heig-vd

HAUTE ÉCOLE
D'INGÉNIERIE ET DE GESTION
DU CANTON DE VAUD

www.heig-vd.ch

TOPMOTORS

Introduction & principes de fonctionnement des convertisseurs de fréquences (CF)

Luc Bossoney, 27 Juin 2019

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

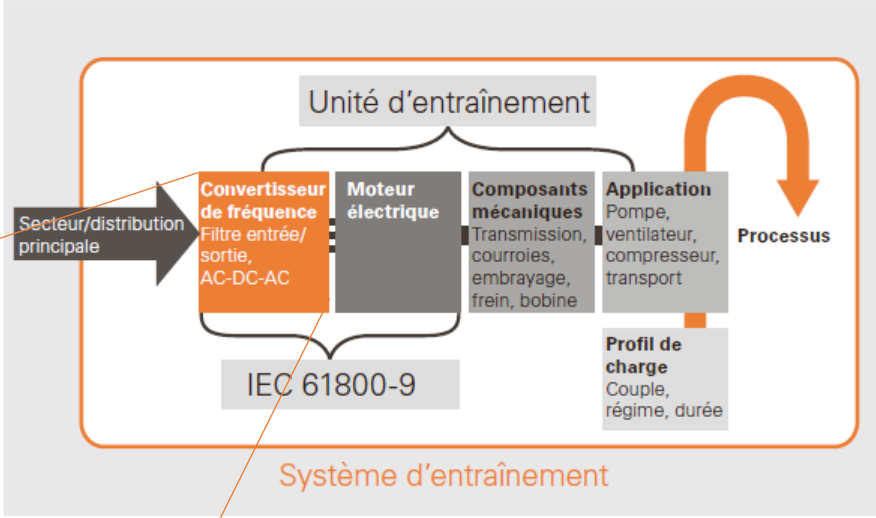
Contenu

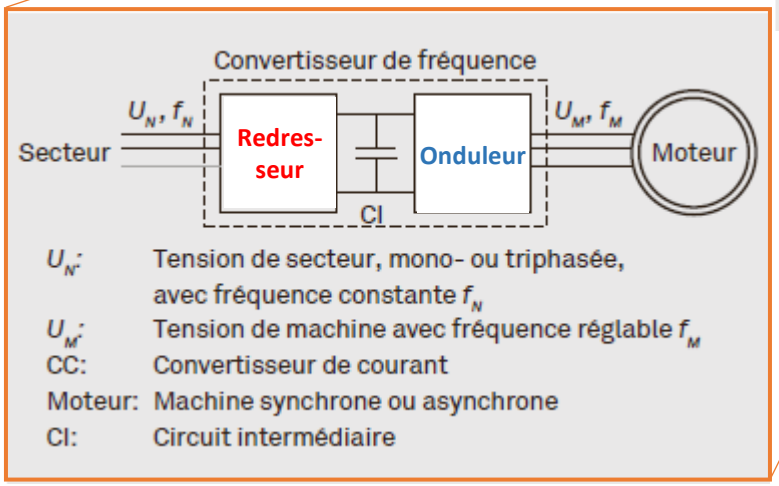
- **Le convertisseur de fréquences (CF), quelques bases**
- **L'utilisation du CF pour les entrainements électriques industriels**
- **Avantages & Inconvénients du CF**
- **La mise en œuvre du CF**
- **Conclusions**
- **Annexes**

Le convertisseur de fréquence

Principes de base

Le convertisseur de fréquence (CF) est le premier élément actif dans un système d'entrainement électrique (en suivant le sens du flux d'énergie électrique).



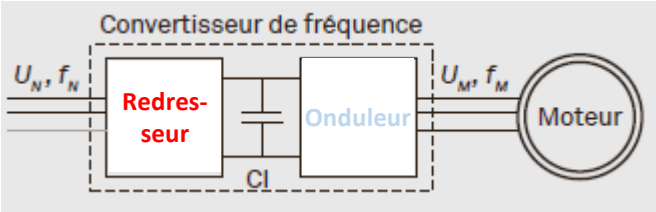


Le convertisseur de fréquence (CF) est constitué d'un bloc redresseur (conversion AC/DC), suivi d'un bloc onduleur (conversion DC/AC).

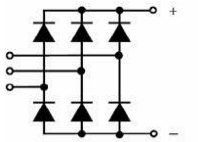
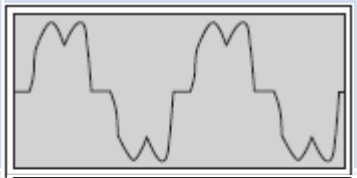
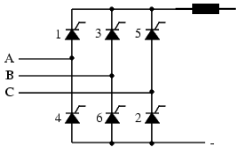
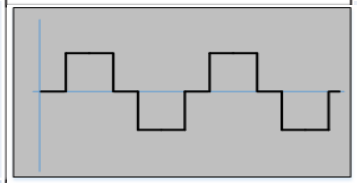
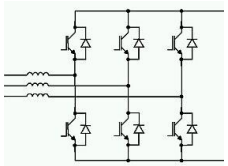
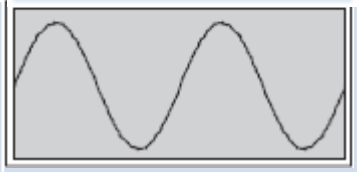
Source illustrations : Topmotors, «Convertisseurs de fréquence»

Le convertisseur de fréquence

Le redresseur



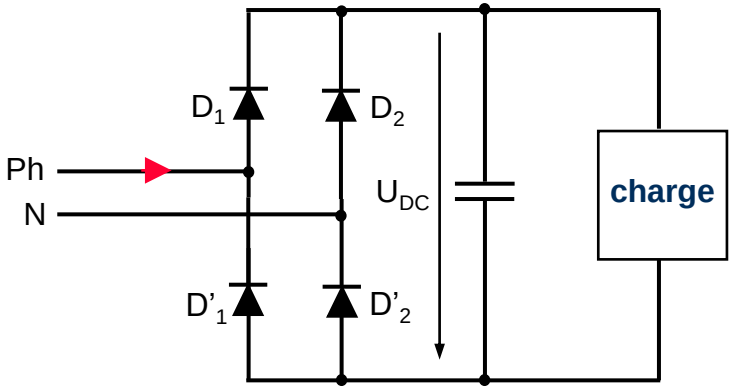
Suivant le type de redresseur, les formes de courant, les harmoniques ainsi que les distorsions de courant réseau peuvent fortement varier

