

GUIDE D'ACHAT

# Les moteurs électriques

JEAN GUILHEM <sup>[1]</sup>

**Les moteurs électriques absorbent à eux seuls 70 % du courant consommé en Europe. Augmenter leur rendement optimise leurs performances et améliore donc le bilan énergétique global. Meilleurs rendements et vitesse variable constituent une remarquable source d'économies. 40 % des nouvelles installations de moteurs adoptent ces technologies qui pérennisent investissements et équipements en accroissant fiabilité et durée de vie des installations.**

Les moteurs électriques servent à une multitude d'applications aux exigences analogues : rendement élevé, longévité, maintenance allégée et fiabilité accrue. Par ailleurs, la sauvegarde de l'environnement, défi majeur de notre siècle, passe par la maîtrise de la dépense énergétique. L'industrie est en première ligne. Sa consommation pèse lourd avec des moteurs représentant à eux seuls près de 70 % du courant utilisé en Europe. À terme, ces moteurs ont l'obligation d'un « haut rendement » énergétique. L'enjeu est de taille puisque dans l'Hexagone on recense plus de 10 millions de moteurs de puissance supérieure ou égale à 0,75 kW.

Répartis dans tous les secteurs, les moteurs doivent consommer moins durant leur cycle de vie pour générer une même puissance utile et répondre aux normes internationales et européennes. La norme internationale EN/CEI 60034-30, définissant les classes IE1, IE2, IE3, concerne les moteurs asynchrones à induction triphasés à cage (moteur seul, motoréducteur ou moteur frein) dont la tension n'excède pas 1 000 V dans une plage de puissance de 0,75 kW à 375 kW (50 ou 60 Hz) et comportant 2, 4 ou 6 pôles, ce type de machines constituant l'essentiel du parc européen.

L'option moteur haut rendement compense rapidement l'investissement car l'énergie représente plus de 80 % du coût complet (achat plus exploitation) d'un moteur durant son activité.

Ainsi, un moteur haut rendement (IE2 ou IE3) est rentabilisé en 24 à 36 mois pour quinze années de service. Autrement dit, une machine de 15 kW, fonctionnant 6 000 heures/an, offre une économie de 4 MWh annuellement (soit environ 200 € par an, avec un kilowattheure à 0,05 €). Pour encourager cette migration vers l'efficacité énergétique, les industriels bénéficient de certificats d'économie d'énergie émis

**mots-clés**

énergie, électrotechnique, efficacité énergétique, puissance

par leurs fournisseurs de courant afin de financer en partie l'acquisition d'unités à haut rendement. D'ailleurs, depuis juin 2011, la commercialisation des moteurs de classe inférieure à IE2 n'est plus autorisée et, à partir de janvier 2015, l'interdiction sera élargie aux moteurs de 7,5 à 375 kW de classe inférieure ou égale à IE2. Pour continuer à progresser en sobriété, dès janvier 2017, tous les moteurs devront afficher un rendement au moins supérieur à celui prévu par la classe IE3. À ces deux dernières échéances, les moteurs classe IE2 pourront encore être commercialisés s'ils sont associés à un variateur de vitesse.

« De manière à équiper des installations standard, nous suivons les évolutions de la réglementation. Pour des puissances inférieures à 0,75 kW, nous restons sur les classes en vigueur IE2 et IE3, et, pour épuiser nos stocks, nous proposerons à partir de 2015 des moteurs de classe IE2 ou IE3 auxquels nous ajouterons un variateur », confirme François Steinmetz, responsable technique chez Sermes Motorisation.

**Moteurs à aimants permanents**

Alors, moteur haut rendement ou moteur plus variateur ? La mesure de rendement d'un moteur alimenté par le réseau est toujours réalisée sans variateur. Cependant, celui-ci est un auxiliaire tellement intéressant que certains constructeurs ou OEM associent moteur de classe IE2 et variateur pour atteindre un niveau IE3 en rendement global d'installation.

