

The Danfoss logo is displayed in a white, cursive font on a red rectangular background.

ENGINEERING  
TOMORROW

# Moteurs et convertisseurs de fréquence efficaces dans l'industrie

Mathieu Devidas – Danfoss AG

**MOTOR SUMMIT 2021**

**Switzerland**

BEQUEM VON ZUHAUSE AUS TEILNEHMEN!  
PARTICIPEZ CONFORTABLEMENT DEPUIS CHEZ VOUS!





- Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture des moteurs électriques alimentés par le secteur
- Directive Européenne Eco-Conception - Comment les variateurs de fréquence et les moteurs sont-ils classés ?
- Calcul de la classe de rendement d'un PDS d'après les données du variateur de fréquence et du moteur
- Quelles technologies moteur disponibles sur le marché ?
- Harmoniques : Influence sur la consommation et solutions techniques
- Technologies de variateurs et efficacité énergétique
- Surveillance conditionnelle grâce aux variateurs intelligents
- Conclusion

# Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE), Annexe 2.7



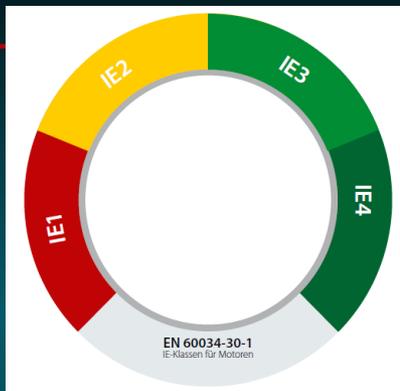
Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture des moteurs électriques alimentés par le secteur

Directive Européenne Eco-Conception



# Comment les variateurs de fréquence et les moteurs sont-ils classés ?

Exigences de la directive Écoconception vis-à-vis des moteurs – Norme CEI/EN 60034-30-2

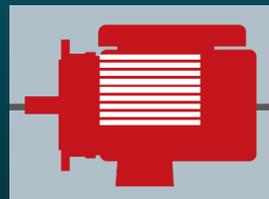


Année d'introduction	Performances minimales standard en Europe			
	Moteurs <sup>[1], [2]</sup>		Variateurs	
	Classe	Gamme de puissance	Classe	Gamme de puissance
2017	IE3/IE2 + VSD <sup>[3]</sup>	3~ 0,75-375 kW	Pas d'exigences	0,12-1000 kW
2021	IE2	3~ 0,12-0,75 kW	IE2	0,12-1000 kW
	IE3	3~ 0,75-1000 kW		
2023	IE2	1~ ≥0,12 kW	IE2	0,12-1000 kW
	IE3	3~ 0,75-75 + 200-1000 kW		
	IE4	3~ 75-200 kW		

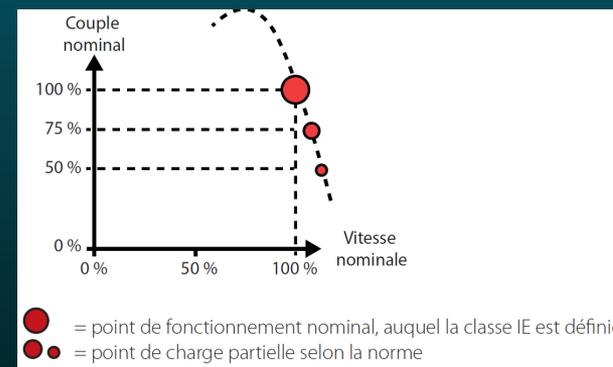
## Applicabilité et exigences légales :

Les exigences minimales de performance énergétique changeront à partir du 01.07.2021 s'appliqueront à la plupart des moteurs remplissant ces critères :

- Plage de puissance nominale : 0,12 kW-1000 kW
- Plage de tension 1 Phase et 3 Phases jusqu'à 1000 V
- De 2 Pôles à 8 Pôles
- Types d'utilisation S1 (fonctionnement continu) ou S3 (utilisation périodique intermittente) avec une activation > 80 %

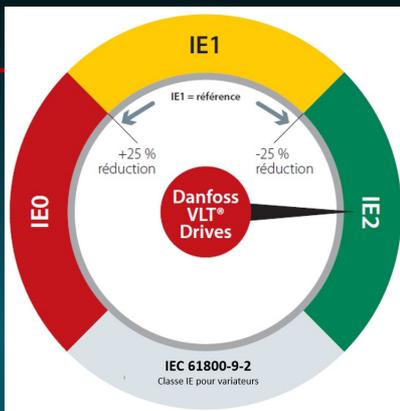


## Classes IE de moteur selon la norme CEI 60034-30-1

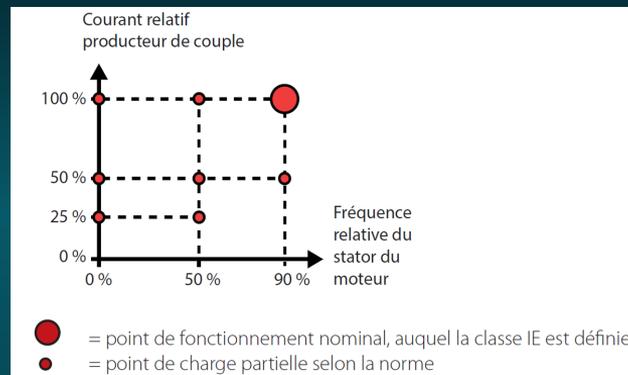


# Comment les variateurs de fréquence et les moteurs sont-ils classés ?

Exigences de la directive Écoconception vis-à-vis des variateurs de fréquence



Classes IE des variateurs de fréquence selon la norme IEC 61800-9-2



## Applicabilité et exigences légales :

A partir du 01.07.2021 les variateurs commercialisés devront respecter la classe de rendement IE2 s'ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- Tension de sortie Monophasée ou Triphasée
- Plage de puissance de 0,12kW à 1000kW
- Tension nominale Triphasée de 100V à 1000V

