Semaine des économies d'énergie dans l'Industrie
Wallonie

# Impact des phénomènes de Power Quality sur la facture énergétique.

Fouad ELKOHEN

13 Octobre 2020

# Intervenant

**Fouad ELKOHEN**
**48 ans, marié, 2 enfants**

- Ingénieur en Electrotechnique depuis 1994
- Master in Business Administration MBA (ISCAE) en 2002
- Fondateur et gérant de société spécialisées dans le domaine de l'Efficacité Energétique depuis 2007 (Elexpert, Meier, CEM, E2Consult)
- Enseignant à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM Casablanca) – Cours d'Audit Energétique depuis 2012
- Directeur Marketing et Communication- Schneider Electric Maroc: 2001 à 2007
- Directeur Technique Ingelec: 1994 à 2001

# Pourquoi ce thème?

- La majorité des entreprises ne savent souvent pas que les causes d'une mauvaise fiabilité électrique sont de leur fait et que des solutions rentables sont entre leurs mains.

- Environ 50% des problèmes de Qualité d'énergie sont issus de l'installation interne de l'entreprise

# Objectifs de cette présentation

- Passer en revue les principaux phénomènes de Power Quality affectant les installations électriques dans l'industrie
- Faire prendre conscience de l'impact de ces phénomènes sur les coûts et donc sur la compétitivité des entreprises
- Evaluer l'apport de ces solutions en matière d'économie d'énergie (positif ou négatif)

# PLAN

- Efficacité énergétique : une histoire de coûts
- Coûts de la qualité de l'énergie électrique dans l'industrie
  - Cas d'une usine de transformation de produits laitiers
- Les 5 principaux phénomènes de qualité d'énergie et leur impact sur la facture énergétique
- Autres phénomènes et solutions

# EFFICACITE ENERGETIQUE:

Une histoire de coûts …

# Efficacité énergétique : Une histoire de coûts

Il s'agit de minimiser au maximum les coûts de l'entreprise, relatifs à l'utilisation de l'énergie:

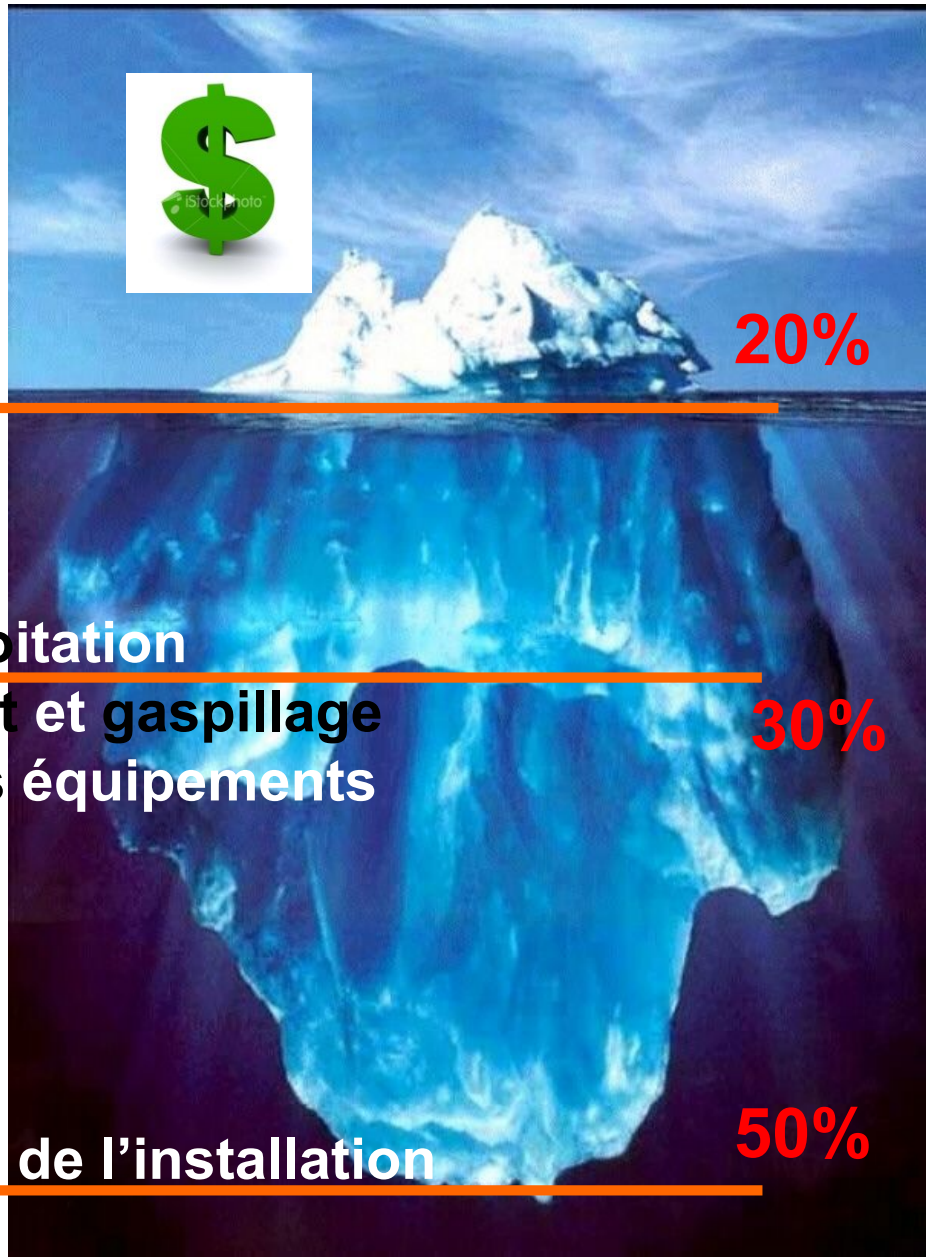
- Dépenser moins pour un même niveau de performance : moins d'énergie consommée, moins d'investissement, …

