

Le câble approprié pour une application industrielle : choix et utilisation pour une conception réussie

Rich Miron, Applications Engineer at Digi-Key Electronics

L'Internet industriel des objets (IIoT) dépend largement des câbles pour le transfert de données, de commandes et d'alimentation entre les machines industrielles, et entre l'usine, le service informatique et le cloud. Toutefois, la connectivité dans les ateliers nécessite une attention particulière quant au choix et au routage des câbles vers des zones présentant des risques physiques, environnementaux et électriques : les concepteurs doivent jongler avec un ensemble complexe de priorités souvent contradictoires en matière de performances et de coûts.

Cet article traite des défis en matière de câblage soulevés par l'environnement industriel et l'IIoT, ainsi que des différences entre les solutions de câblage commerciales prêtes à l'emploi (COTS) et industrielles. Il abordera ensuite la façon dont la spécification d'un câble approprié permet d'augmenter les performances et de réduire le coût total de possession (TCO), qui constitue un indicateur clé dans la planification de l'IIoT.

Deux exemples d'application seront présentés : câbles de variateur de fréquence (VFD) pour moteurs industriels et câbles pour réseaux Ethernet industriel. Ces exemples ont été choisis du fait qu'ils illustrent différents aspects de l'utilisation d'un câble dans l'usine : fonctionnement haute puissance et réseaux de données haut débit.

L'environnement industriel est l'ennemi des câbles

Les installations industrielles incluent les sites de fabrication, les usines de traitement de pétrole et de gaz, les mines de charbon, les sites de traitement des eaux usées et les systèmes de transports, notamment les tunnels et les métros. Les exigences en matière de câbles de ces environnements sont élevées. Les risques incluent les produits chimiques, la lumière ultraviolette (UV), l'infiltration d'humidité, les impacts, les températures extrêmes et les vibrations (Figure 1). En même temps, le câble doit garantir l'intégrité du signal et réduire au minimum les pertes de signal et les effets EMI.

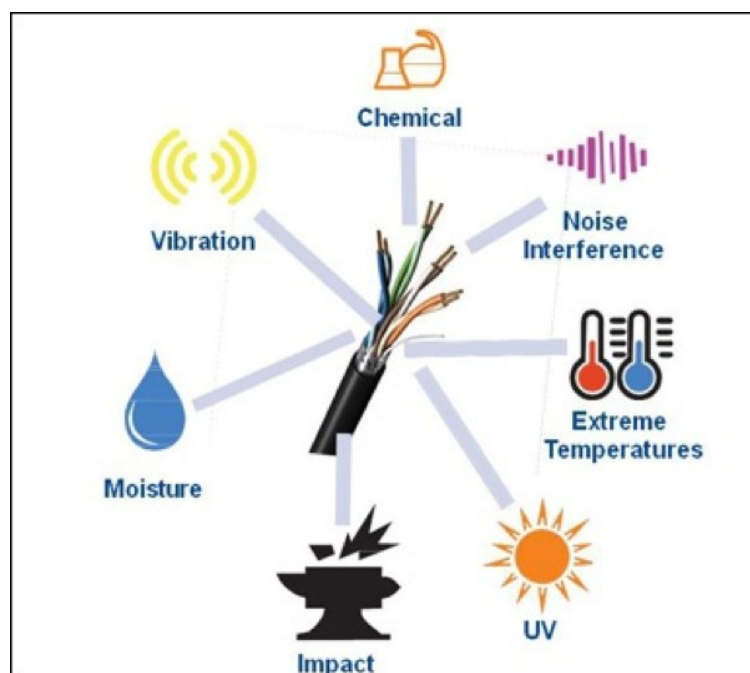


Figure 1 : Les câbles de grade industriel doivent maintenir l'intégrité du signal face aux nombreux risques dans une usine. (Source de l'image : [Belden](#))

Les défaillances peuvent compromettre la sécurité de l'opérateur, provoquer des problèmes de qualité et être très coûteuses : chaque minute de production perdue peut coûter des milliers de dollars. Les risques mécaniques liés aux câbles dans l'usine peuvent inclure les impacts, l'abrasion, les chocs, la tension et les vibrations. En outre, de nombreuses applications industrielles impliquent un mouvement en continu : machines-outils à plusieurs axes, robots, éoliennes, machines d'assemblage automatisé, systèmes de manutention automatisés et systèmes de convoyeur, pour ne citer que quelques exemples. Les câbles pour ces applications doivent être capables de supporter des flexions à répétition pendant des centaines de milliers de cycles.

