

## LIVRE BLANC : IMPACT DE LA VARIATION DE VITESSE SUR LES MOTEURS IMMERGÉS



Les moteurs immergés sont utilisés dans de nombreuses applications, telles que l’approvisionnement en puits profonds, l’irrigation et la surpression. Pour bénéficier d’un système d’isolation robuste, celui-ci doit être conçu pour résister aux pics de tension pendant le fonctionnement du moteur.

Très souvent les applications nécessitent un long câble pour relier le moteur à l’alimentation électrique. Or une longueur de câble élevée augmente la valeur des pics de tension lorsque le moteur est contrôlé par un variateur de fréquence (VFD), équipement appelé aussi convertisseur de fréquence.

Les composants primaires d’un système d’isolation de moteur doivent résister aux contraintes de tensions interphases, entre les phases et la terre et entre spires (voir détails en Figure 1).

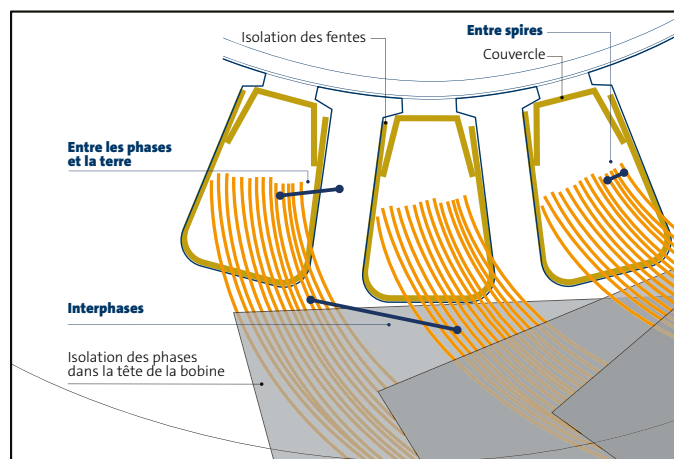


Figure 1 : Système d’isolation classique d’un stator

## CONCEPTION DU STATOR DES MOTEURS IMMERGÉS

Dans les moteurs immergés, l'espace entre le stator et le rotor est rempli d'un liquide moteur, généralement un mélange de glycol et d'eau. Ces moteurs sont appelés moteurs à rotor noyé. La Figure 2 montre les deux principaux types de stator pour un moteur à rotor noyé : les stators à enroulement noyé et les stators à enroulement imprégné dans la résine (parfois appelés stators encapsulés).

Dans les stators encapsulés, une boîte est insérée dans la fente du stator. L'espace autour du fil de cuivre est rempli d'un matériau de remplissage. Le stator encapsulé est hermétiquement fermé, et le fil de cuivre n'est pas en contact avec l'eau. Les phases peuvent être isolées les unes des autres par du papier de phase et les fils sont fixés dans la résine de remplissage.

Les fils de cuivre d'un stator à enroulement noyé sont en contact direct avec le liquide à l'intérieur du moteur et on utilise donc un fil de cuivre spécial avec une isolation plus épaisse, par exemple PE2PA, et une plus grande durabilité mécanique. Les enroulements du stator sont accessibles, et il est possible de rebobiner le stator en cas de défaillance électrique. Les performances électromagnétiques et la robustesse d'un stator à enroulement noyé sont généralement inférieures à celles d'un stator encapsulé.

