

## 1. CONTEXTE

Les machines à bagues (synchrones et asynchrones), ainsi que tous les systèmes rotatifs utilisant des bagues collectrices, font appel à des technologies différentes de celles utilisées pour les moteurs à courant continu. Les exigences technologiques sont donc différentes.

Le choix judicieux d'une nuance de balais est en conséquence subordonné à une étude intégrant principalement les échauffements et les moyens disponibles offerts par la conception de la machine pour dissiper de manière efficace la chaleur générée par le fonctionnement des balais sur les bagues.

On veillera à choisir des nuances qui contiennent une quantité variable de métal (généralement du cuivre ou de l'argent), assurant un service "normal" sur les bagues collectrices, afin de transporter des courants élevés, de réduire les chutes de tension au contact (pertes électriques) et d'améliorer l'échange thermique. Il existe une très large gamme de nuances de balais pour bagues, dans lesquelles la teneur en métal peut varier de 0 à 90%.

## 2. L'ÉCHAUFFEMENT DES BAGUES

La première étape nécessaire pour s'assurer qu'une nuance est correctement adaptée est de considérer que l'ensemble des bagues collectrices a atteint un équilibre de température.

Lorsque la température du système augmente anormalement, le risque d'usure excessive des bagues collectrices et des balais augmente également. Cela peut conduire à des effets secondaires, comme la formation d'étincelles entre les balais et la bague ou d'arcs entre les bagues (phase à phase ou phase à terre).

L'organigramme de la figure 1 ci-dessous montre à quel point l'élévation de température des bagues collectrices occupe une place centrale dans l'état général d'une machine (du fait des différents paramètres en jeu).

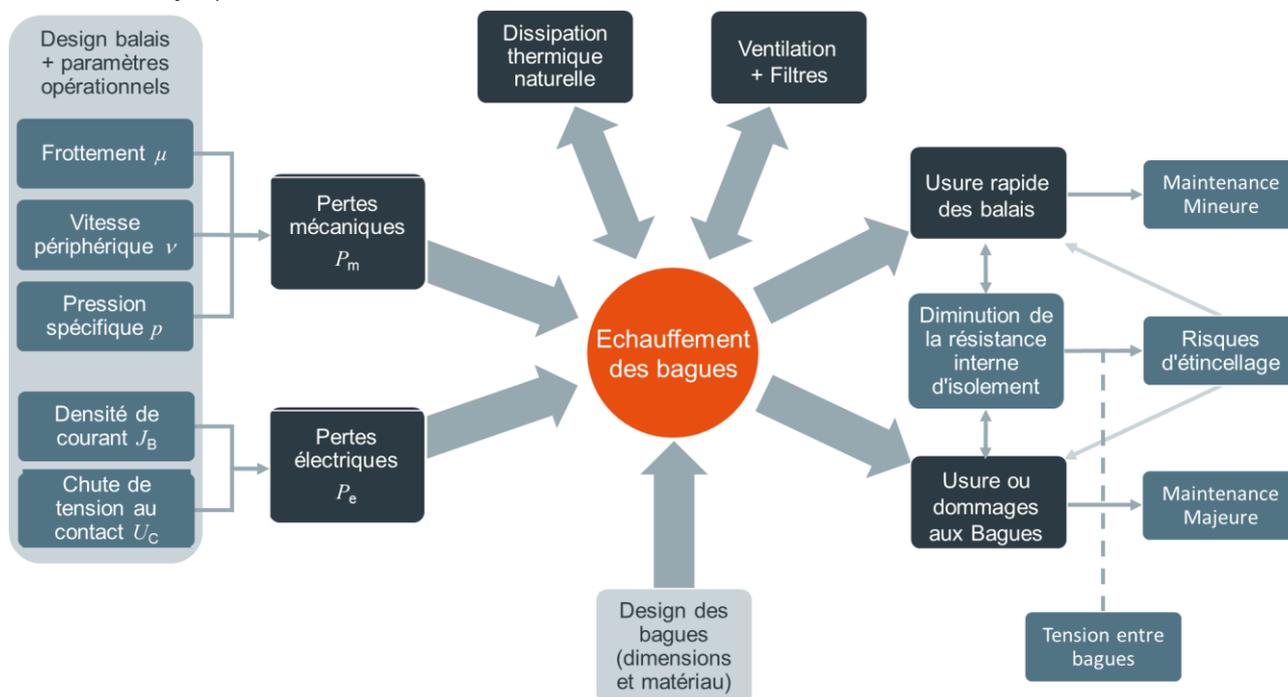


Figure 1 – Interactions entre le design de la machine et les paramètres opérationnels et leurs effets sur l'échauffement des bagues et l'état général de la machine

PROPRIÉTÉ MERSEN

NOTE : Une maintenance Majeure peut impliquer le remplacement du baguier entier, ainsi que d'autres composants (couronne porte-balais, porte-balais, etc.).