Les risques d'infiltration incluent l'humidité, les produits chimiques et la poussière. De nombreux secteurs utilisent des produits chimiques agressifs et le câble doit supporter une exposition prolongée à ces produits, sans compromettre les performances. Par exemple, dans le secteur de l'agroalimentaire, l'équipement doit subir des nettoyages réguliers avec de l'eau à haute pression et des produits chimiques caustiques pour satisfaire à des exigences d'hygiène strictes. Un câble de mauvaise conception peut causer des fuites de fluides dans les conducteurs.

Le câblage industriel est souvent exposé à des éléments situés dans des installations intérieures et extérieures. Les risques résultants incluent les températures extrêmement basses ou extrêmement élevées, le rayonnement UV (lumière du soleil), l'humidité et même les dégâts provoqués par des rongeurs ou des racines d'arbre envahissantes.

L'environnement électrique industriel inclut de forts courants, de hautes tensions, des mises à la terre inappropriées et des interférences électromagnétiques provenant de soudeuses à l'arc, de systèmes de chauffage et d'équipements CVC. Lors des mises à niveau en usine, les contraintes d'espace peuvent causer un routage des nouveaux câbles à proximité de sources de bruit, telles que des moteurs et des générateurs.

Comparons maintenant les risques industriels mentionnés ci-dessus avec ceux rencontrés dans un environnement commercial typique. Les installations commerciales, y compris les espaces à usage de bureau, les salles de serveur et les maisons sont généralement climatisées à l'aide de systèmes de CVC qui permettent de maintenir les câbles à une température constante et à un niveau d'humidité constant. La majeure partie du câblage de l'infrastructure se trouve en l'air, au-dessus de dalles de plafond (plénum) ou est acheminée à l'intérieur des murs où elle peut fonctionner tranquillement pendant des années. Les environnements commerciaux standard sont généralement exempts de particules fines, de liquides et de températures excessives. De ce fait, les câbles commerciaux ne sont pas exposés à la poussière, à l'humidité, aux produits chimiques, aux températures extrêmes ni au rayonnement UV.

Les câbles COTS sont conçus pour satisfaire à des conditions spécifiques, et de ce fait, l'utilisation d'un câble commercial dans une application industrielle entraînera un taux de défaillance élevé, une perte de production, une augmentation des coûts et des risques pour la sécurité. Une comparaison entre les deux types de câble dans une série de tests standard montre les performances supérieures des produits de grade industriel (Figure 2).

Test	Résumé du test	Résultats : câble commercial	Résultats : câble industriel
------	----------------	------------------------------	------------------------------

Abrasion	Les câbles sont étirés sur un tambour abrasif, puis déplacés d'avant en arrière de façon cyclique	Défaillance après 25 cycles (rupture de la gaine, conducteurs visibles)	Les conducteurs restent protégés (gaine blindée)
Pliage à froid (UL 444)	Câble refroidi à une certaine température, puis enroulé autour d'une barre de 76,2 mm tout en étant tendu ; test effectué à -80°C, -60°C et -40°C	Aspect devenu cassant avec des craquelures visibles	Aucun dommage visible
Impact à froid (UL 444)	Test de résistance à la chute d'un poids sur le tube : force d'impact de 2,7 joules. Baisse progressive de la température	Défaillance à -20°C	Défaillance à -70°C avec gaine appropriée pour cette température
Écrasement	Application d'une plaque de 50,8 mm x 50,8 mm à un segment de câble : augmentation de la force tout en surveillant les performances	Défaillance à 181 kg	Défaillance à 1021 kg (câble armé)
Résistance à la coupe (CSA C22.2)	Application d'une pointe de ciseau sur le câble avec une augmentation progressive de la force jusqu'au sectionnement des conducteurs	Défaillance à une force appliquée de 41,7 kg	Défaillance à une force appliquée de 475,4 kg
Haute température	Exposition du câble à +60°C pendant une certaine durée, performances testées par rapport à la température ambiante (+20°C)	Une atténuation accrue à +60°C ne supporterait pas une distance de 100 mètres	Continue à prendre en charge une distance de 100 mètres à +60°C
Résistance aux huiles (UL 1277)	Immersion dans l'huile pendant 60 jours, +125°C	Signes de détérioration observés au niveau des propriétés de traction et d'élongation	Aucun signe de détérioration observé

