièces et de l'équipement des ateliers ;

— la manière de provoquer la formation de la couche superficielle, à l'air ou à l'étuve et, dans ce dernier cas, avec ou sans aération ; chaque vernis demande un traitement particulier.

## 2.23. — CONSTITUTION DES VERNIS

Ils renferment :

◆ **Une base qui est la partie essentielle.**

Elle peut-être :

— une résine naturelle ou synthétique ;

— des huiles de lin ou de ricin ;

— de l'asphalte, du brai.

◆ **Généralement un solvant servant à diluer cette base.**

Les principaux sont : l'alcool, la benzine, le white-spirit, parfois une huile siccative.

## 2.24. — PRINCIPAUX VERNIS (*Voir tableau VII*).

## 2.25. — CONSISTANCE ET CONSERVATION DES VERNIS

Chaque vernis doit être appliqué dans un état de consistance qui lui est propre. Une augmentation de la fluidité facilite sa pénétration mais forme une pellicule trop mince, tandis qu'une concentration élevée nuit à son écoulement.

La viscosité d'un vernis est vérifié à la coupe consistamétrique AFNOR n° 4 où l'on mesure le temps d'écoulement d'un volume déterminé à la température de 20 °C.

En cas de modification des composants — soit par un stockage prolongé, soit par une imprégnation antérieure — les apports doivent se faire à faible dose en remuant pour homogénéiser le mélange.

Afin d'éviter toute modification chimique pendant leur stockage les vernis doivent être conservés dans des bidons fermés entreposés dans un local dont la température est voisine de 15 °C.

## 2.26. — APPLICATION DES VERNIS

### *2.261. Etuvage.*

Les bobinages sont séchés et débarrassés de leur humidité dans des étuves de formes et de dimensions diverses, en tôle ou en maçonnerie, calorifugées et munies d'un système d'évacuation de l'humidité. Le chauffage est assuré par des résistances pour les petites étuves, par le gaz ou par circulation d'un fluide chaud pour les modèles plus importants. Enfin, certaines permettent d'effectuer le vide lorsque le chauffage est terminé.

Les étuves à infra-rouge servent surtout à la cuisson des vernis de surface.

La température de fonctionnement varie entre 100 et 200 °C et la durée d'étuvage, de deux à cinq heures pour la plupart des machines, sauf celles possédant un conducteur isolé à l'émail gras ; en effet, celui-ci n'a pas subi un durcissement après son dépôt sur le conducteur et peut être dissous par le solvant. On évite cet inconvénient par un étuvage d'une dizaine d'heures à 120 °C (1).

### 2.262. *Imprégnation.*

Afin d'éviter la pénétration de l'humidité, l'étuvage doit être suivi par l'imprégnation ; toutefois, la température la plus favorable pour l'application du vernis est voisine de 40 °C. Une température plus élevée entraîne une modification du solvant.

Différents modes d'imprégnation peuvent être utilisés :

— au *pistolet ou au pinceau.* Ces procédés ne permettent de déposer qu'une couche superficielle sur le bobinage et sont surtout employés pour l'application des vernis de finition ;

— *par arrosage.* La machine est placée sur un bac en tôle, le vernis est coulé sur le bobinage, puis il est récupéré au fond du bac pour être reversé plusieurs fois de suite. La machine est tournée dans tous les sens afin de favoriser la pénétration du liquide ;

— *par trempage.* Ce procédé est le plus complet lorsqu'on ne dispose pas d'autoclave. Les pièces sont immergées dans le liquide contenu dans un récipient, et, comme précédemment, elles doivent être tournées plusieurs fois. Des bulles d'air sortant du bobinage indiquent la pénétration du liquide et permettent de déterminer la fin de l'imprégnation.

Certains ateliers possèdent des cuves de trempage perfectionnées où le liquide se trouve en circuit fermé et garde ainsi une concentration constante.