Dans ces conditions, faut-il opter pour le variateur de vitesse sur un moteur IE2 ou directement investir dans un moteur IE3 ? « Il n'y a pas de réponse catégorique. En fait, les économies d'énergie dépendront d'autres paramètres tels que les conditions de démarrage, les applications, les caractéristiques de charge, etc. Chaque cas étant spécifique, il demandera une solution adaptée. Par ailleurs, une méthode de classement concernant moteurs plus variateurs et motovariateurs intégrés verra le jour à l'horizon 2015-2016 », précise

**L'essentiel**

- Améliorer le rendement des moteurs, c'est plus de matière de meilleure qualité faisant appel à une forte densité de cuivre et aux terres rares (moteurs à aimants permanents).
- La classe IE1 est définitivement proscrite alors que l'IE4 entrera en vigueur en 2017. Les moteurs IE2 avec variateurs pourront toujours être vendus après 2015.
- Sans pertes rotoriques, moteurs synchrones à aimants permanents et moteurs à réluctance offrent les meilleurs rendements mais exigent une électronique de puissance spécifique.

[1] Article tiré de *Mesures*, n°861, janvier 2014.

# à haut rendement

Jean-François Soguel, responsable marketing moteurs haut rendement chez Leroy-Somer.

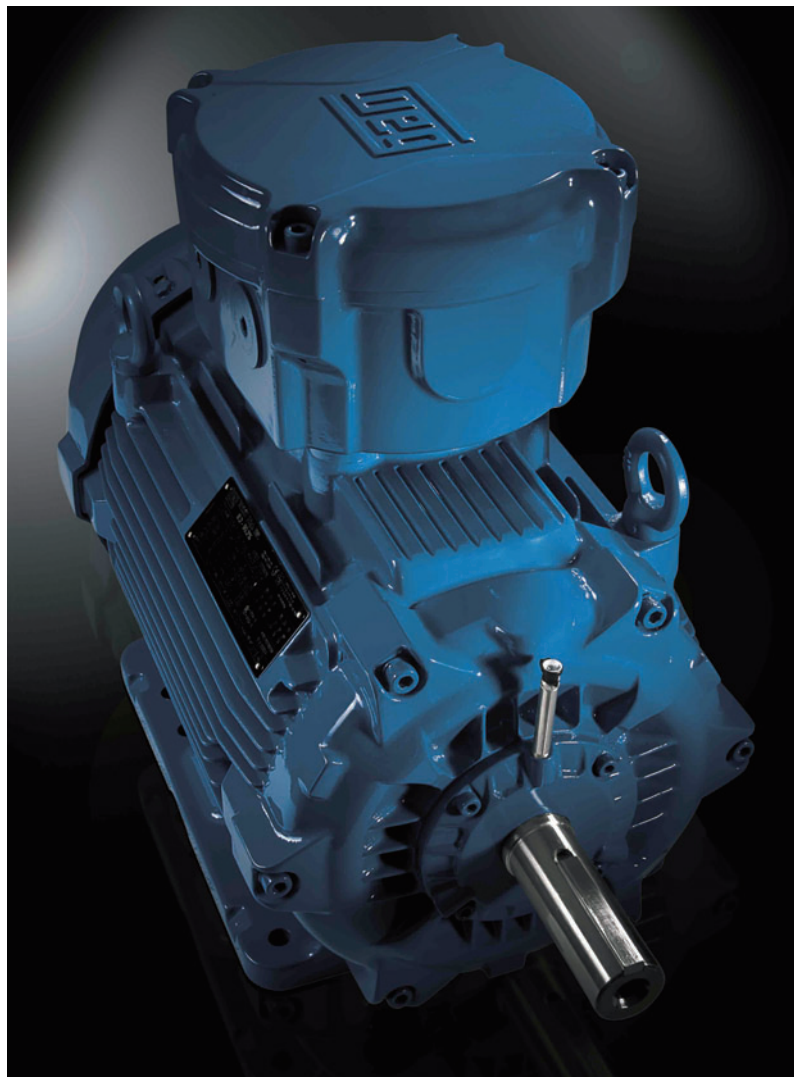
Pour encore plus d'exigence sur le rendement énergétique, les moteurs asynchrones classe IE4 associent réduction des consommations, longévité, moindre maintenance pour des puissances élevées, le tout avec une diminution des pertes de 40 %, comparé aux générations précédentes. Silencieux, fiables, chauffant peu, ils ménagent isolations électriques et environnement.

« Pour que les clients estiment eux-mêmes le gain lors du choix d'un nouveau moteur, plusieurs logiciels ont été développés dont le programme Payback, une application capable d'estimer le retour sur investissement lors d'achats de moteurs ou variateurs », souligne Yves Jamet, responsable du service affaires et projets chez WEG France. Ce constructeur anticipe encore avec sa génération de moteurs hybrides WQuattro à aimants permanents et réluctance variable. Ces machines sont capables de démarrer sans convertisseur de fréquence et sont interchangeable avec une solution asynchrone. « Ainsi, nous atteignons la classe IE4 en moteur asynchrone pour les puissances supérieures à 7,5 kW », précise Yves Jamet.