Exposition aux UV (ASTM G154)	Exposition à une lumière fluorescente pendant 720 heures	Décoloration, signe précurseur de la dégradation	Aucun dommage
Immersion dans l'eau	Test de six mois, tests périodiques	Atténuation et dégradation accrues	Légère atténuation, dépasse les spécifications Cat 5e après 6 mois

Figure 2 : Soumis aux mêmes tests, les câbles de grade industriel fournissent des performances supérieures. (Source de l'image : Belden)

Anatomie d'un câble

Comme l'illustre la Figure 3, un câble est constitué de plusieurs composants essentiels qui contribuent à ses performances globales. Voici ces composants :

- Conducteurs de câble
- Isolant pour les câbles et gaines de câble
- Blindage EMI

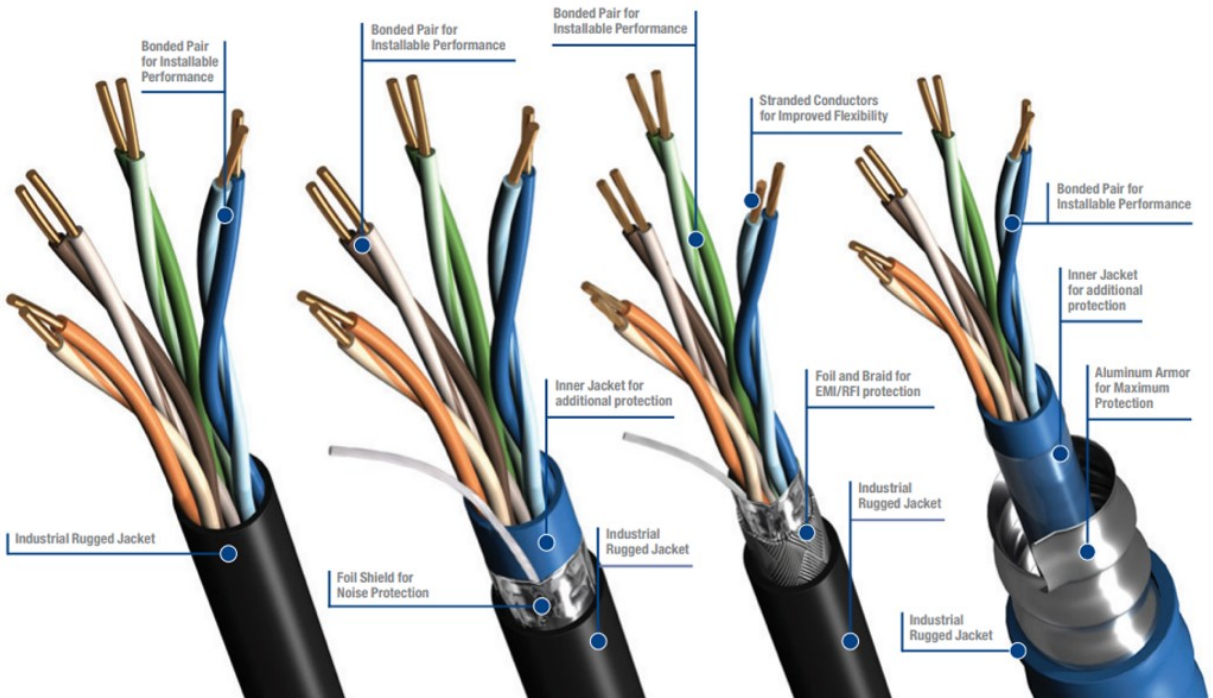


Figure 3 : Une sélection de câbles Ethernet Cat 5e industriels [DataTuff](#) montre quelques-unes des améliorations de conception qui augmentent la fiabilité et les performances. (Source de l'image : Belden)

Conducteurs de câble

Deux types de fils sont couramment utilisés pour la transmission d'alimentation ou de signaux électriques dans le câble : fil plein et fil divisé. Chacun possède des caractéristiques qui les différencient. Comme son nom l'indique, le chemin de conduction d'un câble plein est constitué d'un fil unique, le plus souvent en cuivre. En général, un câble plein est moins coûteux qu'un câble divisé et a un diamètre inférieur pour un courant équivalent. Il présente des performances électriques supérieures avec une résistance inférieure, mais n'est pas aussi flexible. Un câble plein est ainsi moins adapté à des machines mobiles, comme les robots.