— *par autoclave.* Ce procédé sera étudié après la formation de la couche de surface.

### 2.263. *Egouttage.*

Les machines imprégnées par arrosage ou trempage doivent être égouttées ; cette opération se pratique à la température ambiante de 20 °C. environ. Les pièces doivent être tournées dans tous les sens pour faciliter l'écoulement du liquide en excès.

(1) Signalons toutefois que l'émail gras est de moins en moins utilisé.

**TABLEAU VII.** *Principaux vernis. (D'après la documentation des Usines diélectriques de Delle.)*

| Classe de température | Nature | Constituants | Emploi | Temps et température de traitement | Observations |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **1° VERNIS D'IMPRÉGNATION** | | |
| B | Phénolique gras. | Résines phénoliques et huiles siccatives. | Bobinages fixes ou tournants en fils guipés ou émaillés. | 7 à 12 h à 130-140 °C. | *Certains types peuvent être adaptés aux climats tropicaux. Résiste aux huiles minérales à 120 °C.* |
| | Aminoplaste. | Résines urée-formol ou mélamine-formol. | Bobinages tournants à grande vitesse en fils guipés ou émaillés synthétiques. | 2 à 12 h à 130-140 °C. | *Peuvent être adaptés aux climats tropicaux. Certains types ne contiennent pas d'hydrocarbures benzéniques. Résiste aux huiles minérales à 120 °C.* |
| | Polyester. | Résines synthétiques. Acide phtalique. Glycérine. Styrène monomère. | Bobinages demandant un remplissage compact. | Variable suivant le pourcentage de catalyseur. | |
| F | Polyuréthane. Silicone modifié. Polyépoxy. | | Bobinages fixes ou tournants. | 12 h à 150 °C. | *Résistent aux huiles minérales à 120 °C et à l'humidité. Les polyépoxy résistent aux acides et bases.* |
| | Phénolique modifié. | | Bobinages tournants à grande vitesse. | 6 à 8 h à 135 °C<br>1 h à 180 °C | *Résistance mécanique élevée. Ne pas employer sur émail gras.* |
| | Téréphtalique modifié. | | Bobinages fixes ou tournants. | 8 à 10 h à 120 °C<br>5 à 7 h à 140 °C<br>3 à 5 h à 150 °C | *Ne doit pas être mélangé avec d'autres vernis.* |
| H | Silicone. | | Bobinages fixes. | 8 à 16 h à 220-250 °C | *Convient pour les climats tropicaux.* |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **2° VERNIS DE FINITION** | | | |
| A | **Gras.** | Résines. Huiles siccatives. Asphalte. Benzine. | Finition de petits et gros bobinages. | 4 à 12 h à 20 °C. | *Peut servir au vernissage de pièces métalliques. Se ramollit dans l'huile.* |
| | **Cellulosique.** | Nitrocellulose. Résines synthétiques. Pigments. | Finition de petits et gros bobinages. | 30 mn à 20 °C. | *Ne pas utiliser avec des fils émaillés. Peut servir au vernissage de pièces métalliques. Protection des bouts d'arbre.* |
| B | **Oléosynthétique.** | Résines synthétiques. Huiles siccatives. | Convient pour climats tropicaux. | 8 h à 20 °C. | *Très bonne résistance au vieillissement et aux huiles minérales.* |
| | **Oléoglycérophtalique.** | Résines synthétiques. Résines oléoglycérophtaliques. Pigments. | Finition de bobinages déjà imprégnés. | 8 h à 20 °C. | *Résiste à l'eau.* |
| | | **3° VERNIS SPÉCIAUX** | | | |
| A | **Semi-conducteur.** | Résines naturelles. Pigments conducteurs. Alcool éthylique. | Vernis antieffluve pour barres d'alternateurs. | 2 à 3 h à 20 °C. | |
| B | **Antiflash.** | Résines glycérophtaliques. Pigments. | Faces de collecteurs connexions vissées. | 24 h à 20 °C.<br>2 h à 100 °C. | *Peut convenir pour la finition de tout matériel électrique.* |
| B | **Entrecouche.** | Polyester. | Isolation de barres d'alternateur. | Variable suivant catalyseur. | *Convient aussi en haute fréquence et en haute tension.* |
| F | **Entrecouche.** | Epoxy. | Collage et agglomération des enrubannages. | Variable suivant catalyseur. | *Thermodurcissable.* |
| A | **Entrecouche.** | Asphalte. | Collage et agglomération des enrubannages. | 10 h à 110-120 °C. | *Thermoplastique. Conserve sa thermoplasticité dans le temps.* |
| H | **Entrecouche.** | Silicone. | — d° — | 1 h à 250 °C. | *Utilisé aussi pour le scellement des éléments chauffants.* |

