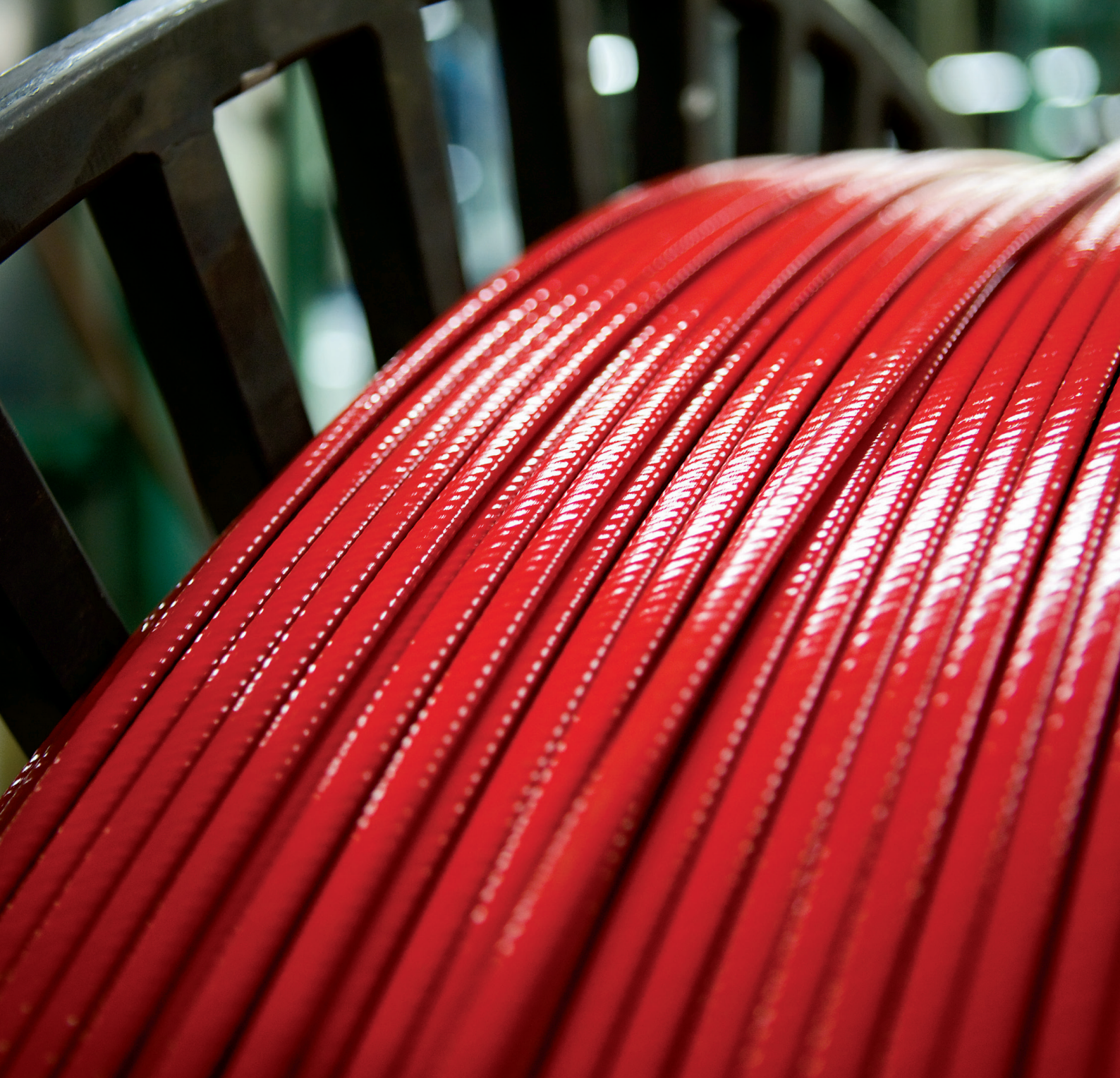
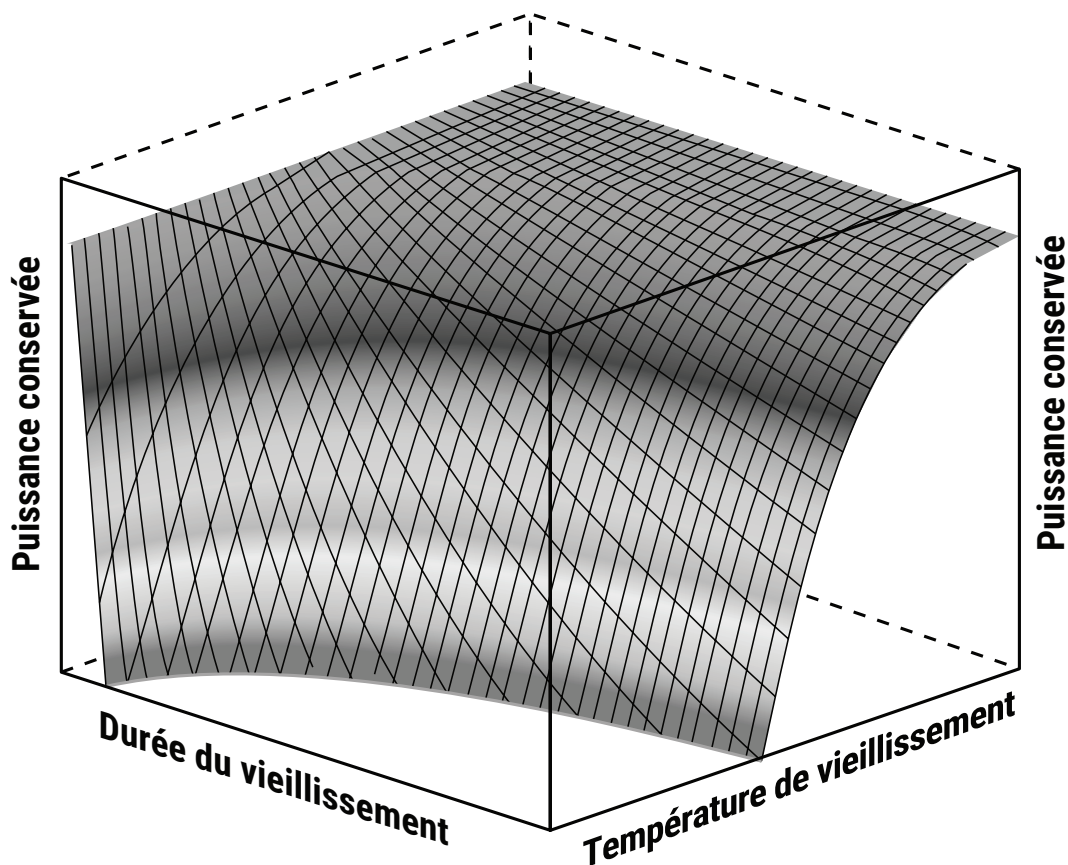