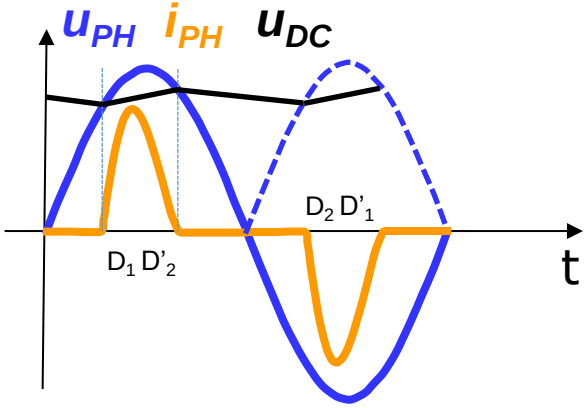
Type de redresseur	Harmoniques courant réseau	Allure du courant réseau	Propriétés
 Pont à diode triphasé	5, 7, 11, 13…		• robuste • bon rendement • cosφ : 0.9 … 1 • sans récupération
 Pont à thyristor	5, 7, 11, 13…		• robuste • bon rendement • cosφ : 0.9 … 1 • avec récupération • pour P > x100 kW
 Pont à IGBT	à partir de f_p, $2f_p$ … (f_p : fréquence de pulsation)		• peu de distorsions réseau • pertes > pont à diode • cosφ : 1 & pilotable • avec récupération

Le convertisseur de fréquence

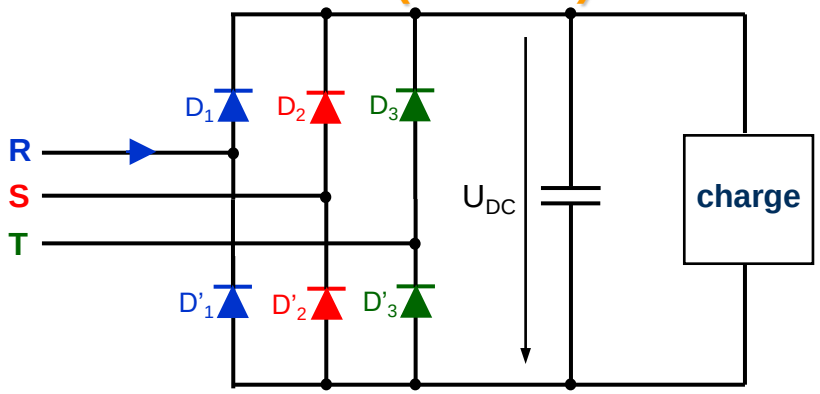
Le redresseur mono- et tri-phasé à diodes

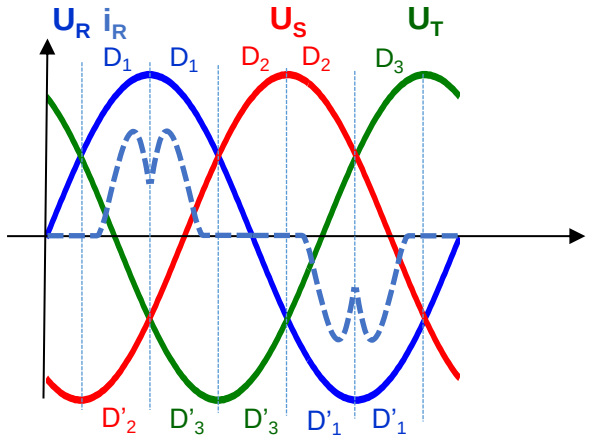
Redresseur mono-phase (< 3 kW)





Redresseur tri-phase (> 3 kW)

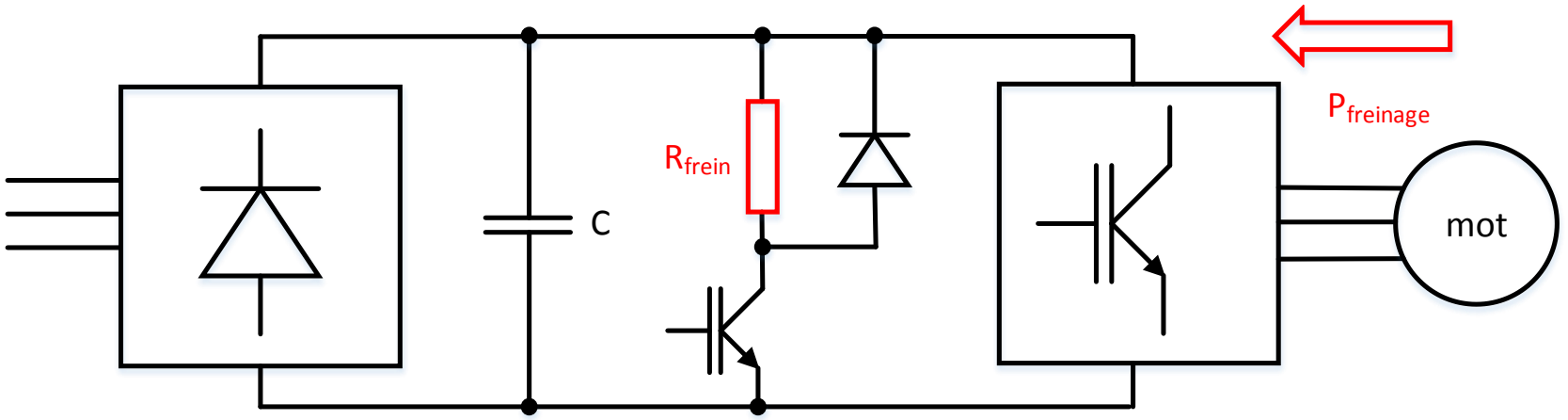




Le convertisseur de fréquence

Le redresseur à diodes avec résistance de freinage

Lorsqu'on souhaite disposer de capacité de freinage (puissance de freinage) élevées, on doit disposer d'une résistance de freinage en conséquence. Celle-ci peut être interne ou externe au CF.



Exemple :

Inertie totale (mot. + charge) : $J_{mtot} = 0.1\ kg \cdot m^2$

Vitesse maximale : $\Omega_{max} = 500\ rad/s$

Temps de décélération: $t_{frein} = 0.5\ s$

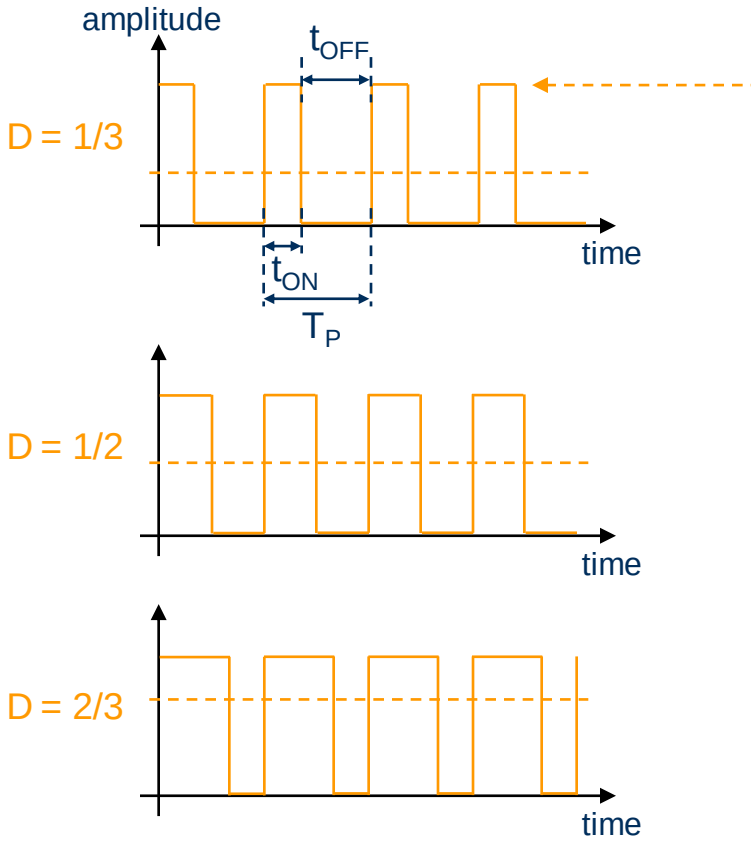
$$E_{cin} = \frac{1}{2} J_{mtot} \cdot \Omega^2$$