Nous allons développer dans ce document 2 aspects : **comment sélectionner la nuance de balais** et **l'influence du design du jeu de bagues** (bagues de configuration des balais).

### 3. CHOIX DES NUANCES DES BALAIS

La nuance des balais affecte les pertes totales aux balais ( $P_m + P_e$ ) au travers de son **coefficient de frottement** et de sa **chute de tension**. Pour plus d'informations sur les calculs de pertes, merci de vous référer à la TDS-05.

Dans des conditions normales d'utilisation, le frottement varie peu d'une nuance à l'autre (proportion d'environ 2 à 1), alors que les chutes de tension peuvent varier dans des rapports de 25 à 1.

La courbe ci-dessous montre les proportions dans lesquelles on peut théoriquement réduire les pertes électriques d'un moteur avec des nuances métal-graphite.

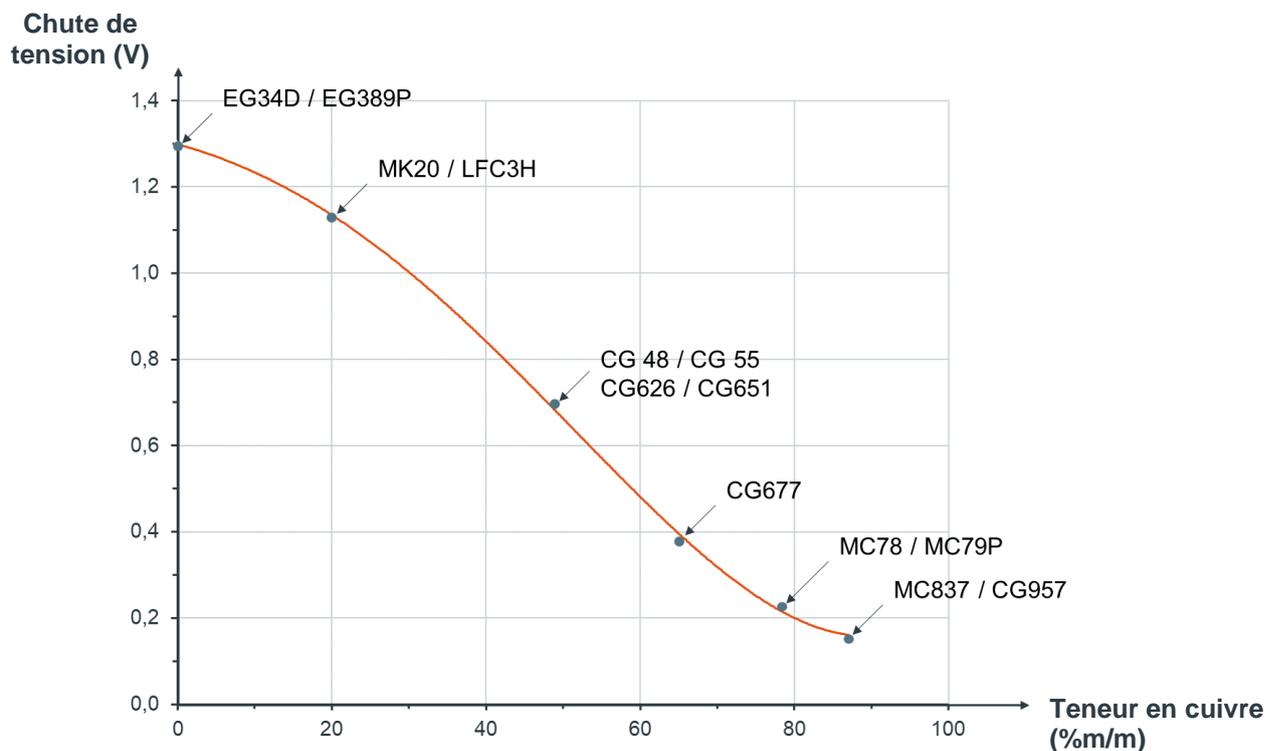


Figure 2 – Chute de tension au balai ( $U_B$ , in V) en fonction de la teneur en métal de la nuance pour une densité de courant  $J_B$  égale à  $10 \text{ A/cm}^2$ , une vitesse périphérique  $v_p$  de  $15 \text{ m/s}$  et une pression spécifique  $P$  de  $18 \text{ kPa}$  ( $= 180 \text{ cN/cm}^2 = 183\text{g/cm}^2$ ).

