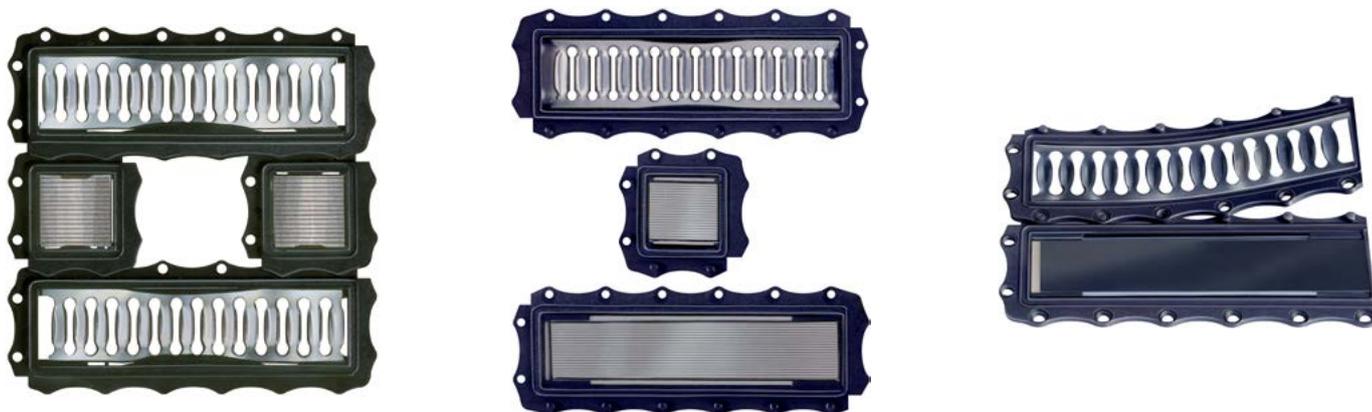


# Comportement des connexions vissées de barres conductrices sans traitement de surface

avec ou sans élément de connexion MC-SEALconTACT

---



Réduction des pertes électriques, extension de la durée de vie et amélioration de la sécurité de l'installation par utilisation de l'élément de connexion MC-SEALconTACT

---

## Sommaire

<b>1.</b>	<b>Données du problème</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Analyse et description des connexions vissées de barres conductrices</b>	<b>3</b>
2.1.	Résistance de jonction $R_v$	3
2.1.1.	Résistance propre $R_b$	3
2.1.2.	Résistance d'étranglement $R_e$	3
2.1.3.	Résistance d'oxydation $R_f$	3
2.1.4.	Résistance de passage $R_{\bar{u}}$	3
2.2.	Résistance de la barre $R_{Sch}$	3
2.3.	Facteur de résistance $k_u$	4
2.3.1.	Facteur de résistance minimum	4
2.4.	Grandeurs influant sur la résistance de jonction $R_v$ et le facteur de résistance $k_u$	4
2.4.1.	Résistance d'étranglement $R_e$ et résistance d'oxydation $R_f$	4
2.4.2.	Formation de couches d'oxydes	4
2.4.3.	Formation de couches d'oxydes et température de jonction	4
2.4.3.1.	Sources de chaleur, chaleurs interne et externe	4
2.4.3.2.	Échauffement anormal	4
<b>3.</b>	<b>Aspects économiques et écologiques</b>	<b>5</b>
3.1.	Fiabilité technique et entretien de connexions vissées de barres conductrices	5
3.2.	État de la technique des connexions vissées de barres conductrices	5
3.3.	Connexions vissées de barres conductrices avec l'élément de connexion MC-SEALconTACT	5
3.3.1.	Caractéristiques fonctionnelles de l'élément de connexion MC-SEALconTACT	5
3.3.1.1.	Module de contact à lamelles inclinées	5
3.3.1.2.	Module-support strié	6
3.3.1.3.	Cadre d'étanchéité pour modules de contact et de support	6
3.4.	Comparaison des facteurs de résistance de connexions vissées de barres conductrices avec et sans élément de contact MC-SEALconTACT	6
3.4.1.	Facteur de résistance initial $k_{u0}$	6
3.4.2.	Évolution du facteur de résistance dans le temps $k_u(t)$	7
3.4.2.1.	Sans élément de connexion	7
3.4.2.2.	Avec élément de connexion	7
3.5.	Économies d'énergie réalisables grâce aux connexions de barres conductrices avec MC-SEALconTACT en utilisation intérieure	8
<b>4.</b>	<b>Synthèse</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>Documents de référence</b>	<b>9</b>
<b>6.</b>	<b>Annexe</b>	
	<b>Essais relatifs au facteur de résistance à long terme <math>k_u(t)</math> de connexions de barres conductrices avec MC-SEALconTACT</b>	<b>10</b>

