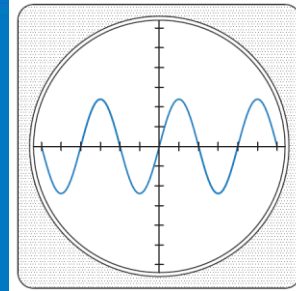




Corporation
des maîtres électriciens
du Québec



LES HARMONIQUES

Imed Laouini ing. Ph. D.
Conseiller technique
CMEQ

71,8 A ou 95,0 ?



71,8 A

95 A

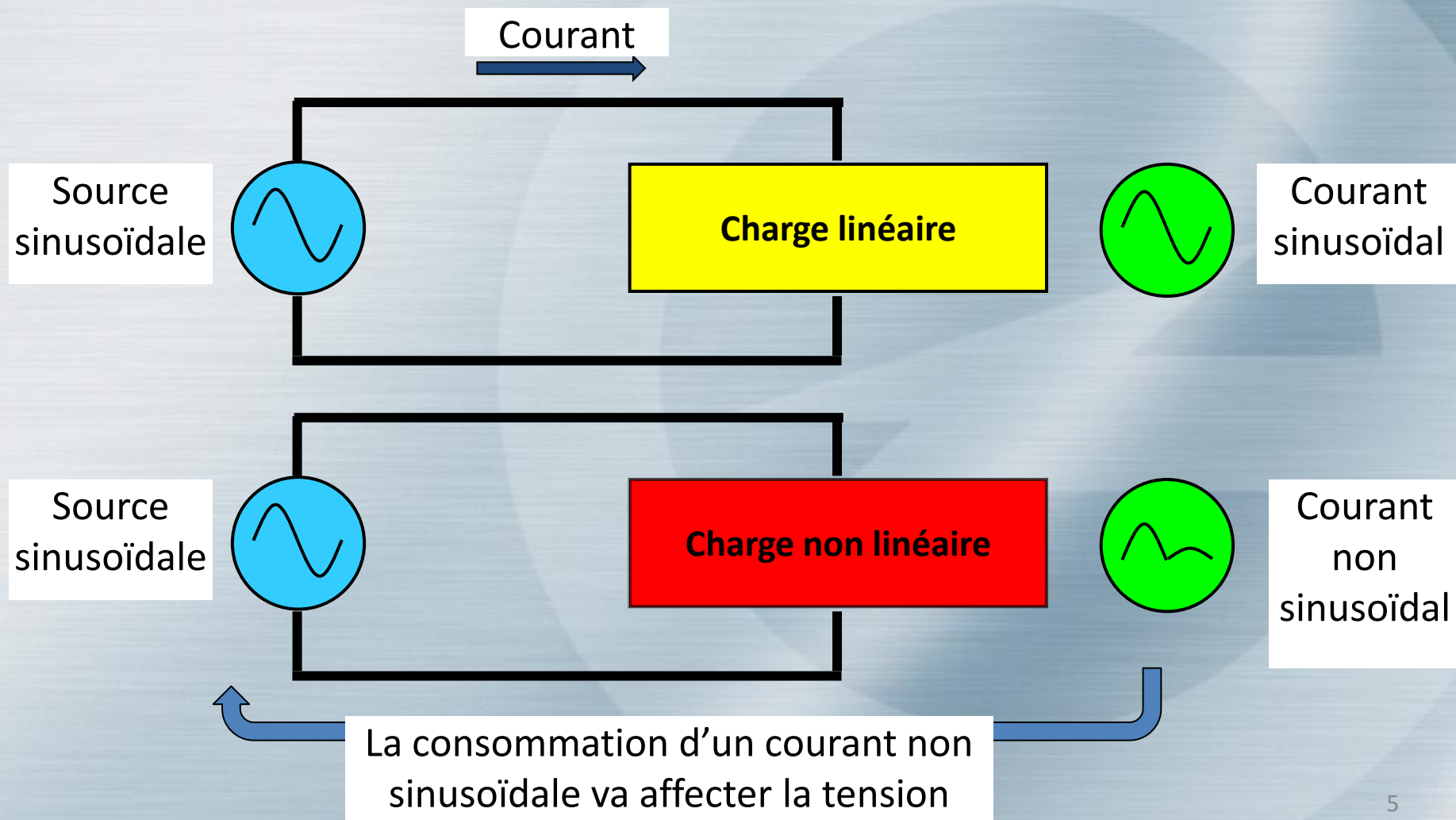
1. Comprendre la formation de courants harmoniques
2. Identifier les charges polluantes
3. Analyser et interpréter un relevé d'harmoniques
4. Comprendre l'effet des harmoniques sur le facteur de puissance et sur la facture d'électricité