Ne sont pas concernés :

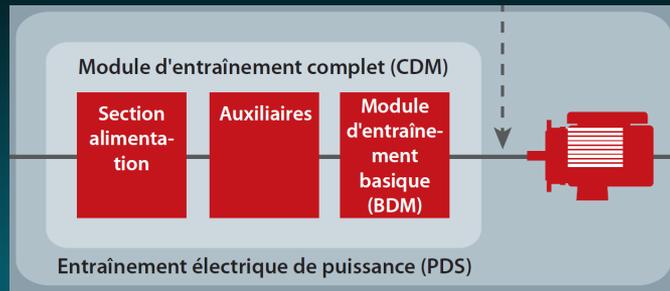
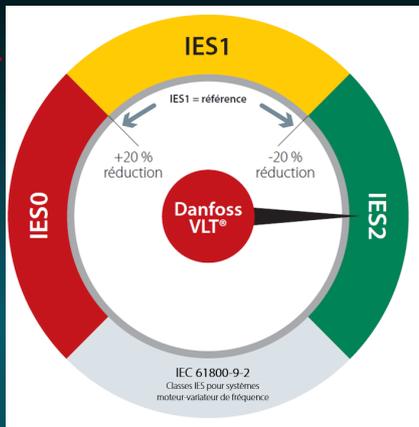
- Variateurs intégrés pour lesquels aucune mesure n'est possible
- Variateurs à faible génération d'harmonique (THDI < 10%)
- Variateurs régénératifs
- Variateurs utilisés en environnement nucléaire.



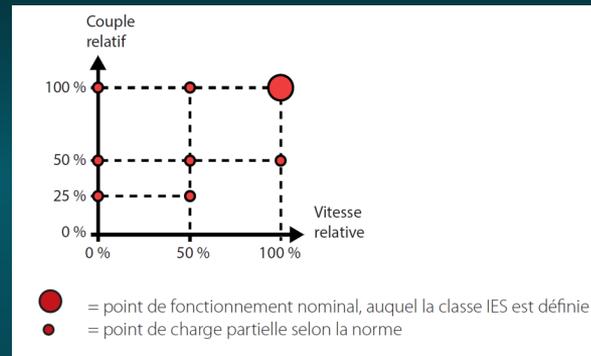
- La classe IE est définie pour un point de fonctionnement à 90 % de la fréquence et 100 % du courant producteur de couple
- Des paramètres de test spéciaux ne sont pas autorisés.
- La classification du variateur de fréquence comprend les options

# Comment les variateurs de fréquence et les moteurs sont-ils classés ?

Exigences de la directive Écoconception vis-à-vis des variateurs de fréquence



Classes IES des entraînements électriques de puissance selon la norme IEC 61800-9-2



## Applicabilité et exigences légales :

L'applicabilité est similaire à celle des classes IE des variateurs de fréquence :

- Tension de sortie Monophasée ou Triphasée
- Plage de puissance de 0,12kW à 1000kW
- Tension nominale Triphasée de 100V à 1000V

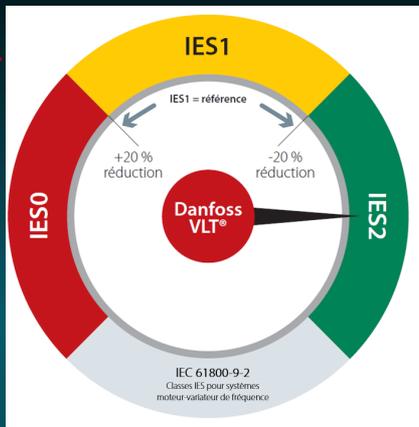
Aucun texte réglementaire n'est attendu avant 2025 au moins.



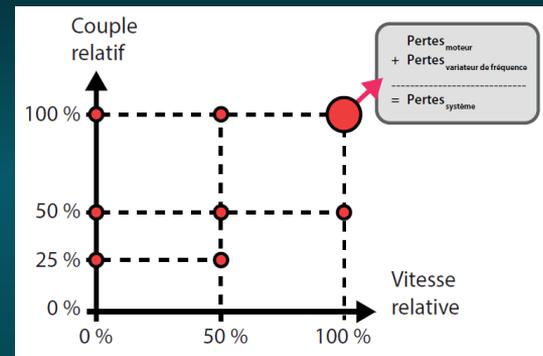
- La classe IES s'applique aux moto-variateurs.
- La classe IES est définie à 100 % de la vitesse et 100 % du couple.
- La longueur de câble entre le variateur de fréquence et le moteur est définie.

# Comment les variateurs de fréquence et les moteurs sont-ils classés ?

Calcul de la classe de rendement d'un PDS d'après les données du variateur de fréquence et du moteur



Classes IES des entraînements électriques de puissance selon la norme IEC 61800-9-2



Exemple de calcul :

Variateur de fréquence (IE1) et moteur (IE2)  
de 7,5 kW

Pertes du variateur de fréquence : 675 W

Pertes du moteur : 1032 W

Pertes du système : 1707 W

Puissance nominale du moteur	IES0	IES1	IES2
3 kW	> 1138 W	758 W-1138 W	< 758 W
4 kW	> 1397 W	931 W-1397 W	< 931 W
5,5 kW	> 1754 W	1170 W-1754 W	< 1170 W
7,5 kW	> 2161 W	<b>1441 W-2161 W</b>	< 1441 W
11 kW	> 2851 W	1901 W-2851 W	< 1901 W
15 kW	> 3596 W	2398 W-3596 W	< 2398 W

# Comment les variateurs de fréquence et les moteurs sont-ils classés ?

## Détermination de la classe de rendement



# Danfoss ecoSmart™



## MyDrive® ecoSmart™ Rapport d'efficacité énergétique

**Rendement du système (PDS)**  
Le système, également appelé Power Drive System (PDS), est composé d'un CDM (Complete Drive Module) et d'un moteur. La classification IES est déterminée en additionnant les pertes du CDM et les pertes du moteur au point de fonctionnement 100% vitesse et 100% couple.