## 1. Données du problème

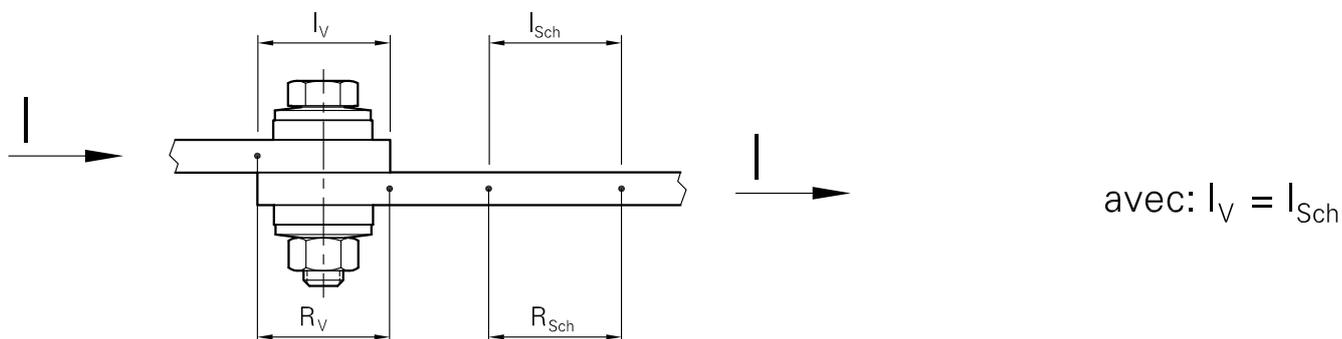
Le transfert de courants de l'ordre de quelques centaines d'ampères à quelques milliers d'ampères, voire jusqu'à quelques dizaines de milliers d'ampères dans certains cas exceptionnels tels que les fours à métaux, pose très souvent, au niveau des points de contact, le problème d'une résistance électrique de jonction trop élevée.

Cette résistance est influencée par plusieurs grandeurs et augmente avec le temps d'utilisation sous l'effet du vieillissement, ce qui se traduit par une élévation des pertes par échauffement et finit par prendre une ampleur telle que, dans des conditions variables, à une longévité variable, peut survenir une défaillance totale de la connexion.

## 2. Analyse et description des connexions vissées de barres conductrices

### 2.1. Résistance de jonction $R_v$

La résistance de jonction  $R_v$  d'une connexion de barres conductrices, figure 1, se décompose en [1] plusieurs résistances partielles selon l'équation 1.



**Figure 1**  
**Résistance de jonction  $R_v$  et facteur de résistance  $k_{ij}$  de barres conductrices vissées**  
 $R_v = R_b + R_e + R_f$  (équation 1)

#### 2.1.1. Résistance propre $R_b$

$R_b$  est la résistance propre des deux barres conductrices sur la longueur de recouvrement  $l_v$ , la liaison métallique des barres étant supposée homogène. Cela signifie que la résistance de passage  $R_{ij}$  donnée par l'équation 2 est nulle.

#### 2.1.2. Résistance d'étranglement $R_e$

$R_e$  est la résistance qui naît du resserrement des lignes de courant au niveau de la surface de contact des deux barres conductrices, celle-ci offrant au courant des points de passage non définis.