E- FOCUS SUR LES COURANTS HARMONIQUES

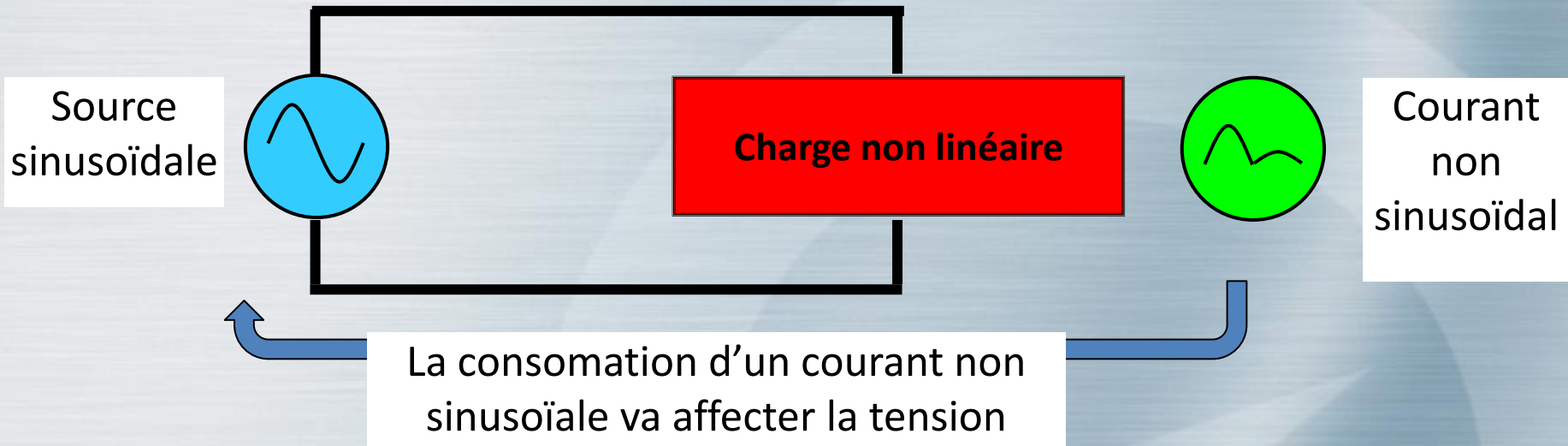
E. Focus sur les courants harmoniques

- 1 INTRODUCTION
- 2 QUE SONT LES HARMONIQUES ?
- 3 LES SOURCES
- 4 LES CONSÉQUENCES
- 5 LES SOLUTIONS
- 6 CONCLUSION

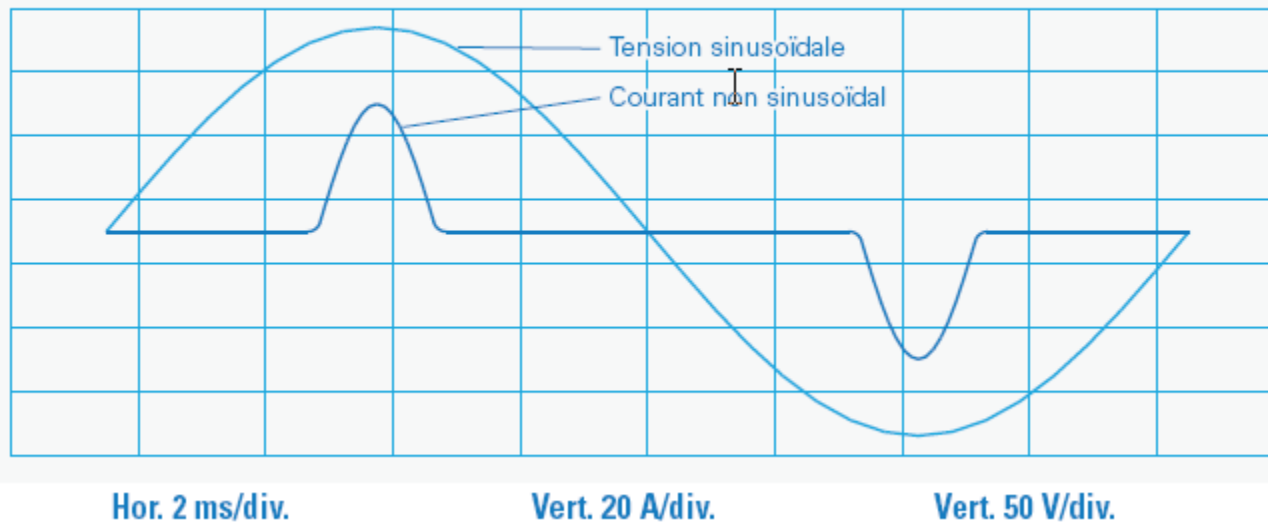
Charge linéaire vs charge non-linéaire



Charge linéaire vs charge non-linéaire



Courant électrique non sinusoïdal



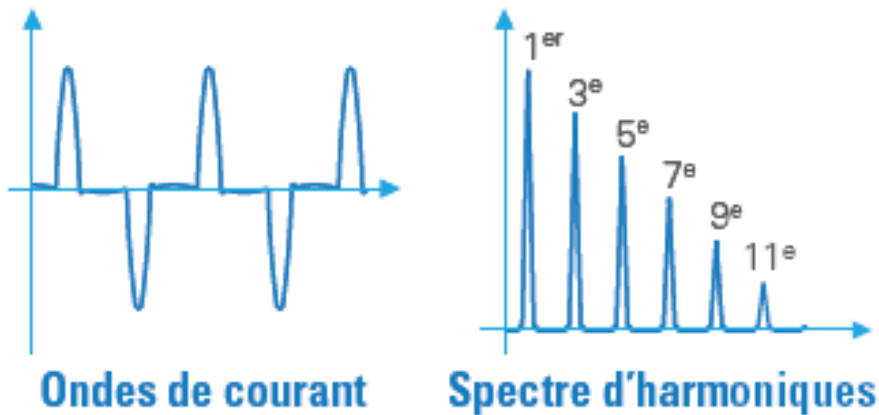
Que sont les harmoniques?

Définition

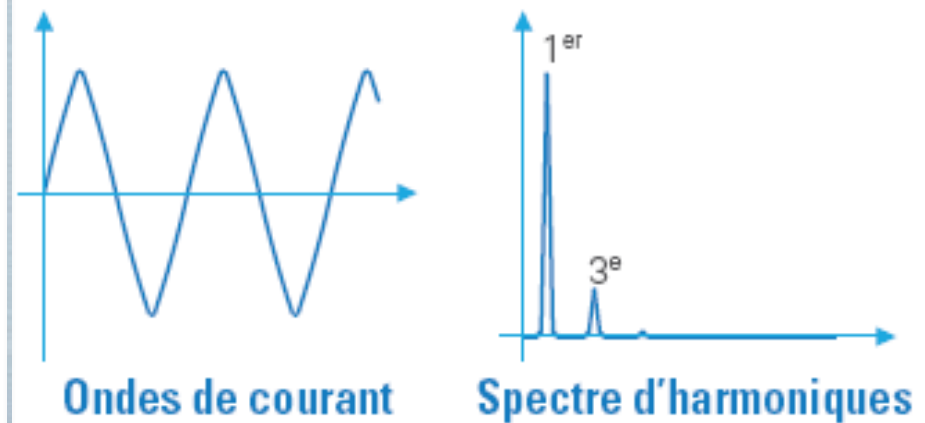
➤ En électricité, les courants harmoniques sont des courants électriques de fréquence multiple de la fréquence fondamentale 60Hz (120, 180, 240, 300 Hz, ect) qui apparaissent dans les réseaux électriques .

Spectre de fréquence harmonique

A) Source d'alimentation à découpage d'un ordinateur



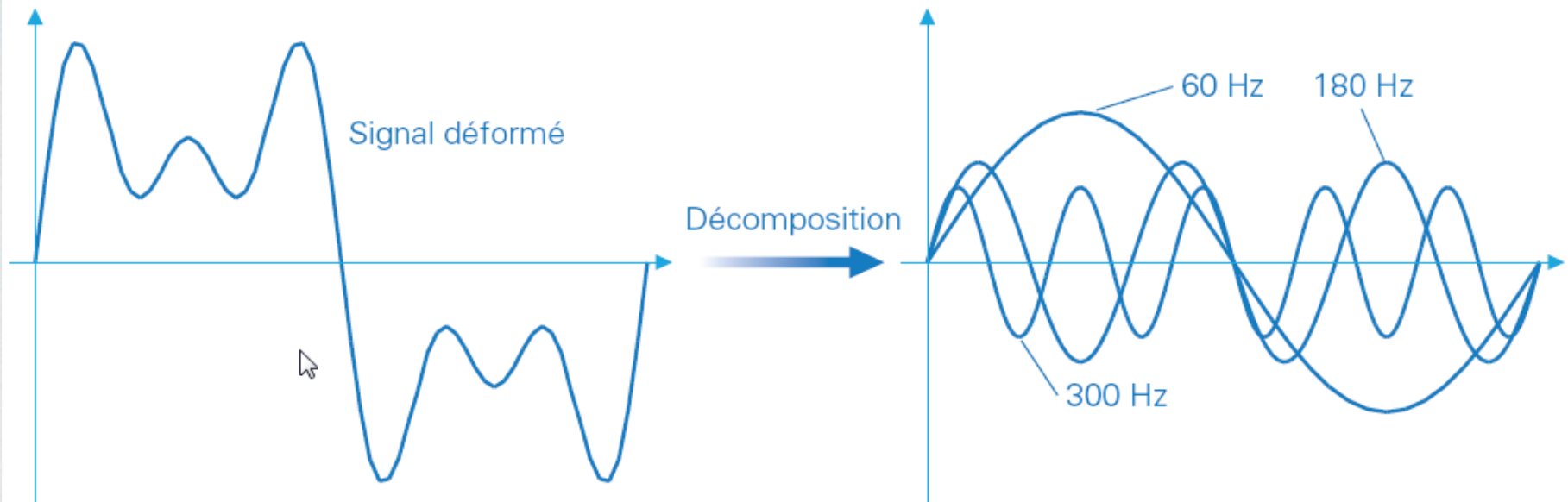
B) Éclairage fluorescent utilisant un ballast de type magnétique



- On parlera donc du *spectre* (de fréquence) des *harmoniques*

Exemple

Décomposition harmonique

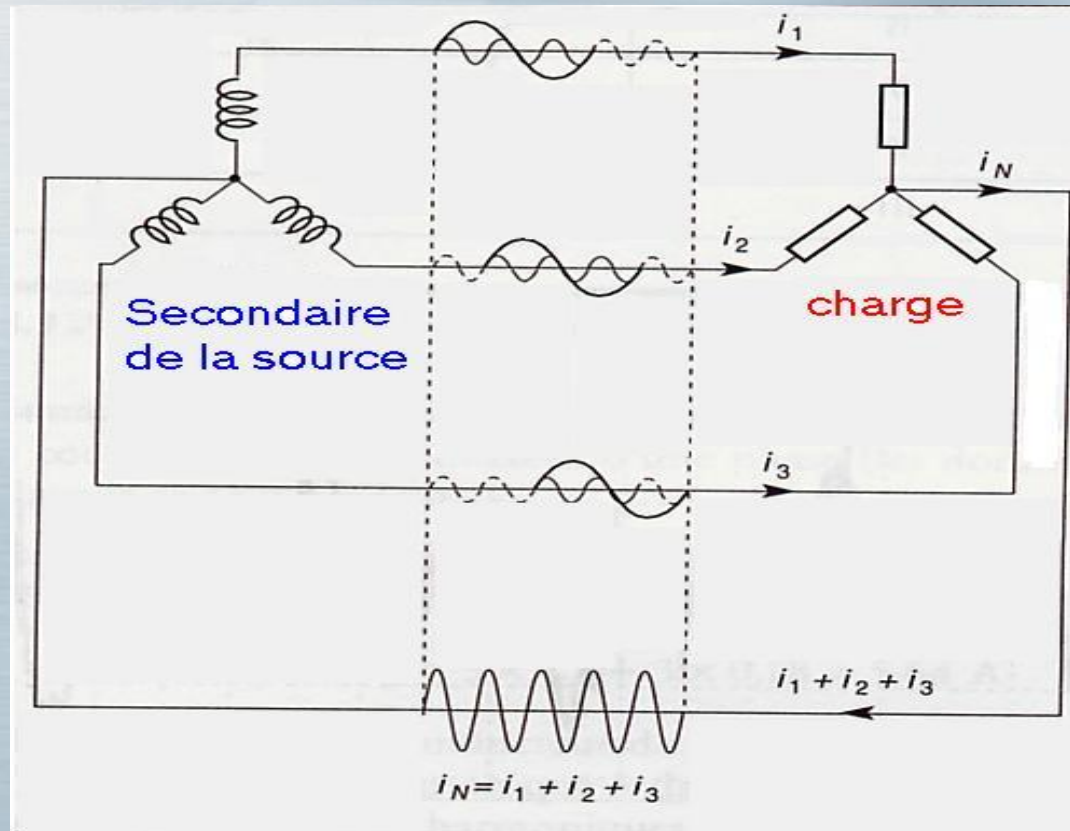


$$U(t) = U_0 + U_1 \cdot \sin(2\pi f) + U_2 \cdot \sin(2\pi \cdot 2f) + U_3 \cdot \sin(2\pi \cdot 3f) + \dots + U_n \cdot \sin(2\pi \cdot nf)$$

- U_0 : composante continue
- U_1 : fondamentale à 60 Hz
- U_2, U_3, U_n : harmoniques (2^{ème} () 120 Hz , 3^{ème} (180 Hz), nième ($n \times 60$ Hz))

La 3^e harmonique

- Les harmoniques *homopolaires* (rang $3n$) : 3^e, 6^e, 9^e etc. sont dans la même direction donc ils *s'additionnent algébriquement dans le neutre*: source d'un grand nombre des problèmes du neutre



