

Câble électrique à autodiagnostic visuel multicouche

Résumé

Le présent document constitue une divulgation technique défensive portant sur un câble électrique intégrant un système d'autodiagnostic visuel multicouche. L'invention combine une structure d'isolant à couches colorées différenciées (permettant la détection des dégradations mécaniques par révélation progressive de couleur) et une couche thermochromique externe (permettant la détection des surcharges électriques). Cette divulgation a pour but de constituer une antériorité opposable à tout dépôt de brevet ultérieur portant sur tout ou partie de ces éléments. L'innovation répond à un besoin émergent de diagnostic fiable à faible coût dans le contexte du développement des filières de réemploi des câbles électriques, en particulier pour les câbles souples de type H07RN-F.

1. Contexte et problème technique

1.1 L'essor des filières de réemploi

Face à l'inflation généralisée des prix des matières premières et à la pression croissante des politiques d'économie circulaire, des filières de réemploi se structurent progressivement sur différents marchés. Le secteur de la téléphonie mobile avec des plateformes telles que Back Market illustre la maturité que peut atteindre une telle filière lorsque des conditions technico-économiques favorables sont réunies. Le réemploi constitue en effet une alternative plus pertinente que le recyclage lorsque le produit est encore fonctionnel, en évitant une destruction prématurée de valeur.

Dans le domaine de la câblerie électrique, cette transition vers le réemploi se heurte à un obstacle fondamental : l'absence de méthode de diagnostic fiable, rapide et économique permettant d'évaluer l'état de santé d'un câble avant sa remise en service.

1.2 Les défaillances des câbles électriques

Deux grandes catégories de défaillance peuvent affecter un câble électrique en cours de vie :

- Défaillances mécaniques : chocs, abrasion, variations thermiques répétées, exposition aux UV, écrasement, traction excessive. Ces agressions peuvent induire des entailles de profondeur variable dans l'isolant, fragilisant la protection électrique du conducteur.
- Défaillances électriques : surcharges en courant, surchauffes localisées, infiltrations d'humidité générant des courts-circuits, arcs électriques. Ces phénomènes peuvent avoir lieu sans laisser de trace visuelle apparente sur l'isolant conventionnel.

Or, les câbles électriques sont systématiquement démontés avant d'être réemployés par un artisan électricien, ce qui rend le diagnostic visuel pertinent : le câble est accessible dans sa totalité au moment de l'inspection.

1.3 Limites des solutions de diagnostic existantes

Les techniques de diagnostic électrique disponibles sur le marché (mesure des pertes diélectriques, détection des décharges partielles) permettent certes d'identifier les défaillances électriques, mais présentent des contraintes opérationnelles rédhibitoires dans le cadre d'une filière de réemploi :

- Nécessité d'un branchement ou d'un couplage magnétique spécifique, impliquant un temps d'intervention significatif.
- Appareillage onéreux (plusieurs milliers d'euros), rarement disponible sur les chantiers.
- Compétences techniques spécifiques requises pour l'interprétation des résultats.
- Absence de détection des dégradations purement mécaniques sans impact électrique immédiat.

Il n'existe à ce jour aucune solution simple permettant à un électricien ou un technicien de terrain de diagnostiquer visuellement et simultanément l'état mécanique et électrique d'un câble démonté, sans équipement ni formation spécifique.

2. Description détaillée de l'invention

2.1 Principe général

L'invention consiste en un câble électrique dont la gaine et ou l'isolant est structurée en plusieurs couches successives présentant des colorations distinctes, surmontées d'une couche externe thermochromique. Ce système constitue un autodiagnostic visuel passif, ne nécessitant aucune source d'énergie, aucun équipement de mesure, ni aucune formation spécifique pour son interprétation.

L'état du câble est révélé directement par la couleur visible en surface. Un câble sain présente une couleur uniforme. Un câble endommagé présente une coloration différente, localisée ou généralisée selon l'étendue du dommage.

La couche thermochromique est choisie de façon à ce que la sollicitation thermique rende la « décoloration permanente ».

2.2 Structure multicouche pour la détection mécanique

La structure standard actuelle d'un câble de type H07RN-F comprend une gaine extérieure de couleur homogène noire. L'invention substitue à cette gaine monochrome une structure comprenant au minimum deux couches différenciées par leur couleur, et de façon optimale trois couches pour un compromis efficacité / coût optimal.