→ réduire la consommation d'énergie: kWh, Joules, etc.

- Améliorer la performance à dépense d'énergie égale: plus de temps de fonctionnement utile, plus de productivité,…

→ Il s'agit de réduire les coûts de l'énergie : y/c les coûts de non disponibilité de l'énergie ou des installations, etc.

# Répartition des coûts de l'énergie

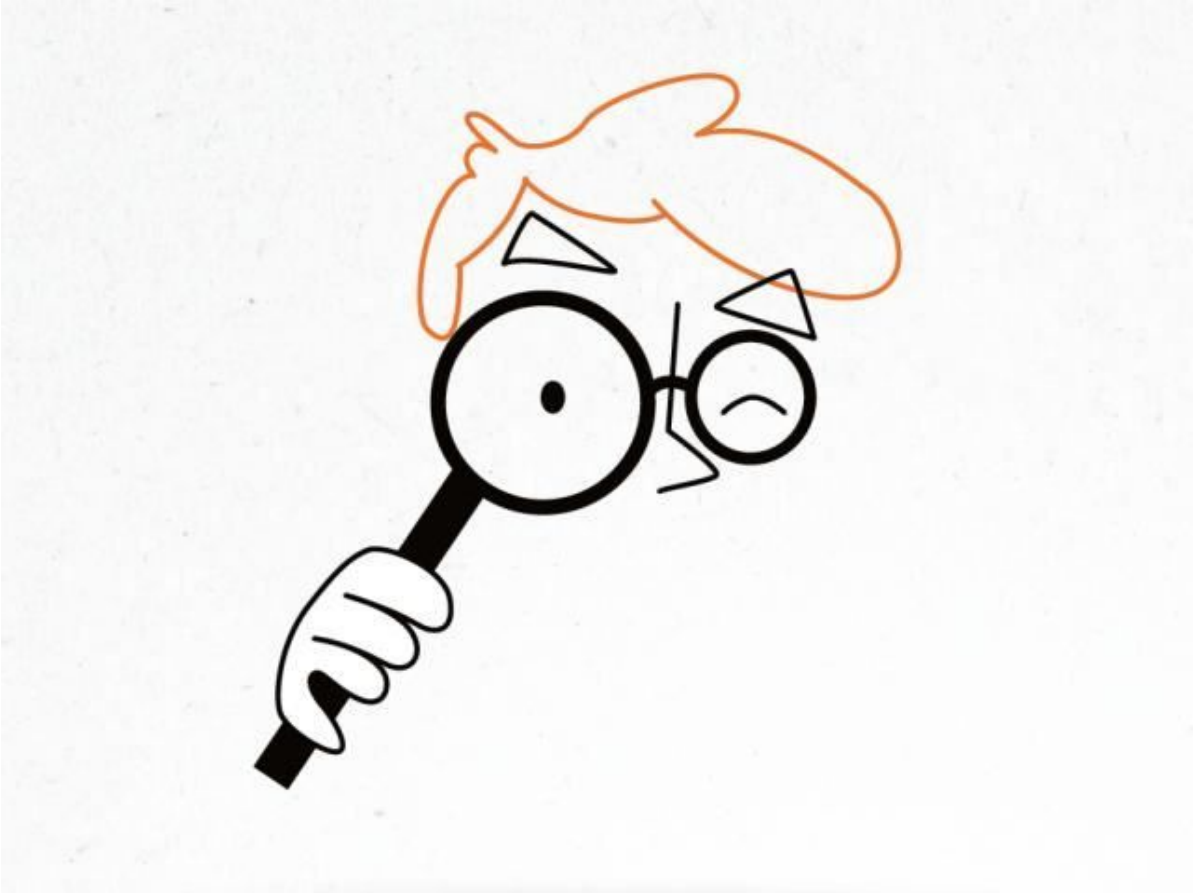


Coût de l'énergie (factures) — 20%

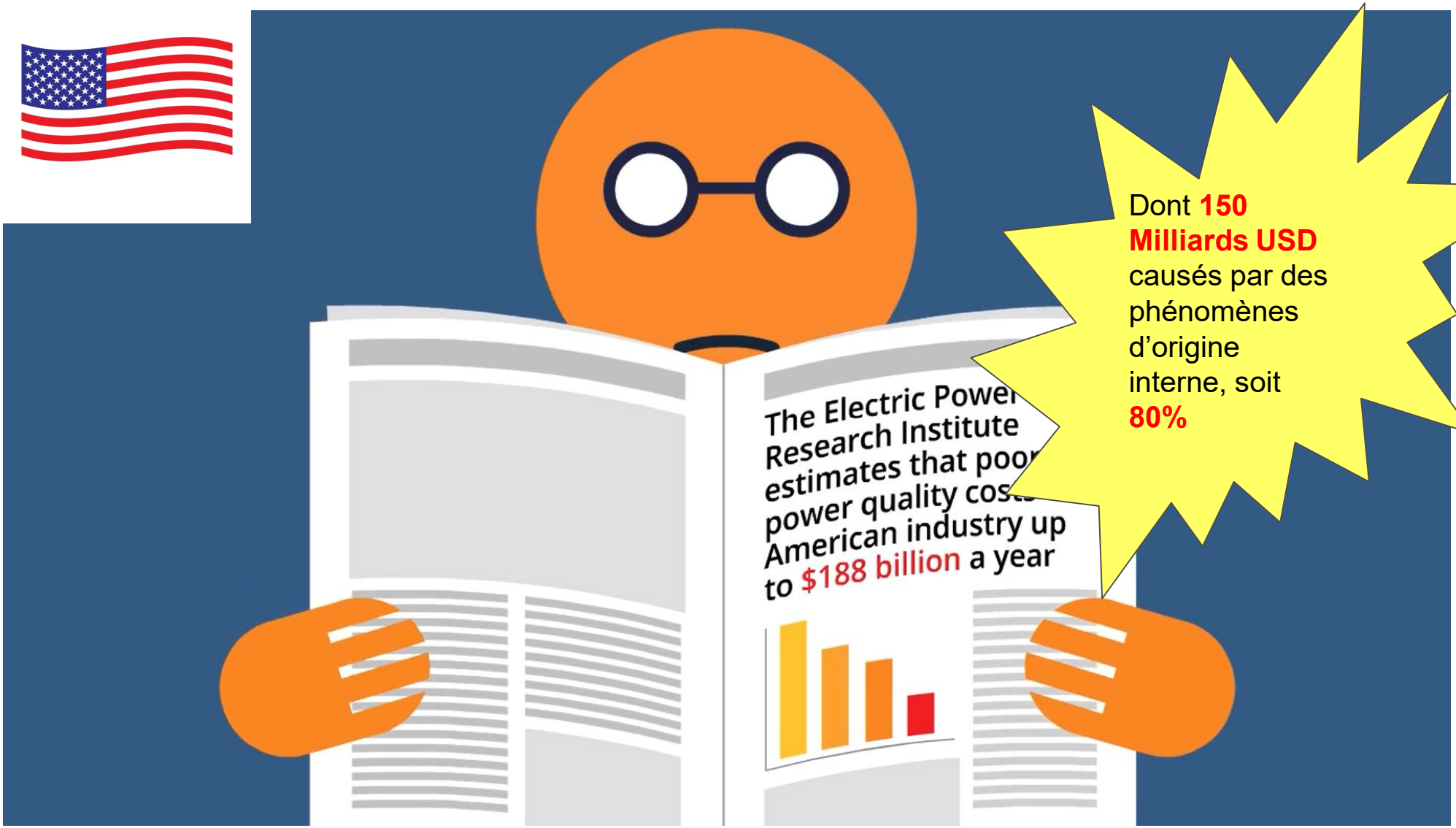
Coûts liés à la mauvaise exploitation
(pannes, surdimensionnement et gaspillage
Remplacement prématuré des équipements — 30%

Coûts liés à la non disponibilité de l'installation
ou à l'instabilité du processus — 50%