Détection de la présence de
pollution sur un réseau
d'alimentation

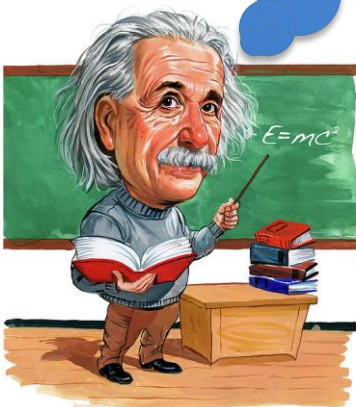


Mesure de tensions
harmoniques

Localisation des
pollueurs



Mesure des courants
harmoniques



Ce qu'il faut mesurer-courant

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2}$$

Valeur efficace
d'un signal périodique
quelconque

$$THDi (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Taux global de distorsion

Facteur de crête

$$F_{ci} = \frac{I_{\text{crête}}}{I_{\text{eff}}}$$

Ce qu'il faut mesurer-tension

$$U_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} U_n^2}$$

Valeur efficace
d'un signal périodique
quelconque

$$THDu \text{ (\%)} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} U_n^2}}{I_1}$$

Taux global de distorsion

Facteur de crête

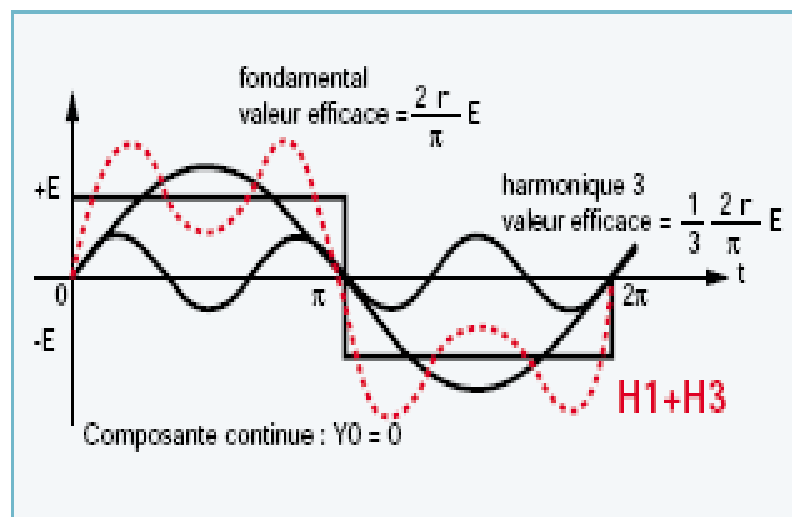
$$F_{Cu} = \frac{U_{\text{crête}}}{U_{\text{eff}}}$$

Ce qu'il faut mesurer

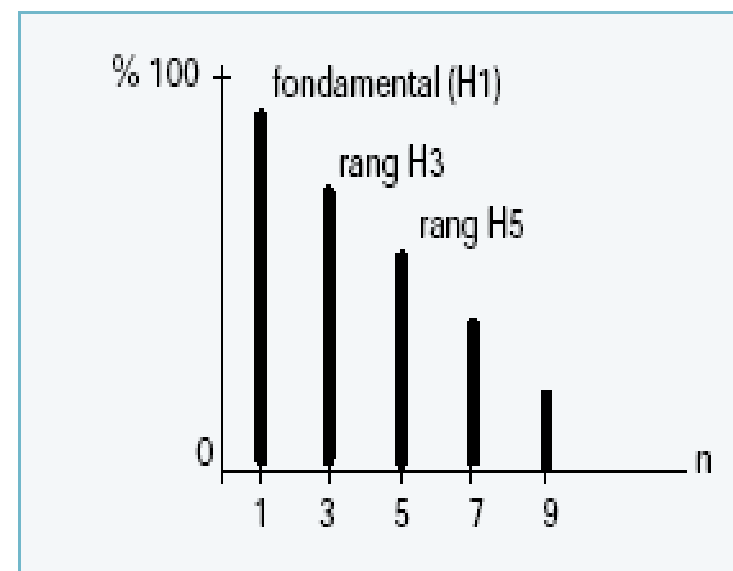
Le taux de distorsion harmonique (TDH) est le rapport entre les harmoniques et la fondamentale exprimé en pourcentage.

Exemple: THDi=28%

Représentation temporelle



Représentation spectrale



Ce qu'il faut mesurer

Limites de distorsion de tension (IEEE 519-1992)

Tableau 14.4 Limites de distorsion de tension au point de couplage pour les fournisseurs

Tension des barres de courant	Distorsion individuelle de tension %	Distorsion totale de tension %
69 kV et moins	3	5
69,001 kV-161 kV	1,5	2,5
161,001 kV et plus	1	1,5

Source : IEEE 519-1992.

Ce qu'il faut mesurer

Limites de distorsion de courant (IEEE 519-1992)

Tableau 14.5 Limites de distorsion de courant pour les réseaux de distribution

SYSTÈMES DE DISTRIBUTION 120 V - 69 kV DISTORSION MAXIMALE DU COURANT HARMONIQUE EN POURCENTAGE DE I_L ORDRE HARMONIQUE INDIVIDUEL (HARMONIQUES IMPAIRS SEULEMENT)						
I_{sc}/I_L	11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	TDH
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 – 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 – 1 000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1 000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Les taux des harmoniques d'ordre pair doivent être inférieurs à 25% des valeurs limites des harmoniques impairs ci-dessus.

I_L : Courant de charge maximal (moyen).

I_{sc} : Courant de court-circuit maximal.

TDH : Taux de distorsion global du courant.

Source : IEEE 519-1992.

Ce qu'il faut mesurer

Le taux de distorsion harmonique (TDH) (IEEE 519-1992)

ANSI / IEEE 519-1992

Voltage Requirements

Low-Voltage System Distortion Limits

	Special Applications *	General System	Dedicated System **
TDD	3%	5%	10%

* Special Applications include hospitals and airports.

** Dedicated System is exclusively dedicated to converter loads.



Tension

Courant

ANSI / IEEE 519-1992

Current Requirements

Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V through 69,000 V)