#### 2.1.3. Résistance d'oxydation $R_f$

$R_f$  est la résistance due à la formation d'oxydes à la surface des zones de contact.

#### 2.1.4. Résistance de passage $R_{ij}$

$R_{ij}$  est la somme de la résistance d'étranglement et de la résistance d'oxydation.

$$R_{ij} = R_e + R_f \quad (\text{équation 2})$$

### 2.2. Résistance de la barre $R_{Sch}$

$R_{Sch}$  est la résistance d'un tronçon de barre conductrice d'une longueur égale à celle de la longueur de recouvrement  $l_v$ .

### 2.3. Facteur de résistance $k_u$

L'équation 3 définit le facteur de résistance  $k_u$  comme le rapport de la résistance  $R_v$  de la connexion sur la longueur de recouvrement  $l_v$  et de la résistance  $R_{sch}$  de la barre conductrice sur une longueur égale  $l_{sch}$ .

$$k_u = \frac{R_v}{R_{sch}} = \frac{U_v}{U_{sch}} = \frac{P_v}{P_{sch}} \quad (\text{équation 3})$$

#### 2.3.1. Facteur de résistance minimum

En supposant négligeable la résistance de passage  $R_{\bar{u}}$ , soit  $R_{\bar{u}} = 0$ , la résistance de jonction devient

$$R_v = R_b \quad (\text{équation 4})$$

D'où la valeur théorique minimale du facteur de résistance

$$k_u = 0,5 \quad (\text{équation 5})$$

### 2.4. Grandeurs influant sur la résistance de jonction $R_v$ et le facteur de résistance $k_u$

2.4.1. Résistance d'étranglement  $R_e$  et résistance d'oxydation  $R_f$   
Il ressort des équations 1 et 2 que la résistance de jonction  $R_v$  est minimale lorsque la résistance de passage  $R_{\bar{u}}$  prend la valeur 0. Il suit de là que la qualité de la connexion de barres conductrices est d'autant meilleure que

- la surface de contact assurant le passage du courant est grande et donc la résistance d'étranglement  $R_e$  petite;
- la couche d'oxydes, pas ou peu conductrice, est faible et donc la résistance d'oxydation  $R_f$  petite.

#### 2.4.2. Formation de couches d'oxydes

Les électrons participants à la conduction du courant doivent passer de l'une des barres dans l'autre au niveau de leurs points de contact. Pour cela, la microstructure de la surface des barres conductrices et l'épaisseur plus ou moins grande de la couche d'oxydes sont d'une grande importance.

La résistance de passage  $R_{\bar{u}}$  et par conséquent la résistance de jonction  $R_v$  augmente au fil du temps par croissance de la couche d'oxydes en raison des réactions chimiques (oxydation, corro-

sion...) qui se produisent entre la matériau des barres et l'atmosphère ambiante (ou les impuretés et gaz polluants qu'elle contient). Seul un vide poussé permet d'obtenir des surfaces exemptes d'une couche d'oxydes.

#### 2.4.3. Formation de couches d'oxydes et température de jonction

La formation constante d'oxydes produit une augmentation de la résistance de jonction  $R_v$ , de la puissance dissipée par échauffement et donc de la température de la jonction, ce qui accélère en retour le processus chimique de la formation d'oxydes. Cette interaction de la formation d'oxydes, des pertes calorifiques et de la température de jonction peut conduire à la défaillance totale de la connexion par surchauffe.

##### 2.4.3.1. Sources de chaleur, chaleurs interne et externe

Les sources d'échauffement des points de contact sont d'origine interne ou externe. La chaleur interne résulte de la dissipation d'énergie dans le conducteur électrique, due principalement aux résistances d'étranglement et d'oxydation. La chaleur externe est fonction des conditions ambiantes: en utilisation intérieure, d'une dissipation insuffisante par rayonnement ou convection, ou d'un apport de chaleur supplémentaire en raison de la proximité de fours à métaux ou dans les installations chimiques; en plein air, du rayonnement solaire.