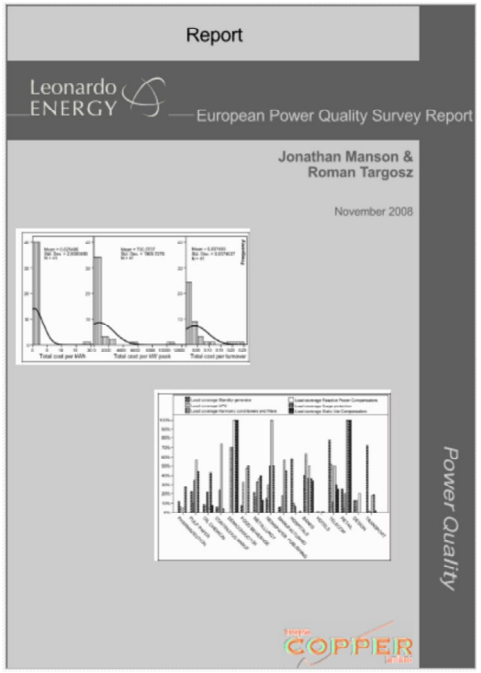
# Quels coûts engendre une mauvaise Qualité de l'énergie électrique dans l'industrie?



# Coût de la mauvaise Qualité de l'énergie



# Coût de la mauvaise Qualité de l'énergie

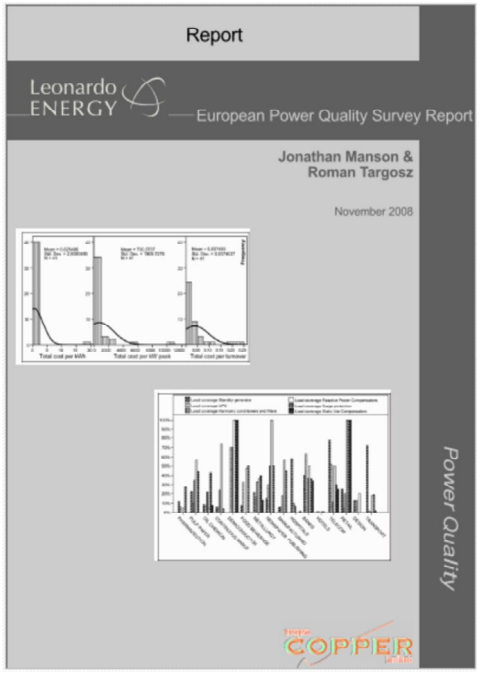



- Selon une étude réalisée en 2007 auprès d'entreprises industrielles et de services dans 25 pays de l'Union Européenne, couvrant 70% de l'économie de l'UE (dont la France et la Belgique)
- La mauvaise qualité de l'électricité affecte sérieusement les résultats des entreprises dans les secteurs de l'industrie et des services.
- Cela représente une perte totale de **150 milliards d'euros par an** dans l'Union Européenne

- **"The economic consequences of unreliable electrical power for European business"-** European Copper Institute 2007

# Coût de la mauvaise Qualité de l'énergie

- La plupart des causes identifiées sont évitables car elles résultent de problèmes liés aux propres systèmes électriques des utilisateurs finaux



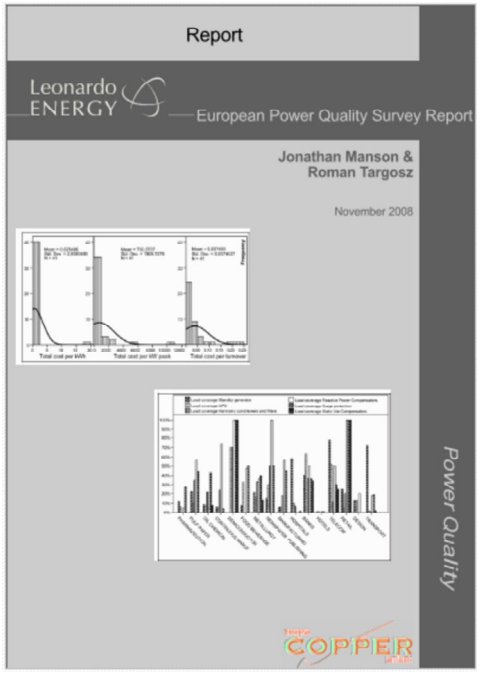

- Les secteurs industriels pour lesquels l'énergie électrique est essentielle à leurs opérations n'investissent qu'environ **50 milliards d'euros par an** dans les solutions PQ, soit à peine le un tiers des coûts occasionnés par la mauvaise qualité de l'énergie

- **"The economic consequences of unreliable electrical power for European business"-** European Copper Institute 2007

# Coût de la mauvaise Qualité de l'énergie

L'étude a montré que:

- les solutions PQ coûtent souvent moins cher que les pertes financières qu'elles résolvent




- Plusieurs entreprises **perdent jusqu'à 10% de leur chiffre d'affaires** en raison de la mauvaise qualité de l'énergie.