TABLEAU VII *(suite)*

| Classe de température | Nature | Constituants | Emploi | Temps et température de traitement | Observations |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **3° VERNIS SPÉCIAUX** *(suite)* | | |
| F | Antiflash. | Epoxy. | Faces de collecteurs. | 12 h à 20 °C. 2 h à 100 °C. | |
| B | Pour tôles magnétiques. | Oléosynthétique. | | 4 h à 120 °C ou 3 mn à 220-250 °C. | |
| B | Pour tôles magnétiques. | Phénolique. | | 1 h-1 h 30 mn à 110-120 °C ou 3-4 mn à 220-250 °C. | |
| B | Collage. | Résines et caoutchouc synthétiques. | Assemblages métal-isolants ou isolants entre eux. Joints. | 30 mn à 20 °C plus 3 h à 120 °C. | *Ne résiste ni à l'huile ni au pyralène.* |
| | | | **4° PRODUITS DE REMPLISSAGE** | | |
| | Compounds à l'asphalte. | Asphalte et brais spéciaux. | Boîtes de jonction, barres d'alternateur, carters de bobinage. | Coulée à 150-180 °C. | *Point de fusion variable de* 100 à 120 °C. |
| B | Polyester. | Résines polyesters et charges minérales. | Protection par enrobage et moulage. | Suivant pourcentage de catalyseur. | *Peut également servir à la réalisation de pièces isolantes moulées.* |
| B | Epoxy. | Résines époxy et charges. | Obturation de fentes et interstices. | 8 à 12 h à 20 °C. | *Dureté élevée. Résistance excellente à la chaleur, à l'humidité, aux solvants.* |
| H | Silicone. | | | 15 h à 20 °C. | |

### *2.264. Evaporation du solvant.*

Le solvant retenu à l'intérieur du bobinage risquerait d'être nuisible ; il faut donc le chasser avant la formation de la croûte superficielle résultant d'une oxydation. L'opération doit donc avoir lieu avec le minimum d'oxygène ; elle se pratique à l'étuve, les ouvertures d'aération fermées, et dure environ une heure. Après ce laps de temps on assure une certaine ventilation afin d'aspirer le solvant.

### *2.265. Formation de la couche superficielle.*

Par modification chimique, les vernis forment à la surface des bobinages une couche protectrice ; celle-ci, sauf indication du constructeur, est réalisée à l'étuve et peut comporter :

— une *oxydation* et, dans ce cas, la circulation d'air nécessaire doit être réglée suivant le volume des pièces et le vernis employé ;

— une *polymérisation*, qui peut être effectuée sans renouveler l'air.

### *2.266. Finition.*

Afin de renforcer la protection des bobinages et de leur donner un bel aspect, une imprégnation doit être suivie par une couche de finition passée au pistolet ou au pinceau. Les vernis employés sèchent à la température ambiante ou aux rayons infra-rouges.

En outre, il convient de débarrasser les parties métalliques des traces de vernis. Certaines d'entre elles s'enlèvent facilement par grattage ; pour d'autres on utilise un solvant approprié.