$$P_{frein} = \frac{E_{cin}}{t_{frein}} = \frac{1}{2 \cdot t_{frein}} J_{mtot} \cdot \Omega^2$$

Le convertisseur de fréquence

Modulation PWM

Tous les convertisseurs de puissance sont basés sur une commande par modulation de largeur d'impulsions ou PWM (Pulse-Width Modulation):



Amplitude A

Moyenne: $\overline{U} = D \cdot A$

Rapport cyclique: $D = \frac{t_{ON}}{T_P}$

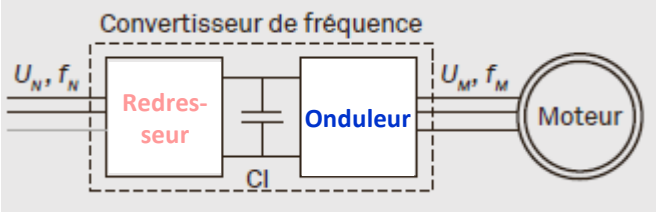
La moyenne dépend du rapport cyclique (c.a.d. largeur d'impulsion) du signal -> modulation par largeur d'impulsions (PWM)

Valeur efficace: $U_{rms} = \sqrt{D} \cdot A$

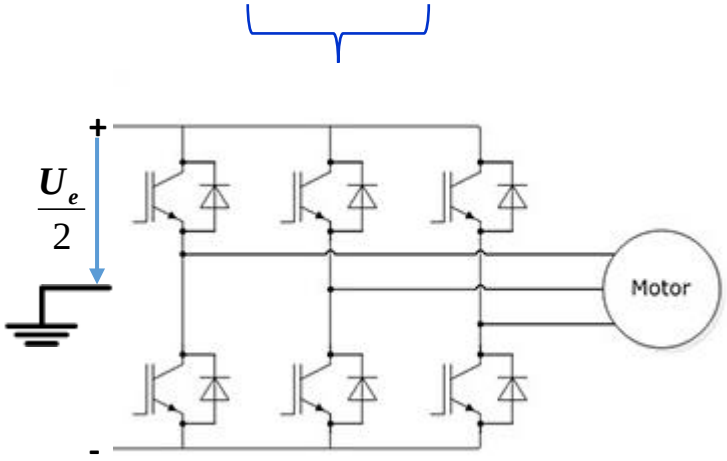
Note: la valeur efficace est calculée sur une période de pulsation Tp. Elle est utile pour calculer les pertes de conduction des semi-conducteurs.

Le convertisseur de fréquence

L'onduleur triphasé

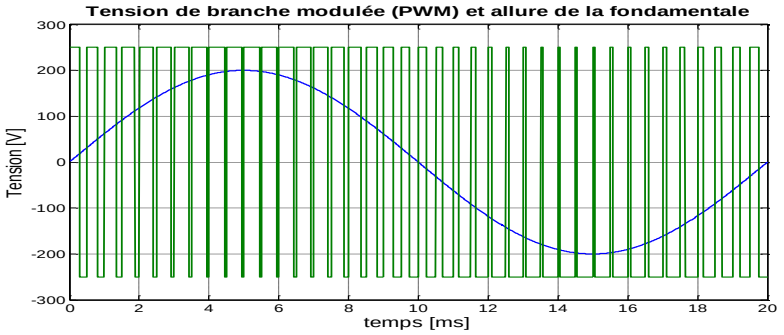


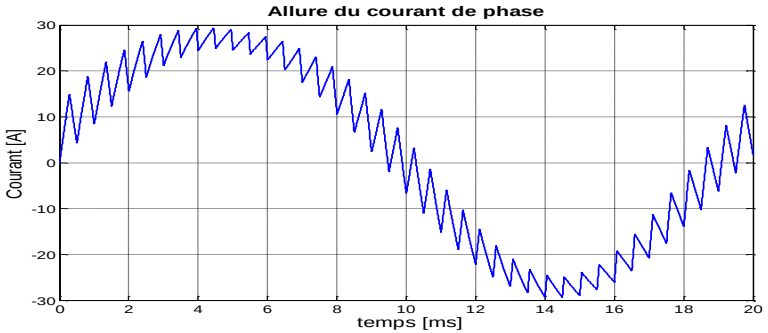
Source illustration : Topmotors, «Convertisseurs de fréquence»



La tension et le courant de phase sont générés à partir d'une <u>modulation</u> (PWM) de la tension intermédiaire :

- **Tension : harmoniques de rang élevés**
- **Courant : lissé par l'inductance moteur**