##### 2.4.3.2. Échauffement anormal

D'après les mesures relevées dans [2], la température des surfaces de contact assurant la conduction du courant est significativement plus élevée au sein de la connexion que celle mesurée sur la face externe de la barre conductrice. Il est donc possible qu'aucun échauffement anormal ne soit constaté du côté extérieur mais qu'à l'intérieur la température soit suffisamment élevée pour que la contrainte thermique y occasionne une accélération du vieillissement.

### 3. Aspects économiques et écologiques

#### 3.1. Fiabilité technique et entretien de connexions vissées de barres conductrices

Il existe une relation directe entre, d'une part, la fiabilité technique et les besoins en entretien d'une connexion de barres conductrices et, d'autre part, le facteur de résistance  $k_u$ . Une connexion de barres conductrices est considérée comme fiable et demandant peu, voire – dans les cas exceptionnels – pas d'entretien lorsque le vieillissement pendant une durée de vie économique de 20 à 40 ans, en utilisation extérieure ou intérieure, ne progresse pas jusqu'à provoquer son autodestruction par surchauffe.

Il est possible d'améliorer encore la rentabilité de la grande majorité des connexions vissées de barres conductrices en réduisant les pertes énergétiques par échauffement des contacts sur la période mentionnée. Cela suppose, à intensité égale, une amélioration du facteur de résistance  $k_u$ , un résultat que permet d'atteindre l'élément de connexion MC-SEALconTACT.

L'extension de la durée de vie utile ou la réduction des intervalles de maintenance, facteur d'augmentation de la sécurité et de la disponibilité des installations, sont d'autres effets positifs d'une fiabilité accrue. Ces avantages sont directement liés aux caractéristiques fonctionnelles de l'élément de connexion MC-SEALconTACT.

Outre les aspects immédiatement économiques, il convient de ne pas négliger le point de vue écologique: rien qu'en Europe occidentale, le grand nombre de connexions de barres conductrices est à l'origine de pertes énergétiques qui se chiffrent par milliards et entraînent une surconsommation de combustibles fossiles.

Celle-ci donne lieu à une émission accrue de gaz polluants qui contribuent à la destruction de l'environnement et au réchauffement global. Là aussi, l'utilisation de l'élément de connexion MC-SEALconTACT aide à fortement réduire ce potentiel nuisible.

#### 3.2. État de la technique des connexions vissées de barres conductrices

Le transfert de courant ne peut pas être assuré de manière sûre par un simple assemblage de méplats. Entre deux surfaces planes, il n'existe qu'un nombre relativement limité de surfaces de contact qui, de plus, sont réparties au hasard. Au fil du temps, suite à la croissance de la couche d'oxydes, celles-ci se réduisent, voire disparaissent, provoquant une défaillance de la connexion par surchauffe. Ces détériorations catastrophiques ne peuvent être évitées que par des révisions périodiques, coûteuses en temps et en argent.

#### 3.3. Connexions vissées de barres conductrices avec l'élément de connexion MC-SEALconTACT

##### 3.3.1. Caractéristiques fonctionnelles de l'élément de connexion MC-SEALconTACT

###### 3.3.1.1. Module de contact à lamelles inclinées

Le module de contact du MC-SEALconTACT à lamelles inclinées permet de mettre en contact une multiplicité de surfaces conductrices.