TECHNIQUES D'ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE DES CÂBLES CHAUFFANTS AUTORÉGULANTS EN POLYMÈRE

Techniques d'estimation de la durée de vie des câbles chauffants autorégulants en polymère

Graphique d'Arrhénius en 3D



de
James P. Gemperle
Ronald W. Buckley

INTRODUCTION

Les polymères conducteurs sont de plus en plus utilisés dans les dispositifs de chauffage électrique, notamment lorsqu'ils sont formulés de sorte à générer un coefficient de température positif pour la résistivité (CTP-R). La figure 1 illustre une forme courante de ces dispositifs : les câbles chauffants. Dans ce type de dispositifs chauffants en polymère conducteur, deux fils de cuivre sont utilisés comme électrodes parallèles. L'élément chauffant en polymère conducteur se trouve entre les deux électrodes ; il conduit l'électricité en présence de potentiel électrique entre ces dernières. La chaleur générée par la conduction de courant à travers l'élément résistif (le segment en polymère conducteur) est exprimée en Watts par pied de câble chauffant, par souci de commodité.

Les câbles chauffants et autres dispositifs en polymère conducteur CTP-R présentent une caractéristique importante : à mesure que la température ambiante augmente, ils limitent leur génération de chaleur, ce qui leur évite toute surchauffe provenant de leur propre dissipation de puissance.

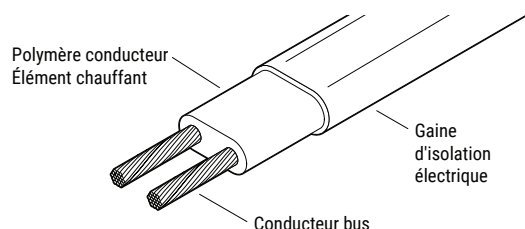


Fig. 1. Conception standard d'un câble chauffant autorégulant de base

Les figures 2 et 3 illustrent, respectivement, les caractéristiques de résistivité par rapport à la température et d'énergie par rapport à la température des câbles chauffants CTP-R. Étant donné que la dissipation de puissance diminue de manière significative à mesure que la température augmente, ces câbles chauffants sont souvent appelés autorégulants.

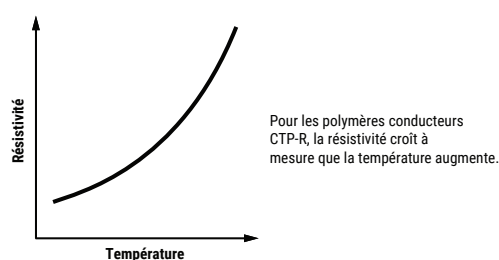


Fig. 2. Résistivité en fonction de la température

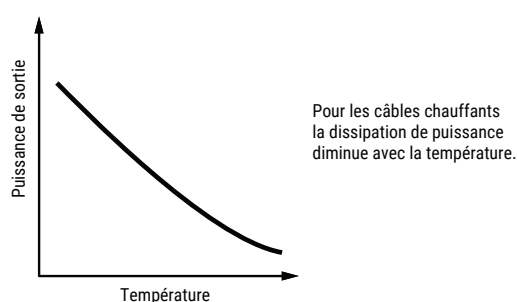


Fig. 3. Dissipation de puissance par rapport à la température

Les câbles chauffants autorégulants sont très fréquemment employés dans de nombreux secteurs d'activité. Étant donné que les câbles chauffants sont souvent essentiels au bon fonctionnement d'une installation et au démarrage ou au changement fluides de processus, et que le coût de réparation ou de remplacement des matériaux chauffants défectueux peut être élevé, la fiabilité et la fonctionnalité de ces dispositifs sont un point important à prendre en considération.