I_{SC}/I_L	TDD
< 20 *	5.0
20-50	8.0
50-100	12.0
100-1000	15.0
> 1000	20.0

TDD = Maximum Harmonic Current Distortion, in percent of I_L

Where: I_{SC} = Maximum short circuit current @ PCC

I_L = Maximum demand load current (fundamental frequency component) @ PCC

Appareils de mesure

Multimètre
TRMS



Pince
harmonique

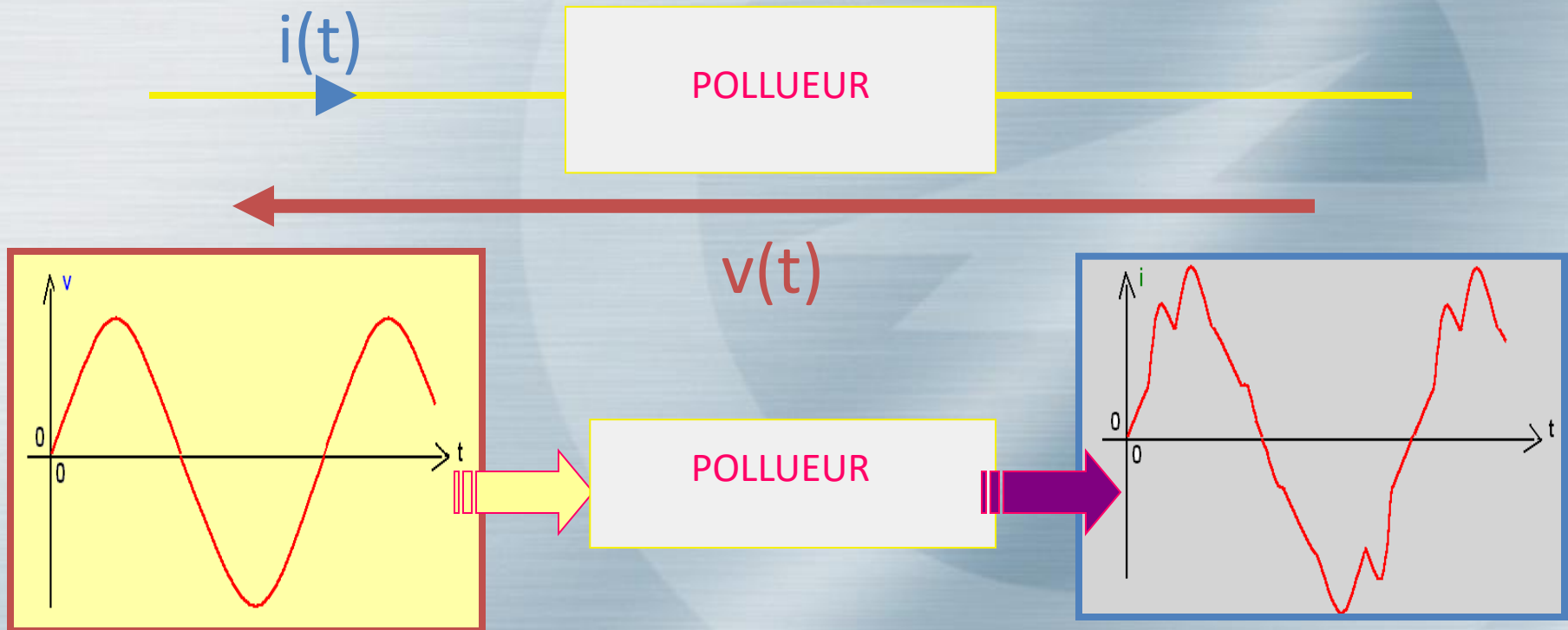


Analyseur de réseau
électrique

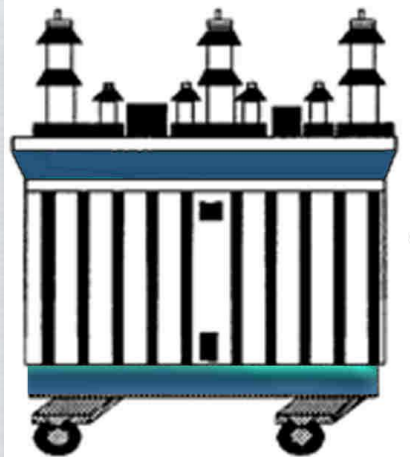


Sources-les pollueurs

- Un POLLUEUR est une CHARGE DEFORMANTE , c'est-à dire une charge qui, alimentée par une tension sinusoïdale $v(t)$, appelle sur le réseau un courant déformé $i(t)$ (non sinusoïdal) .



Sources-les pollueurs

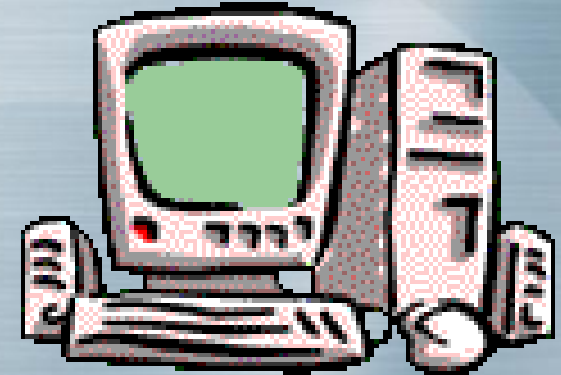


TRANSFORMATEUR

Variateur de vitesse

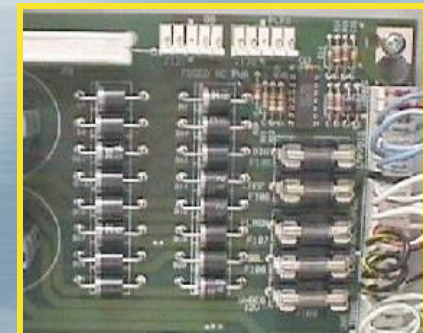


Ballast



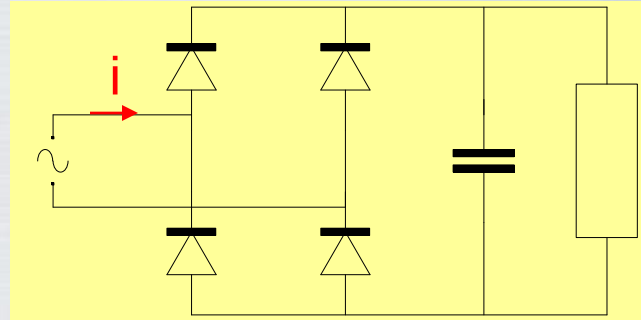
ORDINATEUR

REDRESSEUR

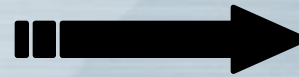


TELEVISION

Sources-les pollueurs

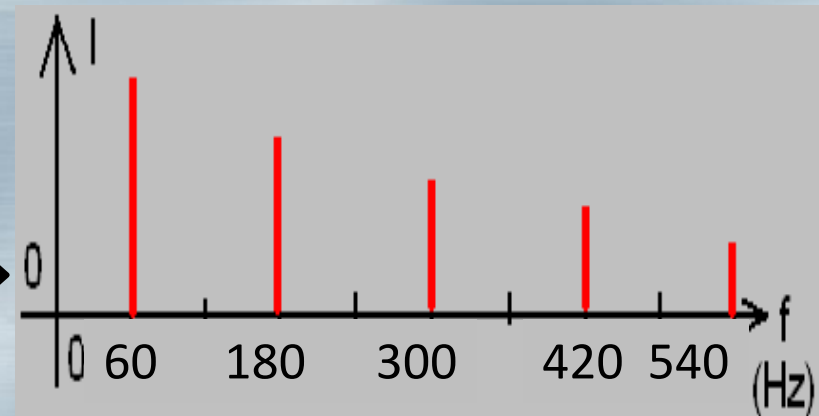
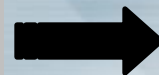
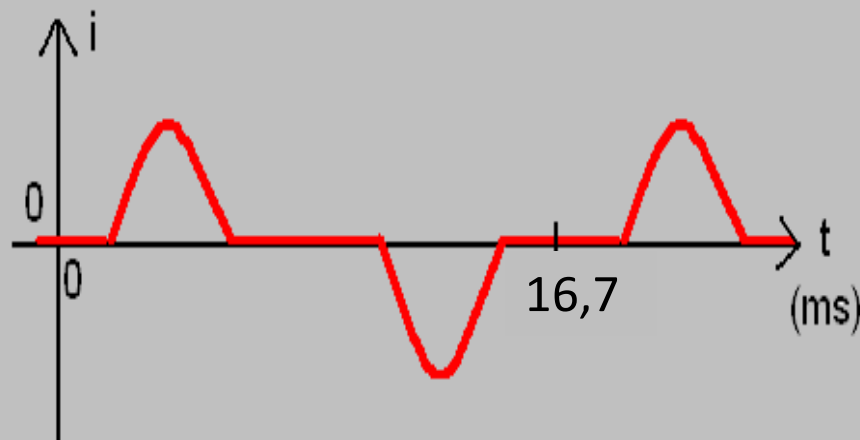


Utilisation

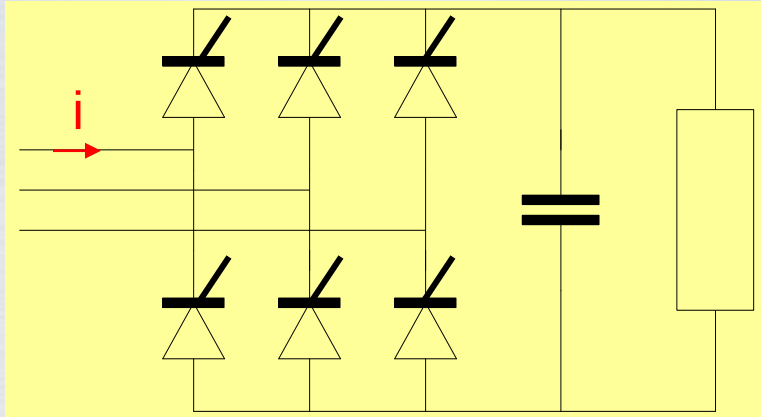


Micro-informatique
Télévision
Lampe à ballast
électronique

Alimentation à découpage : redresseur monophasé à diodes avec filtrage capacitif...

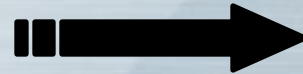


Sources-les pollueurs

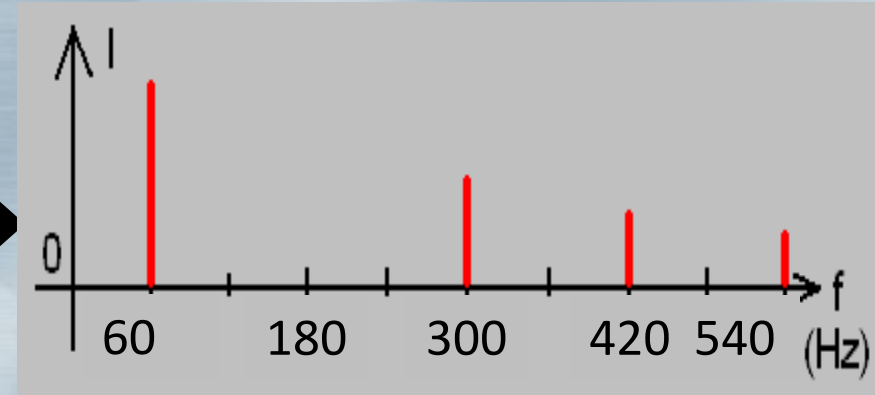
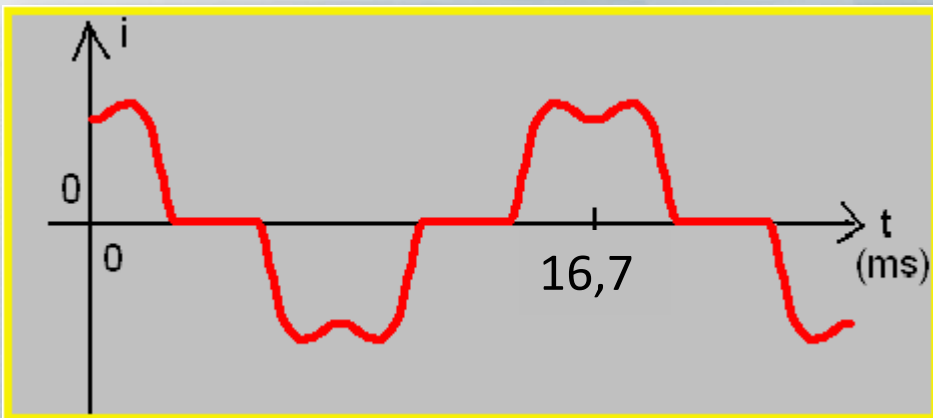