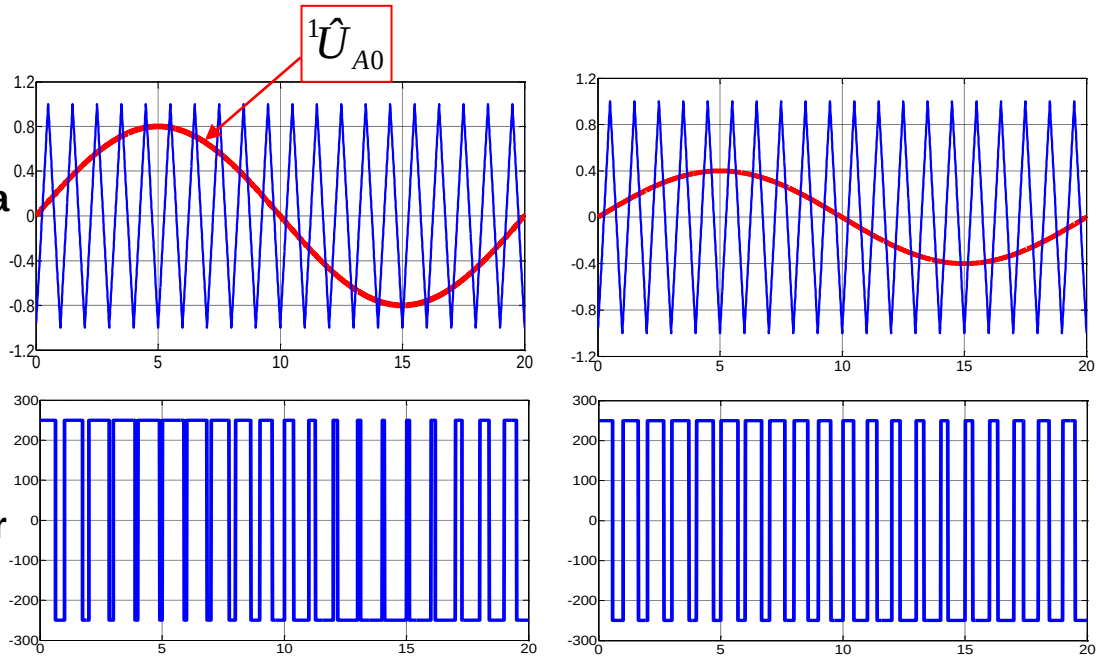


Le convertisseur de fréquence

L'onduleur triphasé et sa variation d'amplitude

Modulation de la fondamentale

Tension de branche onduleur



amplitude $^1\hat{U}_{A0}$ élevée | **amplitude $^1\hat{U}_{A0}$ faible**

- **L'amplitude de la tension générée, dépend de la profondeur de modulation m_a (= rapport cyclique maximum de la tension de branche)**
- **Le rapport cyclique varie temporellement sur une période, afin de reconstruire l'allure sinusoïdale de la tension.**

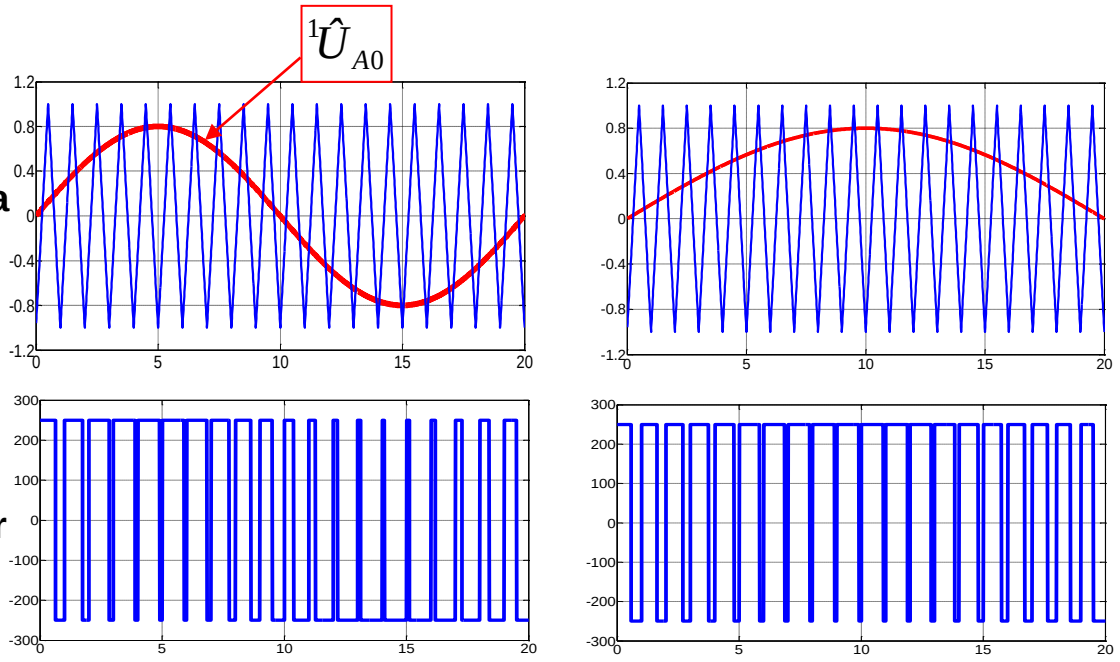
$$^1\hat{U}_{A0} = m_a \frac{U_e}{2}$$

Le convertisseur de fréquence

L'onduleur triphasé et sa variation de fréquence

Modulation de la fondamentale

Tension de branche onduleur



^{1}f = 50 Hz (m_f = 10) **^{1}f = 25 Hz (m_f = 20)**

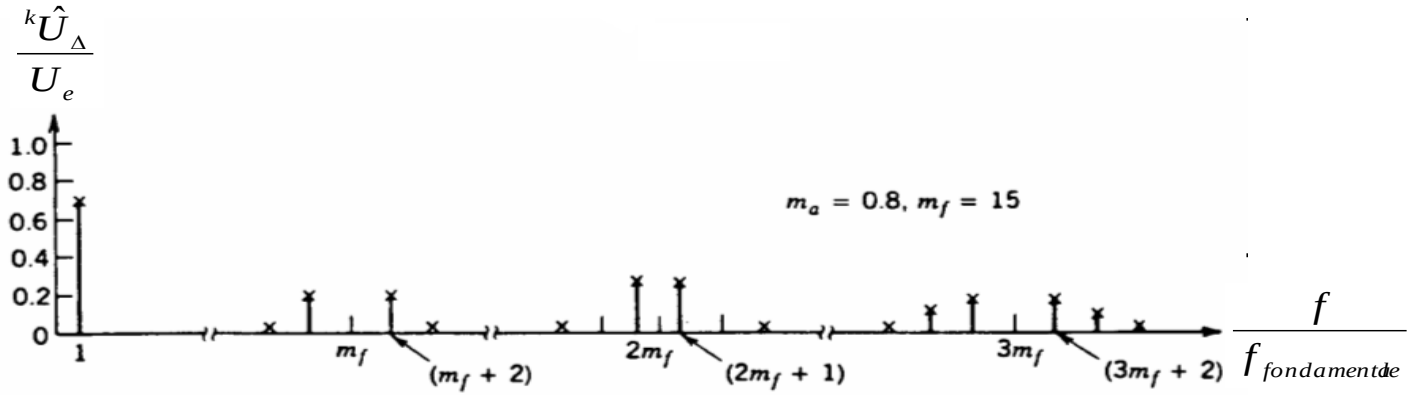
- **Le nombre de pulses par période de la fondamentale, dépend du rapport de fréquence m_f (= fréq. de pulsation / fréq. de la fondamentale)**
- **Avec une fréquence de pulsation constante, le rapport de fréquence m_f variera avec la fréquence de la fondamentale.**

$$m_f = \frac{^1f}{f_{PWM}}$$

Le convertisseur de fréquence

L'onduleur triphasé et le spectre d'harmoniques produit

Le spectre de fréquence de la tension produit par l'onduleur, dépend des indices m_a et m_f. Les harmoniques de tension apparaissent surtout à partir du rang m_f (généralement > 40) et de ces multiples.



Les harmoniques de courant sont diminués en fonction de l'inductance du moteur.