Les techniques d'évaluation des matériaux polymères conventionnelles peuvent s'appliquer aux câbles chauffants CTP-R lorsque la nature particulière de ces câbles et les modes de fonctionnement sont pris en compte dans le programme d'évaluation et l'interprétation des résultats. Le présent document évoque ces aspects particuliers des câbles chauffants autorégulants en polymère ainsi qu'une nouvelle technique permettant d'estimer la durée de vie de ces derniers. Cette technique se fonde sur la détermination de la température de service des câbles chauffants et une approche en 3D de la loi d'Arrhénius.

TECHNIQUES D'ESTIMATION GÉNÉRALE DE LA DURÉE DE VIE

Il existe depuis un certain temps déjà des normes publiques qui présentent des techniques d'estimation des performances à long terme aux températures de service. Elles sont présentées dans diverses publications éditées par les organismes de normalisation, y compris les normes UL746B, CEI216 et IEEE 1, 98 et 99.

Ces procédures se basent sur le fait que la vitesse de réaction chimique des matériaux polymères s'accélère à mesure que la température augmente. Les procédures d'évaluation supposent une exposition d'échantillons des produits à des températures supérieures aux températures de service normales. Elles utilisent en général différentes températures élevées, connues pour provoquer des modifications des propriétés des matériaux sur des durées comprises entre 100 et 10 000 heures, voire davantage.

Une ou plusieurs des propriétés des matériaux sont surveillées pendant le programme de vieillissement accéléré. Dans de nombreux cas, la propriété sélectionnée est directement liée à un attribut de performance réel du produit. Par exemple, lors du test d'un polymère requérant un certain degré de flexibilité, il convient de surveiller son allongement à la rupture pendant le programme de vieillissement. Si le vieillissement dû au stress oxydant du produit affecte directement le paramètre surveillé, l'on peut considérer que la technique employée est adéquate. C'est l'existence de cet effet ou de la relation entre le vieillissement par stress oxydant (réaction chimique) et la propriété qui permet d'utiliser l'équation d'Arrhénius afin d'estimer le comportement à long terme du matériau à des températures plus basses.

Les graphiques représentatifs de la figure 4 pourraient être le résultat de la mesure de l'allongement après divers temps d'exposition à cinq températures différentes et de l'utilisation de ces techniques traditionnelles. Il existe une multitude d'informations qui établissent un lien entre la conservation de cette propriété (conservation de l'allongement) et le vieillissement par stress oxydant du matériau.

Dans cet exemple, il a été sélectionné un critère d'échec correspondant à la conservation de 50 % de l'allongement d'origine. La ligne d'échec de la figure 4 indique le moment réel auquel la rupture des échantillons testés s'est produite. Un graphique standard contient de nombreux points de données pour chaque température. Pour que la présentation de la technique soit claire, seule la courbe moyenne de chaque température est indiquée sur la figure 4.

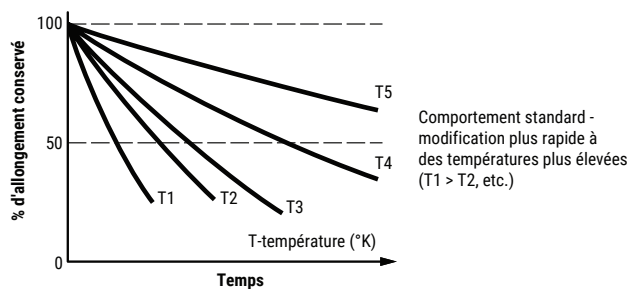


Fig. 4. Allongement à la rupture en fonction de la durée et de la température

L'étape suivante consiste à établir l'impact de la température sur le taux de modification de la propriété étudiée. Le but est d'estimer le comportement à long terme de cette propriété à des températures plus basses. Dans cet exemple, le critère d'échec sélectionné est la conservation de 50 % de l'allongement d'origine. Les points de rupture (voir la figure 4) aux températures plus élevées (T1 à T4) peuvent être utilisés pour estimer la durée jusqu'à la rupture à une température plus basse (T5). Pour de nombreux matériaux, une propriété dépend de la température à laquelle le matériau est exposé, ainsi que du temps d'exposition. Ce type de vieillissement peut être décrit comme la dépendance de la température au taux de réaction chimique. Il est possible d'utiliser l'équation d'Arrhénius pour caractériser ce comportement.