Redresseur triphasé avec filtrage

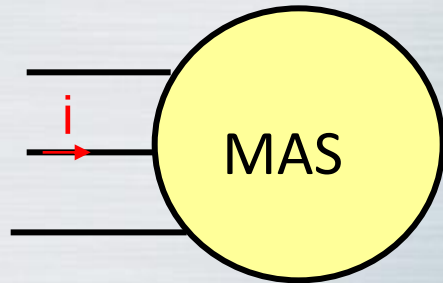
Utilisation



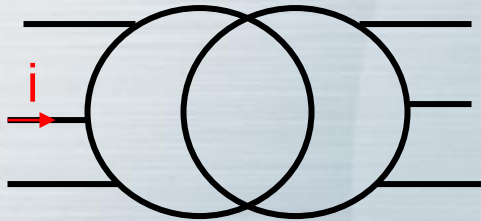
Variation de vitesse des
moteurs à courant
continu
Variation de vitesse des
moteurs synchrones



Sources-les pollueurs



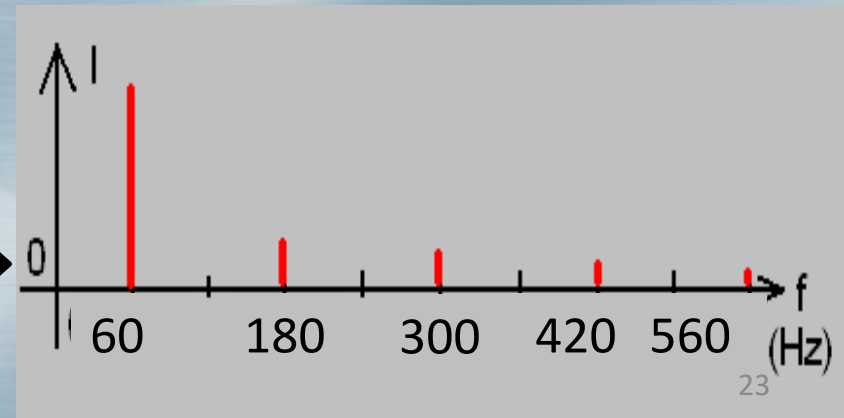
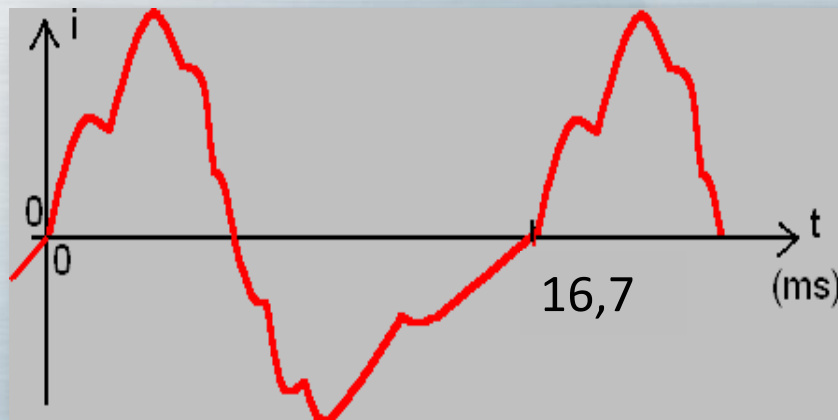
Moteur asynchrone



Transformateur



Machines-outils
Appareils
électroménagers
Ascenseurs

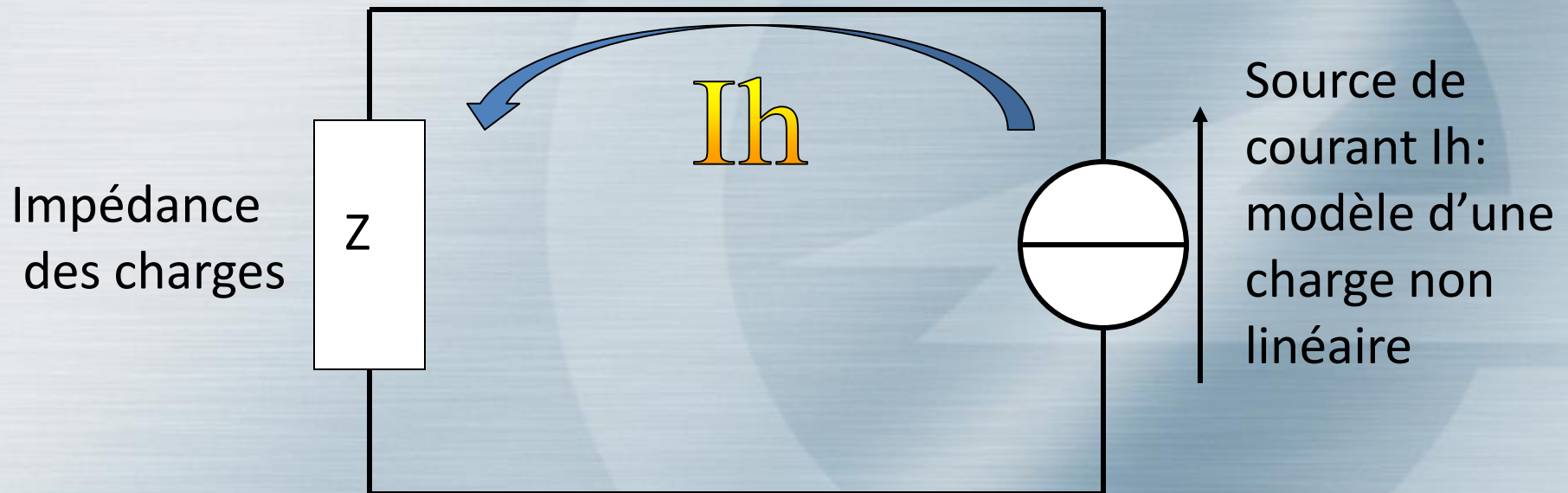


Sources-les pollueurs

	I_{EFF}	I_{CRETE}	F_c
ordinateur	0,66 A	1,60 A	2,4
téléviseur	0,73 A	2,03 A	2,8
pont de Graëtz	1,74 A	5 A	2,87

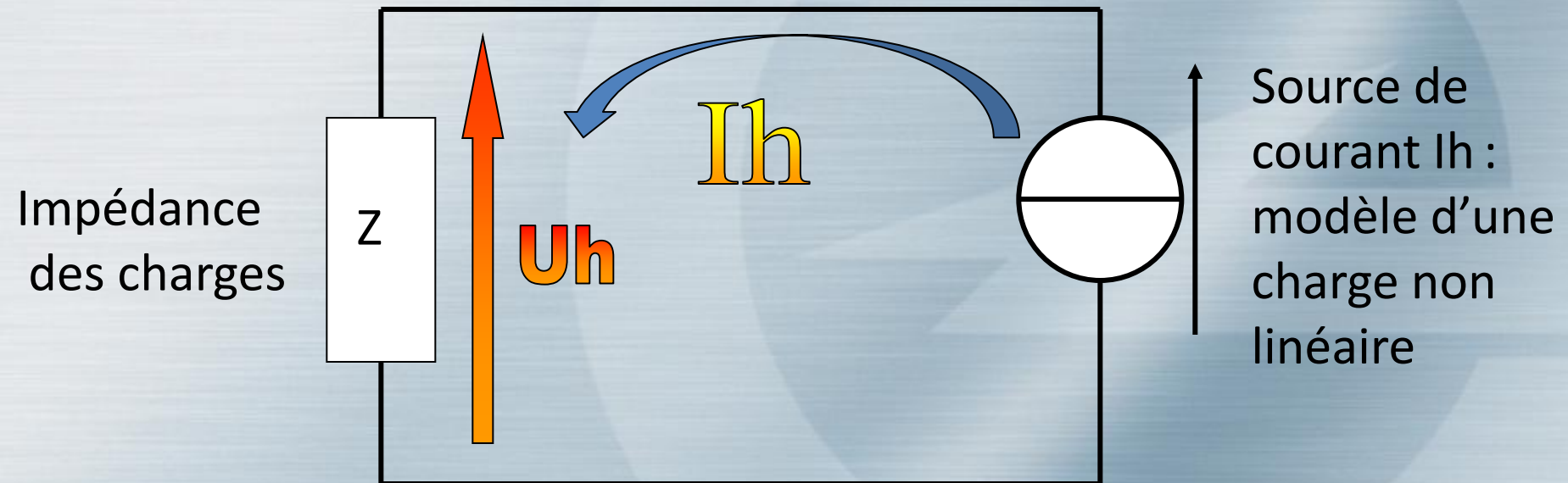
Problèmes liés aux harmoniques

La circulation des courants harmoniques I_h dans les conducteurs et les charges d'impédance Z