Cet avantage est évident pour les machines lentes à forte charge. Néanmoins, l'utilisation de nuances métal-graphite implique :

- un frottement plus important, donc une usure mécanique, de sorte que la vitesse périphérique de la machine doit être réduite si l'on veut augmenter la teneur en métal,
- la poussière d'usure contient plus de cuivre, ce qui signifie qu'elles sont plus conductrices et que le risque de court-circuit est accru. Ces qualités ne doivent donc pas être utilisées sur des machines à haute tension et complètement fermées.

PROPRIÉTÉ MERSEN

La figure 3 illustre **la plage de densité de courant et la limite maximale de la vitesse** en fonction de la teneur en métal (cette figure ne donne que des valeurs indicatives).

En outre, les deux règles suivantes doivent être prises en compte dans la mesure du possible :

- Pour les machines fermées, les pertes totales par balai ( $P_m + P_e$ ) par unité de surface des bagues collectrices doivent être inférieures à  $1 \text{ W/cm}^2$ .
- Pour les machines à ventilation ouverte, la limite dépend beaucoup du mode de ventilation et de son efficacité ; en première approximation, elle peut être fixée à  $1,5 \text{ W/cm}^2$ .

En particulier pour les machines fermées, le balai le plus approprié est celui qui produit le moins de poussière conductrice (avec la plus faible teneur en métal) en raison de l'usure, à condition que ses pertes totales restent inférieures à la valeur indiquée ci-dessus.