L'équation d'Arrhénius pour une réaction chimique est la suivante :

$$K = A \exp (-E/RT) \quad (1)$$

Où :

K = Taux de réaction spécifique

A = Constante

E = Énergie d'activation de la réaction

R = Constante des gaz parfaits

T = Température absolue

Étant donné que le but est d'estimer la durée de vie ou la durée jusqu'à la rupture du matériau, l'équation 1 est modifiée algébriquement pour donner l'équation 2. L'équation 2 peut être simplifiée avec ses composants de base (équation 3).

$$\text{Résultat (durée de vie)} = \text{Constante} + (1 / 2,303) * (E / RT) \quad (2)$$

ou

$$\text{Résultat (durée de vie)} = a + b / T \quad (3)$$

L'équation 3 est algébriquement linéaire. Il est possible de réaliser un graphique des données expérimentales où le résultat (la durée de vie) est fonction de la réciproque que la température absolue de vieillissement.

La figure 5 est un graphique indiquant la durée de vie par rapport à 1/température dans K. Le graphique doit être linéaire pour les températures de T1 à T4 s'il s'agit d'une modification de la propriété basée sur le taux de réaction. Il est ensuite possible, en prolongeant le graphique linéaire jusqu'à la température voulue T5, d'estimer la durée jusqu'à la rupture.

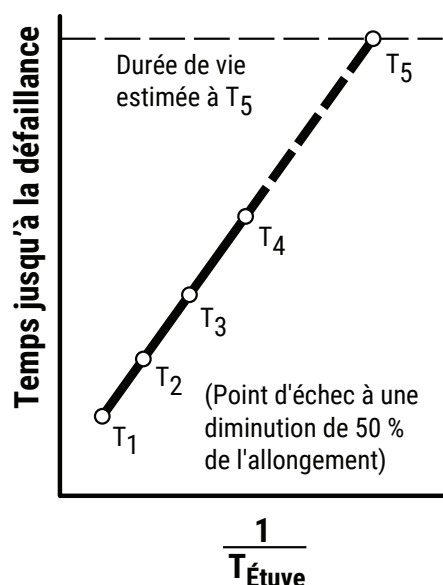


Fig. 5. Exemple de graphique d'Arrhénius (allongement à la rupture)

Cette technique classique peut être utilisée pour estimer la durée de vie des câbles chauffants autorégulants. Les approches statistiques modernes ont augmenté la précision et la certitude des estimations calculées à l'aide de l'équation d'Arrhénius. Il existe toutefois un certain nombre de modes de défaillance qui ne sont pas dus au vieillissement du produit en fonction de la température (ou stress oxydant). Avant d'évoquer l'utilisation de la technique d'estimation basée sur la loi d'Arrhénius, il faut d'abord passer en revue les autres modes de défaillance. Nombre de ces modes de défaillance produisent un chauffage non uniforme des câbles et ne peuvent donc pas être utilisés dans les estimations d'Arrhénius. L'utilisation d'échantillons présentant un ou plusieurs de ces modes de défaillance dans une estimation d'Arrhénius génère des calculs de durée de vie non valables.

MODES DE DÉFAILLANCE PRÉMATURÉE

Même lorsque les matériaux sélectionnés pour la fabrication des câbles chauffants autorégulants sont adéquats, il existe un risque d'échec de fonctionnement si les étapes de processus individuelles ne sont pas correctes. Ceci peut entraîner une augmentation de la température interne en des points localisés de l'élément chauffant. Ces températures élevées localisées peuvent être mesurées à l'aide d'une sonde thermique à infrarouge, afin de déterminer la température à la surface de l'élément chauffant, en faisant passer la sonde au travers d'une fenêtre ouverte dans l'isolation thermique, comme illustré à la figure 6. Grâce à cette technique, un échantillon du produit est fixé à un substrat à température constante, par exemple, un tuyau métallique. Une isolation hermétique pour tuyau est ensuite installée. Une toute petite fenêtre est créée dans l'isolation, dont la largeur ne doit pas dépasser celle nécessaire pour utiliser une sonde thermique à infrarouge, comme illustré.

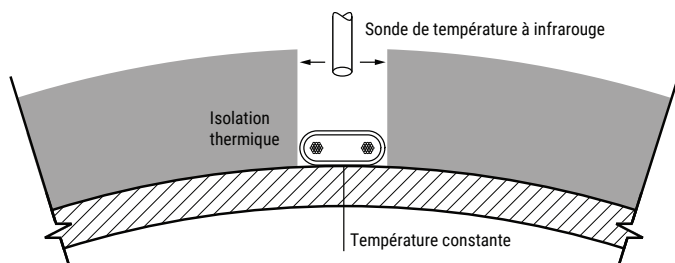


Fig. 6. Test permettant de déterminer l'uniformité de la température de l'élément de câble chauffant

Une fois le câble chauffant sous tension et le substrat soumis à une température constante, il est possible d'établir le profil thermique. En déplaçant la sonde thermique à infrarouge de part et d'autre, l'uniformité de la température dans l'ensemble de l'élément chauffant est établie. Un profil thermique est alors créé. Ce profil permet de déterminer si le produit fabriqué présente l'un des modes de défaillance prématurée indiqués ci-dessus. Il est également possible de réaliser des tests électriques sophistiqués pour rechercher certains de ces modes de défaillance prématurée.

Il existe deux facteurs créant de telles températures élevées localisées : la résistivité non uniforme et la résistance de contact électrique à l'interface conducteur bus-polymère.