Cependant, estime François Steinmetz, « les solutions IE4 à partir de moteurs à aimants permanents, tributaires des terres rares, sont souvent proposées à des prix prohibitifs avec retours sur investissements pénalisants. En outre, leur coût varie sur des périodes courtes (un mois) alors que les moteurs à réluctance sont complexes à fabriquer. Pour déjouer ces obstacles et atteindre l'IE4, Sermes préconise les solutions associant moteur IE3 et variateur ».

La machine idéale serait, sans nul doute, un moteur synchrone capable de se passer des fameuses terres rares. La solution est proposée par Hitachi, qui développe un moteur de 11 kW à aimants permanents sans utiliser de matériaux tels que le néodyme ou le dysprosium (terres rares). Les alternatives à leur utilisation font partie d'enjeux considérables, notamment pour le développement des moteurs de traction des véhicules électriques.

Dès 2008, Hitachi avait annoncé un moteur de 150 W utilisant des composants réalisés à partir de métal amorphe couplés avec un rotor en ferrite aimantable. Le dernier modèle conçu par le constructeur nippon affiche 11 kW, pour une efficacité de 93 % et un indice de performance IE4, niveau de rendement le plus élevé pour l'International Efficiency Class



■ Investir dans un moteur à haut rendement est rentabilisé sur 24 à 36 mois pour 15 années de service

(IEC). Alors que le moteur de 2008 atteignait 86 % d'efficacité, le nouveau modèle est non seulement plus performant, mais aussi plus compact. Sa conception fait appel à un double rotor et utilise un stator en fer laminé caractérisé par de faibles pertes électriques. En effet, ce métal amorphe bénéficie d'une structure atomique désordonnée associant résistance élastique à la force pour de très faibles pertes. Afin d'élaborer ce nouveau type de machines, Hitachi utilise des logiciels d'analyse 3D du comportement des champs magnétiques et de leurs interactions avec un stator en fer laminé.

Aperçu de l'offre en moteurs électriques à haut rendement (\*)

Fabricant	Modèle	Classe de rendement	Puissance (kW)	Vitesse de rotation (tr/min)	Nombre de pôles	Environnement	Observations
ABB	M3AA	IE3	0,75 à 55	3 000/1 500/1 000/750	2, 4, 6, 8	IP55	Moteur carcasse aluminium à rendement premium, pouvant fonctionner en direct sur réseau ou en vitesse variable
	M3AA	IE2	0,09 à 90	3 000/1 500/1 000/750	2, 4, 6, 8	IP55	Moteur carcasse aluminium à haut rendement, pouvant fonctionner en direct sur réseau ou en vitesse variable
	M3BP	IE3	11 à 355	3 000/1 500/1 000/750	2, 4, 6, 8	IP55	Moteur carcasse fonte à rendement premium, pouvant fonctionner en direct sur réseau ou en vitesse variable
	M3BP	IE2	0,25 à 1 000	3 000/1 500/1 000/750	2, 4, 6, 8	IP55	Moteur carcasse fonte à haut rendement, pouvant fonctionner en direct sur réseau ou en vitesse variable
	M3JP	IE2	0,37 à 710	3 000/1 500/1 000/750	2, 4, 6, 8	Atex - Antidéflagrant	Moteur de sécurité pour environnement explosif gazeux
	M3BL		11 à 350	3 000/2 100/1 500	NA	IP55	Moteur synchrone haut rendement à réluctance variable sans aimants permanents
	M3AL		1,1 à 37	3 000/2 100/1 500	NA	IP55	Moteur synchrone haut rendement à réluctance variable sans aimants permanents
Lenze	MD	IE1	0,06 à 22	1 000, 1 500, 3 000	2, 4, 6	IP54/55/65	Avec frein à partir de 0,75 kW
	MH	IE2	0,75 à 45	1 500	4	IP54/55/65	Moteurs modulaires avec options : frein, codeur, peinture époxy, ventilation forcée, connecteur HAN ou M23, volant...
	MF	IE3	0,55 à 22	3 500	4	IP54/55/65	Moteurs compacts de jusqu'à 2 tailles inférieures à celle d'un moteur standard et avec large plage de vitesse
	Lenze Smart Motor	IE3	0,09 à 1,36	500 à 2 600	4	IP54/55/65	Moteurs compacts et modulaires, 4 x Mn au démarrage. Réglage par smartphone
Leroy-Somer Emerson	Gamme LS2 Séries LSES - FLSES	IE2	0,75 à 375	3 600 à 1 000	2, 4, 6	IP55	Applications usage général ou carter fonte pour applications usage sévère
	Gamme LS2 Série LSMV	IE2	0,75 à 132	0 à 6 000	2, 4, 6	IP55	Pour fonctionnement avec variateur de fréquence
	Gamme Dyneo Séries LSRPM - PLSRPM	IE4	0,75 à 600	750 à 5 500 (nominale)	8	IP55 ou IP23	Économie d'énergie et compacité
Sermes	Almo Q2E	IE2	0,75 à 45	1 000-1 500-3 000	2, 4, 6	IP55	Carcasse aluminium Application industrielle standard
	Almo Q3E	IE3	0,75 à 45	1 500-3 000	2, 4	IP55	Carcasse aluminium Application industrielle standard
	Almo SM2	IE2	4 à 315	750-100-1 500-3 000	2, 4, 6, 8	IP55	Carcasse fonte Application industrielle standard
	Almo SM3	IE3	4 à 315	750-100-1 500-3 000	2, 4, 6, 8	IP55	Carcasse fonte Application industrielle standard
	VEM W21	IE2	0,75 à 315	750-100-1 500-3 000	2, 4, 6, 8	IP55 à 66 Atex Exe, ExnA, silo	Carcasse fonte Environnement marin, désenfumage, chimie
	VEM W41	IE3	0,75 à 315	750-100-1 500-3 000	2, 4, 6, 8	IP55 à 66 Atex Exe, ExnA, silo	Normes anticorrosion, ferroviaire Moteurs freins