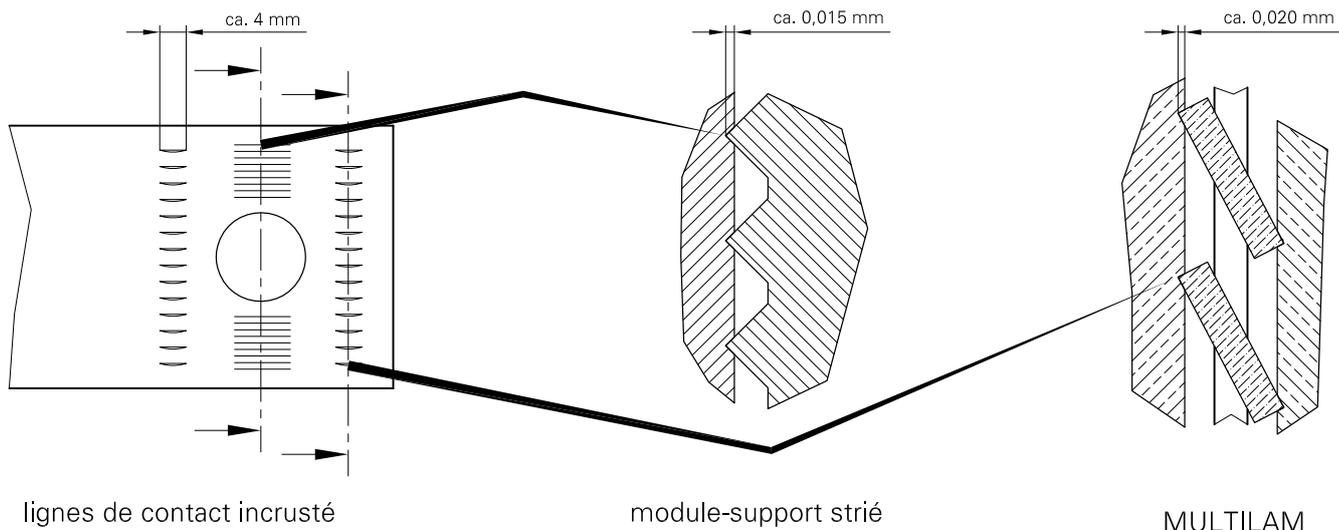
De par leur forme et leur mode d'action, les lamelles inclinées sont capables de percer les couches d'oxydes, ce qui autorise la mise en contact de barres conductrices à l'état brut, sans traitement de surface.

Au niveau de la surface de contact conductrice assurée par chaque lamelle, la reconstitution d'une couche d'oxydes est impossible. La liaison avec la surface à contacter est en effet si homogène, en raison de la force de pression élevée exercée par la lamelle, qu'une formation d'oxydes est absolument exclue.

### 3.3.1.2. Module-support strié

La fonction principale du module-support consiste à délimiter d'une manière optimale la compression des lamelles de contact. Toutefois, son profil strié lui confère une propriété analogue au

module de contact: les arêtes vives caractérisant le profil des deux types de modules transpercent les couches d'oxydes superficielles, s'incrudent dans les barres, et établissent ainsi un contact électrique de qualité.



p.ex. Couche d'oxyde des barres d'aluminium  
 2 nm (Valeurs moyenne) = 0,000002 mm

**Figure 2**  
**Les lamelles de contact et le profil strié des modules-supports transpercent les couches d'oxydes superficielles**

### 3.3.1.3. Cadre d'étanchéité pour modules de contact et de support

Un cadre d'étanchéité isole hermétiquement le module de contact et le module de support du MC-SEALconTACT de l'atmosphère ambiante, c.à.d. de l'humidité et des gaz polluants, de sorte à interdire toute formation de couche d'oxydes. Sans formation d'oxydes, le facteur de résistance  $k_u$  ainsi que les pertes d'énergie résultantes restent faibles et constants à long terme.

## 3.4. Comparaison des facteurs de résistance de connexions vissées de barres conductrices avec et sans élément de connexion MC-SEALconTACT

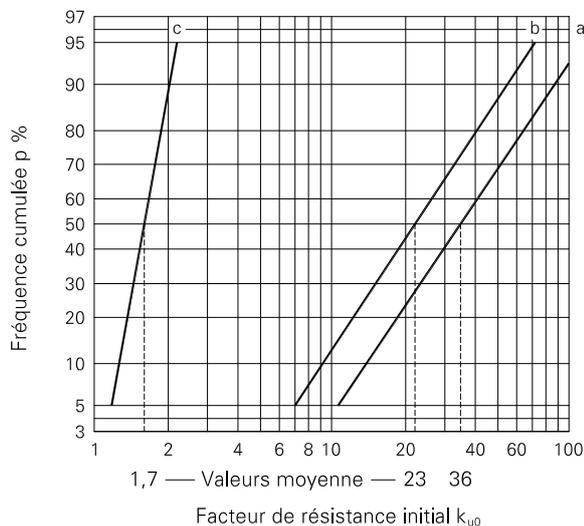
### 3.4.1. Facteur de résistance initial $k_{u0}$