Ci-dessous un exemple de structure :



Couche	Couleur indicative	Signification diagnostique
Couche externe (1)	Vert	Câble sain — aucune dégradation mécanique détectée
Couche intermédiaire (2)	Orange	Dégradation mécanique modérée — vigilance recommandée
Couche interne (3)	Rouge	Dégradation sévère — câble à mettre au rebut ou recycler
Couche thermochromique (4)	Variable (neutre → coloré)	Surchauffe électrique passée détectée — mémoire thermique

La performance mécanique (allongement, contrainte à la rupture...) de chaque couche est ajustée de sorte qu'une entaille suffisante provoque l'ouverture et le décollement de la couche concernée, rendant la coloration sous-jacente nettement visible. Cette propriété amplifie visuellement le signal de défaillance et rend le diagnostic non ambigu.

2.3 Couche thermochromique pour la détection de défaillance électrique

Une couche externe intégrant un matériau thermochromique est déposée sur les trois couches mécaniques. Ce matériau, dont la teinte évolue de façon irréversible (ou réversible selon la formulation retenue) en fonction de la température atteinte, permet de témoigner d'un épisode de surchauffe électrique passé.

Les matériaux thermochromiques envisageables comprennent notamment les pigments à base de leucocolorants microencapsulés (leucodyes), les cristaux liquides cholestériques, ou les encres thermochromiques à changement de phase, dont la température de transition est réglable selon la formulation. Des températures de seuil comprises entre 70°C et 110°C sont pertinentes pour les câbles de puissance basse tension. Les matériaux peuvent être formulés pour répondre de façon irréversible (mémoire permanente de la surchauffe) ou réversible (indication d'un état actuel).

Analogie industrielle — Le Thermo-Spot® Tefal

Le principe de la couche thermochromique est analogue au Thermo-Spot® utilisé sur les poêles Tefal, qui change de couleur à la température de cuisson optimale. Transposé au câble électrique, ce principe permet de révéler de façon passive et permanente tout épisode de surchauffe, sans instrumentation.

2.4 Matériaux et procédé de fabrication

Les couches d'isolant colorées sont réalisées à partir de polymères conventionnels utilisés en câblerie (PVC, XLPE, TPE, caoutchouc EPDM) auxquels sont ajoutés des pigments minéraux ou organiques

présentant une stabilité thermique et chimique adaptée aux conditions d'utilisation du câble (température de service, résistance aux UV, aux hydrocarbures, etc.).

Le procédé de fabrication ne nécessite pas d'investissement industriel nouveau : l'ajout d'une couche supplémentaire s'effectue par une opération de coextrusion ou d'extrusion successive sur les équipements de gainage existants. La couche thermochromique est déposée par extrusion ou application en continu (enrobage, pulvérisation).

Le surcoût de fabrication est estimé marginal par rapport au prix de revient total du câble, notamment pour les câbles à forte valeur ajoutée comme les câbles souples industriels H07RN-F.

3. Variantes et extensions de l'invention

3.1 Stries de fragilisation pour amplification du signal mécanique

Une première variante consiste à introduire des stries ou des zones de fragilisation superficielle en surface de la première couche colorée. Ces stries, réalisées lors de l'extrusion ou en post-traitement, ont pour effet de provoquer un décollement conséquent et visible de la couche externe dès qu'une entaille atteint le seuil de dégradation mécanique significatif. Cette amplification mécanique du signal visuel réduit le risque de faux négatif lors d'une inspection rapide.

3.2 Microencapsulation et capacité d'autoréparation

Une seconde variante, plus avancée, consiste à intégrer dans les couches d'isolant des microcapsules contenant un agent colorant révélateur et/ou un agent de cicatrisation (self-healing agent). Lorsqu'une entaille rompt les microcapsules, le contenu se libère et produit deux effets simultanés :

- Révélation renforcée : l'agent colorant amplifie et pérennise le signal visuel de défaillance, indépendamment de la couche traversée.
- Autoréparation partielle : l'agent cicatrisant (typiquement un monomère ou un oligomère réticulable) comble partiellement l'entaille par polymérisation in situ, restaurant une barrière diélectrique résiduelle et ralentissant la progression de la dégradation.

Ce principe est directement inspiré des techniques de ressuage utilisées en contrôle non destructif des soudures, et des matériaux auto-cicatrisants développés en génie des matériaux avancés. Son application à la câblerie constitue une transposition originale.

3.3 Extension aux autres types de câbles

Bien que l'application préférentielle soit le câble souple industriel H07RN-F utilisé en génie climatique et frigorifique, le principe de l'invention est applicable à tout type de câble ou conducteur isolé, notamment :

- Câbles d'alimentation industriels basse tension (H07RR-F, H05RR-F)
 - Câbles de contrôle et d'instrumentation
-

- Câbles d'installation fixes (H07V-R, H07V-U)
- Câbles de puissance pour véhicules électriques

4. Antériorités identifiées

4.1 État de l'art dans le domaine du diagnostic câble

À la date de la présente divulgation, les techniques de diagnostic électrique des câbles reposent principalement sur :

- La mesure des pertes diélectriques ($\tan \delta$), permettant d'évaluer la qualité de l'isolant par mesure de la composante résistive du courant de fuite.
- La détection des décharges partielles (DP), permettant de localiser les zones d'affaiblissement diélectrique. Ces deux méthodes, bien que précises, nécessitent un appareillage spécialisé coûteux et un temps d'intervention incompatible avec les contraintes de la filière réemploi.