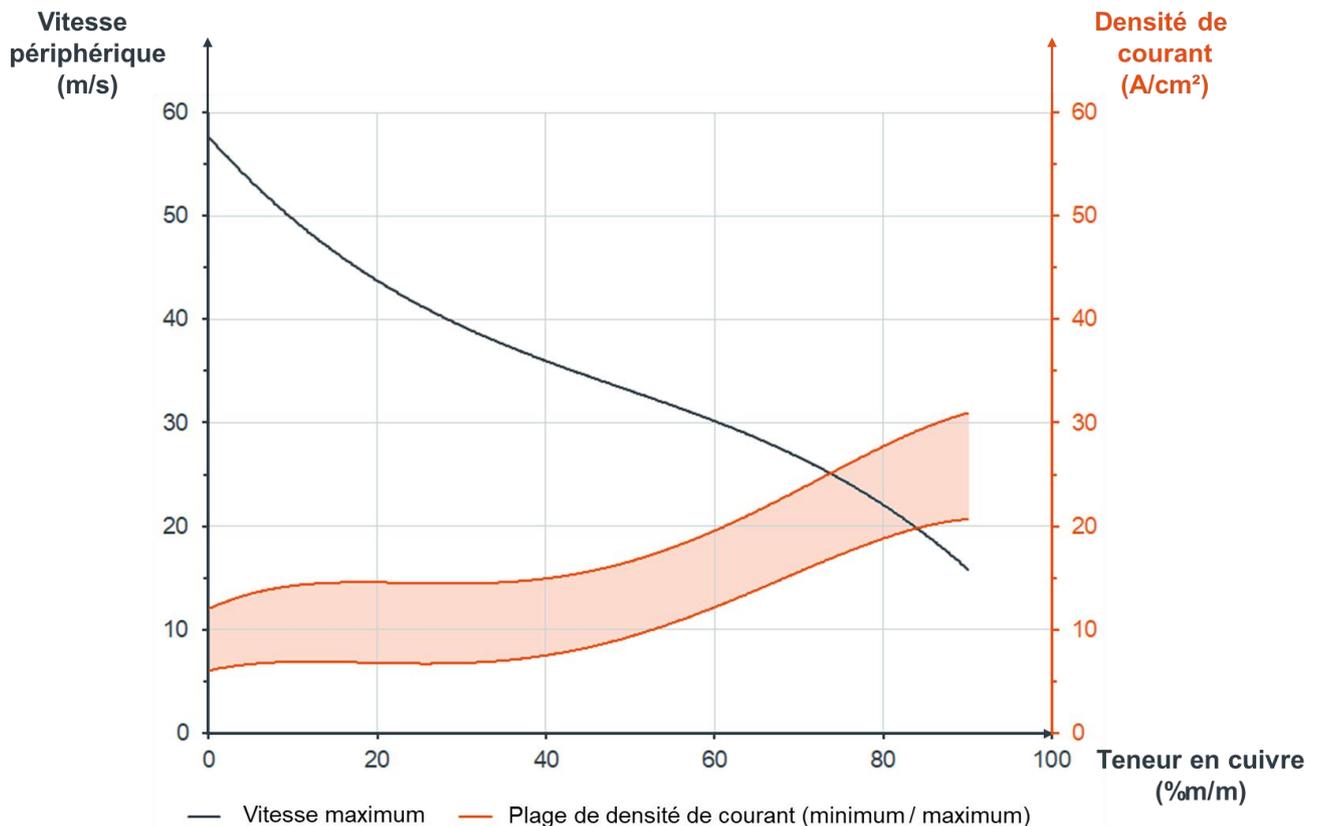


Figure 3 – Vitesse périphérique maximum acceptable et plage de densité de courant recommandées en fonction du taux de cuivre en % massique.

## 4. DIMENSIONNEMENT DU JEU DE BAGUES

Le choix du balai adapté à une application ne constitue qu'une partie de la solution pour obtenir les meilleures performances du balai et de la bague collectrice. Les **dimensions des porte-balais et des bagues**, développées ci-dessous, sont tout aussi essentielles.

### COEFFICIENT $S$ ( $S$ FACTOR)

Sur la base de notre expérience, nous avons défini et utilisé un facteur de conception clé, appelé **coefficient  $S$**  ( $S$  pour surfacique), qui peut être considéré comme l'**indice de dissipation thermique** d'une machine.

Ce coefficient  $S$  est utile pour **évaluer rapidement le degré de difficulté** d'une machine à bagues collectrices et pour guider la sélection d'une qualité de brosse pour l'application considérée.

Il est calculé comme étant le rapport entre la surface de la bague collectrice et le courant nominal :

$$S = \frac{\pi \times D \times L}{I}$$

Où:

$S$  est exprimé en  $\text{cm}^2/\text{A}$ ,

$D$  est le diamètre des bagues, en cm,

$L$  est la largeur des bagues, en cm,

$I$  est le courant nominal par bague ( $I$  rotor), en A.

Lorsque  $S$  diminue, les risques d'échauffement deviennent plus importants, les pertes totales doivent être réduites par un choix judicieux de la nuance de balai, ainsi que par une ventilation appropriée (voir TDS-12).

Le tableau 1 suivant donne des **valeurs minimales indicatives du coefficient  $S$**  correspondant aux principales nuances de Mersen pour les bagues de machines fermées et ventilées. Elles ont été déterminées à partir d'observations et d'essais pratiques sur des bagues en bronze.

Coefficient $S$ par configuration de machine		Nuance	Teneur en métal
Ouverte ou ventilée	Fermée		
> 1	> 1,2	EG34D EG389P	0%
> 0,8	> 1	M9426 MK20 LFC3H CG48 CG626 CG55 CG651	5%-50%
> 0,6	> 0,9	CG677	55-80%
> 0,5	> 0,7	MC79P MC78 CG957 MC837	≥ 80%

Table 1 – Principales nuances et coefficient  $S$  pour différentes configurations avec des bagues bronze

Les pertes avec les bagues en acier standard ou en acier inoxydable sont toujours plus élevées que sur les bagues en bronze. Ainsi, les valeurs minimales de  $S$  dans le tableau ci-dessus doivent être augmentées de 10 à 20%.

**REMARQUE :** Lorsque le facteur  $S$  est trop faible, en d'autres termes  $< 0,5$ , une combinaison spécifique entre la conception du baguier, en particulier la couronne et la ventilation, et la nuance des balais devra être soigneusement choisie. Nous recommandons vivement de tester la configuration pour la valider.