Dans un câble **divisé**, les conducteurs sont constitués de nombreux filaments torsadés ensemble pour former un fil plus grand et plus épais. La flexibilité des câbles divisés fait qu'on les préfère dans les cas où les vibrations constituent un problème, ou dans des applications qui nécessitent des flexions et pliages fréquents.

Isolant pour conducteurs et gaines de câble

En plus de fournir un isolant, les plastiques utilisés pour le revêtement des conducteurs agissent comme diélectriques. Leur constante diélectrique et le facteur de dissipation affectent la transmission du signal (Figure 4). Plus précisément, la constante diélectrique mesure la capacité du câble à stocker l'énergie électrique : elle dépend de la vitesse à laquelle l'énergie se déplace dans l'isolant. Le facteur de dissipation mesure le taux auquel l'énergie est perdue vers (absorbée par) le diélectrique. La réduction de la valeur de l'un de ces paramètres permet d'améliorer la transmission du signal.

Type d'isolant	Densité relative	Constante diélectrique	Facteur de dissipation	Résistivité volumique (ohm-cm)	Rigidité diélectrique (volts/mil)	Inflammabilité	Plage de températures (°C)
PVC (standard)	1,25-1,38	4-6	0,06-0,10	10^{11}	800-900	Bonne	-20 à +80
PVC (premium)	1,38	3-5	0,080-0,085	10^{12}	800-900	Bonne	-55 à +105
Polyéthylène	0,92	2,27	0,0002	$>10^{16}$	1200	Médiocre	-60 à +80
Polypropylène	0,90	2,24	0,0003	$>10^{16}$	850	Médiocre	-60 à +80

Polyéthylène cellulaire	0,50	1,5	0,0002	–	500	Médiocre	-60 à +80
Polyéthylène ignifuge	1,30	2,5	0,0015	$>10^{16}$	1000	Moyenne	-60 à +80
FEP (ou TFE)	2,15	2,1	0,0007	$>10^{18}$	1200	Excellente	-70 à +200 (ou +260)
FEP cellulaire	1,2	1,4	0,0007	–	500	Bonne	-70 à +200

Figure 4 : Comparaison des propriétés pour les matériaux isolants des câbles courants. Une constante diélectrique inférieure et un facteur de dissipation inférieur permettent une meilleure transmission du signal. (Source de l'image : [Texas Instruments](#))

De nombreux câbles industriels présentent un blindage autour des conducteurs pour réduire le bruit électrique et protéger contre les interférences. Le blindage par tresse et le blindage par feuille sont les deux types les plus fréquents. Le blindage par feuille offre une couverture à 100 %, mais il est difficile à terminer, et sa résistance relativement élevée offre un trajet à la terre médiocre. Le blindage par tresse en cuivre offre une couverture de blindage de 60 % à 85 % seulement, mais sa masse plus importante fournit une meilleure conductivité et une procédure de terminaison plus facile, ainsi qu'une bonne connexion à la terre.

Dans les environnements EMI difficiles, une combinaison de blindage (feuille/tresse) peut fournir le niveau de protection le plus élevé. Par exemple, [Alpha Wire](#) propose des câbles qui incluent à la fois un blindage par feuille à triple couche aluminium/polyester/aluminium et un blindage par tresse en cuivre étamé (Figure 5).