- **"The economic consequences of unreliable electrical power for European business"-** European Copper Institute 2007

# Coût de la mauvaise Qualité de l'énergie

## COMBIEN VOUS COÛTENT LES PHENOMENES DE QUALITE D'ENERGIE?

***Les coûts moyens suivants par type d'évènement de qualité d'énergie ont été établis par les résultats de l'enquête***

| | |
|---|---|
| Surtension ou transitoire: | €120,000 - 180,000 |
| Interruption longue: | €90,000 |
| Interruption courte, secteur des services: | €18,000 - 36,000 |
| Interruption courte, industrie: | €7,000 - 14,000 |
| Creux de tension | €2,000 - 4,000 |

- **"The economic consequences of unreliable electrical power for European business"-** European Copper Institute 2007

# Coût de la mauvaise Qualité de l'énergie

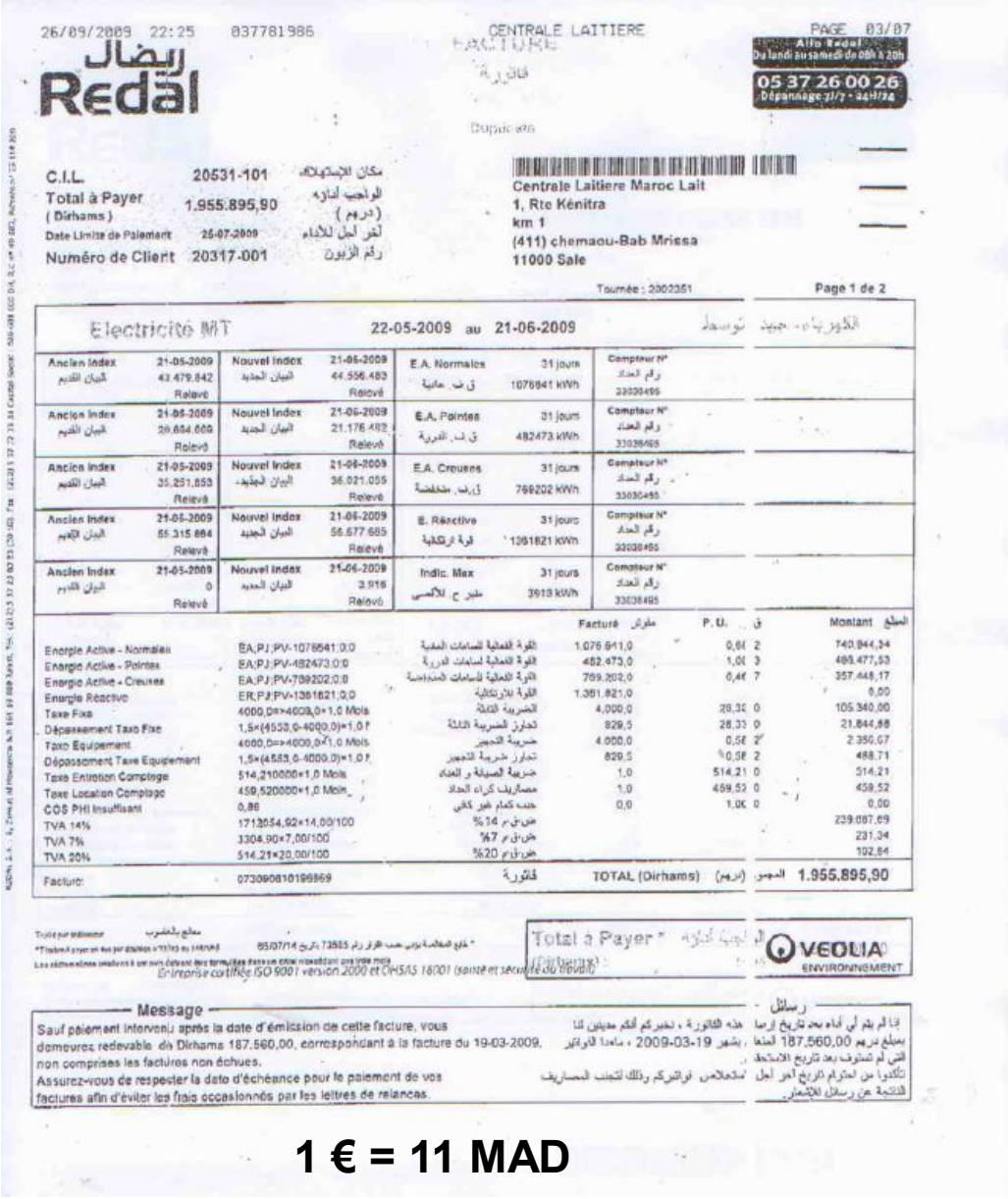
Les événements de Power Quality affectent souvent différents centres de coûts d'une organisation, comme par exemple:

**Pour un processus de fabrication**

- Ralentit ou endommage la production;
- Entraîne des dommages matériels et une maintenance supplémentaire.
- Occasionne le chômage technique du personnel de production.
- Occasionne la perte de revenus(ou un manque à gagner) et affecte les flux de trésorerie
- Altère la réputation de l'organisation en matière de qualité des produits et de fiabilité de l'approvisionnement

# Etude de cas: Laiterie

- Facture électrique annuelle: **2000 K€**
- Plusieurs problèmes de continuité de service
- Etude réalisée par ELEXPERT en 2008



26/09/2009 22:25 037781986 CENTRALE LAITIERE PAGE 03/07

Redal

05 37 26 00 26

C.I.L. 20531-101
Total à Payer (Dirhams) 1.955.895,90
Date Limite de Paiement 25-07-2009
Numéro de Client 20317-001

Centrale Laitiere Maroc Lait
1, Rte Kénitra
km 1
(411) chemaou-Bab Mrissa
11000 Sale

Tournée : 2002351 Page 1 de 2

Electricité MT 22-05-2009 au 21-06-2009

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ancien Index | 21-05-2009 43.479.842 Relevé | Nouvel Index | 21-06-2009 44.556.483 Relevé | E.A. Normales | 31 jours 1076841 kWh | Compteur N° 33038465 |
| Ancien Index | 21-05-2009 20.654.609 Relevé | Nouvel Index | 21-06-2009 21.176.482 Relevé | E.A. Pointes | 31 jours 482473 kWh | Compteur N° 33038465 |
| Ancien Index | 21-05-2009 35.251.853 Relevé | Nouvel Index | 21-06-2009 36.021.055 Relevé | E.A. Creuses | 31 jours 769202 kWh | Compteur N° 33038465 |
| Ancien Index | 21-05-2009 55.315.864 Relevé | Nouvel Index | 21-06-2009 56.677.685 Relevé | E. Réactive | 31 jours 1361821 kWh | Compteur N° 33038465 |
| Ancien Index | 21-05-2009 0 Relevé | Nouvel Index | 21-06-2009 3.918 Relevé | Indic. Max | 31 jours 3918 kWh | Compteur N° 33038465 |

| | | | Facturé | P.U. | | Montant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Energie Active - Normales | EA;PJ;PV-1076841;0;0 | القوة الفعالية للساعات العادية | 1.076.841,0 | 0,68 | 2 | 740.844,34 |
| Energie Active - Pointes | EA;PJ;PV-482473;0;0 | القوة الفعالية لساعات الذروة | 482.473,0 | 1,01 | 3 | 486.477,53 |
| Energie Active - Creuses | EA;PJ;PV-769202;0;0 | القوة الفعالية لساعات الصداحة | 769.202,0 | 0,46 | 7 | 357.448,17 |
| Energie Réactive | ER;PJ;PV-1361821;0;0 | القوة اللاارتكاثية | 1.361.821,0 | | | 0,00 |
| Taxe Fixe | 4000,0=>4000,0*1,0 Mois | الضريبة الثابتة | 4.000,0 | 26,32 | 0 | 105.340,00 |
| Dépassement Taxe Fixe | 1,5*(4553,0-4000,0)=1,0 f | تجاوز الضريبة الثابتة | 829,5 | 26,32 | 0 | 21.844,88 |
| Taxe Equipement | 4000,0=>4000,0*1,0 Mois | ضريبة التجهيز | 4.000,0 | 0,58 | 2 | 2.350,07 |
| Dépassement Taxe Equipement | 1,5*(4553,0-4000,0)=1,0 f | تجاوز ضريبة التجهيز | 829,5 | 0,58 | 2 | 488,71 |
| Taxe Entretien Comptage | 514,210000*1,0 Mois | ضريبة الصيانة و العداد | 1,0 | 514,21 | 0 | 514,21 |
| Taxe Location Comptage | 459,520000*1,0 Mois | مصاريف كراء العداد | 1,0 | 459,52 | 0 | 459,52 |
| COS PHI Insuffisant | 0,86 | حدد كمام غير كافي | 0,0 | 1,00 | 0 | 0,00 |
| TVA 14% | 1713054,92*14,00/100 | ض.ق.م 14% | | | | 239.087,69 |
| TVA 7% | 3304,90*7,00/100 | ض.ق.م 7% | | | | 231,34 |
| TVA 20% | 514,21*20,00/100 | ض.ق.م 20% | | | | 102,84 |
| Facture: | 073090810196869 | فاتورة | TOTAL (Dirhams) | | | 1.955.895,90 |

Total à Payer (Dirhams)

VEOLIA ENVIRONNEMENT

Message

Sauf paiement intervenu après la date d'émission de cette facture, vous demeurez redevable de Dirhams 187.560,00, correspondant à la facture du 19-03-2009, non comprises les factures non échues.
Assurez-vous de respecter la date d'échéance pour le paiement de vos factures afin d'éviter les frais occasionnés par les lettres de relances.