## TAUX DE COUVERTURE

Il ressort de ce qui précède que la principale préoccupation pour les machines à bagues est l'échange de chaleur ou la dissipation de la chaleur due aux pertes. Il en résulte que nous devons considérer deux autres paramètres pour donner une idée assez précise de la capacité de la conception de la machine à dissiper les pertes dues au fonctionnement des balais.

Le **concept de taux de couverture** est complémentaire et indissociable du concept de coefficient  $S$ .

### Taux de couverture périphérique $\tau_p$

Cette grandeur définit le **ratio du périmètre de bague couvert par les balais**, et est exprimé en %:

$$\tau_p = \frac{N \times t}{\pi \times D} \times 100$$

où:

$t$  est la dimension tangentielle du balai, en mm

$D$  est le diamètre de la bague, en mm

$N$  est le nombre de balais par piste.

### Taux de couverture global $\tau_g$

Il définit le **ratio de la surface de bague couverte par les balais** sur la surface totale de la bague, et est exprimé en %:

$$\tau_g = \frac{N \times t \times a}{\pi \times D \times L} \times 100$$

où:

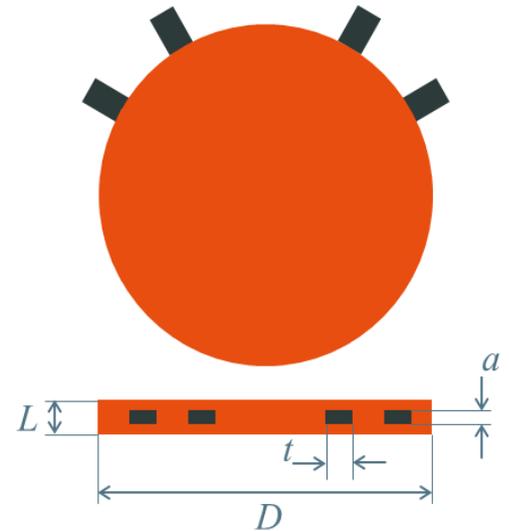
$t$  est la dimension tangentielle du balai, en mm

$a$  est la dimension axiale du balai, en mm

$D$  est le diamètre de la bague, en mm

$L$  est la largeur de la bague, en mm

$N$  est le nombre de balais par piste.



Notre expérience a démontré que :

Lorsque  $\tau_p < 15 \%$ , la configuration est optimum.

Si  $15 \% < \tau_p < 20 \%$ , il y a un **risque d'augmentation anormale de température**.

Lorsque  $\tau_p > 20 \%$  : il y aura des **problèmes de fonctionnement des bagues, des balais et de l'ensemble complet**.

Les effets attendus seront identiques lorsque  $\tau_g > 15 \%$ .

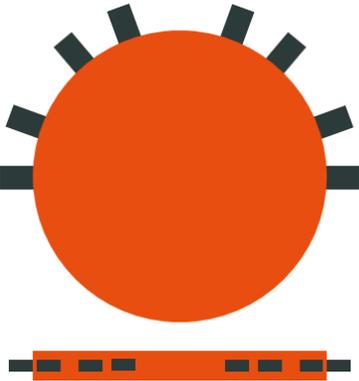
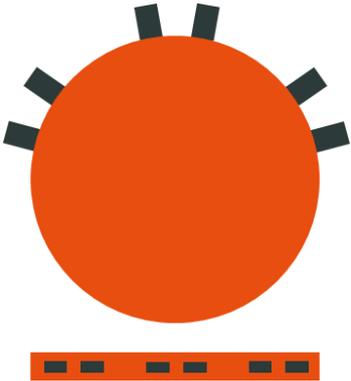
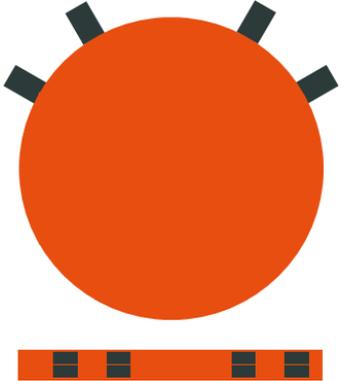
On peut comprendre à partir des formules ci-dessus qu'une adaptation des dimensions et du nombre de balais peut donc être réalisée pour réduire le risque d'échauffement (pour des dimensions données de la bague collectrice).

REMARQUE : Une attention particulière doit être accordée à la modification du nombre de balais et/ou de leurs dimensions. Comme la densité de courant dans les balais se trouvera modifiée, le choix de la nuance doit être confirmé ou modifié.