Rendement du système déterminé conformément à les normes EN 50598-2 et IEC 61800-9

**Rendement du variateur (CDM)**  
La classe de rendement du module d'entraînement CDM IE est déterminée par les pertes du variateur qui inclut les filtres CEM, les hacheurs de freinage, etc. La détermination des pertes est basée sur les réglages usine par défaut avec, par exemple, la fréquence de découpage, etc. La classe de rendement est déterminée pour 90% de fréquence et à 100% de courant.

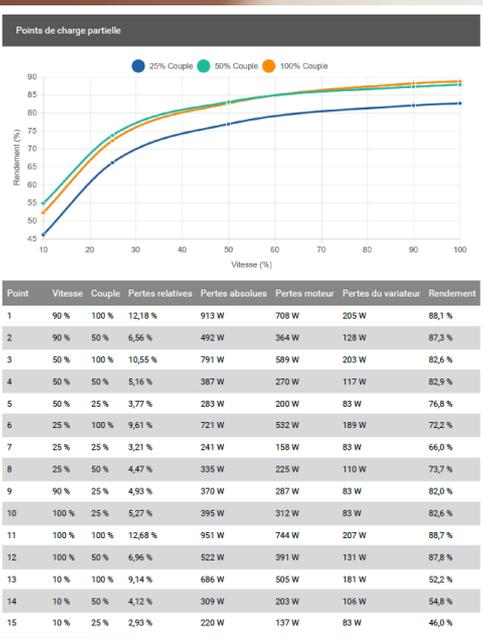


Rendement du variateur déterminé selon EN 50598-2 et IEC 61800-9

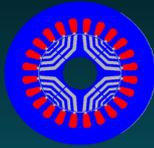
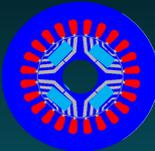
**Rendement du moteur**  
Le rendement du moteur pour les moteurs alimentés par le réseau (DOL) est calculé comme défini dans la norme CEI 60034-30-1. La classification IE pour les moteurs est définie pour le point de fonctionnement à 100% de vitesse et 100% de couple.



Rendement du moteur déterminé conformément à la norme CEI 60034-30-1



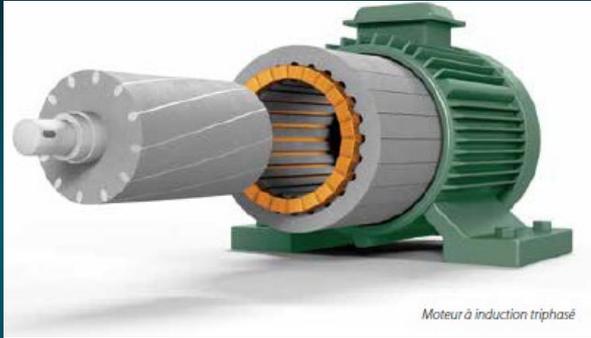
# Quelles technologies moteurs disponibles sur le marché ?



# Quelles technologies moteur disponibles sur le marché ?



## Moteur Asynchrone

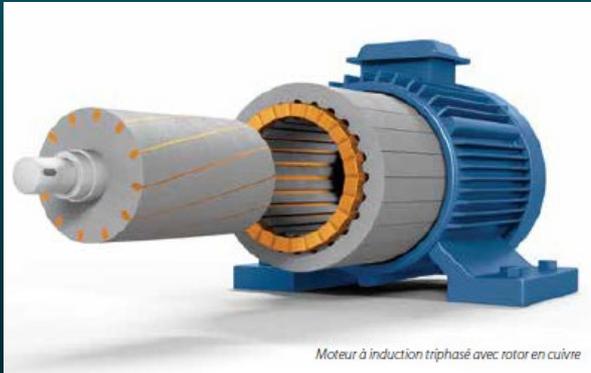


### Avantages :

- Technologie reconnue, robuste et économique
- Niveau de rendement IE4 atteignable
- Solutions avec rotors cuivrés, proposant un rendement encore plus élevé, également disponibles
- Maintenance simple

### Inconvénients :

- Faible rendement à charge partielle
- Moteurs à haut rendement plus volumineux
- Rendement supérieur à l'IE4 très difficilement atteignables



# Quelles technologies moteurs disponibles sur le marché ?

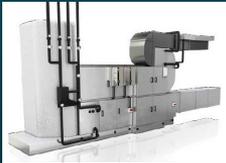


## Moteurs Synchrones

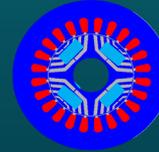
Moteurs à aimants permanents en surface du rotor (SPM) – Moteurs EC



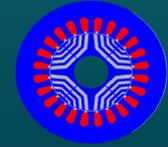
Moteurs à aimants permanent à l'intérieur du rotor (IPM)



Moteurs synchro-réductants assistés d'aimants permanents (PMSynRM)



Moteurs synchro-réductants (SynRM)



Couple produit par des aimants

Couple produit par reluctance

# Quelles technologies moteurs disponibles sur le marché ?

*Danfoss*

## Moteur synchrone à aimants permanents



### Avantages :

- Rendement très élevé, même à charge partielle
- Niveau de rendement IE4 - IE5 atteignable
- Compacité élevée