## 2.27. — IMPRÉGNATION DANS L'AUTOCLAVE

Cet appareil permet d'effectuer toutes les opérations précédentes sur les machines de puissance moyenne — quoique certains ateliers en possèdent de dimensions importantes. Malheureusement le coût élevé de l'installation limite son emploi.

L'autoclave permet une imprégnation sous vide et sous pression, ce qui est la façon la plus efficace d'assurer la pénétration du liquide au cœur du bobinage.

L'appareillage comprend (*fig.* 10) :

— une *cuve en tôle d'acier* à double paroi où s'effectuent toutes les phases de l'imprégnation, les pièces étant posées sur une tôle perforée ; cette cuve est chauffée par circulation de vapeur ou de liquide chaud et peut être calorifugée ;

— un *réservoir* à vernis en contrebas de la cuve, celui-ci pouvant être chauffé électriquement ou au gaz ;

— un *compresseur* pouvant également effectuer le vide de l'autoclave ;

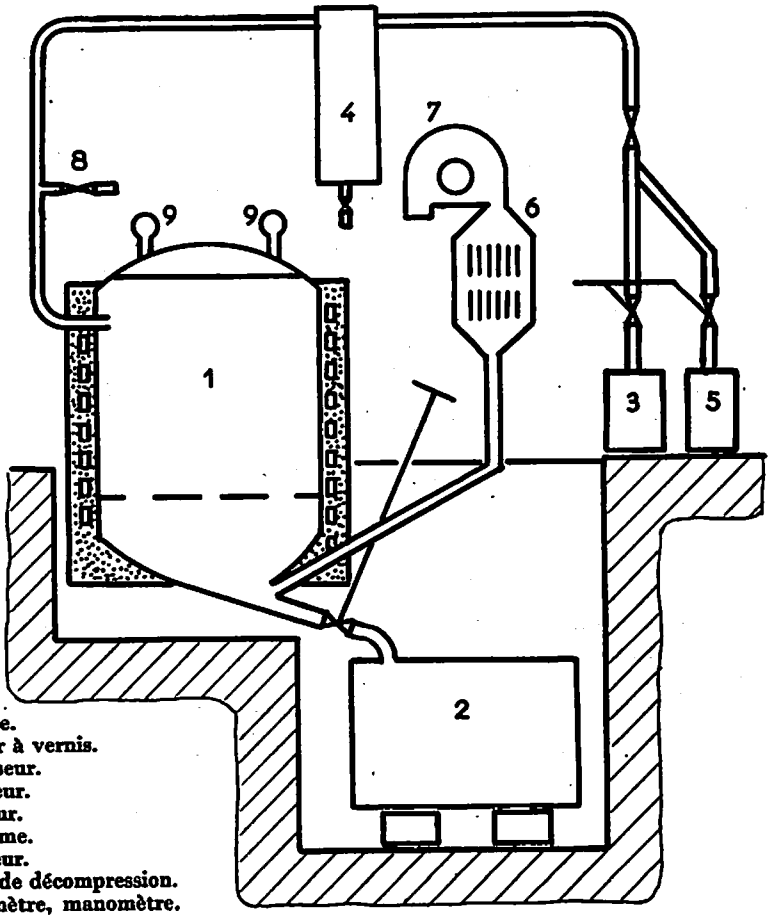
— un *condenseur* pour la récupération des solvants ;

— un *déshuileur* ;

— un *aérotherme* et un ventilateur qui permettent d'envoyer de l'air à la température ambiante, ou réchauffé, pendant l'évacuation du solvant, ou pour effectuer l'oxydation du vernis.

L'ensemble est complété par les appareils de contrôle, la robinetterie et la tuyauterie de liaison.

*Fig.* 10.




1. Autoclave.
2. Réservoir à vernis.
3. Compresseur.
4. Condenseur.
5. Déshuileur.
6. Aérotherme.
7. Ventilateur.
8. Robinet de décompression.
9. Thermomètre, manomètre.