4.2 Antériorités dans les domaines adjacents

Les éléments suivants constituent des antériorités dans des domaines connexes mais ne divulguent pas la combinaison spécifique objet de la présente divulgation :

- Thermo-Spot® Tefal et dérivés : utilisation de matériaux thermochromiques pour l'indication d'une température atteinte sur des ustensiles de cuisson. Pas d'application à la câblerie électrique.
- Techniques de ressuage en contrôle non destructif (CND) des soudures : révélation colorée d'un défaut de continuité mécanique par capillarité. Application limitée aux surfaces métalliques, non transposée à l'isolant polymère de câbles.
- Matériaux auto-cicatrisants (self-healing polymers) : décrits dans la littérature académique pour des applications structurelles, non documentés pour l'isolant de câbles électriques à usage réemploi.
- Câbles de télécommunication à fibres optiques avec indicateurs de tension : différents par la nature du signal transmis et le mode de défaillance surveillé.

5. Avantages et bénéfices de l'invention

5.1 Avantages techniques

L'invention présente les avantages techniques suivants par rapport à l'état de l'art :

- Diagnostic passif et instantané : aucune source d'énergie externe, aucun appareillage, aucun branchement requis.
 - Double diagnostic intégré : détection simultanée des défaillances mécaniques (par les couches colorées) et électriques (par la couche thermochromique), aucune solution existante ne proposant cette combinaison.
-

- Localisation de la défaillance : la coloration peut être localisée (défaut ponctuel) ou généralisée (dégradation diffuse), apportant une information qualitative supplémentaire.
- Compatibilité avec les procédés industriels existants : pas d'investissement en nouveaux équipements, simple ajout de couches par extrusion successive.
- Absence de formation requise : le code couleur intuitif (vert / orange / rouge) est compris sans notice.

5.2 Avantages économiques et environnementaux

L'invention s'inscrit dans une logique d'économie circulaire en rendant viable la filière de réemploi des câbles électriques, avec les bénéfices suivants :

- Réduction du coût du diagnostic : élimination du coût d'appareillage et de main-d'œuvre spécialisée.
- Allongement de la durée de vie matière : les câbles sains peuvent être réemployés en toute sécurité, réduisant la demande en matières premières (cuivre, aluminium, polymères).
- Réduction des déchets : seuls les câbles réellement défaillants sont orientés vers le recyclage.
- Création de nouveaux services à valeur ajoutée : les prestataires de services électriques peuvent proposer des offres de réemploi certifiées, différenciantes sur le marché.

6. Éléments revendiqués à des fins de divulgation défensive

La présente divulgation couvre notamment, sans que cette liste soit limitative, les éléments suivants :

- Un câble électrique comprenant une gaine d'isolant structurée en au moins deux couches concentriques de couleurs distinctes, la couche externe présentant une couleur révélant l'état mécanique du câble par exposition progressive des couches sous-jacentes en cas de dégradation.
 - Un câble électrique selon le point précédent, comprenant trois couches colorées concentriques, de préférence de couleurs verte (état sain), orange (dégradation modérée) et rouge (dégradation sévère).
 - Un câble électrique comprenant une couche externe thermochromique dont la teinte évolue de façon permanente ou irréversible en cas de dépassement d'un seuil de température lié à une surcharge électrique.
 - Un câble électrique combinant une structure multicouche colorée et une couche thermochromique, constituant un système intégré de diagnostic visuel mécanique et électrique.
 - Une structure d'isolant multicouche pour câble électrique, dans laquelle la tension de surface des couches est ajustée pour provoquer un décollement amplifié de la couche externe en cas d'entaille atteignant un seuil de profondeur prédéfini.
 - Une structure d'isolant pour câble électrique intégrant des microcapsules contenant un agent colorant révélateur et/ou un agent de cicatrisation, libérés en cas de rupture mécanique.
-

- Tout câble électrique de type H07RN-F, H07RR-F, H05RR-F ou équivalent intégrant tout ou partie des caractéristiques ci-dessus.
- L'utilisation d'un câble électrique selon l'une quelconque des caractéristiques ci-dessus dans le cadre d'une filière de réemploi ou de seconde vie des câbles électriques.