Les études menées dans [2] démontrent que l'évolution du facteur de résistance  $k_u(t)$ , représentée à la figure 3, dépend dans une

large mesure du facteur de résistance initial  $k_{u0}$ . Les connexions présentant un facteur de résistance initial élevé deviennent rapidement instables. C'est ainsi qu'une connexion ayant un facteur de résistance initial de  $k_{u0} = 6$  peut connaître une défaillance totale au bout d'à peine quelques mois.

Figure 3 établit une comparaison entre des connexions sans MC-SEALconTACT de jeux de barres ayant subi au préalable différentes traitements de surface.

Figur 4 des connexions avec MC-SEALconTACT de divers couples de barres (Cu-Cu, Al-Al, Cu-Al), dégraissées ou non, et utilisées dans différents environnements (atmosphère confinée, plein air, pluie) ont un facteur de résistance de départ sensiblement comparable ( $k=1,5$ )

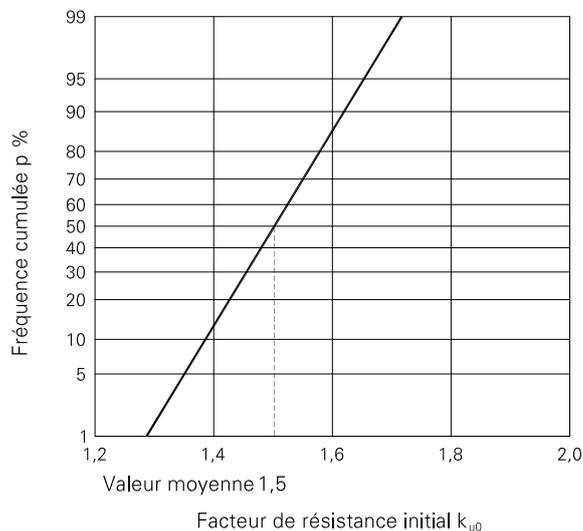


**Figure 3**  
Valeurs expérimentales de départ des facteurs de résistance de connexions sans MC-SEALCONTACT.

**Courbe a:** barres non nettoyées

**Courbe b:** barres parfaitement nettoyées, puis touchées avec des mains grasses

**Courbe c:** barres parfaitement dégraissées



**Figure 4**  
Valeurs expérimentales de départ des facteurs de résistance de connexions avec MC-SEALCONTACT.

- pour des barres conductrices dégraissées et sales

- Cu-Cu, Al-Al, Cu-Al

- pour des barres conductrices utilisées en atmosphère confinée, en plein air, ou sous la pluie

### 3.4.2. Évolution du facteur de résistance dans le temps $k_u(t)$ Représentée à la figure 5

#### 3.4.2.1. Sans élément de connexion

Les valeurs de cette zone graphique ont été déterminées expérimentalement et sont valables pour une utilisation intérieure. La largeur de cette zone dépend des:

- différents facteurs de qualité initiaux,  $k_{u0}$
- différentes combinaisons de température