**Fonctionnement.** — Il peut se résumer ainsi :

— *introduire* les pièces à chauffer dans l'autoclave puis fermer soigneusement celui-ci ;

— *élever* lentement *la température* de la cuve et pratiquer un vide partiel ;

— *étuver à la température* désirée et pendant le temps nécessaire ;

— *couper le chauffage* et laisser la température descendre à 40 °C. Certains autoclaves possèdent un système de refroidissement ;

— *aspirer le vernis* lentement. Celui-ci doit complètement immerger les pièces à imprégner ;

— *maintenir le vide* pendant 30 minutes ;

— *ouvrir lentement* le robinet de décompression de façon à chasser le vide, puis le fermer et appliquer une pression de 2 à 3 bars pendant une heure ;

— *ouvrir lentement* le robinet précédent et renvoyer sous faible pression le vernis dans son réservoir ;

— *effectuer l'égouttage* ;

— *procéder* ensuite à l'*évacuation* des solvants en faisant fonctionner le ventilateur et l'aérotherme ;

— *provoquer* la formation de la croûte superficielle en chauffant à 120 °C pendant plusieurs heures, avec ventilation s'il s'agit d'effectuer une oxydation ou sans brassage d'air dans le cas d'une polymérisation.

Pour ne pas immobiliser l'autoclave, le séchage des enroulements et la formation de la couche de surface peuvent être effectués à l'étuve atmosphérique.

## 2.3. — ÉQUILIBRAGE DES ROTORS

### 2.31. — ORIGINE DES VIBRATIONS DANS LES MACHINES TOURNANTES

*Dans les organes en rotation*, des forces variables prennent naissance lorsque l'axe de rotation n'est pas un axe principal d'inertie ; elles sont appliquées aux paliers. Leur cause la plus fréquente est un défaut d'équilibrage des parties tournantes provoqué par des dissymétries de montage, l'hétérogénéité de la matière, des inégalités de façonnage.

*Les actions magnétiques* entre stator et rotor peuvent également conduire à des vibrations s'il y a des attractions dues à des irrégularités du champ magnétique ; défaut d'entrefer, denture des encoches, dissymétrie du bobinage en sont les causes principales.

*Des forces extérieures* peuvent s'exercer sur le rotor : accouplement mal aligné, tension exagérée des courroies.

Ces forces sont transmises au bâti par les paliers et provoquent une usure prématurée des coussinets. Elles engendrent également des vibrations qui sont toujours néfastes pour la tenue des assemblages mécaniques.

L'ensemble formé par les paliers, la carcasse et le socle est élastique. Si, pour des raisons quelconques, cet ensemble est flexible, les vibrations peuvent être amplifiées. La flexibilité de l'ensemble peut provenir de causes très diverses telles que : faible moment d'inertie du socle, élasticité des flasques et des paliers, manque de rigidité de la carcasse.

## 2.32. — TRANSMISSION DES VIBRATIONS

Considérons une masse M montée sur un ressort pour lequel une force F provoque une flèche égale à l'unité. L'ensemble a une fréquence d'oscillation libre très sensiblement égale à :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{F}{M}}$$

Si nous montons maintenant cet ensemble sur des supports élastiques, nous constatons une modification des propriétés oscillatoires du système.
Soient :

$f_1$ la fréquence de la force $F_1$ s'exerçant sur la masse M ;

$f_2$ la fréquence propre d'oscillation du nouveau système masse-support-ressort ;

$F_2$ la force transmise au bâti supportant l'ensemble.