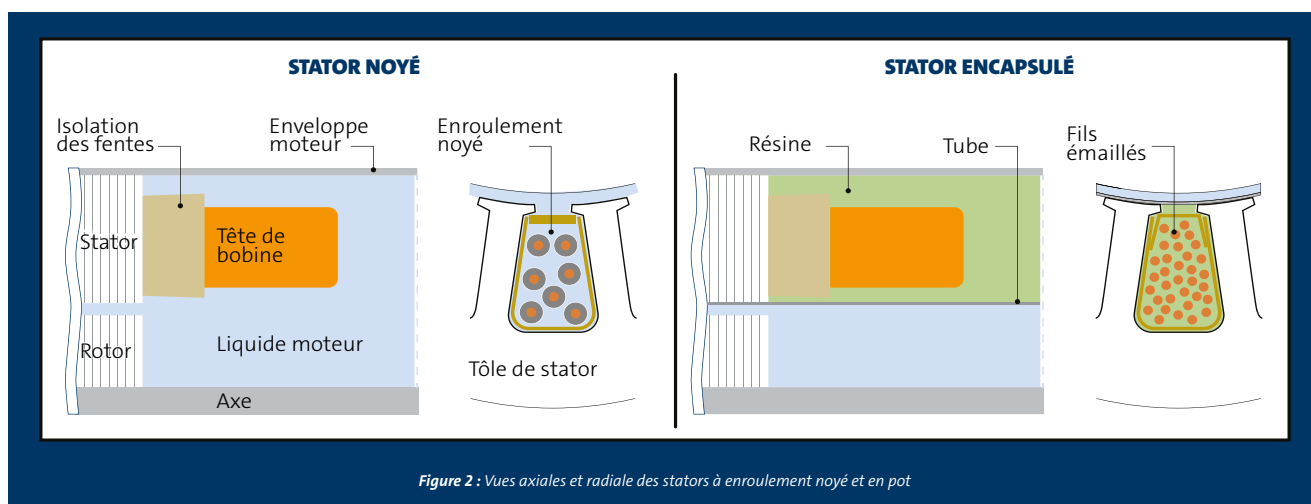


Figure 2 : Vues axiales et radiales des stators à enroulement noyé et en pot

## UTILISATION D'UN FILTRE À ONDES SINUSOÏDALES

Le filtre à ondes sinusoïdales est placé entre le VFD et le moteur, comme le montre la Figure 3, pour protéger le système d'isolation du moteur des tensions transitoires liées à la génération de tension LMI par le VFD.

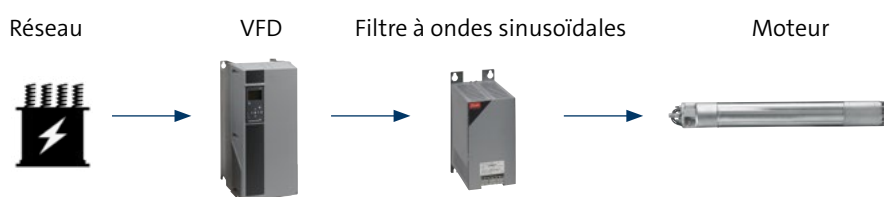


Figure 3 : Composants d'un moteur à vitesse variable et d'un système de pompage

Un VFD avec un pont redresseur à diodes passif, un tampon DC et un onduleur triphasé, comme le montre la Figure 4, est la topologie la plus couramment utilisée dans les installations de pompage actuelles.

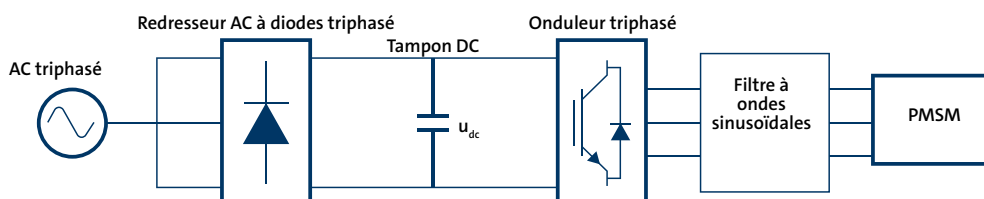


Figure 4 : Schéma du circuit électrique d'un moteur à vitesse variable et d'un système de pompage

La tension AC triphasée du réseau est redressée en une tension de liaison DC par le redresseur à diodes comme le montre la Figure 5. La tension de liaison DC est découpée en une série d'impulsions de tension rectangulaires, avec une largeur et une fréquence variables mais une amplitude fixe, en activant et désactivant les transistors à une fréquence élevée dans l'onduleur. Le schéma de commutation des transistors est contrôlé par une stratégie PWM permettant une régulation à vitesse variable du moteur.