- **Plus l'inductance du moteur est élevée, moins il y aura d'harmoniques de courant.**
  Mais : la dynamique de courant et la réserve de tension seront diminués.
- **Plus la fréquence de pulsation f_p est élevée, moins il y aura d'harmoniques de courant.**
  Mais : les pertes de commutation et les émissions EMC augmentent.

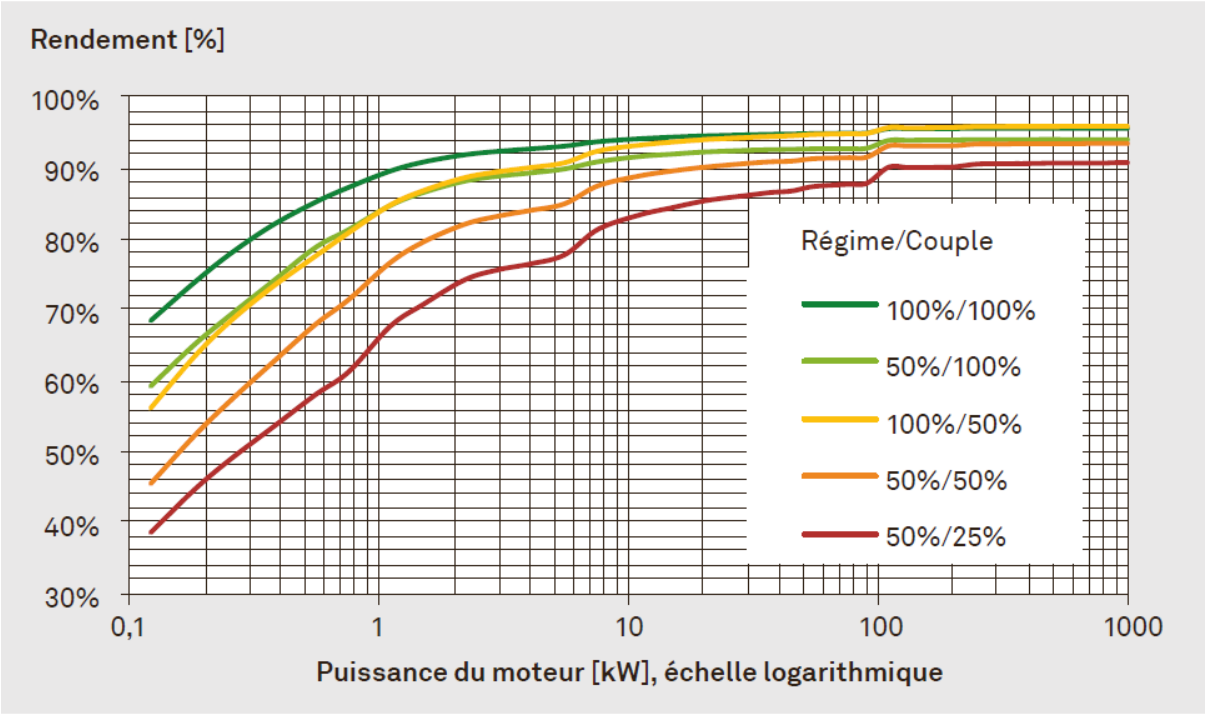
Le convertisseur de fréquence

Principes de base : Rendement et taux de charge du convertisseur

Le rendement d'un convertisseur dépend fortement de son point de fonctionnement (courant, tension – s'apparente à vitesse, couple du moteur).

Exemple : 95% à $P_{max} = P_{nom}$ -> 83% à 0.5 U_{nom} & 0.25 I_{nom}

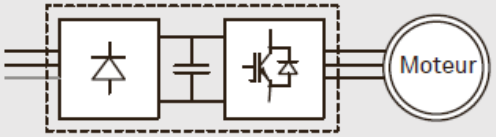
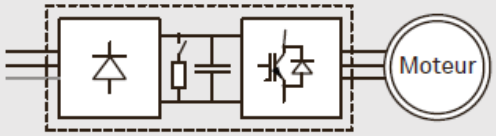
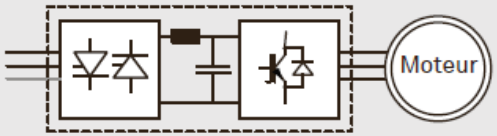
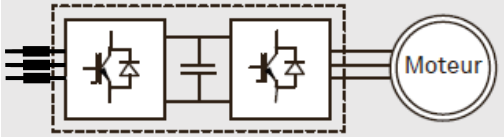
Ne pas (trop) sur-dimensionner le CF



Source : Fpr EN 50598-2, classe efficience 1

Le convertisseur de fréquence

Résumé des divers formes de CF

CF avec	Freinage électrique	cos φ	Harmoniques dans le courant de secteur
Redresseur à diodes			
	Non	Très bon	Toutes les impaires. Avec du triphasé, il manque les harmoniques des multiples de trois.
Redresseur à diodes avec hacheur de freinage			
	Oui, l'énergie de freinage est chauffée dans la résistance de freinage du hacheur de freinage.	Très bon	Comme les redresseurs à diodes sans hacheur de freinage.
Redresseur inverseur			
	Oui, avec réinjection de l'énergie de freinage dans le secteur.	Bon	Similaire aux redresseurs à diodes. Légèrement inférieur en raison de l'inductance de lissage dans le circuit intermédiaire.
Côté secteur actif avec onduleur			
	Oui, avec réinjection de l'énergie de freinage dans le secteur.	Très bon, réglable, compensation possible.	Plus la fréquence de découpage est élevée, plus elles sont faibles.

Explication des symboles

Diode. Elle symbolise ici un redresseur mono- ou triphasé doté de diodes.

Thyristor. Les deux thyristors parallèles symbolisent ici un redresseur inverseur doté de thyristors, capable de conduire l'énergie dans les deux sens.

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) avec diode antiparallèle. L'IGBT est un semi-conducteur de puissance pouvant être désactivé. Six IGBT et la diode associée permettent de réaliser un onduleur triphasé.