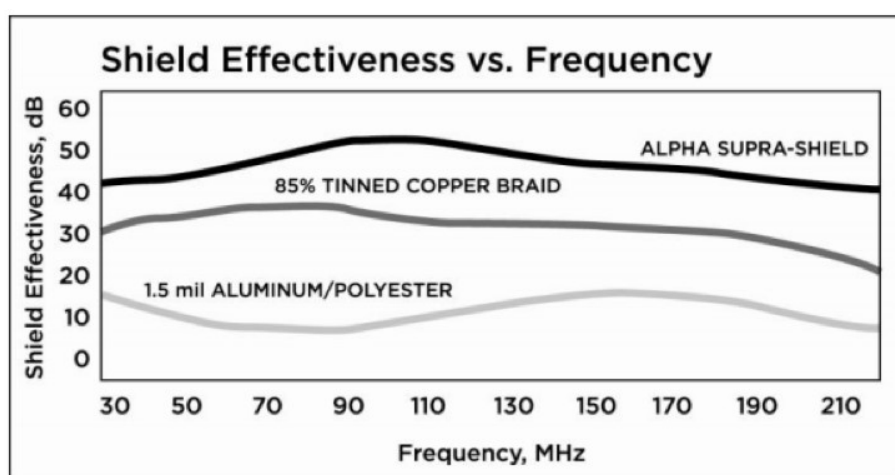


Figure 5 : Le blindage peut être composé d'une feuille (bas), d'une tresse en cuivre (milieu) ou, pour de meilleures performances, d'une combinaison de blindage par feuille aluminium/polyester/aluminium plus un blindage par tresse en cuivre étamé (haut). (Source de l'image : Alpha Wire)

La gaine de câble protège les conducteurs sous-jacents des dommages provoqués par diverses sources : mécaniques, humidité et produits chimiques lors de l'installation et la durée de service du câble. La gaine peut également améliorer la résistance aux flammes, protéger contre le rayonnement UV et faciliter l'installation.

Les câbles munis de gaines armées protègent les fils et offrent une protection contre l'écrasement. Leurs techniques de construction incluent un blindage entrecroisé en aluminium et un gainage de fil en acier galvanisé. Un câble armé peut également inclure une gaine en PVC ou en matériau similaire autour du métal, garantissant l'étanchéité du câble et le blindage contre les vapeurs corrosives et l'humidité.

Les options de câble standard incluent un blindage entrecroisé en aluminium ou en acier, et des câbles optimisés pour un usage enterré ou en extérieur, une résistance aux carburants, une haute capacité de flexion ou un fonctionnement à hautes et basses températures.

De nombreux fabricants incluent des caractéristiques propriétaires supplémentaires dans des câbles hautes performances. Par exemple, les câbles Ethernet industriels Cat 5e DataTuff de Belden utilisent la construction brevetée à paire liée de l'entreprise qui permet d'éliminer les écarts entre les paires de conducteurs afin d'offrir des performances électriques fiables et régulières.

Exemple d'application : réseaux Ethernet

La technologie Ethernet est présente dans les usines depuis des années, mais son utilisation s'est étendue aux applications de contrôle des machines haute tension (> 600 V) où la sécurité constitue un élément primordial de la conception. Bien qu'ils ne transportent pas de hautes tensions, les câbles de commande destinés à ces applications restent soumis aux exigences du National Electrical Code (NEC), ce qui entraîne une augmentation de la disponibilité de câbles Ethernet de 600 V.

Les câbles de la série [Flamar](#) de [Molex](#) constituent un bon exemple. Conçus pour l'automatisation industrielle, ces câbles fournissent une capacité de 600 V et sont proposés dans des versions pour les applications de commande générales, le contrôle de servomoteur et les réseaux. Les câbles sont résistants aux huiles et aux projections de soudure, ils sont conformes aux normes Ecolab en matière d'hygiène alimentaire et ils répondent à la norme Oil Resistance II Compliance d'Underwriters Laboratories (UL).

Les câbles utilisés dans les télécommunications possèdent leur propre norme environnementale (ANSI/TIA-1005-A) qui couvre les sites industriels. Cette norme définit quatre niveaux de classifications environnementales pour la robustesse : mécanique, infiltration, climatique/chimique et électromagnétique (MICE). Les classifications sont répertoriées par niveau de sévérité pour chaque catégorie : 1, 2 ou 3. La classification environnementale d'un bâtiment commercial est généralement M1I1C1E1 ; la classification environnementale la plus élevée dans la norme est M3I3C3E3.