On constate que le rapport $F_2/F_1$ diminue notablement si le support est suffisamment flexible et si le bâti a une masse suffisante pour que $f_2$ soit inférieur à $f_1$. Dans la pratique, on cherche à obtenir un rapport $f_1/f_2$ supérieur à 2,5. Avec des ressorts ou des blocs en caoutchouc, la période fondamentale varie de 0,1 à 0,3 s. Les supports en caoutchouc présentent l'avantage de ne pas transmettre les vibrations de fréquence acoustique supérieure à 500 qui peuvent passer dans les ressorts, et d'absorber une partie importante de l'énergie vibratoire.

## 2.33. — DÉSÉQUILIBRE

Supposons un rotor divisé en deux parties par une section transversale et appelons $G_1$ et $G_2$ les centres de gravité respectifs (*fig.* 11). Trois cas peuvent se présenter :

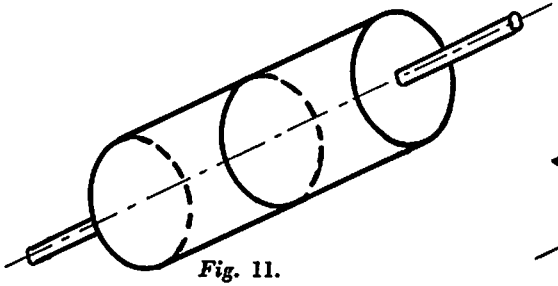


*Fig.* 11.

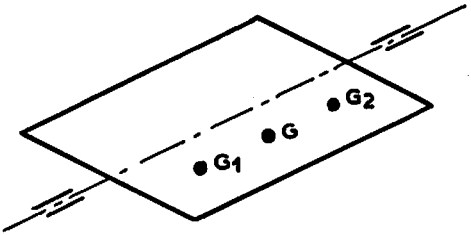



*Fig.* 12.

***2.331. $G_1$ et $G_2$ sont situés dans le même plan axial et du même côté de l'axe*** (*fig.* 12).

Il s'ensuit que le centre de gravité du rotor entier se trouve, lui aussi, dans ce même plan, mais à une certaine distance de l'axe. Ce type de déséquilibre constitue un déséquilibre statique. Il est facile à déceler en faisant reposer le rotor par les extrémités de son arbre sur des rails parallèles disposés dans un même plan horizontal. Le rotor tourne jusqu'à ce que G soit dans le plan vertical passant par l'axe, et au-dessous de l'axe (*fig.* 13).

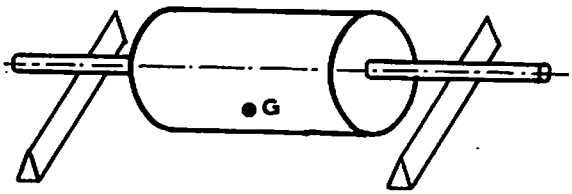



*Fig.* 13.

***2.332. $G_1$ et $G_2$ sont situés dans le même plan axial mais de part et d'autre de l'axe, le centre de gravité G du rotor entier se trouvant sur l'axe.***

Il n'y a pas de déséquilibre statique et l'équilibre sur les rails est donc indifférent.

En revanche, pendant la rotation, deux forces centrifuges vont apparaître et elles constituent un couple qui va tourner avec le rotor. On se trouve en présence d'un déséquilibre dynamique (*fig.* 14).

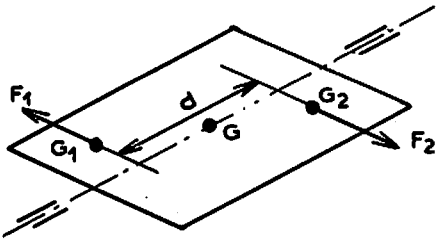



*Fig.* 14.