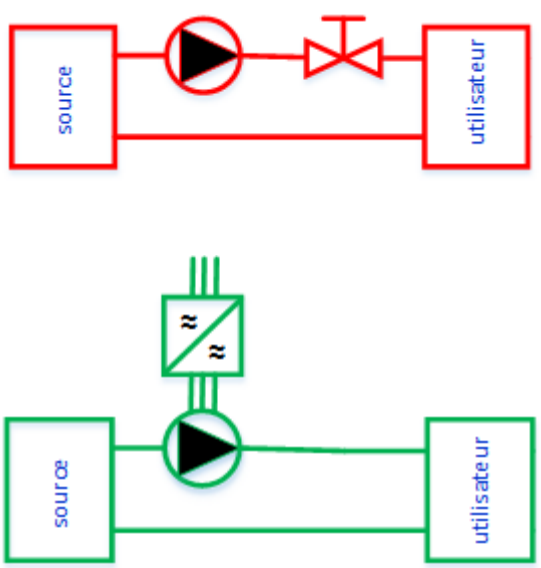
Raccordement au secteur, mono- ou triphasé

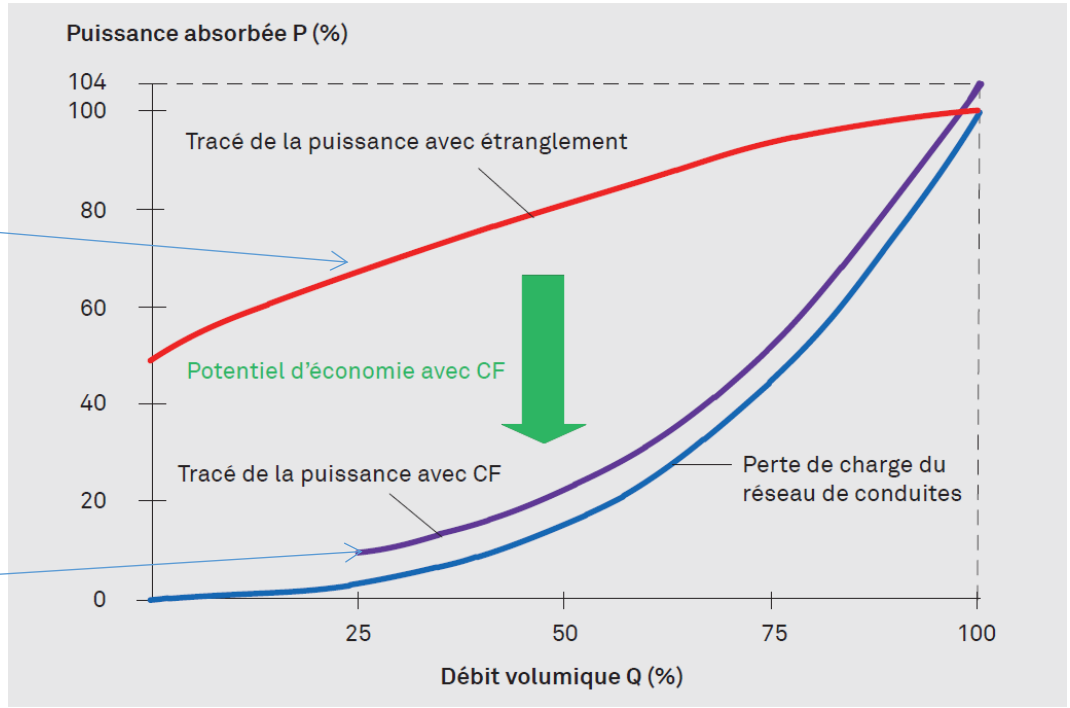
Source : Topmotors, «Convertisseurs de fréquence»

Le CF pour l'entrainement des pompes électriques

Le potentiel d'économie d'énergie

Un des <u>avantages principaux</u> de l'utilisation d'un CF réside dans l'économie d'énergie réalisable pour des applications à débit variable et ceci malgré (ou en tenant compte) des pertes engendrés par le CF.





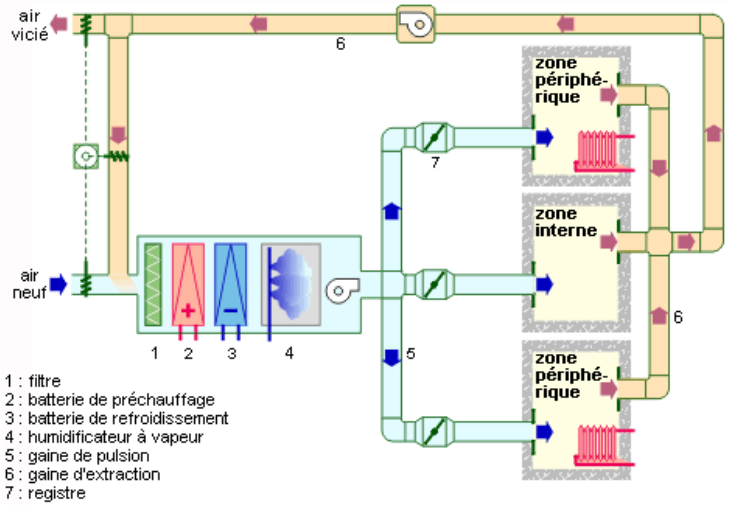
Source : Topmotors, «Pompes»

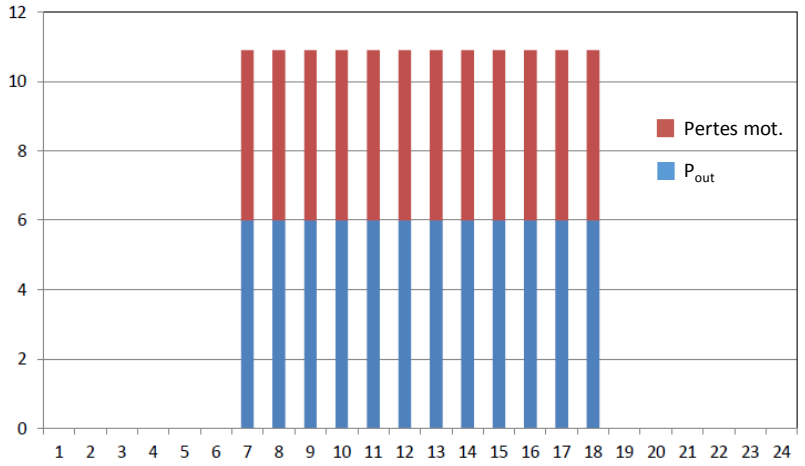
Le CF pour l'entrainement des compresseurs & ventilateurs

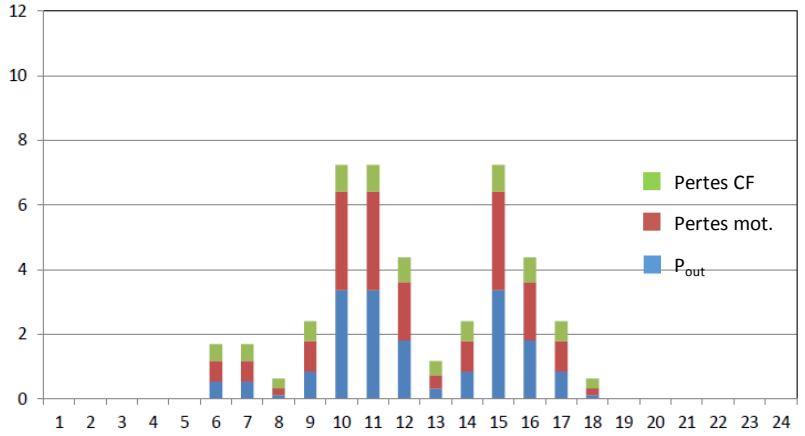
Le potentiel d'économie d'énergie

A. <u>Réglage par vannes / mélangeurs</u> :

- <u>Débit constant</u> ➡ consommation constante
- Exemple : **131 kWh/jour**







B. <u>Réglage par débit variables</u> :

- <u>Débit variable</u> (CF) : consommation réduite
- Exemple : **44 kWh/jour**

Source : workshop Topmotors 8.5.2015

heig-vd

Le CF pour l'entrainement des pompes électriques

Avantages & Inconvénients du CF

Avantages du CF :