La résistivité non uniforme de la matrice polymère peut provenir d'un mélange inadéquat du noir de carbone conducteur dans le polymère ou d'autres sources. Le résultat du profil de résistivité est non uniforme (voir la figure 7). Une fois sous tension, la température est supérieure aux points de résistivité plus élevée, car à ces emplacements, la quantité de chaleur générée est proportionnellement plus importante. Ceci s'explique essentiellement par une chute de tension plus importante aux emplacements en question du câble chauffant. La figure 7 illustre les profils de résistance et de température pouvant être créés par un mélange non uniforme du matériau polymère chauffant pendant la procédure.

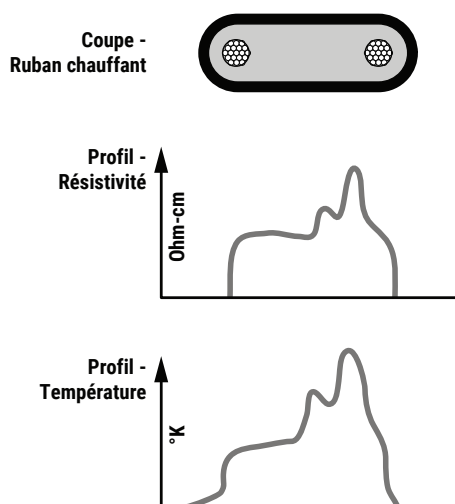


Fig. 7. Effet de la résistivité non uniforme sur la température interne

La température est non uniforme lorsqu'il existe une résistance de contact électrique à l'interface conducteur bus-polymère. La totalité du courant électrique passe au travers de cette interface. Si les techniques de procédure adéquates ne sont pas utilisées, la résistance autour des conducteurs bus peut être relativement élevée. Les températures élevées et localisées qui en résultent (voir la figure 8) entraînent une accélération de la dégradation du produit en ces points. L'augmentation de la puissance est due, comme indiqué précédemment, par une chute de tension plus importante dans cette zone de haute résistance.

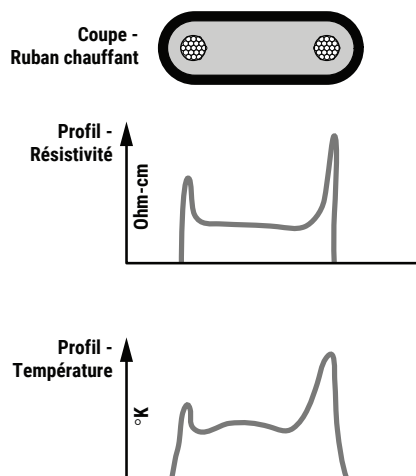


Fig. 8. Effet de la résistance de contact électrique à l'interface polymère conducteur-électrode

Les deux modes potentiels de défaillance prématurée précédemment décrits sont dus à des températures élevées autogénérées ; la figure 9 exagère l'augmentation de ces températures causée par un faible transfert de chaleur. Il convient également de signaler que pour les câbles chauffants en polymère conducteur CTP-R, la dissipation de chaleur est réduite si l'élément chauffant est lui-même à une température plus élevée. La dissipation de chaleur peut alors initialement être inférieure aux besoins et la dégradation du produit due à cette température supérieure de l'élément chauffant risque de s'accélérer.

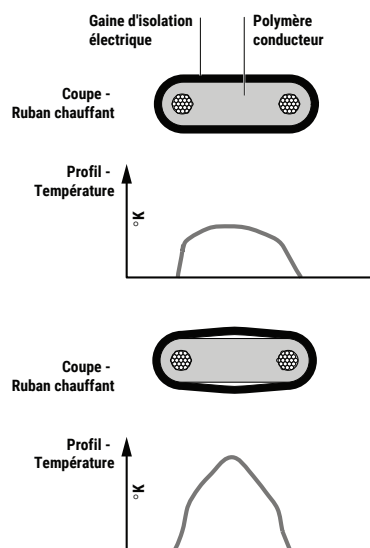


Fig. 9. Effet d'un faible transfert de chaleur sur le profil de température

TECHNIQUES D'ARRHÉNIUS D'ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE DES CÂBLES CHAUFFANTS AUTORÉGULANTS

Les produits utilisés pour les études de vieillissement doivent être sélectionnés de manière aléatoire dans le stock du fabricant. Les produits dotés des caractéristiques indiquées ci-dessus présenteront les symptômes de modes de défaillance prématurée, ce qui indique une mauvaise qualité de conception et de fabrication de ces produits ; de telles défaillances prématurées invalident l'utilisation des techniques d'Arrhénius pour l'estimation de la durée de vie de ces produits.