Problèmes liés aux harmoniques

La circulation des courants harmoniques I_h dans les conducteurs et les charges d'impédance Z



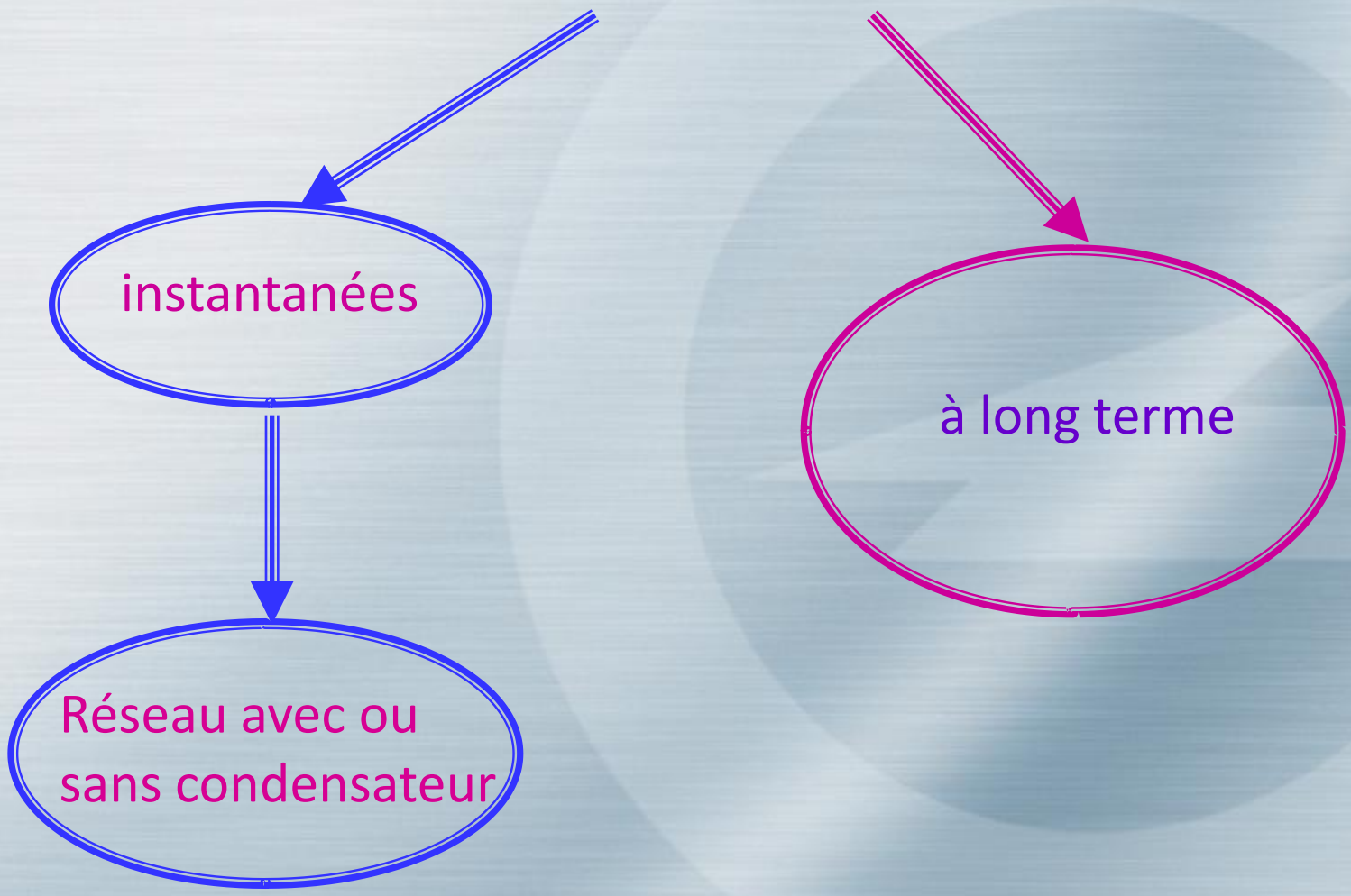
engendre des tensions harmoniques U_h

selon la loi d'Ohm : $U_h = Z I_h$

Les courants harmoniques créés par les charges non linéaires induisent de façon générale :

- La création de tension harmonique.
- Des pertes supplémentaires par effet Joule;
- Une diminution du facteur de puissance;

Ces effets peuvent avoir des conséquences



instantanées

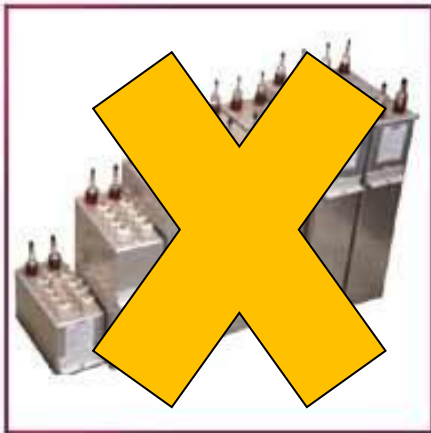
Réseau avec ou
sans condensateur

à long terme

Problèmes liés aux harmoniques

La gravité des effets instantanés de la pollution harmonique dépend de la constitution du réseau :

Réseau sans
condensateur



Réseau avec
condensateurs



Les effets instantanés

- Surcoût de la facture d'électricité car le facteur de puissance diminue;
- Perturbation des lignes à courant faible lorsqu'elles circulent à côté d'une canalisation de distribution électrique (télécommunications);
- Perte de la stabilité mécanique des moteurs à cause des vibrations dues aux couples pulsatoires;
- Claquage des condensateurs à cause de la résonnance;
- Disfonctionnement des moteurs de supports magnétiques des ordinateurs

Les effets à long terme

- Ils sont dus à l'augmentation des pertes par effet Joule;
- Échauffement des machines tournantes dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires à cause des champs tournants harmoniques;
- Échauffement des transformateurs dû à l'augmentation de l'hystérésis et des courants de Foucault;
- Vieillissement des condensateurs dû aux surcharges causées par la résonance sur un rang harmonique;
- Échauffement des conducteurs et perte en ligne supplémentaires

Rang harmonique et effets typiques

Rangs, séquences et effets typiques des harmoniques

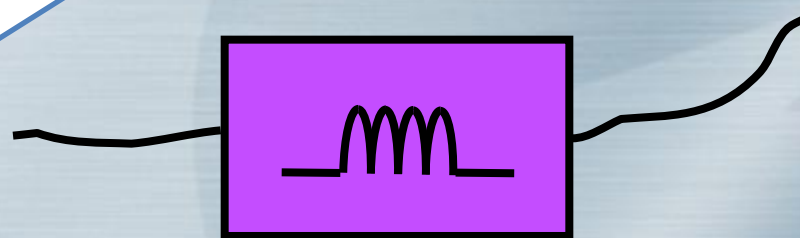
Rang	Fréquence	Séquence	Effets typiques
1 (fondamentale)	60	Positive	Puissance active
2, 5, 8, ... $(3n - 1)$	120 Hz = 2×60	Négative	Freinage et échauffement des moteurs
3, 6, 9, ... $(3n)$	180 Hz = 3×60	Zéro	Échauffement et courant du neutre
4, 7, 10, ... $(3n + 1)$	240 Hz = 4×60	Positive	Pulsation et à-coups sur l'arbre du moteur

La protection des condensateurs

Le but est de protéger les condensateurs
installés sur le réseau contre les
surcharges harmoniques



On installe des inductances anti-harmoniques en série avec le condensateur. On déplace ainsi la fréquence de résonance



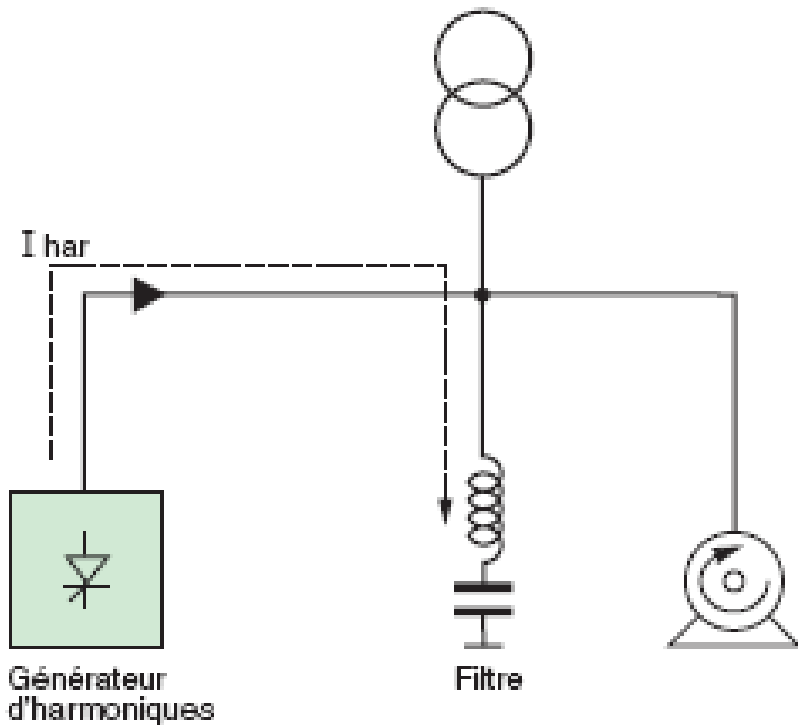
Le but est de dépolluer le réseau lorsque le niveau d'harmonique est trop élevé.
trois types de filtres en fonction de l'application source d'harmonique:

1. Filtre passif
2. Filtre actif
3. Filtre hybride



Les solutions: filtrage passif

Le filtre passif piège les courants harmoniques dans des courts-circuits pour harmoniques



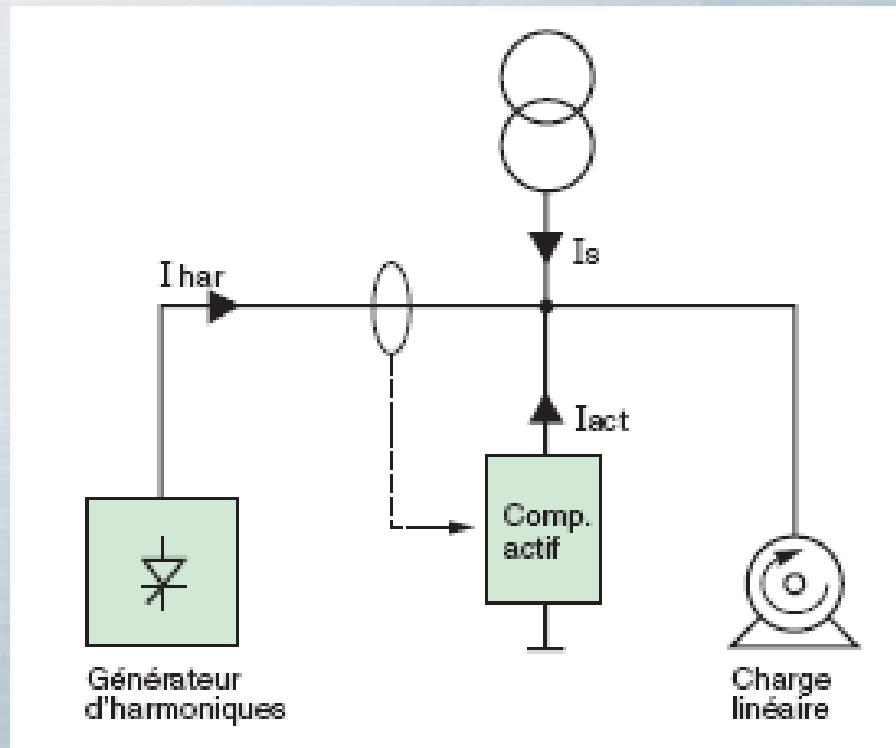
Source Schneider

➤ Filtres passifs

- Ils sont constitués de bobines et de condensateurs configurés en circuits résonants accordés sur la fréquence d'un rang d'harmonique à éliminer.
- Un équipement peut comprendre plusieurs ensembles afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques.
- Les filtres passifs peuvent être réalisés pour tout niveau de tension et de courant.

Les solutions: filtrage actif

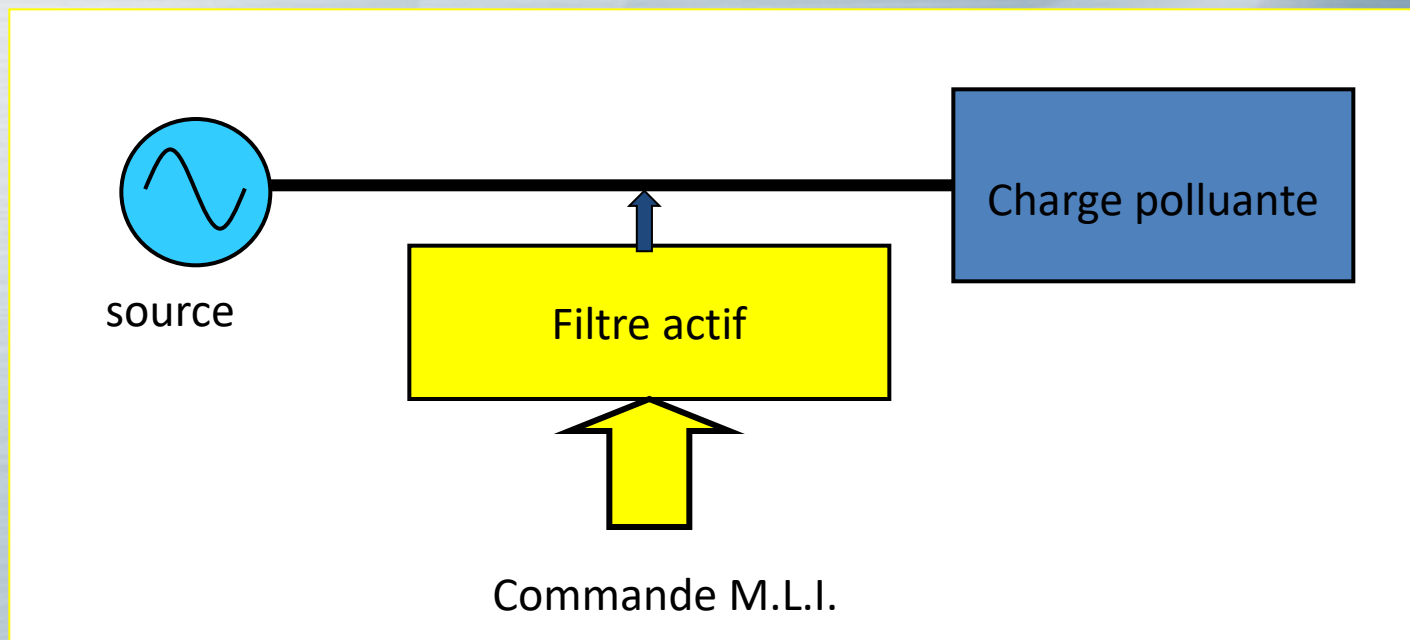
Le filtre actif injecte en opposition de phase les harmonique présentes sur l'alimentation



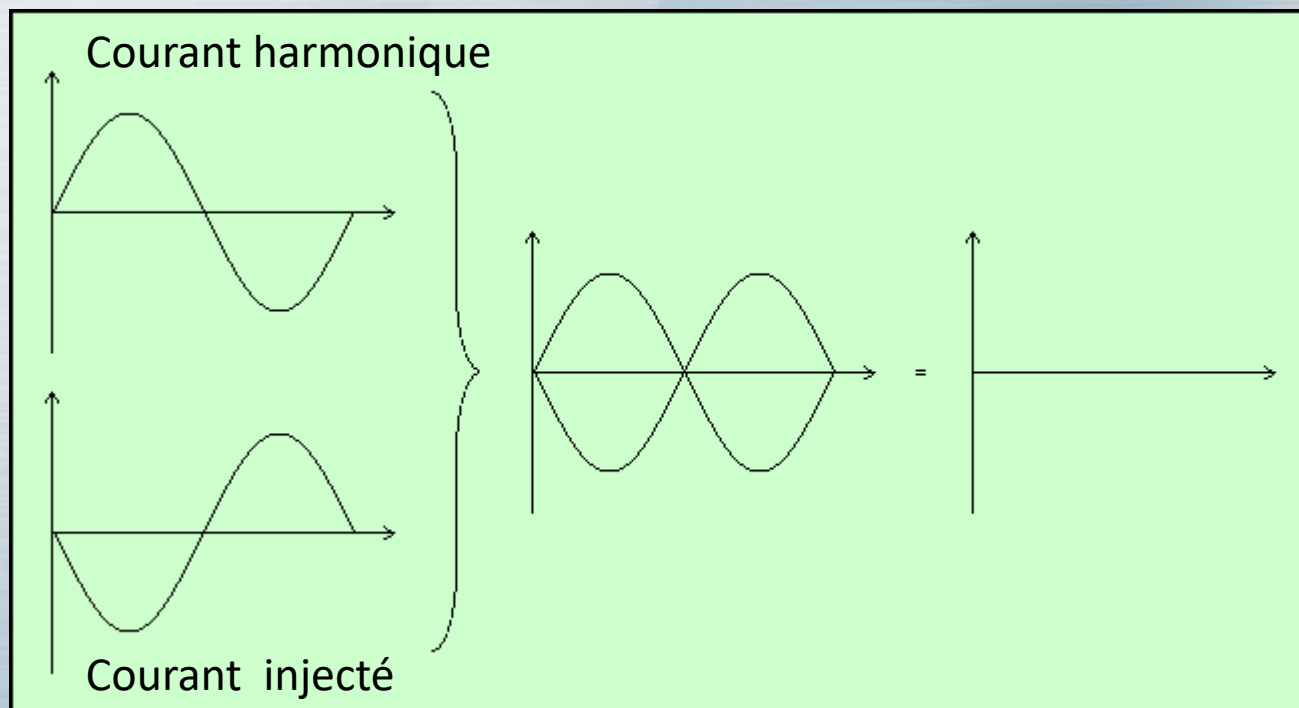
Source Schneider

Les solutions: filtrage actif

- Le filtre actif élimine les harmoniques par injection d'harmoniques
- Il permet d'éliminer le courant du neutre (3ieme harmonique)
- Il permet de balancer les phases et corriger le facteur de puissance