Lors du choix entre plusieurs câbles qui satisfont nominalement aux exigences les plus élevées (comme Ethernet Cat 5e), le concepteur doit comparer soigneusement les spécifications du câble. Il existe souvent plusieurs câbles à différents niveaux de prix pour satisfaire aux exigences d'applications les plus élevées. Cependant, un examen plus approfondi peut révéler les différences au niveau des spécifications. Par exemple, les modèles [7928](#) et [7939](#) de Belden sont des câbles DataTuff à 8 conducteurs certifiés pour une utilisation industrielle Cat 5e, mais les applications recommandées pour ces câbles sont différentes. Cela s'explique par de subtiles variations de la construction du 7928 qui

lui confèrent des avantages en termes de performances par rapport au 7939, mais qui font également qu'il est plus coûteux à produire (Tableau 1).

Spécifications	7939	7928
Conducteur	Cuivre divisé 7x32	Cuivre massif de 0,5 mm
Isolant	Polychlorure de vinyle (PVC)	Éthylène fluoré (FEP)
Matériau de blindage extérieur	Feuille d'aluminium-ruban polyester	Aucun

Tableau 1 : Les modèles 7939 et 7928 de Belden sont tous les deux des câbles DataTuff Cat 5e à 8 conducteurs, mais de subtiles variations au niveau de la construction confèrent au 7928 quelques avantages en termes de performances. (Source des données : Belden)

L'isolant FEP du 7928 lui permet de fonctionner à une température plus élevée que celle du PVC du 7939. Le conducteur en cuivre massif du câble 7928 offre une meilleure résistance en courant continu (DCR) par mètre et une capacité maximale par mètre bien plus faible par rapport au conducteur divisé du 7939. Ces différences électriques confèrent au 7928 un temps de propagation inférieur et une vitesse de propagation supérieure. Cela se résume dans la spécification des performances haute fréquence. Le fonctionnement du câble 7928 est spécifié jusqu'à 350 mégahertz (MHz) contre 100 MHz pour le 7939. Le 7928 présente également de meilleures performances à plus basses fréquences. En plus de ces différences claires en termes de performances, il y a également des différences en termes de coûts. Ces deux câbles répondent aux spécifications de base pour une application particulière, mais la version de qualité supérieure offre une marge supplémentaire de performances et de confiance pour le fonctionnement.

Exemple d'application : câble VFD

Un moteur convertit l'énergie électrique en mouvement mécanique : les moteurs sont un élément clé des opérations industrielles depuis des décennies. Les types de moteur incluent des conceptions à courant continu avec et sans balais (BLDC), des conceptions à courant alternatif (CA) et des moteurs pas-à-pas, qui présentent chacun leurs performances caractéristiques et leurs fonctionnalités d'entraînement.

Caractéristiques d'un train d'impulsions VFD

Un variateur de fréquence fournit un contrôle précis de la vitesse et du couple d'un moteur CA via la modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les VFD sont largement utilisés dans les processus de fabrication, mais les caractéristiques du signal de commande commuté font qu'il est essentiel de choisir le câble approprié pour obtenir les meilleures performances et une durée de fonctionnement étendue. Voici certaines de ces caractéristiques :

- **Ondes stationnaires** : un câble VFD présente une impédance d'environ 85 à 120 ohms (Ω). L'impédance d'un moteur VFD est supérieure, généralement quelques centaines d'ohms. Lorsque le train d'impulsions PWM se trouve au niveau de l'impédance supérieure du moteur, une grande partie de l'énergie est réfléchi. Cette onde stationnaire multiplie la tension du câble par deux ou trois, ce qui entraîne une dégradation de l'isolant et peut provoquer une défaillance.
- **Décharge par effet corona** : le champ électrique intense qui entoure les conducteurs ionise l'air situé entre eux, ce qui provoque une décharge d'énergie. Les décharges par effet corona dégradent le matériau isolant du câble et endommagent le blindage. Elles peuvent également endommager les composants électroniques de commande, gaspiller de l'énergie et même générer suffisamment de chaleur pour faire fondre l'isolant.
- **Distorsion harmonique** : tout signal contient de l'énergie à sa fréquence de fonctionnement, plus de l'énergie à des multiples de cette fréquence (harmoniques), ce qui génère une déformation des ondes. L'énergie à des harmoniques plus élevées augmente les pertes en joules dans le câble et provoque un échauffement.
- **Courant d'appel** : au démarrage, un moteur peut utiliser une grande quantité de courant. La plupart des contrôleurs VFD limitent le courant de démarrage maximum en augmentant progressivement la vitesse du moteur, mais le câble doit néanmoins être conçu pour supporter une pointe initiale.
- **EMI** : la commutation rapide des impulsions numériques crée une interférence électromagnétique. Cette énergie peut être transférée à d'autres circuits, ce qui provoque une dégradation des signaux, de faux signaux et d'autres problèmes.