Étant donné qu'il faut relier les modifications de la propriété mesurée à la température réelle de vieillissement du polymère, il est nécessaire de connaître, de manière hautement fiable, la température de l'élément chauffant. Par conséquent, le vieillissement des câbles chauffants dans des étuves doit être effectué sans mise sous tension de ces derniers. La mesure de la température des câbles chauffants sous tension dans des étuves de vieillissement n'est pas pratique pour deux raisons : (1) la température de service des câbles chauffants sous tension change continuellement à mesure que leur vieillissement fait chuter la dissipation de puissance ; (2) en raison de l'aspect logistique lié à la manipulation du grand nombre d'échantillons et à la surveillance de la température de l'élément chauffant de chaque échantillon, le coût de ce type de test est prohibitif. Toutefois, étant donné que les câbles chauffants sous tension fonctionnent à une température plus élevée que celle du tuyau ou substrat, la caractérisation de la température de service de l'élément chauffant est nécessaire. De plus, pour le client, il est plus clair d'indiquer la température à maintenir que la température du dispositif chauffant. Il est possible de déterminer la température de service d'un produit et de la caractériser en fonction de la puissance dissipée. Cette caractérisation de la température de l'élément chauffant peut être déterminée avec précision à l'aide d'échantillons représentatifs.

Pour caractériser la température de l'élément chauffant, les échantillons doivent être installés, comme illustré à la figure 10. Un câble chauffant est équipé avec précaution de thermocouples de 36 AWG maximum, fixés sous la gaine d'isolation électrique de chaque côté du câble. Les thermocouples sont en contact direct avec la surface de l'élément chauffant en polymère et sont identifiés en tant que T_{surface1} et T_{surface2} . Le câble chauffant est alors installé dans un dissipateur thermique, par exemple un tuyau métallique ou un autre substrat métallique, qui peut être contrôlé à température constante. L'installation est alors isolée, le tuyau ou le substrat est réglé sur la température de service maximum recommandée par le fabricant, puis le câble chauffant est mis sous tension. Une fois l'équilibre atteint, les températures en haut et en bas de l'élément chauffant sont enregistrées. Ce test est réalisé sur le produit sélectionné à différents niveaux de dissipation de puissance. En général, la plage requise de dissipations de puissance est comprise entre les niveaux les plus élevés et les niveaux les plus bas pour les produits composés d'une même matrice polymère et présentant la même construction.

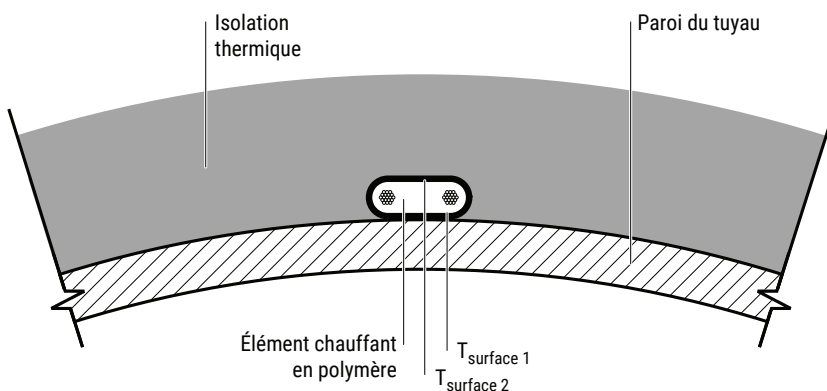


Fig. 10. Câble chauffant installé et équipé en vue de la détermination de la température de l'élément chauffant

La figure 11 indique les résultats standard provenant de la caractérisation de la température de service d'un câble chauffant. L'on peut remarquer que la température à la surface de l'élément chauffant, T_{surface2} (côté de l'élément chauffant le plus éloigné du tuyau), est considérablement plus élevée que T_{surface1} (côté de l'élément chauffant le plus proche du tuyau). Dans la pratique, il est possible de tester un certain nombre de températures de service en modifiant la température du tuyau ou du substrat contrôlé, en créant toute une série de courbes pour un produit donné. Des données supplémentaires sur l'utilisation de ces informations seront présentées ultérieurement.

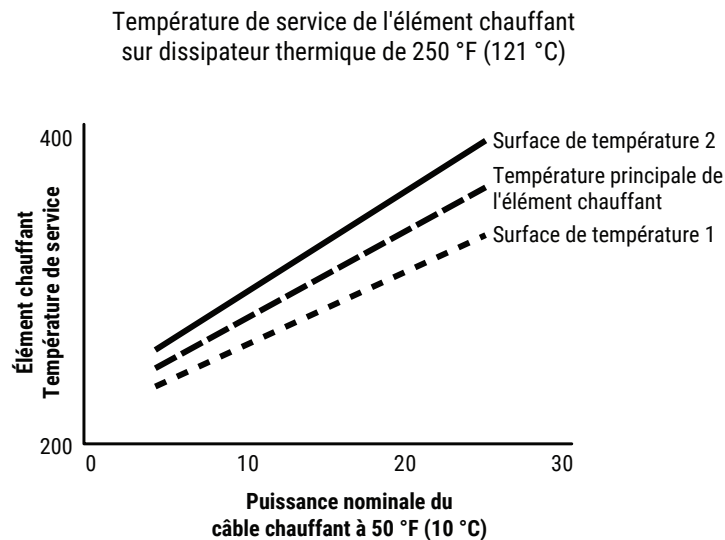


Fig. 11. Température de l'élément chauffant (standard) par rapport à la température de dissipateur thermique

Au cours du test de vieillissement accéléré, il faut au moins quatre températures de test, de préférence cinq. La température entre chaque étape doit être de 25 °F (14 °C) minimum. Pour atteindre un vieillissement significatif, toutes les températures doivent être supérieures à la température de service maximum.