رسائل

إذا لم يتم أي أداء بعد تاريخ إرسا بمبلغ درهم 187.560,00 المتعا التي لم تستوف بعد تاريخ الاستحقا تأكدوا من احترام تاريخ آخر أجل الناتجة عن رسائل التذكير.

**1 € = 11 MAD**

# Etude de cas: Statistiques des perturbations

- Période de Janvier à Août 2008  soit 8 mois
- 55 interruptions ( brèves et longues; principalement brèves)
- Temps nécessaire avant redémarrage production:
  - Fromage et desserts: 2 heures / Conditionnement : 0,5 heures
- Total temps arrêt usine:  110 heures de process – 27,5 heures conditionnement

# Etude de cas: Calcul des pertes

- Pertes enregistrées sur 8 mois

  - **87 000 litres de MP valeur 36000 €**
  - **Manque à gagner: process: 110 heures valeur 527 080 € x 0,15**
    **conditionnement: 27,5 heures 330 000 € x 0,15**

  - **Coût énergie: 3370 € (Fuel et électricité)**
  - **Coût détergent: 2850 €**

  - **Total pertes en 8 mois = 170 880 €**

- **Pertes** (prévisionnelles sur 1 exercice complet hors MO supplémentaire)

3/2 x 170 880 = **256 300 € / an**

(**hors coût personnel au chômage technique et coûts de maintenance**)
Ratios (estimés): 0.5 €/litre MP - 12000 € CA/heure de lait pasteurisé - 4800 € CA/heure fromages et desserts
Production conditionnement: 400 000 litre/jour – 0.5€/litre CA - Bénéfice net: 15%

# Etude de cas: Laiterie

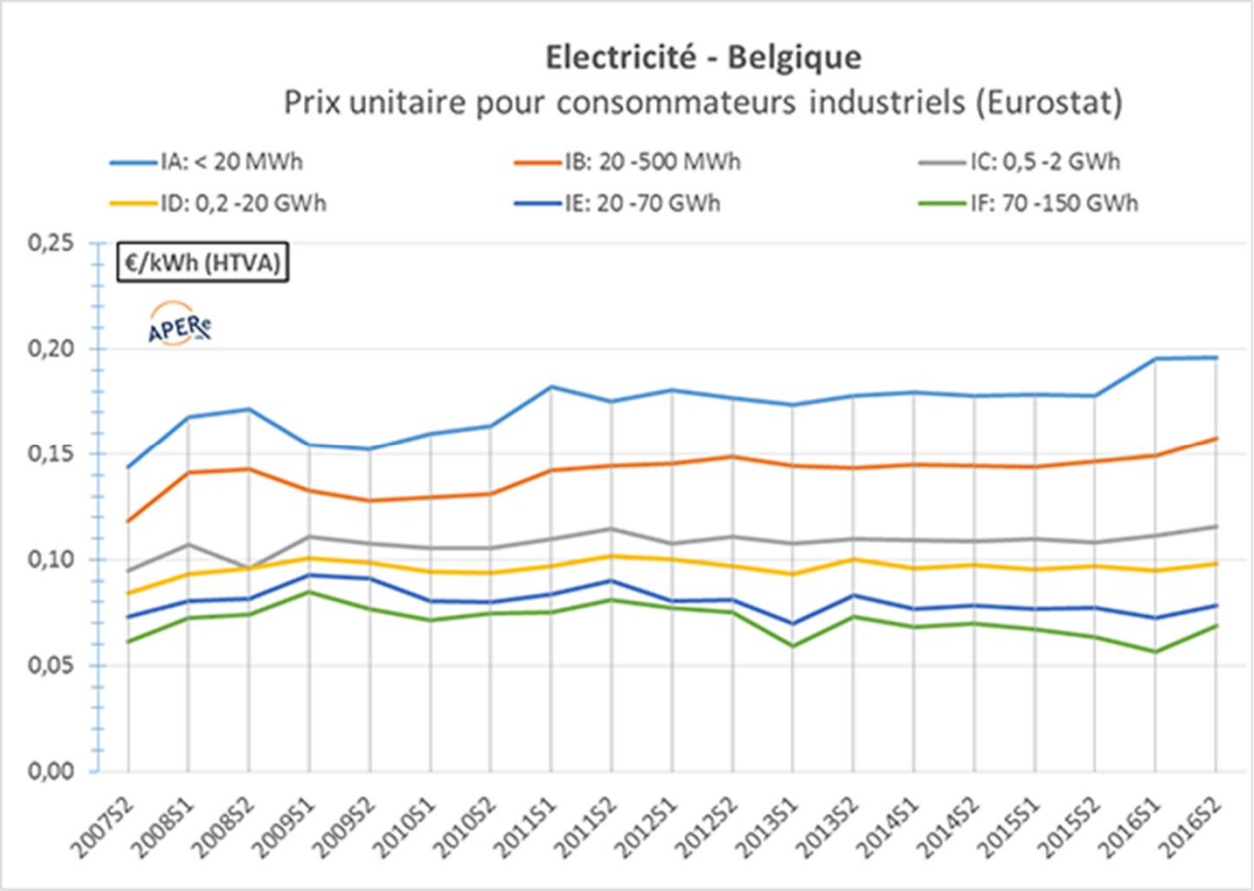
- Le coût des arrêts dus aux microcoupures