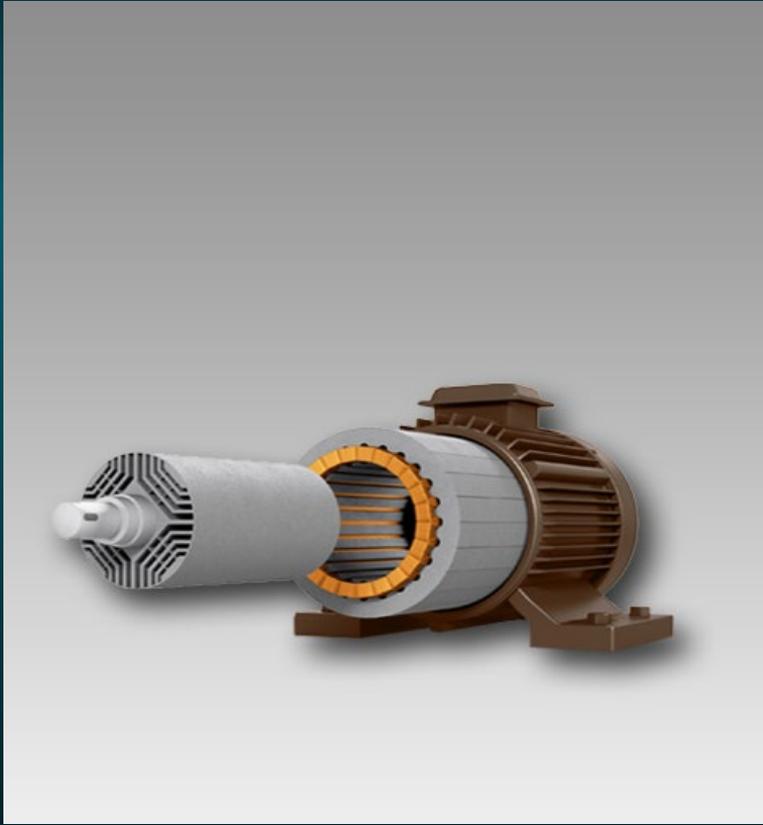
### Inconvénients :

- Nécessite d'être contrôlé par un variateur
- Risque de démagnétisation des aimants
- Prix élevés
- Utilisation de terres rares pour les aimants
- Maintenance délicate

# Quelles technologies moteurs disponibles sur le marché ?



## Moteur synchro-réductant



### Avantages :

- Pas d'aimants dans le rotor, le couple est produit par l'effet de reluctance
- Niveau de rendement IE4 atteignable
- Construction robuste et simple
- Compacité élevée

### Inconvénients :

- Nécessite d'être contrôlé par un variateur
- Faible facteur de puissance ( $\cos \phi$ ), nécessitant plus de courant que pour un moteur AC.
- Utilisation d'un plus gros variateur souvent nécessaire.

# Quelles technologies moteur disponibles sur le marché ?



## Moteur Synchro-reluctant assisté d'aimants permanents



### Avantages :

- Présence d'aimants Ferrite dans le rotor, plus d'utilisation de terres rares.
- Niveau de rendement IE4 - IE5 atteignable.
- Prix plus compétitif qu'un moteur à aimants permanent standard.
- Très bon facteur de puissance ( $\cos \phi$ ).
- La grande majorité des constructeurs de moteurs se dirigent vers cette technologie.

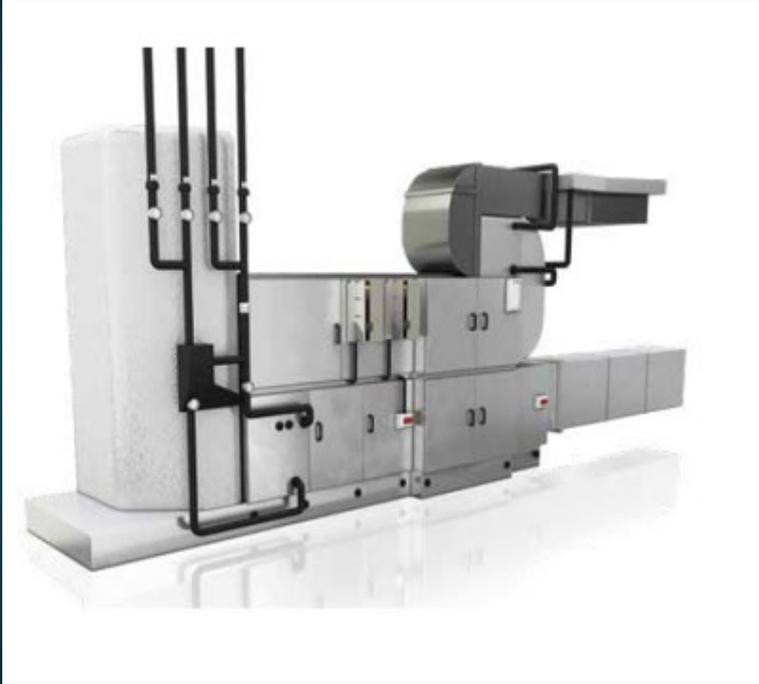
### Inconvénients :

- Nécessite d'être contrôlé par un variateur
- Nouvelle technologie, peu d'expérience

# Quelles technologies moteurs disponibles sur le marché ?



## Moteur EC



### Avantages :

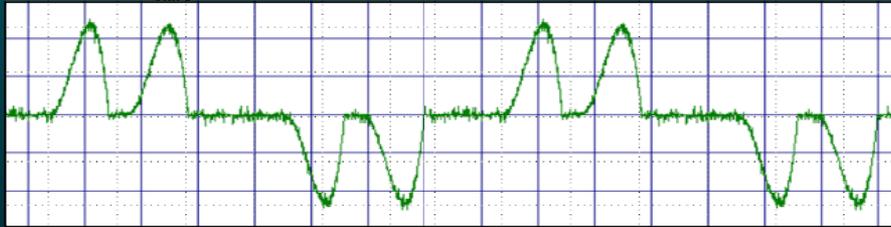
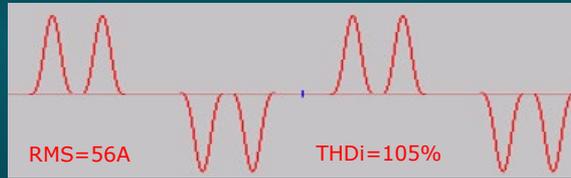
- Rendements élevés, même à charge partielle
- Niveau de rendement IE4 atteignable
- Compacité élevée
- Très bon rendement pour les puissances < 750W

### ➤ Inconvénients :

- Nécessite d'être contrôlé par un contrôleur
- Pas de design CEI
- Disponible seulement pour des puissances faibles
- Utilisation de terres rares pour les aimants

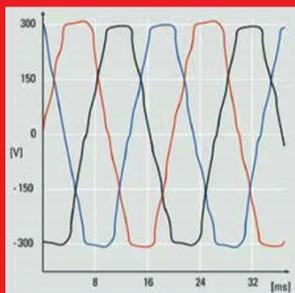
# Technologies de variateurs et efficacité énergétique

Harmoniques : Influence sur la consommation électrique et solutions techniques.