- ✓ L'utilisation d'un CF pour des applications à débit variable, permet une **économie substantielle d'énergie**, tout en garantissant les besoins du processus ainsi que les impératifs économiques (rentabilité)
- ✓ Le débit peut être **piloté à volonté** selon des critères +/- complexes
- ✓ La variation du débit peut s'avérer avantageuse/nécessaire pour l'évolution du processus (gain en **flexibilité**)

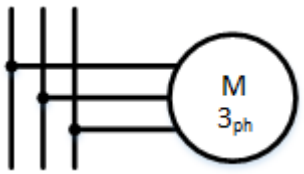
Inconvénients du CF:

- Coûts d'investissement
- Effets d'harmoniques:
  - **Distorsions sur réseau**
  - **Moteur doit être adapté au CF**
- Implémentation plus laborieuse:
  - **Encombrement / Refroidissement**
  - **Câblage blindé & mises à terre**

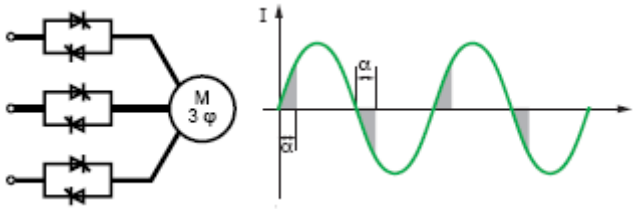
Le CF pour l'entrainement des pompes électriques

Alternatives au CF

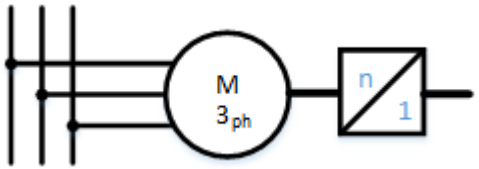
- ✓ **Raccordement direct (au réseau)**
  - Excellent rendement, si le régime moteur est constant
  - Appel de courant au démarrage élevé
  - Robuste, économique



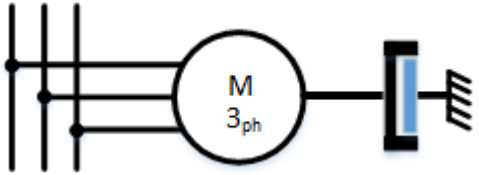
- ✓ **Démarreur progressif**
  - Appel de courant au démarrage limité
  - Robuste, économique
  - Ne permet pas la variation de vitesse efficace



- ✓ **Transmission mécanique (variable)**
  - Réducteur: permet l'adaptation de vitesse (fixe)
  - Similaire au raccordement direct



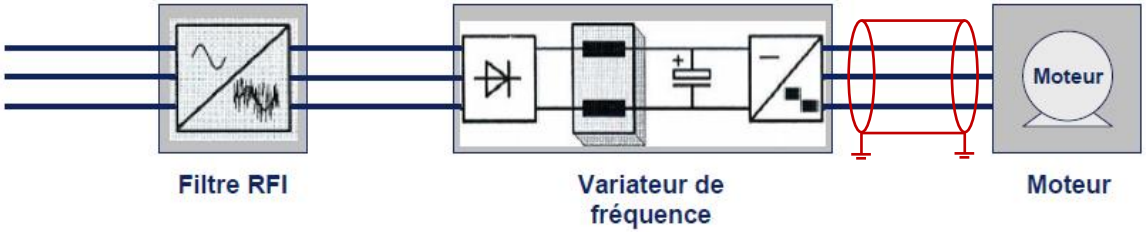
  - Frein magnétique : permet l'adaptation de vitesse,
  - … mais : peu efficace énergétiquement
    (partie de l'énergie consommée détruite dans le frein)



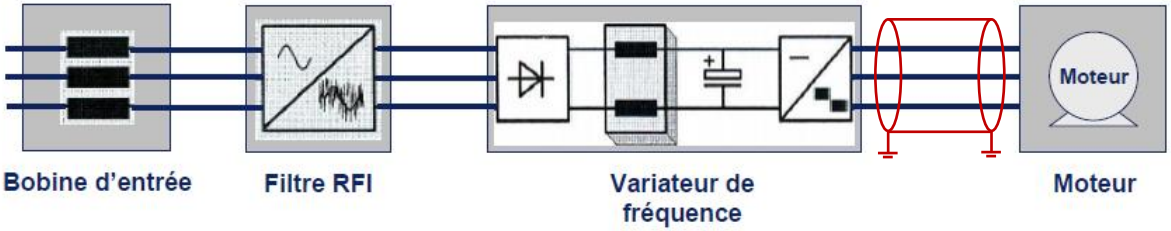
La mise en œuvre du CF

Câblages & Filtres

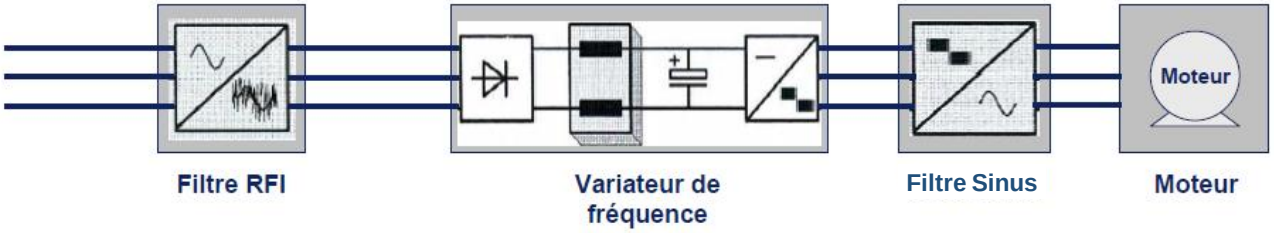
1. Filtre réseau & câbles blindés



2. Filtre et inductances réseau & câbles blindés



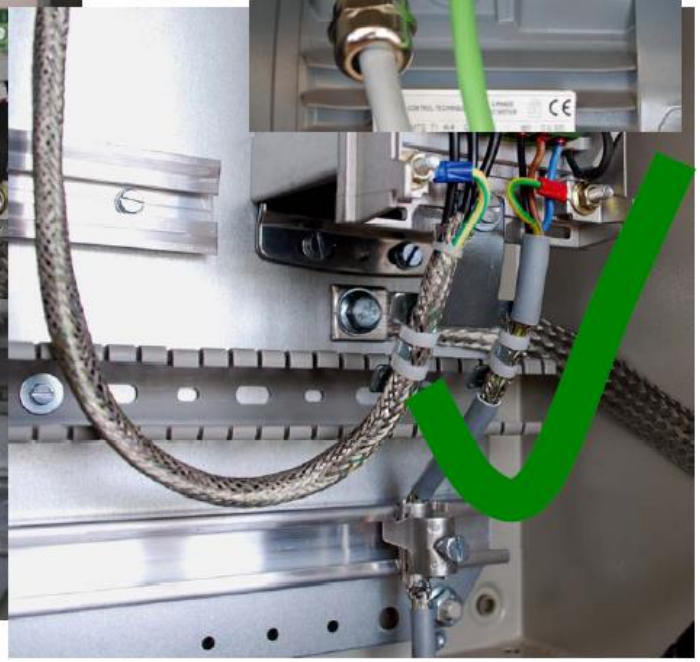
3. Filtre réseau & filtre «Sinus»