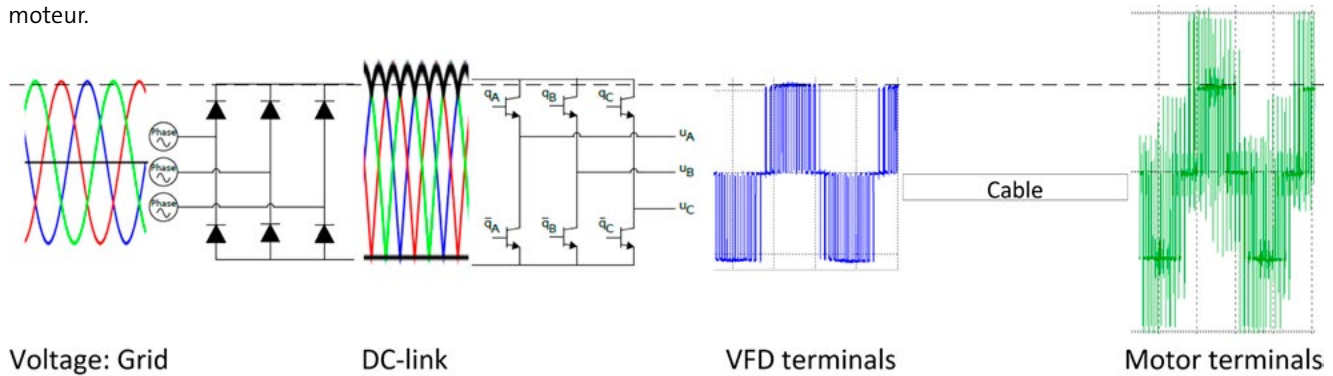


Figure 5 : Formes d'onde de tension sans filtre à ondes sinusoïdales

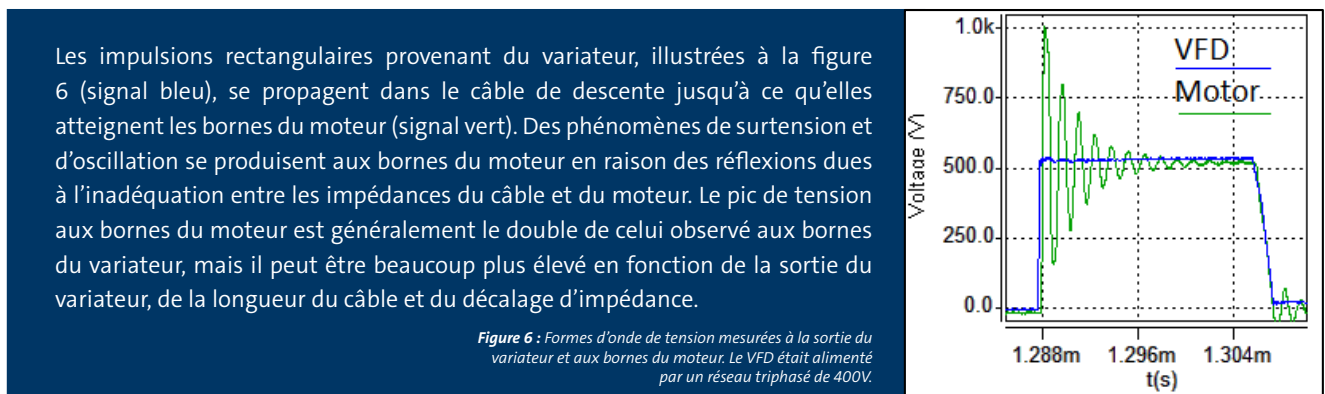


Figure 6 : Formes d'onde de tension mesurées à la sortie du variateur et aux bornes du moteur. Le VFD était alimenté par un réseau triphasé de 400V.

Le but du filtre à ondes sinusoïdales est de filtrer les tensions LMI à la sortie du VFD. La Figure 7 montre la sortie de tension sinusoïdale provenant du filtre. La forme d'onde sinusoïdale ne génère pas de dépassement ni de résonance avec les câbles longs et le pic de tension est donc réduit.

Le filtre à ondes sinusoïdales réduit également le bruit électromagnétique rayonné à haute fréquence généré par le VFD et transmis par le câble, mais cela doit être traité séparément car il faut tenir compte de l'application, des exigences locales et des installations électriques sur le site.

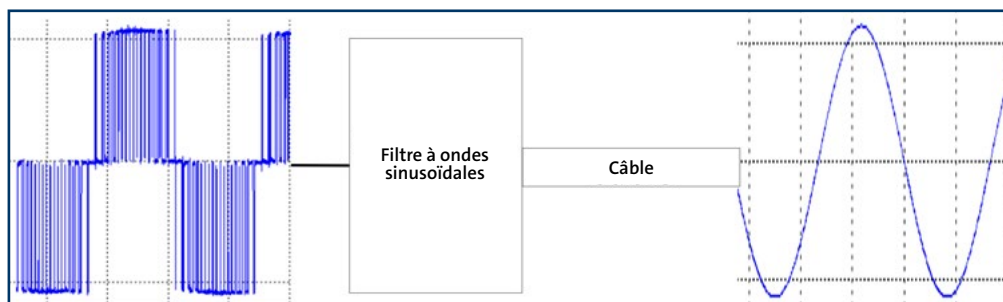


Figure 7 : Filtre à ondes sinusoïdales avec entrée de tension PWM (à gauche) et sortie de tension sinusoïdale (à droite)

## EFFETS SUR LES MOTEURS NON CONÇUS POUR FONCTIONNER SUR VFD

Les moteurs non conçus pour être entraînés par un VFD sans filtre à ondes sinusoïdales sont susceptibles de subir une défaillance électrique du système d'isolation après une courte période de fonctionnement.