PROPRIÉTÉ MERSEN

## Exemples de calcul :

Dimensions des balais :  $t \times a = 40 \times 20$  (mm)Dimensions des bagues :  $D = 500$ mm et  $L = 50$ mm

<p>Configuration initiale : 8 balais sur 1 piste.</p>  <p><math>\tau_p = 20.4\%</math> et <math>\tau_g = 8.2\%</math> ⇒ Problèmes d'échauffements attendus sur l'ensemble du système.</p>	<p>Configuration 1 : Diminution du nombre de balais à 6.</p>  <p><math>\tau_p = 15.3\%</math> et <math>\tau_g = 6.1\%</math> ⇒ <math>\tau_p</math> atteint la première limite, le système pourrait fonctionner correctement. ⇒ Vérifier cependant la nuance de balai (la densité de courant augmente de 33%).</p>	<p>Configuration 2 : Arrangement des 8 balais sur 2 pistes.</p>  <p><math>\tau_p = 10.2\%</math> et <math>\tau_g = 8.1\%</math> ⇒ Pas d'effet prévu (pourvu que le coefficient <math>S</math> soit en accord avec les valeurs du Tableau 1).</p>
--	--	---

NOTE : En outre, même si le facteur  $S$  se situe dans les valeurs indiquées dans le tableau 1 et que le taux de couverture est inférieur à 15%, il faut encore déterminer la position des balais et la conception de la ventilation, de manière à ce que les balais fonctionnent sans problème.

En pratique, le choix d'une nuance de balais pour bagues collectrices doit prendre en compte :

- les **limites des paramètres de fonctionnement recommandés** (cf. Figure 3), qui sont indiquées dans le Guide technique Mersen sur les balais pour moteurs et générateurs (pages 14 et 15),
- les **pertes totales** au contact entre la bague et les balais pour la charge et la vitesse nominale du moteur,
- le **type (ouvert ou fermé) et la ventilation** (conception, vitesse, débit d'air...) de la machine,
- la capacité du baguier à dissiper la chaleur liée aux pertes, par un calcul du **coefficient  $S$  et des taux de couverture**.

## HELIÇAGE DES BAGUES

Des rainures hélicoïdales sont utilisées sur les bagues collectrices pour **améliorer la répartition du courant entre les balais**. Cela a été expliqué par le fait que, lors de chaque révolution, une partie de la surface de contact des balais est inopérante pendant un certain (petit) laps de temps, ce qui oblige le courant à passer par une surface plus petite.

PROPRIÉTÉ MERSEN

Un autre effet induit est l'amélioration du refroidissement dû à la circulation d'air à l'intérieur des rainures. En outre, cela permet de réduire la couche d'air piégée au contact entre le balai et la bague.

Cependant, la présence d'une rainure hélicoïdale peut affecter la circulation de l'air autour du système balai/bague, en particulier lorsqu'il est fermé.

### Pas

**La dimension de la rainure** (largeur et profondeur) **et le pas doivent être soigneusement choisis** pour optimiser les pertes thermiques.

Bien qu'il n'y ait pas d'unanimité sur le dimensionnement des rainures, nous pouvons indiquer une plage dimensionnelle utilisée couramment:

- le pas peut varier de 8 à 25 mm,
- la largeur de la rainure varie de 2 à 5 mm,
- la profondeur est généralement comprise entre 3 et 4 mm (plus ou moins égale à la largeur de la rainure).

Pour assurer un bon fonctionnement du balai, **deux conditions importantes** doivent être remplies :

- la **dimension axiale du balai doit être un multiple du pas** de la rainure.
- la **surface réelle** couverte par le balai avec une bague rainurée **ne doit pas être inférieure à 60%** de la surface couverte par une bague lisse.

Exemple : Un balai avec  $a = 25$  mm s'adaptera à une bague rainurée avec un pas  $h = 12,5$  mm. Dans ce cas, deux rainures seront toujours présentes sous la surface de contact du balai.

Lorsque la première règle n'est pas respectée, la surface de contact réelle de chaque balai avec la bague, ainsi que la pression spécifique au contact, oscillent entre deux limites. Par conséquent, le courant de chaque balai variera aussi périodiquement. La surface de contact des balais peut alors présenter un aspect rainuré, comme le montre la photo ci-contre.