La mise en œuvre du CF

Blindages & mises à terre

- Câble moteur blindé direct → variateur
- Pas de « queues de cochon » (pigtails)
- Blindage raccordé des deux côtés
- Presse-étoupe CEM



Source : P.Bertholet «La CEM des variateurs de fréquences»

heig-vd

La mise en œuvre du CF

Critères de choix & dimensionnement

- ✓ **L'utilisation d'un CF est-elle justifiée ?**
  - Alternatives? Critères de pilotage / régulation?
- ✓ **Le moteur est-il adapté au CF ?**
- ✓ **Quel type de CF est nécessaire ?**
  - Nécessité de freinage? Récupération? Distorsions réseau acceptables?
- ✓ **Dimensionnement correct de la puissance du CF**
  - Puiss. telle que domaine fonctionnement principal à bon rendement
  - $P_{max,mot} = P_{nom,CF}$
  - U_{mot} et I_{mot} garantis pour le pire cas en alimentation ($U_{réseau}$)
- ✓ **Conséquences de la mise en œuvre du CF**
  - Encombrement, Environnement, refroidissement, degré IP
  - Câblage blindé (év. Filtres), mise à terres
  - Prévoir maintenance, durée de vie

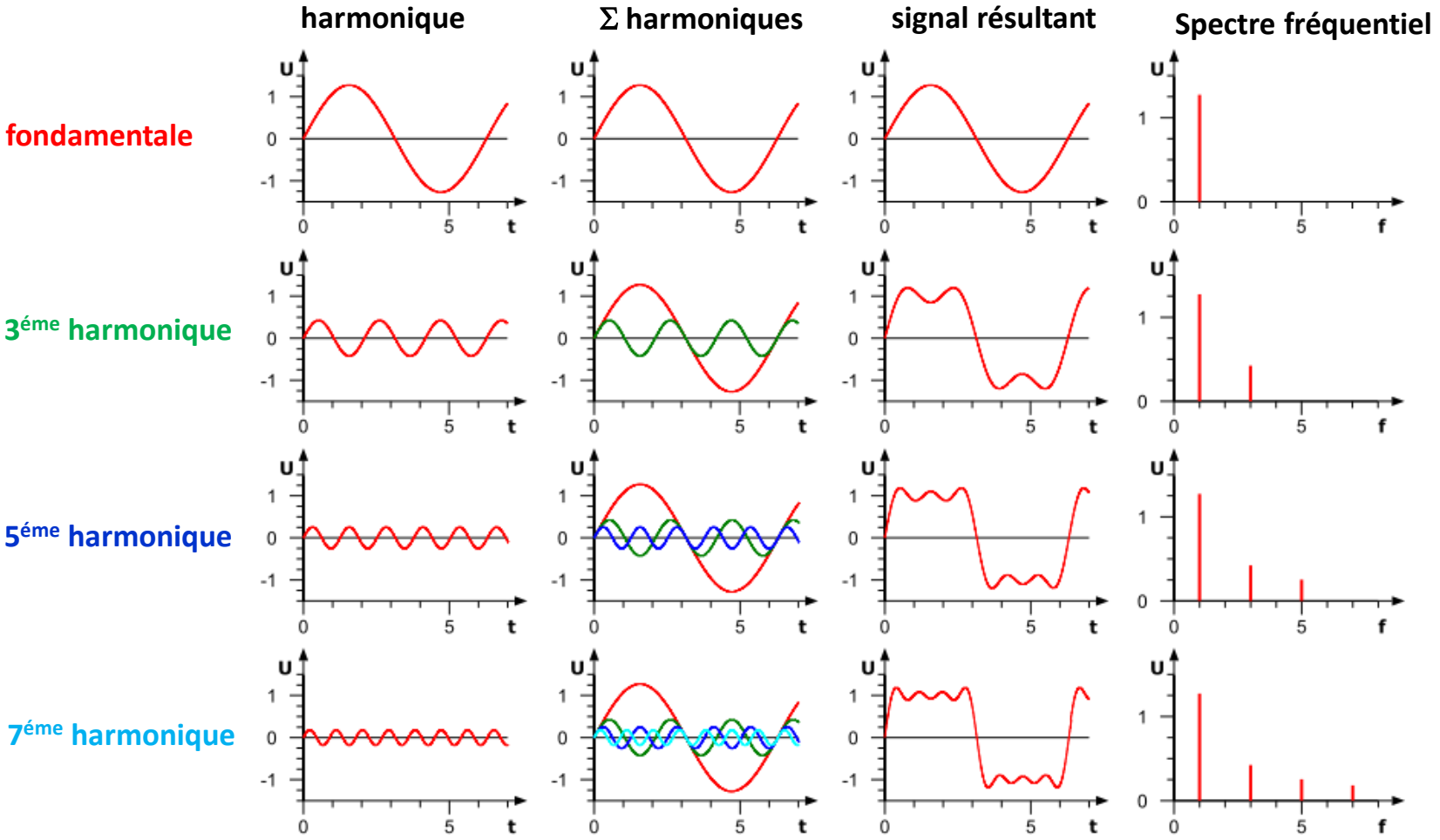
Conclusions

- ✓ **L'utilisation d'un CF est justifié dans les applications à régime variable, permettant un gain en efficacité tout en répondant au critères de fonctionnement du processus.**
- ✓ **Le gain en énergie à régime réduit doit pouvoir compenser les pertes supplémentaires du CF.**
- ✓ **Le moteur doit être adapté pour l'utilisation d'un CF (risque de défauts d'isolation, pertes supplémentaires). Un moteur plus récent, représente généralement également un gain en efficacité énergétique.**
- ✓ **Dimensionnement correct de la puissance du CF est indispensable, afin de garantir une bonne efficacité de l'ensemble de la chaîne d'entrainement électrique.**
- ✓ **Planifier également les conséquences de la mise en œuvre du CF**

heig-vd

Questions

… pour la pause-café ou la table-ronde

Annexes

Rappel : fondamentale & harmoniques