La température de vieillissement maximum peut être également limitée. Il faut également prendre en compte les changements de phase des polymères et les seuils de réaction chimique pouvant être dépassés par la température maximum de vieillissement. L'utilisation de températures au-dessus de ce niveau suppose que le test lui-même modifie le produit et que d'autres modes de défaillance non prévus sur le terrain soient introduits.

Pour chaque produit testé, huit échantillons minimum sont sélectionnés pour la température de vieillissement la plus élevée, ce qui permet un niveau de confiance élevé pour les échantillons qui vieillissent le plus rapidement. Pour chaque température inférieure suivante, le nombre d'échantillons augmente de huit. L'augmentation du nombre d'échantillons aux températures inférieures permet d'obtenir davantage de données pour caractériser le comportement du produit à ces températures. Voici les nombres standard d'échantillons par température :

Température de vieillissement la plus élevée : 8
 Température de vieillissement inférieure suivante : 16
 Température de vieillissement inférieure suivante : 24
 Température de vieillissement inférieure suivante : 32
 Température de vieillissement la plus basse : 48

Les échantillons sont retirés régulièrement des étuves de vieillissement ; la dissipation de puissance est mesurée lorsqu'ils sont fixés à un tuyau métallique ou à un autre substrat en métal et maintenus à une température de 50 °F (10 °C). Chaque mesure produit un point de donnée sur la puissance conservée ; tous les points de données sont utilisés dans le calcul de la régression selon la loi d'Arrhénius.

Lors d'une expérience de vieillissement standard, il est possible d'effectuer jusqu'à 10 mesures pour chaque échantillon. Pour le nombre d'échantillons décrit ci-dessus, seraient inclus dans l'ensemble des données de régression jusqu'à 1280 points de données.

L'équation générale de la régression selon la loi d'Arrhénius, en trois dimensions, est la suivante : ¹

$$P_n = 10^a (a - t \cdot b \cdot \exp(-c/K))$$

P_n	=	Puissance conservée normalisée (% de puissance conservée/100)
a	=	Caractéristique constante du produit
$b \cdot \exp(-c/K)$	=	Taux de réaction de la procédure de dégradation
t	=	Temps
c	=	Énergie d'activation pour la réaction / constante de Boltzmann

¹ L'équation est une forme d'équation d'Arrhénius. Pour obtenir des informations supplémentaires, voir *Accelerated Testing* de Wayne Nelson, ISBN 0-471-52277-5, pages 524-530.

La régression est ensuite réalisée à l'aide d'un logiciel de régression 3D adéquat. Des résultats en 3D standard sont illustrés à la figure 12.

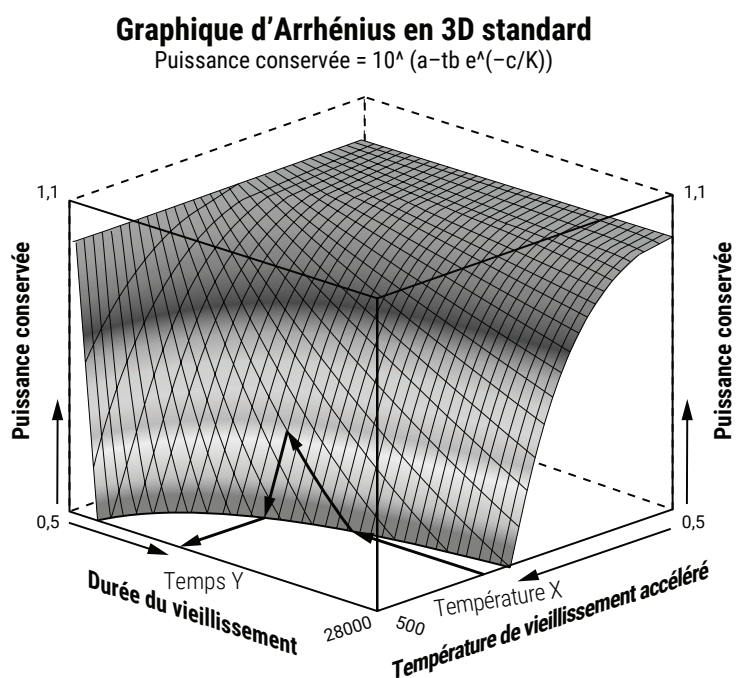


Fig. 12. Graphique de relation d'Arrhénius en 3D standard

Le client est souvent intéressé par la durée de service estimée d'un produit à une température de tuyau donnée. Pour effectuer une estimation prudente, l'on peut supposer que le câble chauffant est sous tension en permanence. Toute période hors tension prolonge alors considérablement la durée de vie estimée. Ou encore, l'on peut aussi supposer que la température maximum de l'élément chauffant de la figure 11 ou T_{surface2} est utilisée. Par ailleurs, il est possible de réaliser une estimation raisonnable de la durée de vie du produit en se basant sur la température moyenne de l'élément chauffant. Une fois la température de l'élément chauffant sélectionnée, pour estimer la durée de vie du produit (durée Y) pour cette condition de service, il convient d'entrer la courbe d'Arrhénius en 3D (voir la figure 12) à cette température (température X), de passer aux critères de défaillance définis, puis à l'axe de temps de l'estimation.