Si le pic de tension dans le moteur dépasse le niveau de décharge partielle du matériau d'isolation, ce dernier commence à se détériorer. Les décharges partielles provoquent la dégradation et finalement la défaillance du système d'isolation par l'usure chimique et mécanique du matériau isolant. La Figure 8 montre la dégradation du fil de cuivre (à gauche) et du papier isolant (à droite). L'érosion du fil de cuivre commence à des niveaux de tension inférieurs par rapport au papier isolant et, de ce fait, un papier isolant de phase est souvent nécessaire entre deux phases dans un stator.

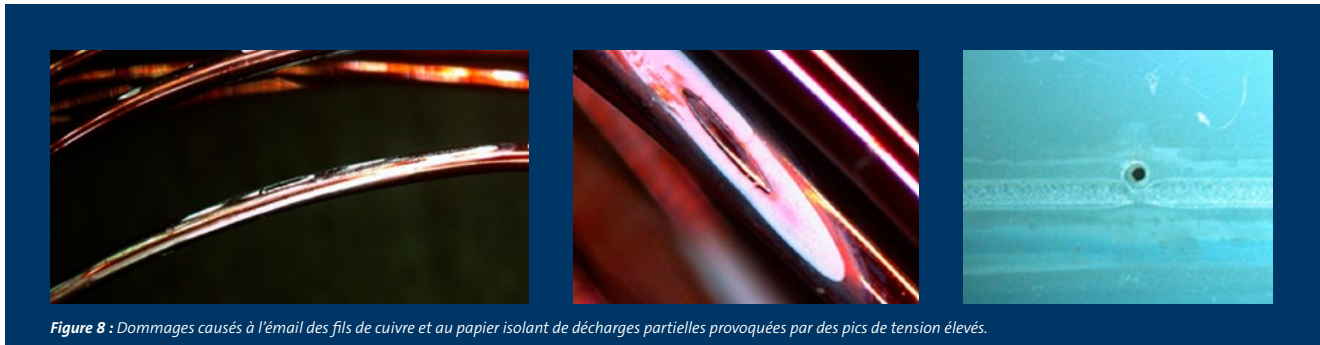


Figure 8 : Dommages causés à l'émail des fils de cuivre et au papier isolant de décharges partielles provoquées par des pics de tension élevés.

## MOTEURS CONÇUS POUR LES VARIATEURS DE FRÉQUENCE

Le système d'isolation des moteurs conçus pour les variateurs de fréquence est construit avec des matériaux et une structure qui peuvent résister à l'augmentation du niveau de pic de tension du VFD. La conception et les matériaux du système d'isolation sont adaptés aux pics de tension et aux températures pendant le fonctionnement. Lorsque le système est adapté et validé, les processus de fabrication doivent être en mesure de maintenir un niveau élevé afin de garantir une conception de moteur robuste pour utilisation avec un convertisseur de fréquence.

Le moteur à aimants permanents Grundfos MS6000P de 6 pouces fait partie des rares moteurs immergés qui existent sur le marché, conçu et certifié pour fonctionner sans filtre à ondes sinusoïdales dans les limites décrites au tableau 1 (voir ci-après). La conception robuste du convertisseur du moteur MS6000P réduit le coût, la complexité et la taille du système de pompage immergé en permettant de s'affranchir de la nécessité d'installer un filtre.

Caractéristiques du moteur	Valeur	Unité
Température du liquide	$\leq 60 / (140)$	$^{\circ}\text{C} / (^{\circ}\text{F})$
Pic de tension aux bornes moteur (VLL)	$< 1500$	VLL
dU/dt aux bornes moteur	$< 6$	V/ns
Caractéristiques du réseau	Valeur	Unité
Tension ligne-ligne (nominale)	$\leq 460$	V RMS
Phases	3	[-]
Caractéristiques du variateur	Valeur	Unité
Tension DC	$< 620$	Vdc
Pic de tension aux bornes variateur (VLL)	$< 650$	VLL
Temps de montée aux bornes (10-90%)	$> 100$	ns
dU/dt aux bornes variateur	$< 5$	V/ns
Fréquence de commutation	$\leq 4$	kHz
Redressement de la tension réseau	Passive rectifier bridge	
Caractéristiques du câble	Valeur	Unité
Longueur	$\leq 300 / (1000)$	m / (ft)

Tableau 1 : Caractéristiques du système pour le fonctionnement du moteur à aimant permanent Grundfos MS6000P sans filtre à ondes sinusoïdales. Les conditions locales et nationales en matière de sécurité, EMI, etc. doivent toujours être respectées et peuvent exiger un filtrage pour supprimer les bruits, par exemple. Les câbles et autres composants du système doivent être correctement classés pour l'utilisation du variateur de fréquence.