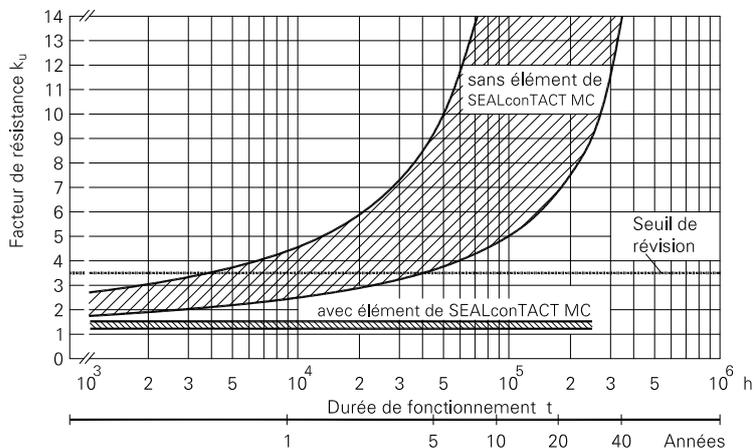
Si l'objectif est de limiter le coût des pertes au minimum ou à une valeur économiquement tolérable, la connexion devra être révisée dès que le facteur de résistance  $k_u$  devient  $\geq 3,5$  pour ne pas entrer dans la zone de croissance exponentielle du facteur de résistance et risquer la défaillance totale de la connexion.

### Détermination expérimentale du facteur de résistance

- Le facteur de résistance peut être déterminé directement dans l'installation par une mesure simple effectuée à l'aide d'un microohmmètre spécialement développé à cet effet.

#### 3.4.2.2. Avec élément de connexion

Cette zone graphique est valable pour une application intérieure ou en plein air. Le comportement à long terme prévisionnel est basé sur des essais d'environnement accélérés (annexe) et sur les caractéristiques fonctionnelles des lamelles inclinées Stäubli, confirmées par plusieurs années d'usage. Pour les applications en plein air, le cadre d'étanchéité des modules de contact et de support apporte ici un plus appréciable.



**Figure 5**  
Facteur de résistance à long terme  $k_u(t)$

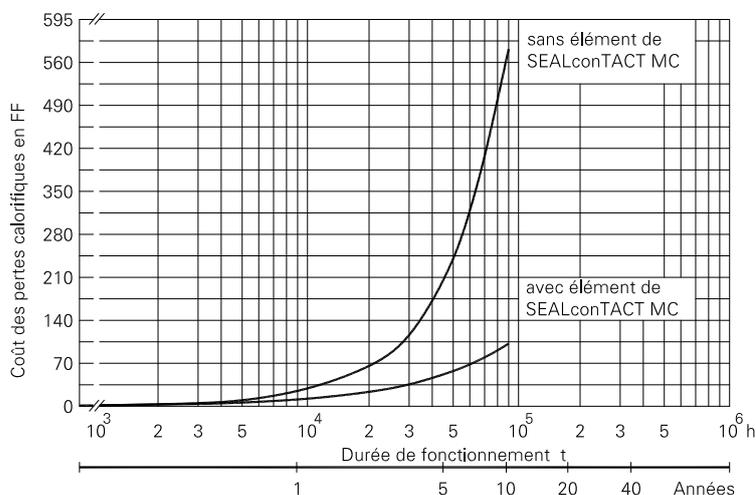
**3.5. Économies d'énergie réalisables grâce aux connexions de barres conductrices avec MC-SEALconTACT en utilisation intérieure**

La figure 6 présente les coûts comparés des pertes par échauffement imputables à la résistance de passage  $R_{ij}$ . Le graphique ne prend pas en compte les pertes dans les barres conductrices dues à la résistance propre  $R_b$ .

Le calcul prend pour base une connexion de barres conductrices très courante dans le secteur de la distribution d'énergie.

Des coûts des pertes par échauffement d'une connexion de barres conductrice

Matériau:	Aluminium, sans traitement de surface
Dimensions:	40 mm x 10 mm
Intensité:	600 A, constante
Facteur de résistance initial $k_{u0}$ :	1,5
Facteur de résistance à long terme $k_u(t)$ :	Valeurs moyenne d'après figure 3
Durée de fonctionnement:	jusqu'à 10 ans
Coût de l'énergie:	€ 0.08/kWh



**Figure 6**  
Économies d'énergie réalisables grâce aux connexions de barres conductrices avec MC-SEALconTACT

## 4. Synthèse

Comparaison de liaisons vissées de jeux de barres avec ou sans élément de connexion MC-SEALconTACT:

Connexion de jeux de barres sans MC-SEALconTACT	Connexion de jeux de barres avec MC-SEALconTACT
Un important travail préparatoire (dégraissage) des barres, parfois difficilement accessibles, est nécessaire accessible locations.	Dégraissage des barres non requis
Un dégraissage optimal est difficilement réalisable, en conséquence, mauvais facteur de résistance initial	Facteur de résistance de départ excellent et indépendant des barres et de l'atmosphère environnante
Traitement de surface des barres requis pour majorité des applications	Traitement de surface non requis
Après quelques mois de fonctionnement, augmentation sensible du facteur de résistance et, à fortiori des pertes d'énergie	Rentabilité de la connexion : Facteur de résistance faible à long terme (comportement stable dans le temps), d'où des pertes d'énergie limitées
Fiabilité de la connexion remise en cause et maintenance périodique nécessaire	Fiabilité de l'installation. Aucune maintenance requise
Durée de vie réduite	Augmentation sensible de la durée de vie

Ces avantages deviennent particulièrement évidents dans les atmosphères chargées en substances chimiques agressives, no-

tamment en combinaison avec une humidité normale, dans les applications en plein air ou dans les installations chimiques.

## 5. Documents de référence

[1] A. Erk/M. Schmelzle  
Éléments d'électrotechnique  
Springer-Verlag/Berlin/Heidelberg/New York 1974

[2] H. Böhme  
Technique moyenne tension  
Éditeur Technik/Berlin/Munich 1992

## 6. Annexe

Essais relatifs au facteur de résistance à long terme  $k_u(t)$  de connexions de barres conductrices avec MC-SEALconTACT

Les essais suivants, accélérés ou menés dans des conditions particulières, ont permis d'étudier l'étanchéité et la qualité électrique:

- CEI 68-2-2 ou DIN CEI 68 partie 2-2  
Procédures de base pour les essais d'environnement partie 2, essai B: chaleur sèche
- CEI 68-2-3 ou DIN CEI 68 partie 2-3  
Electrotechnique, Procédures de base pour les essais d'environnement, essai: chaleur humide, régime permanent
- DIN VDE 0212 partie 52  
Accessoires pour lignes électriques aériennes et postes de commutation, essais d'efforts cycliques
- Variation de température dans l'air, à l'intérieur  
Plage de température: - 20 °C à +110 °C  
Temps d'échauffement: t = 65 min.  
Temps de refroidissement: t = 130 min.  
Durée: t = 10 jours
- Essai d'étanchéité en fonction de la température et de pression superficielleatmosphère normale, à l'intérieur
 

à t = 80 °C	Durée t = 72 h
t = 100 °C	t = 72 h
t = 120 °C	t = 72 h
- Essai d'étanchéité avec surfaces extrêmement rugueuses de barres brutes atmosphère normale, à l'intérieur, barres conductrices avec rugosité de surface N8 à N10
- Des essais de longue durée en atmosphère confinée, en plein air et sous la pluie, actuellement en course, sont en voie d'achèvement.
- IEC 68-2-52/DIN IEC 68 part 2-52  
Brouillard salins  
essai d'une durée t = 30 jours
- **Essais de longue durée en atmosphère confinée, en plein air, et sous eau de pluie.**  
Les essais menés avec des barres en Cu et Al, non nettoyées et non traitées, ainsi qu'avec la combinaison critique Al/Cu, n'ont pas permis de mettre en avant, après 24'000h, de dégradation de la résistance de contact (ou facteur de résistance) par rapport à sa valeur initiale. L'état de connaissance général de l'évolution dans le temps de la qualité de contact de connecteurs de puissance, en particulier ceux équipés de contacts à lamelles Stäubli, permet d'extrapoler ces premiers résultats à des durées de mise en oeuvre de l'ordre de 200'000h (20 années) sans dépassement des valeurs limites définies. Les essais se poursuivent afin de compléter le diagramme d'évolution du facteur de résistance dans le temps avec des données établies à partir d'essais accélérés.





● Sites Staubli ○ Représentants/agents

# Présence mondiale du groupe Staubli

[www.staubli.com](http://www.staubli.com)