Il est aussi possible de créer un graphique en 2D classique pour la température concernée. Le « plan X » de température peut être créé, et les informations de puissance et de temps correspondantes sélectionnées et affichées. La figure 13 illustre ce type de graphique à une température limite proposée. Cette approche peut s'avérer utile pour sélectionner un câble chauffant dont la puissance initiale est supérieure aux besoins et dont la puissance réduite est suffisante pour garantir la durée de vie utile du produit à la température voulue.

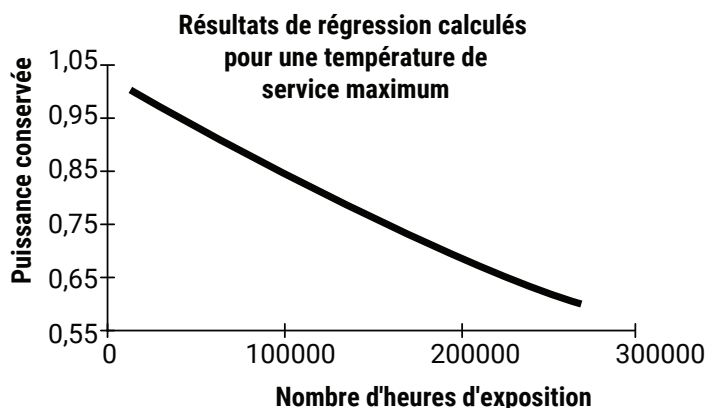


Fig. 13. Résultats de la régression à la température de service maximale

Les informations 3D d'Arrhénius peuvent également être utilisées différemment : une durée de service (par exemple 10 ans ou 87 660 heures) est sélectionnée et la température de service maximum pour un système pouvant supporter une baisse de puissance de 25 % est déterminée. Voir cet exemple à la figure 14.

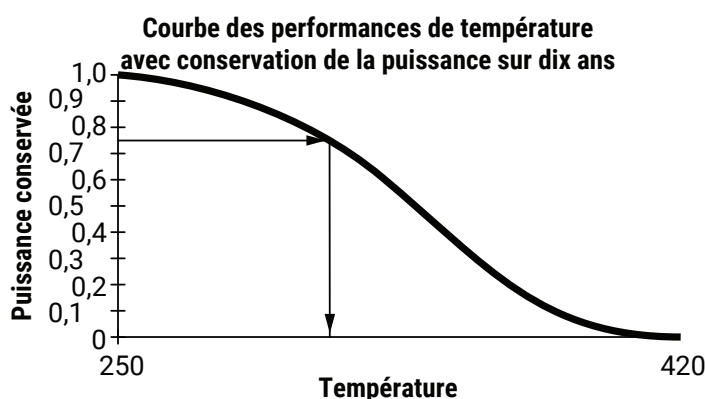


Fig. 14. Courbe des performances de température avec conservation de la puissance sur dix ans

Il existe de nombreux moyens d'améliorer l'estimation de la durée de vie pour des applications spécifiques grâce à des traitements mathématiques supplémentaires. Il est possible de prendre en compte le cycle de service d'un produit pour une application donnée : pour cela, il faut déterminer la température de vieillissement dans les deux conditions et estimer la durée de vie du produit en pondérant les résultats en fonction du cycle de service. Il est également possible de prendre en compte explicitement la baisse de la température de vieillissement à mesure que l'élément chauffant vieillit avec le temps. À mesure que la puissance chute pendant la durée de vie utile du produit, la température de l'élément chauffant diminue également, ce qui tend à prolonger la durée de vie estimée du produit.

CONCLUSION

Le présent document a présenté une nouvelle approche statistique relative à l'utilisation des données d'études de vieillissement. Elle permet aux fabricants de câbles chauffants en polymère d'estimer avec plus de précision les performances de leurs produits, en vue de les indiquer à leurs clients. Ils peuvent ainsi répondre rapidement aux questions des clients sur ces performances, lorsqu'un câble chauffant doit fonctionner en dehors des conditions normales d'utilisation. La puissance des régressions en 3D selon la loi d'Arrhénius repose sur la capacité à utiliser les points de données directement dans la régression finale, qui ne correspondent pas exactement à un unique critère de défaillance ou ne sont que des estimations de celui-ci. Il est désormais possible d'explorer rapidement d'autres critères de défaillance et d'utiliser des conditions sans analyser de nouveau les données expérimentales.

North America

Tel +1.800.545.6258

Fax +1.800.527.5703

thermal.info@nvent.com

Europe, Middle East, Africa

Tel +32.16.213.511

Fax +32.16.213.604

thermal.info@nvent.com

Asia Pacific

Tel +86.21.2412.1688

Fax +86.21.5426.3167

cn.thermal.info@nvent.com

Latin America

Tel +1.713.868.4800

Fax +1.713.868.2333

thermal.info@nvent.com

Notre éventail complet de marques:

CADDY ERICO HOFFMAN RAYCHEM SCHROFF TRACER



nVent.com