En outre, en dessous d'un rapport de contact de 60%, une évaluation de la stabilité et des paramètres de fonctionnement des balais sera étudiée. En particulier, on remarquera que la pression de contact réelle peut être supérieure à la plage recommandée pour la nuance considérée.



### Influence de la rainure hélicoïdale sur les paramètres de fonctionnement des balais

Bien que la rainure hélicoïdale aide à dissiper la chaleur grâce à la circulation d'air, il faut noter qu'elle peut affecter le fonctionnement du balai. En effet, comme la surface de contact est réduite, la pression spécifique augmente, ce qui accroît la contrainte sur le matériau et augmente l'usure du balai.

C'est la raison pour laquelle il est fortement recommandé **de prendre en compte la dimension de la rainure hélicoïdale lors du calcul des pertes mécaniques** des balais.

Il faut noter que la densité de courant au contact augmente, mais pas la densité de courant à l'intérieur de la section du balai. Comme les pertes électriques sont calculées par la chute de tension au contact et le courant global, il est généralement admis que les pertes électriques ne sont pas modifiées par l'existence de la rainure hélicoïdale.

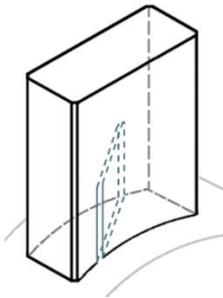
NOTE : Une grande attention doit être portée à l'usinage des rainures hélicoïdales. Un chanfrein de 45° est recommandé. Se référer à notre fiche technique TDS-03.

PROPRIÉTÉ MERSEN

## Balais fendus

En l'absence de rainure hélicoïdale (c'est-à-dire de bague lisse), un balai à **face frottante fendue**, ou rainurée, est recommandé pour éliminer la couche d'air. Il est réalisé en découpant une ou deux rainures, appelées traits de scie, au travers de sa section à partir de sa surface de contact (sur sa hauteur, avec un angle spécifique – voir photos ci-dessous).

NOTE : un tel balai n'est pas recommandé dans le cas d'une bague collectrice rainurée.



### REMARQUE GÉNÉRALE :

Cette approche n'est pas nouvelle, cependant nous rencontrons toujours des problèmes d'échauffement anormaux dus à une mauvaise conception des bagues, car le principe est trop souvent oublié ou inconnu par le concepteur du jeu de bagues. Une fois la machine construite, il est généralement impossible de résoudre ces problèmes, car aucun balai ne peut résister aux conditions rencontrées.

Ainsi, les paramètres simples et rapides à calculer exposés ci-dessus doivent être considérés lors de la conception des jeux de bagues afin de s'assurer que les dimensions permettront un fonctionnement satisfaisant.

Mersen recommande vivement de procéder à une simulation numérique et/ou à des essais en laboratoire avant de valider la conception d'un jeu de bagues.

### Documents cités :

Guide Technique : Balais pour moteurs et générateurs.

Fiches Techniques Mersen PTT :

TDS-03 : Chanfreinage des arêtes

TDS-05 : Pertes dans les balais

TDS-12 : Ventilation

## SERVICES MERSEN



Bénéficiez des connaissances et de l'expérience des experts Mersen pour tous vos besoins d'expertise moteur, de maintenance ou de formation :

- Expertise des moteurs sur site (diagnostic de l'état de fonctionnement de vos machines)
- Examen complet des machines
- Expertise électrique machine pour résoudre des problèmes tels que par exemple :
  - Marques d'origine électrique sur les lames des collecteurs, les bagues ou les balais
  - Etincelage
  - Vibrations
  - Problèmes de répartition de courant
  - Symétrie machine
- Analyse de l'environnement machine

Nous offrons un grand choix de **formations**, n'hésitez pas à nous contacter, nos experts vous proposeront une solution d'apprentissage personnalisée qui correspond à vos besoins.

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif et ne sauraient engager la responsabilité de Mersen pour quelque cause que ce soit. Toute copie, reproduction ou traduction, intégralement ou partiellement, de ces informations est interdite sans l'accord écrit préalable de Mersen. En outre, en raison de l'évolution constante des techniques et des normes applicables, Mersen s'autorise à modifier à tout moment les caractéristiques et spécifications de ses produits telles que décrites dans le présent document.

Contact : [info.ptt@mersen.com](mailto:info.ptt@mersen.com)

PROPRIÉTÉ MERSEN

PTT-TDS20-FR-2202