## Aperçu de l'offre en moteurs électriques à haut rendement (suite)

Fabricant	Modèle	Classe de rendement	Puissance (kW)	Vitesse de rotation (tr/min)	Nombre de pôles	Environnement	Observations
Sermes (suite)	Bartec Varnost 4KTC	IE2	0,75 à 200	750-100-1 500-3 000	2, 4, 6, 8	Atex Exd	Moteurs antidéflagrants
	VEM PE1R/RE1R	« IE3 + » (IE4 non défini officiellement)	0,75 à 75	1 000-1 500-3 000	2, 4, 6	IP55	Moteurs synchrones à aimants permanents et à réluctance
SEW Usocome	DRE	IE2	0,25-225	1 500	Asynchrone 4	IP54/55/65/66	230-400 V tri/50, 60, 50-60 Hz Couple et poids selon la taille
	DRP	IE3	0,37-160	1 500	Asynchrone 2, 4, 6	IP54/55/65/66	230-400 V tri/50, 60, 50-60 Hz Couple et poids selon la taille Hauteur d'axe : 71-225, 250, 280, 315 Protection anticorrosion Exécution Atex
	DRU	IE4	0,18-3,0	1 500	Synchrone LSPM 4	IP54/55/65/66	230-400 V tri/50, 60 Hz Couple et poids selon la taille Hauteur d'axe 71-100 Protection anticorrosion
Siemens	1LE10	IE2, IE3	0,75 à 18,5	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	IP55	Carcasse aluminium
	1LE15	IE2, IE3	2,2 à 200	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	IP55	Carcasse fonte
	1LE16	IE2, IE3	2,2 à 200	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	IP55	Carcasse fonte Pour ambiance agressive 36 mois de garantie de base
	1MB15	IE2, IE3	2,2 à 200	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	Atex zone 2, 21 et 22	Carcasse fonte
	1MB16	IE2, IE3	2,2 à 200	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	Atex zone 2, 21 et 22	Carcasse fonte 36 mois de garantie de base
	1MB10	IE2, IE3	3 à 18,5	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	Atex zone 2, 21 et 22	Carcasse aluminium
	1PS	IE2	0,75 à 375	3 000-1 500-1 000	2, 4, 6	Atex	Protection EEx de ou EEx d disponible en IE2
WEG	W22	IE2, IE3	0,12 à 500	3 000, 1 500, 1 000, 750	2, 4, 6, 8	IP55 à IP66	Moteurs asynchrones carcasse fonte
	W22	IE4	3 à 355	3 000, 1 500, 1 000	2, 4, 6	IP55 à IP66	Moteurs asynchrones carcasse fonte
	W22Xd	IE2, IE3	0,18 à 500	3 000, 1 500, 1 000, 750	2, 4, 6, 8	Atex, Exd Antidéflagrant IIB/IIC T4	Secteur de la pétrochimie : raffinerie, plate-forme offshore
	WMagnet	IE4	11 à 160	3 000, 1 500	2, 4	Moteur synchrone à aimants permanents IP55 à IP66	Haut rendement, entraînement direct : suppression du réducteur
	WQuattro	IE4	0,37 à 7,5	1 500, 1 000	4, 6	Moteur hybride à double cage (écureuil + aimants permanents) IP55 à IP66	Démarrage en asynchrone (direct en ligne) et fonctionnement nominal à haut rendement à la vitesse synchrone grâce aux aimants permanents