Lors de la sélection d'un câble VFD, il est essentiel de bien comprendre le système de commande complet et la tenue en courant requise, peut-être en tenant compte d'une augmentation future. Les câbles VFD hautes performances présentent des capacités de mise à la terre et de blindage supérieures par rapport aux câbles de grade construction et ils fournissent des connexions plus fiables et stables. Voici quelques conseils et des recommandations clés pour des performances VFD accrues :

- Le système de mise à la terre doit être conçu pour la plus faible impédance de mise à la terre possible. Un câble avec cuivre supplémentaire dans le chemin de terre (appelé conception de terre 300 %) permet de s'assurer qu'un courant de mode commun (CMC) potentiellement dangereux est contenu et renvoyé au variateur sans effets négatifs.
- Choisissez un conducteur conçu pour un fonctionnement haute fréquence (conducteurs en cuivre étamé) pour une protection contre la corrosion, et un nombre de brins élevé pour une surface accrue.
- Choisissez un câble avec une faible capacité et une rigidité diélectrique élevée. Les câbles VFD à revêtement nylon haute température thermoplastique (THHN) de grade construction présentent des pertes de charge de câble plus élevées et génèrent des tensions d'ondes réfléchies plus rapidement. Ces câbles présentent environ un tiers de la résistance d'isolant d'un conducteur de grade élevé avec un isolant thermodurcissable, tel que le polyéthylène réticulé (XLP) : le XLP fournit également une meilleure résistance aux décharges par effet corona que le THHN.
- Le matériau de blindage a une grande influence sur les performances de bruit. Un blindage à faible impédance résulte en une réflexion de courant inférieure et une fiabilité système supérieure. Inversement, un câble non blindé peut agir en tant qu'antenne et constituer une source d'émissions rayonnées. Le blindage doit présenter une surface maximale pour offrir les

meilleures performances haute fréquence. Comme mentionné précédemment, les tresses ou les rubans doubles en cuivre fournissent les meilleures performances de blindage.

Les [câbles V-Flex](#) d'Alpha Wire sont spécifiquement conçus pour les applications VFD hautes performances sur des robots, des convoyeurs et d'autres machines avec des mouvements répétitifs ou continus. Cette gamme inclut sept conceptions de câble, des conducteurs divisés en cuivre étamé de 4 AWG à 16 AWG, une gaine TPE et une flexibilité améliorée pour un routage et une manipulation plus simples. Par exemple, le câble [VF16006 BK005](#) est un câble à quatre conducteurs avec un fil de 6 AWG et un blindage par feuille/tresse (Figure 6).



Figure 6 : Le câble VF16006 BK005 d'Alpha Wire est conçu pour des applications VFD. Il peut supporter jusqu'à 52 A par conducteur et utilise un blindage par feuille/tresse. (Source de l'image : Alpha Wire)

Le câble est résistant aux huiles et aux UV, présente une température de fonctionnement de -40°C à +90°C et peut prendre en charge des entraînements jusqu'à 50 HP de puissance avec un courant à pleine charge de 52 A par conducteur.

Conclusion

Pour une application donnée, le concepteur a généralement le choix entre plusieurs câbles à des niveaux de prix différents, qui semblent tous satisfaire aux spécifications les plus élevées. Toutefois, les environnements de fonctionnement commercial et industriel sont très différents. Cet article a abordé les différences de construction entre les câbles commerciaux et industriels et a examiné les exigences de câblage pour deux applications industrielles courantes. Comme l'illustre cet article, les câbles industriels incluent des améliorations subtiles et moins subtiles par rapport aux câbles commerciaux qui s'avèrent bien plus que rentables sur leur durée de vie dans l'usine.

www.digikey.fr/fr/articles/techzone/2019/feb/the-right-cable-industrial-application-how-to-choose-and-use