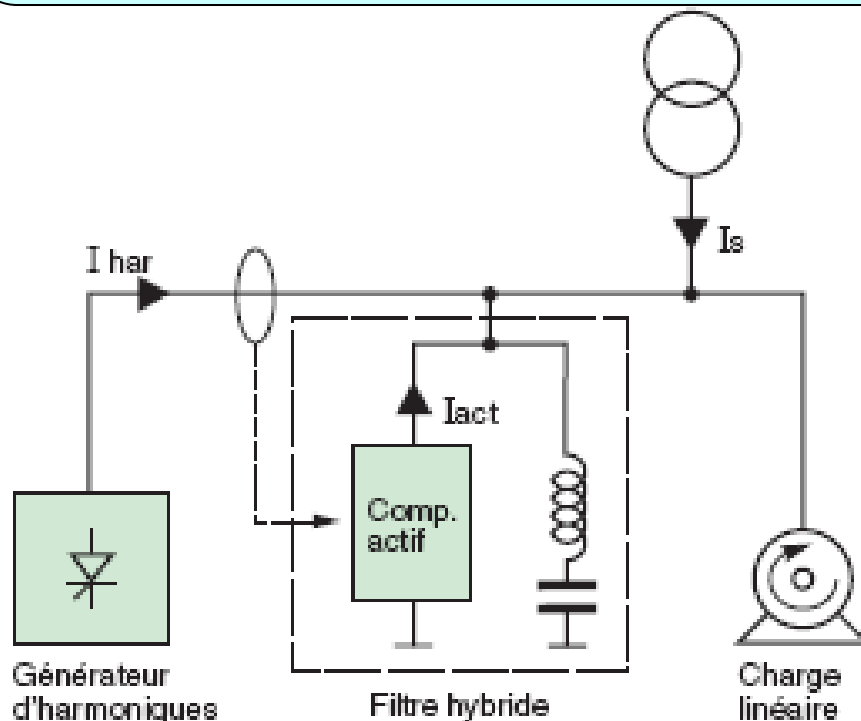
Les solutions: filtrage actif- superposition de deux onde en opposition de phase



Focus sur les harmoniques

Les solutions: filtrage hybride

Le filtre hybride: filtre passif + filtre actif



Filtres hybrides

Ces équipements cumulent les avantages en incluant dans la même enveloppe un filtre passif et un compensateur actif SineWave.

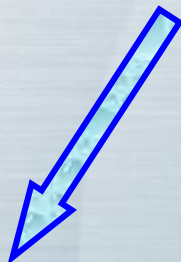
Source Schneider

Focus sur les harmoniques

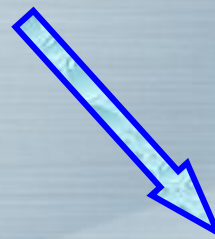
❑ Critères de choix des filtres

- **Le filtre passif permet à la fois la compensation d'énergie réactive et une grande** capacité de filtrage en courant. Le filtre passif réduit aussi les tensions harmoniques des installations dont la tension d'alimentation est polluée.
- Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les période de faible charge. L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.
- **Le compensateur actif permet le filtrage des harmoniques sur une large bande** de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge. Cependant, sa puissance harmonique est limitée.
- **Le filtre hybride réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.**

AUTRES SOLUTIONS



Planification et
conception



Déclassement des équipements

❑ Les solutions: planifier et concevoir adéquatement l'installation

- Linéaires vs. non-linéaires
 - Prévoir des distributions distinctes
- Tension
 - Le changement de tension permet une élimination partielle
- Reliées ou non à un système d'urgence
 - Les génératrices n'aiment pas les harmoniques
- Croissance anticipée
 - Quantité,
 - Proportion

Focus sur les harmoniques

□ Les solutions, éléments de conception

- Transformateurs à facteur K (K13)
 - La forme du conducteur
 - En option: zig-zag, double sortie, déphasés de 15°
- Neutre doublé
 - Transformateur
 - Distribution
- CDM séparée
 - Prises orange
 - Jusqu'au panneau ou au transformateur (le plus prêt possible de l'entrée)

❑ Les solutions: éléments de conception

- Estimer les courants harmoniques si possible
- Prévoir des correcteurs passifs ou actifs (ces éléments sont rarement requis)
- Optez pour une installation bien conçue
- Corriger à l'équipement autant que possible
- Coordonner les travaux avec le distributeur d'électricité

Focus sur les harmoniques

Livre bleu d'HQ- article 1.2.1.3: Afin de maintenir la qualité de l'alimentation [pour l'ensemble de ses clients], Hydro-Québec doit s'assurer que la limite du niveau d'émission des différents types de perturbations sur son réseau est respectée.

Les clients
s'engagent
à limiter leur
niveau
de pollution



HQ s'engage à
fournir une énergie
de qualité

Focus sur les harmoniques

- En général, avant d'effectuer le raccordement d'un client industriel ou de certains clients commerciaux, Hydro-Québec peut exiger des études sur les effets de l'installation du client sur le réseau de distribution.
- Plusieurs normes techniques ont été établies par Hydro-Québec à cet effet. Il faut communiquer avec le distributeur pour bien les connaître et bénéficier des services d'accompagnement existants. À ce point, il s'agit d'une affaire de spécialistes.

Conclusion

- La figure suivante montre les effets de quelques-unes de ces perturbations sur l'onde électrique.

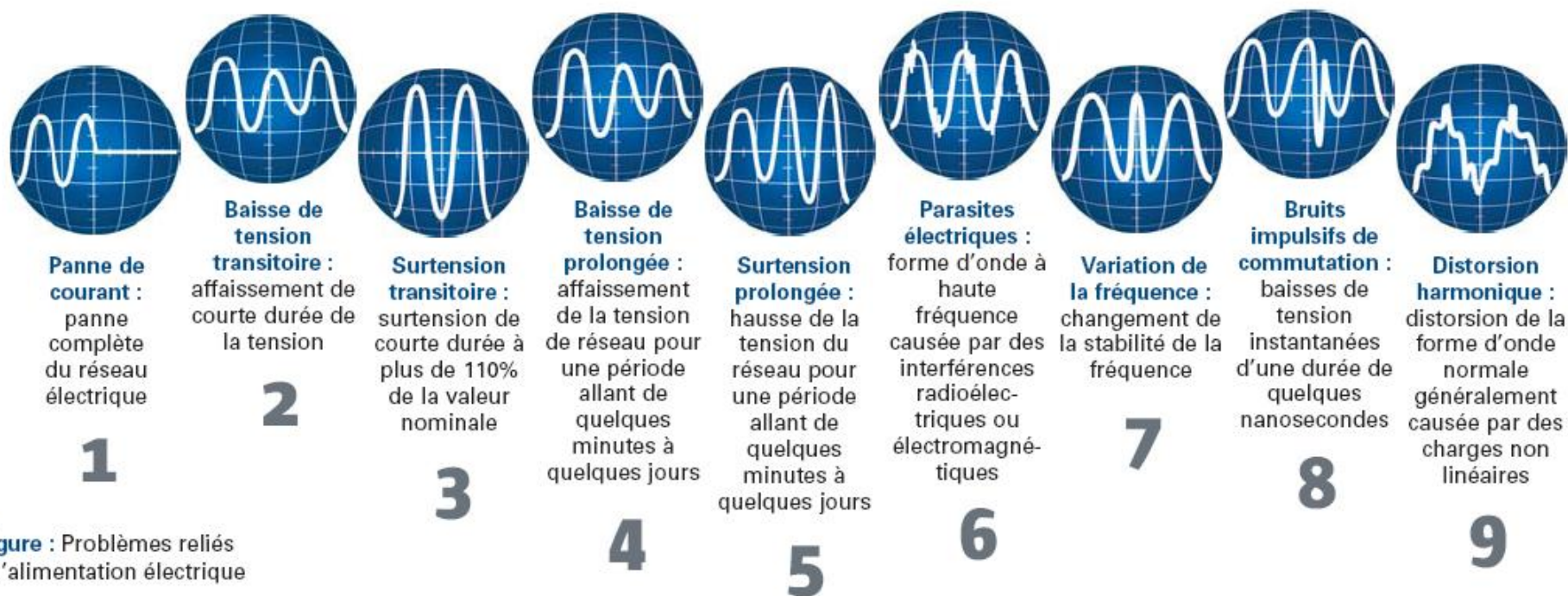


Figure : Problèmes reliés à l'alimentation électrique

Source: Eaton Powerware

Conclusion

- Une perturbation harmonique est définie comme une déformation de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur.
- Sur le réseau électrique, les perturbations de la forme d'onde sont principalement dues à la présence de charges non linéaires. On peut prendre l'exemple des variateurs de vitesse, des ballasts électroniques pour l'éclairage, des matériels informatiques et plus généralement des appareils possédant un étage d'entrée avec des composants d'électronique de puissance

Conclusion

Problèmes étranges :

- Échauffements bizarres
- Pannes inexplicables
- Équipement qui brise à répétition sans raisons apparentes



Conclusion

➤ Ce qu'il faut retenir:

- Favoriser les solutions préventives
- positionner les charge polluantes en amont du réseau
- regrouper les charges polluantes
- séparer les sources
- Utiliser des transformateurs à couplage particulier
- Placer des inductances dans l'installation
- Choisir un schéma de liaison à la terre adapté

Merci pour votre attention.

Questions?