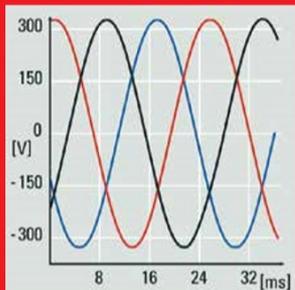


# Technologies de variateurs et efficacité énergétique ?

## Harmoniques : Influence sur la consommation et solutions techniques



Les mesures montrent la déformation distincte de la forme d'onde de la tension secteur suite à des interférences à partir de charges non linéaires.

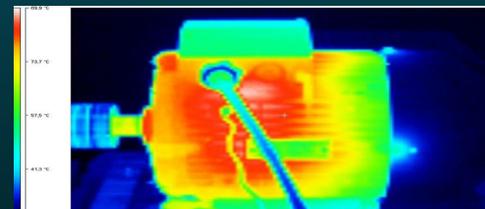
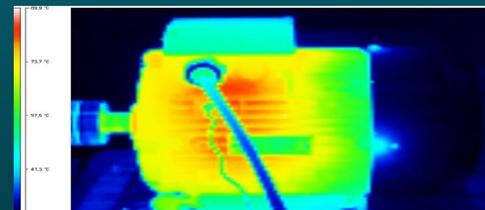


La situation idéale d'une tension secteur sinusoïdale est rarement identifiée de nos jours sur nos réseaux de secteur.

### Distorsion des harmoniques – Un problème en constante augmentation :

Conséquences d'un taux d'harmonique élevé :

- Limitations de l'usage sur l'alimentation et sur le Réseau
- Les harmoniques prennent une part supplémentaire de la puissance active, de la puissance apparente et de la puissance réactive.
- La distorsion harmonique accroît la valeur du courant total.
- Augmentation de la chaleur sur le transformateur, le moteur et les câbles
- Baisse globale de l'efficacité du système
- Diminution de la durée de vie de l'équipement
- Temps d'arrêt des équipements coûteux
- Dysfonctionnements du système de commande
- Présence de bruits



# Technologies de variateurs et efficacité énergétique ?

Harmoniques : Influence sur la consommation et solutions techniques

Technologies de variateur : Rendements et distorsion harmonique – Exemple variateur 315KW\*