(\*) Liste non exhaustive.





■ La commande déportée d'un variateur facilite beaucoup les réglages sur site

### S'affranchir des terres rares

Moteur étudié depuis des décennies, ses coûts de développement restent élevés, ce qui freine son essor bien que le constructeur nippon soit soutenu par le Nedo (New Energy and Industrial Technology Development Organization), l'agence de la maîtrise de l'énergie japonaise. Toujours pour s'affranchir des terres rares, la stratégie est différente chez ABB qui, en simplifiant la structure du rotor des moteurs synchrones à réluctance, supprime les pertes rotoriques, augmente le rendement et réduit l'encombrement. Comparées aux moteurs asynchrones ou synchrones à aimants permanents, les performances des moteurs synchrones à réluctance sont meilleures. « Vis-à-vis de la technologie asynchrone, on relève une disparition des pertes rotoriques, soit de 20 à 35 % des pertes totales. D'où une économie d'énergie tout en augmentant la densité du couple pour une même classe d'isolation. Ensuite, comparée à celles des moteurs synchrones à aimant, leur structure est plus simple donc plus robuste », indique-t-on chez ABB. Ces moteurs compacts pour une puissance supérieure et des gains énergétiques notables sont déjà au niveau de la classe IE4.

Imaginé dès 1923, le moteur synchrone à réluctance ne pouvait être démarré directement sur le réseau. Aujourd'hui, l'obstacle est franchi grâce à une alimentation par variateur. Ainsi piloté, le moteur synchrone à réluctance offre une densité de puissance et un rendement supérieurs à ceux du moteur asynchrone équivalent (mêmes niveaux de puissance et de couple). Ce gain induit naturellement des économies d'énergie.

Les avantages des moteurs synchrones sont connus. Un tel dispositif avec un rotor quatre pôles alimenté à 50 Hz est exactement synchronisé à 1 500 tr/min, alors qu'un moteur asynchrone équivalent ne tourne qu'à 1 475 tr/min étant donné les pertes par glissement. Dans les moteurs asynchrones modernes à cage en court-circuit, les pertes rotoriques repré-

sentent de 20 à 35 % des pertes totales. La rotation synchronisée avec le réseau supprime une partie de ces pertes. Ce principe augmente de 20 à 40 % la densité de puissance et le couple pour une même classe d'isolation.

L'autre avantage de la machine synchrone à réluctance, c'est que son rotor est simple, sans aimants ni cage, donc plus robuste que celui des moteurs asynchrones ou à aimants permanents. Son principe fonctionnel est sûr car, sans force contre-électromotrice induite, le convertisseur n'a plus à être protégé des surtensions.

La suppression de la plupart des pertes rotoriques et la structure simplifiée du rotor ajoutent d'autres avantages à l'ensemble entraîné car ce moteur fonctionne aux puissances normalisées CEI pour une hauteur d'axe donnée. Dans ce cas, le gain en rendement



■ Plus performants, les moteurs à haut rendement sont aussi plus compacts donc plus faciles à intégrer dans les machines



■ Le système d'entraînement WMagnet à aimants permanents fonctionne sans perte fer ni perte par effet Joule dans le rotor



■ À partir de 2015, les applications de forte puissance seront IE3. Elles seront rejointes en 2017 par les moteurs moins puissants

de l'entraînement à vitesse variable peut dépasser 5 % pour les moteurs de puissance unitaire et approche 0,5 % pour les grosses unités (ayant une hauteur d'axe de 315 mm). Ce faible encombrement des moteurs synchrones à réluctance permet aux OEM de concevoir des équipements plus compacts, plus légers et plus efficaces.