**2.333.** ***$G_1$ et $G_2$ ne se trouvent pas dans le même plan axial*** (fig. 15).

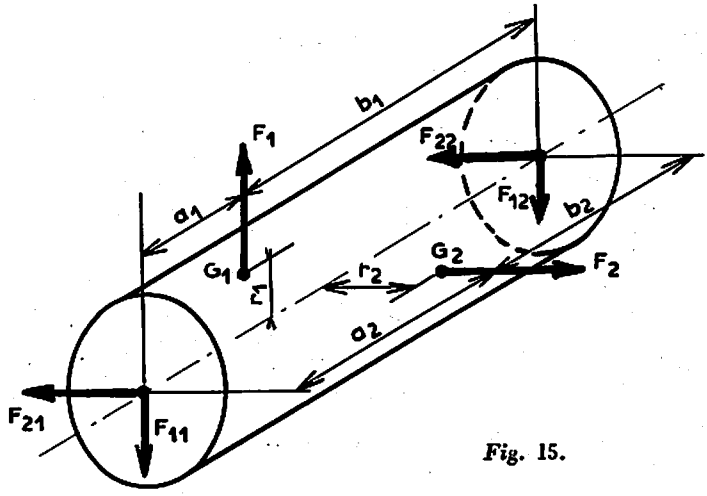



*Fig.* 15.

Ce cas correspond à un déséquilibre statique et un déséquilibre dynamique simultanés. C'est celui qui se rencontre le plus souvent en pratique.

Les forces centrifuges ont pour valeur :

$$F_1 = M_1\omega^2 r_1 \qquad F_2 = M_2\omega^2 r_2$$

L'opération d'équilibrage aura pour effet d'opposer à ces forces centrifuges des forces antagonistes de telle sorte que le centre de gravité du rotor soit sur l'axe et que l'ensemble forme un système en équilibre.

## 2.34. — PRINCIPE DE L'ÉQUILIBRAGE

Considérons deux sections droites quelconques sur le rotor, que nous appellerons plans d'équilibrage, et dans lesquelles nous nous proposons de disposer des masses d'équilibrage. Les sections peuvent être les faces terminales, mais ce n'est nullement obligatoire.

La force $F_1$ peut être équilibrée par deux forces $F_{11}$ et $F_{12}$ telles que :

$$F_{11} + F_{12} = F_1$$
$$a_1 \times F_{11} - b_1 \times F_{12} = 0$$

La force $F_2$ peut également être équilibrée par deux forces $F_{21}$ et $F_{22}$ telles que :

$$F_{21} + F_{22} = F_2$$
$$-a_2 \times F_{21} + b_2 \times F_{22} = 0$$

La résultante de $F_{11}$ et $F_{21}$ dans le premier plan d'équilibrage et la résultante de $F_{12}$ et de $F_{22}$ dans le second plan d'équilibrage déterminent la position et le poids des masses d'équilibrage à disposer dans ces plans pour obtenir l'équilibrage.

## 2.35. — CONDUITE DE L'ÉQUILIBRAGE

Il existe des machines à équilibrer, d'une organisation assez complexe, qui donnent par simple lecture la position et le poids des masses d'équilibrage. Il est cependant possible de procéder à l'équilibrage avec des dispositifs très simples. Quel que soit le système employé, le principe consiste à faire coïncider la période élastique propre du support sur lequel repose le rotor avec la période cinématique, de façon à amplifier les vibrations résultant du déséquilibre.

A cet effet, le rotor est monté sur des paliers souples, par exemple de simples vés en bois munis d'une plaque de plomb et reposant sur des plaques en caoutchouc. Le rotor est entraîné au-delà de sa vitesse critique supposée, puis il est abandonné à lui-même. Il ralentit progressivement et, au passage de la vitesse critique, de fortes élongations se produisent, dans un plan vertical sous l'effet des balourds dynamiques, puis dans un plan horizontal sous l'effet des balourds statiques. Le faux rond maximal est décelé en approchant de l'arbre un crayon gras ; on obtient ainsi une trace sur l'arbre. La même opération est répétée en inversant le sens de rotation. Les masses d'équilibrage destinées à compenser les balourds dynamiques sont à disposer dans le plan axial passant par la bissectrice de l'angle formé par les queues des traces :

— *du côté des queues de traces*, dans le plan d'équilibre situé à proximité du palier sur lequel ont été déterminées les traces (*fig.* 16) ;

— *du côté opposé*, dans le plan d'équilibrage situé à proximité du palier opposé (*fig.* 17).