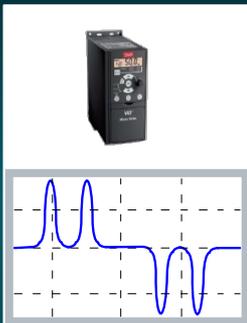


**Variateur sans self de ligne**

**THDI = 100%**

**Rendement total :  
97,95 %**

**Pertes totales :  
6610 W**

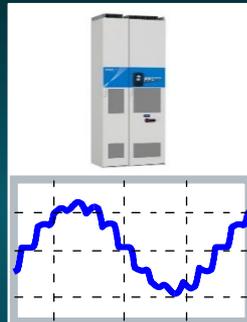


**Variateur 12 Pulses**

**THDI ≈ 12%**

**Rendement total :  
97,80 %**

**Pertes totales :  
6790 W**



**Variateur avec filtre actif**

**THDI < 5%**

**Rendement total :  
95,8 %**

**Pertes totales :  
13280 W**

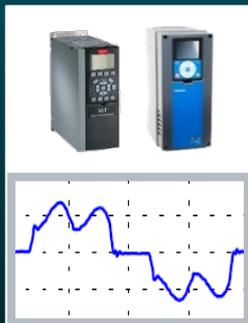


**Variateur avec self de ligne**

**THDI < 45%**

**Rendement total :  
97,9 %**

**Pertes totales :  
6670 W**

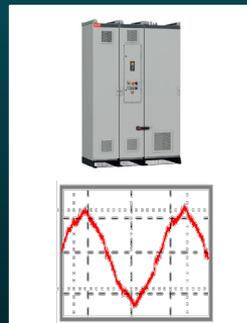


**Variateur avec filtre passif**

**THDI < 5%**

**Rendement total :  
97,0 %**

**Pertes totales :  
9486 W**

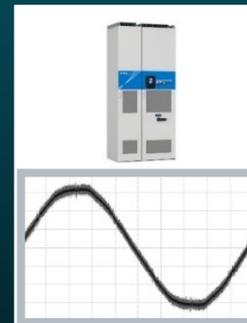


**Variateur AFE**

**THDI < 5%**

**Rendement total :  
94,8 %**

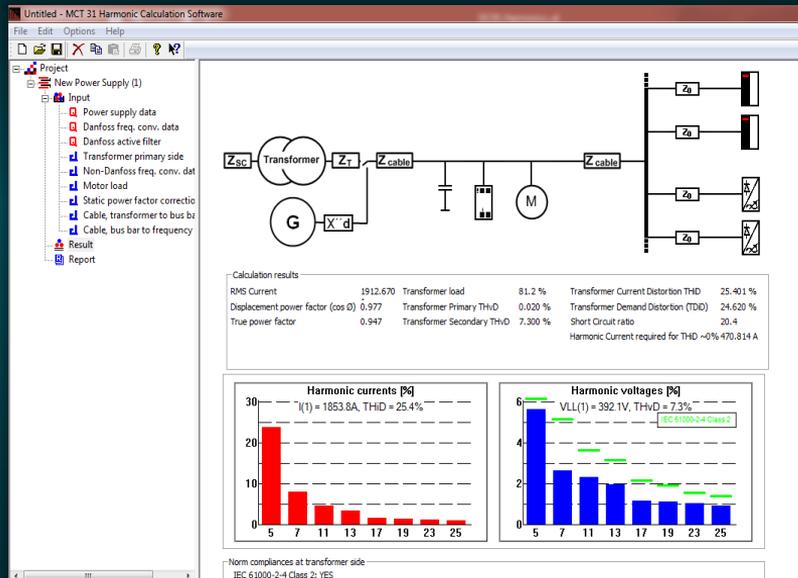
**Pertes totales :  
16210 W**



# Technologies de variateurs et efficacité énergétique ?

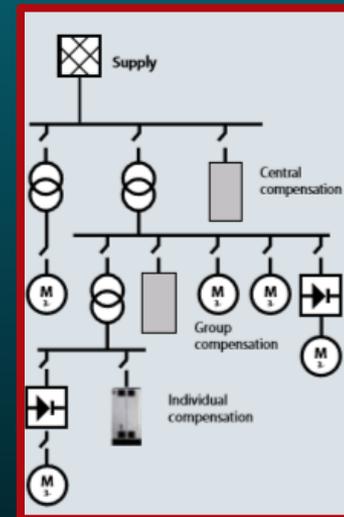
## Harmoniques : Influence sur la consommation et solutions techniques

### Logiciel de calcul des harmoniques VLT® MCT 31:



VLT® MCT 31 évalue les harmoniques de courant et la distorsion de tension de votre application, puis détermine si un filtre harmonique est nécessaire. De plus, le logiciel peut déterminer les conséquences liées à l'ajout d'un équipement d'atténuation et si votre système est conforme à diverses normes.

- Transformateur: 1600KVA@5.9%
- Charge: 2\*630kW FC302 chargés à 90%
- Résultat:
- Transformateur chargé à 81% 25% THDi
- 7% THDv (Taux d'harmonique en tension)
- IEC61000-2-4 class2 = OK



# Technologies de variateurs et efficacité énergétique ?



## Harmoniques : Influence sur la consommation et solutions techniques

Exemple pratique : Installation frigorifique avec 3 moteurs et variateurs de 315KW

### Variateur avec filtre passif:



Rendement du variateur : 97%

THDI : 5%

Consommation annuelle :

$$3 \times (315\text{KW} \times 0,8 * 6000) / 0,97 = 4'676'288 \text{ kWh / an}$$

Coût annuel : CHF 701'443,-- / an

### Variateur avec filtre actif:



Rendement du variateur : 95,8%

THDI : 5%

Consommation annuelle :

$$3 \times (315\text{KW} \times 0,8 * 6000) / 0,958 = 4'734'864 \text{ kWh / an}$$

Coût annuel : CHF 710'230,-- / an

### Variateur AFE :



Rendement du variateur : 94,8%

THDI : 5%

Consommation annuelle :

$$3 \times (315\text{KW} \times 0,8 * 6000) / 0,948 = 4'784'810 \text{ kWh / an}$$

Coût annuel : CHF 717'720,-- / an

## Données du système :

- Fonctionnement 6000h / ans
- Moteurs chargés à 80%
- Taux d'harmonique souhaité : THDI = 5%
- Variateurs 315KW – 600A
- Coût du kWh : CHF 0,15 / kWh

## Economies réalisées :

Variateur avec filtre actif vs Variateur AFE :

- 49946 kWh / an
- CHF 7'492,-- / an

Variateur avec filtre passif vs Variateur AFE :

- 108522 kWh / an
- CHF 16'278,-- / an

Variateur avec filtre passif vs Variateur avec filtres actifs :

- 58576 kWh / an
- CHF 8'786,-- / an

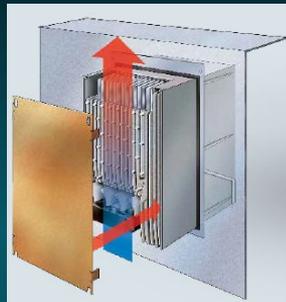
# Gestion de la chaleur engendrée par les pertes du variateur

## Différentes technologies de refroidissement



### Refroidissement par le panneau

Ce kit de montage pour les variateurs de petite et moyenne gammes permet d'acheminer les pertes de chaleur directement hors du panneau de distribution.



### Variateur à refroidissement liquide :

Jusqu'à **25%**  
d'économies sur le coût  
global de cycle de vie  
par rapport aux solutions  
refroidies par air

Niveau  
sonore  
inférieur de

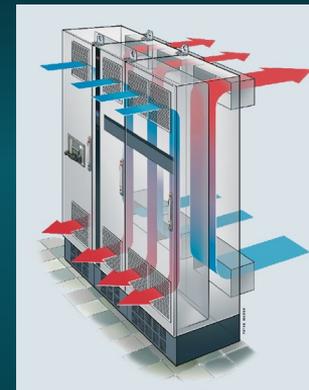
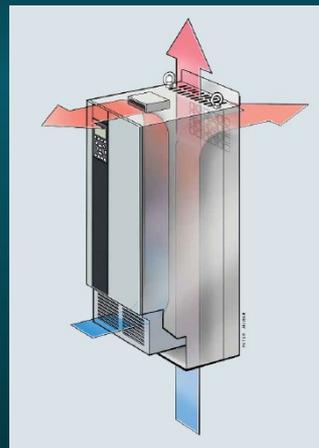
**20 dBA**

par rapport à un convertisseur  
refroidi par air



### Refroidissement par le canal arrière

En acheminant l'air par un canal de refroidissement à l'arrière, jusqu'à 90 % de la perte de chaleur du variateur est directement envoyée vers l'extérieur de la salle d'installation.