En outre, alors qu'un moteur asynchrone fonctionne avec un échauffement de classe F (105 K), le moteur synchrone à réluctance se limite à un échauffement de classe A (60 K). Son principe et sa basse température améliorent la durée de vie des isolants, et celle des roulements pour des intervalles de maintenance (lubrification) nettement plus longs. En effet, les roulements de moteur exigent un entretien régulier et, selon certaines études, leur défaillance est à l'origine



■ Le couple moteur haut rendement plus variateur de vitesse est intéressant lorsqu'il faut faire varier la vitesse d'au moins 5 à 10 %

de près de 70 % des pannes. Enfin, les fonctions ajoutées au variateur améliorent le bilan énergétique et la puissance des systèmes d'entraînement à moteur synchrone à réluctance, désormais comparables à ceux d'un entraînement à moteur à aimants permanents, mais avec un moteur plus simple donc fiable. Moteurs à aimants permanents avec ou sans terres rares, moteurs synchrones à réluctance et variateurs, la nouvelle génération IE4 sera encore plus performante que les précédentes, mais aussi plus chère à acquérir avec des amortissements sur du long terme. « Quel que soit le moteur électrique, l'obsolescence provient neuf fois sur dix de soucis mécaniques et non électriques. Dans les années 1990, un moteur tournait 20 000 heures en moyenne. La progression technologique liée aux moteurs à haut rendement de classes IE2 et IE3 permet maintenant d'atteindre les 40 000 heures de fonctionnement. Cette performance provient certes de l'amélioration des roulements, mais aussi de leur moindre usure, car, plus sophistiqués, les moteurs électriques à haut rendement chauffent nettement moins », conclut Jean-François Soguel (Leroy-Somer). ■

### Les variateurs offrant de nombreux avantages

Le contrôle des moteurs via une électronique de puissance s'est démocratisé. Grâce à la variation de fréquence, ces systèmes offrent des gains qui oscillent de 10 à 70 % de la consommation pour certains circuits hydrauliques à fort débit. « Ce sujet est de première importance, car régler le refoulement d'une pompe à l'aide d'une vanne avec un moteur fonctionnant à plein régime reste une méthode encore trop utilisée et dramatiquement énergivore », déplore Édouard Van Den Corput, responsable de l'offre variation de vitesse chez Schneider Electric.

La société aligne des appareils pour le bâtiment, l'industrie et les infrastructures jusqu'à 800 kW. Ces variateurs facilitent les réglages, se connectent aux réseaux de terrain et supportent une régulation PID (en boucle fermée). « Leur fiabilité est élevée, avec un taux de pannes inférieur à 1 % et même inférieur à 0,5 % sur dix années de service », ajoute Édouard Van Den Corput.

« La variation de vitesse favorise le développement d'interfaces homme-machine conviviales et plus de proximité pour gérer les moteurs, avec des réglages facilités sur site. En outre, le variateur scrute le moteur en temps réel, permet l'affichage de ses caractéristiques de fonctionnement, améliore son suivi et sa maintenance en faisant gagner du temps. L'électronique réagit immédiatement en cas de dérive des valeurs critiques (vitesses, débit, pression, température...) », renchérit Tony Tarmis, responsable administration des ventes et marketing chez Danfoss. Ce fournisseur développe d'autres capacités avec sa gamme de variateurs VLT *low harmonic drives*, une fonction réduisant les distorsions harmoniques, véritable pollution des réseaux électriques.

« Il est important de diminuer ces distorsions, car elles augmentent le courant consommé en faisant chauffer câbles et transformateurs d'alimentation. Ce lissage antiharmonique intégré aux variateurs est un facteur supplémentaire d'économie d'énergie », poursuit Tony Tarmis. Mieux, les variateurs favorisent la communication entre machines et exploitants en renseignant la supervision sur les intensités, courants absorbés, vitesses de rotation et autres paramètres en temps réel. Cette possibilité facilite régulation et gestion tout en permettant de détecter d'éventuelles anomalies en fonction des points de consigne.

Outre la consommation électrique, les variateurs diminuent aussi le stress mécanique, les bruits et les vibrations avec des démarrages et arrêts progressifs, autant de points importants qui amenuisent les coûts de maintenance tout en prolongeant la durée de vie des machines et ensembles industriels.