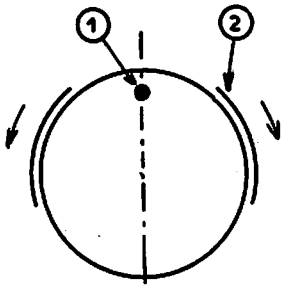



*Fig.* 16.
1. Position du balourd.
2. Queue de trace.

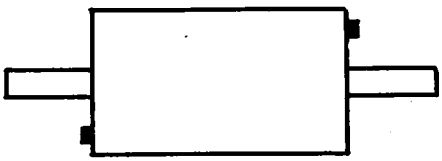


*Fig.* 17.

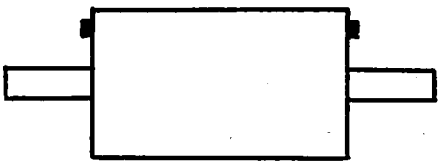


*Fig.* 18.

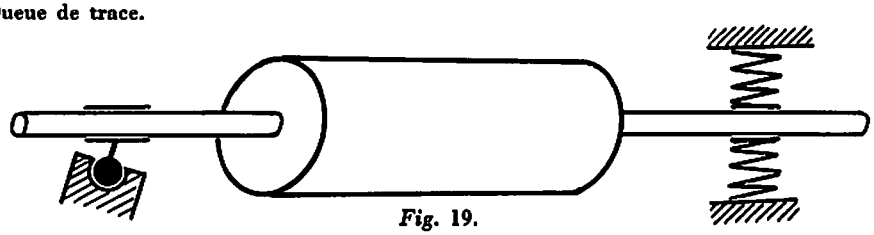


*Fig.* 19.

La compensation des balourds statiques s'effectue par des masses d'équilibrage disposées dans les deux plans d'équilibrage, d'un même côté de l'axe, ou encore par des cales d'encoches en laiton (*fig.* 18).

Dans tous les cas, la valeur des masses doit être déterminée par tâtonnements.

Il est possible de réaliser en une seule opération l'équilibrage statique et dynamique du rotor. A cet effet, un des paliers est monté sur un appui articulé (rotule par exemple), tandis que l'autre, maintenu par l'intermédiaire de ressorts, peut osciller dans un plan axial horizontal (*fig.* 19). On commence par déterminer le balourd sur le palier oscillant en procédant de la façon suivante :

- le rotor est lancé au-dessus de sa vitesse critique supposée, puis on le laisse ralentir ;
- au moment de la résonance, on détermine le faux rond sur l'arbre avec un crayon gras ;
- on recommence la même opération en inversant le sens de rotation. Comme précédemment, la masse d'équilibrage est à fixer sur le diamètre passant par la bissectrice de l'angle formé par les queues des traces, du côté de ces queues.

On détermine ensuite le balourd sur le deuxième palier. Le palier déjà équilibré est alors monté sur rotule et le palier à équilibrer est monté oscillant. L'ordre des opérations reste identique.

## 2.36. — ÉQUILIBRAGE SUR PALIERS RIGIDES

Pour les rotors dont la masse dépasse quelques dizaines de tonnes, la construction d'une machine à équilibrer présente des difficultés. Aussi, les rotors sont équilibrés sur des paliers identiques aux paliers réels. Les amplitudes des vibrations des paliers sont relevées sur des appareils spéciaux et les compensations des balourds n'offrent rien de particulier.

L'équilibrage est une opération très importante pour les rotors de turbo-alternateurs. Actuellement, l'Electricité de France impose une amplitude crête à crête maximale de quinze microns pour les paliers de turbo-alternateurs.