Le refroidissement par  
le canal arrière permet de  
**réduire**

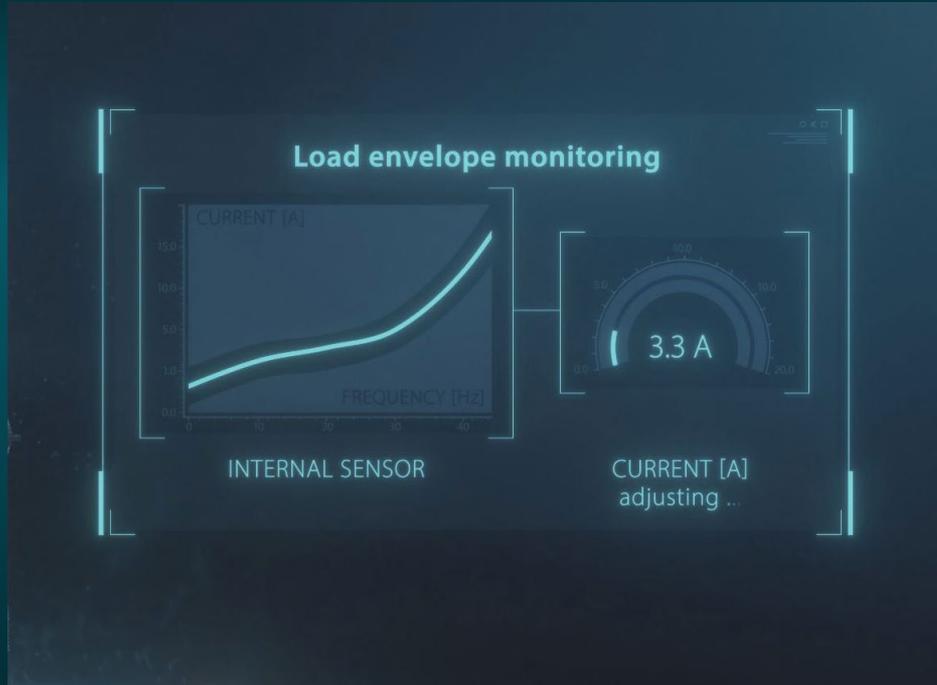
jusqu'à

**90 %**

sur les coûts  
d'investissement pour  
le refroidissement d'air

# Surveillance conditionnelle grâce aux variateurs intelligents

Systèmes d'automatisation de l'industrie 4.0



# Surveillance conditionnelle grâce aux variateurs intelligents

Systemes d'automatisation de l'industrie 4.0

*Danfoss*

Illustration : pyramide d'automatisation

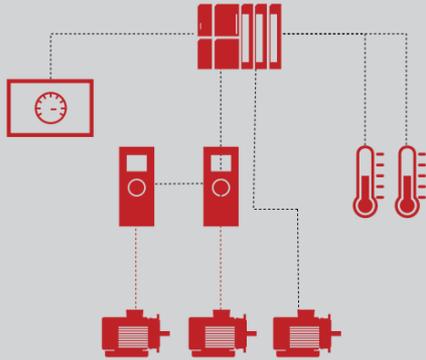
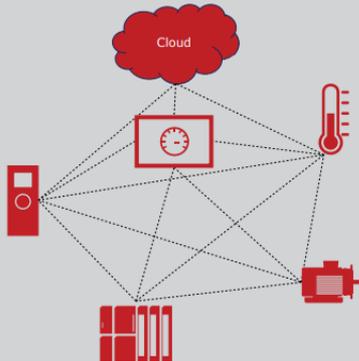


Illustration : réseau d'automatisation



Dans le réseau de l'industrie 4.0, le variateur joue un rôle important et se caractérise par certaines fonctionnalités :

- **Connectivité sécurisée** : le variateur peut se connecter à d'autres éléments de manière sécurisée. Les autres éléments du réseau peuvent inclure des variateurs, des PLC, des capteurs et un cloud.
- **Le variateur agit comme un capteur** : le variateur utilise une analyse de signature de courant et de tension du moteur pour détecter les performances du moteur et de l'application.
- **Le variateur agit comme un concentrateur de capteurs** : le variateur recueille les données de capteurs externes liés au processus qui est contrôlé par le variateur.
- **Le variateur agit comme un contrôleur** : le variateur peut remplacer le PLC lorsque les contraintes d'application le permettent.

# Surveillance conditionnelle grâce aux variateurs intelligents

Nouvelles stratégies de maintenance

*Danfoss*

## Maintenance Corrective

Le produit est remplacé après un défaut.

## Maintenance preventive

Le produit est remplacé avant qu'un défaut n'apparaisse, bien que le produit n'ait émis aucun signal.

## Maintenance conditionnelle

Le produit émet un avertissement lorsque sa durée de vie réelle varie par rapport à sa durée de vie théorique. Les causes principales possibles sont indiquées.

## Maintenance prédictive

Le produit émet un avertissement avant d'atteindre le nombre d'heures de fonctionnement défini, et ce, afin qu'une action de maintenance soit entreprise



3. Automation



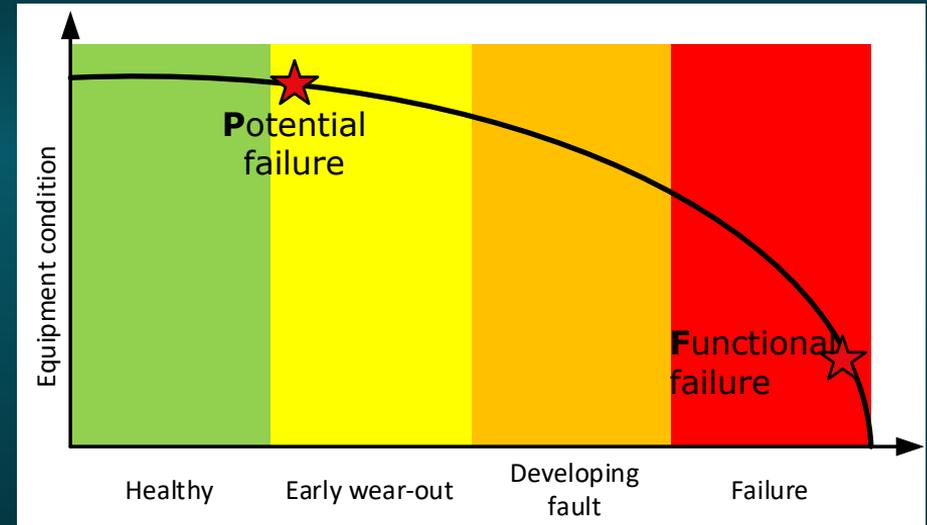
4. Networking

# Surveillance conditionnelle grâce aux variateurs intelligents

La bonne information au bon moment

*Danfoss*

- La surveillance conditionnelle détecte les défauts à un stade précoce
- Permet d'optimiser les ressources et de planifier des interventions
- Permet de réduire les temps d'arrêts
- Permet de réduire le coût global d'utilisation
- Permet de réduire les stocks de pièce de rechange



# Surveillance conditionnelle grâce aux variateurs intelligents

La bonne information au bon moment



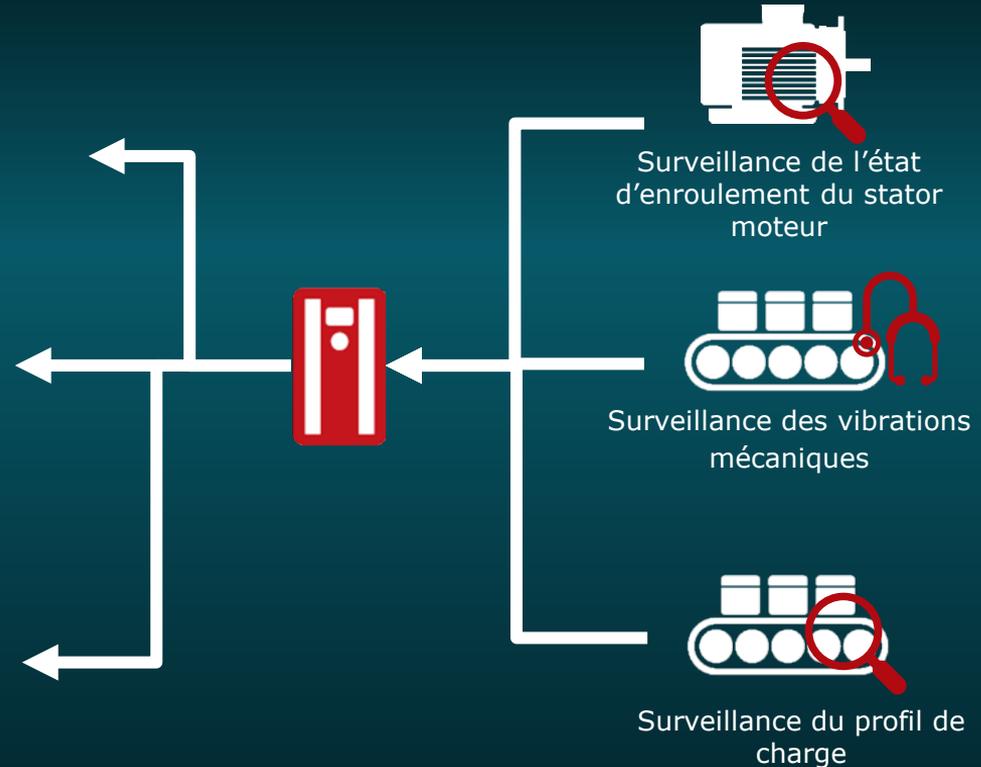
Détection des erreurs de bobinage moteur avant la survenance d'une panne

- Défaillances de bobinage
- Court-circuit
- Echauffement supplémentaire

Détection précoce de l'usure : surveillance des vibrations mécaniques

- Usure des roulements
- Désalignement de l'arbre
- Déséquilibre

Optimisation/amélioration de l'efficacité du process grâce à la fonction de comparaison des performances réelles du système par rapport aux données de référence et aux requêtes d'interventions de maintenance



# Que faut-il retenir?

- L'ordonnance Suisse sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, ainsi que celles établies par la directive Ecoconception ont un impact important sur les économies d'énergies.
- La mise en place de classes de rendement augmente la visibilité quant à l'efficacité énergétique des systèmes d'entraînement.
  - Le marché du moteur et du variateur on été fortement stimulé.
  - Les constructeurs et utilisateurs s'orientent naturellement vers des solutions technologiques à haute efficacité énergétique.
- Il est toutefois important d'examiner attentivement chaque situation pour voir si l'utilisation de tel moteur à haute efficacité ou telle technologie de variateur est rentable.
- La digitalisation et l'industrie 4.0 aident à la prise de décision et permettent de réaliser des économies d'énergies.
- Que ce soit pour des installations existantes ou neuves, les opérateurs doivent d'abord analyser l'état réel de l'ensemble du système avant de prendre des mesures pour réduire la consommation énergétique.

Merci pour votre attention

The Danfoss logo, featuring the word "Danfoss" in a white, cursive script font, set against a red square background.The Danfoss logo, featuring the word "Danfoss" in a white, cursive script font, set against a red square background, which is itself centered within a white rectangular box.

**ENGINEERING  
TOMORROW**

**Mathieu Devidas**

Sales Engineer – Romandie & Zentral Schweiz

**Danfoss AG**

VLT Antriebstechnik

Parkstrasse 6, CH-4402 Frenkendorf, Schweiz

Mobil: +41 79 677 06 66

[mathieu.devidas@danfoss.com](mailto:mathieu.devidas@danfoss.com)