= **11,7%** de la facture annuelle

Soit l'équivalent de la consommation électrique de

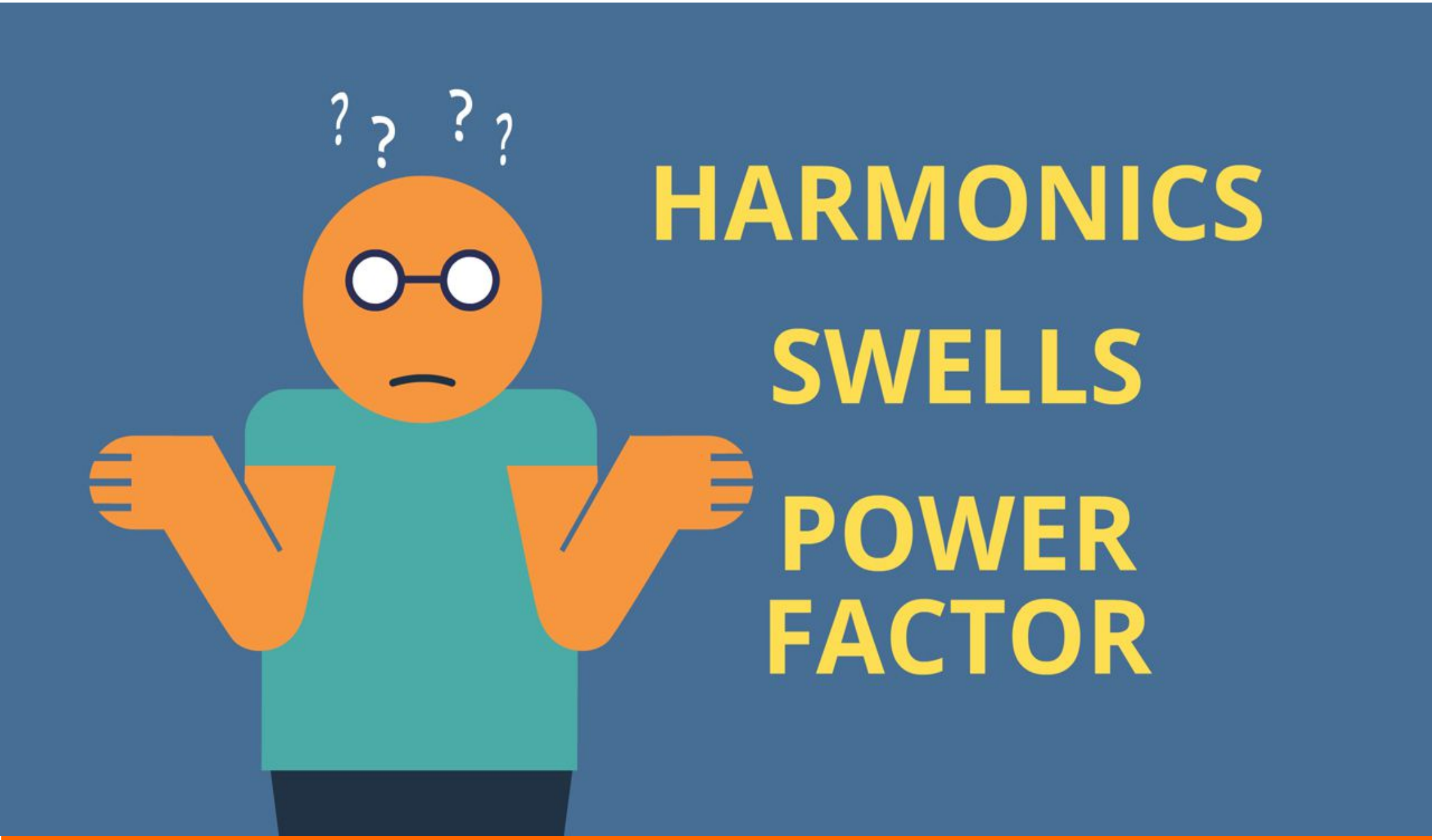
**1,4 mois**

# Evolution 2007-2016 des prix unitaires du kWh électrique en Belgique




**On considère un prix moyen de 0.1€/kWh**

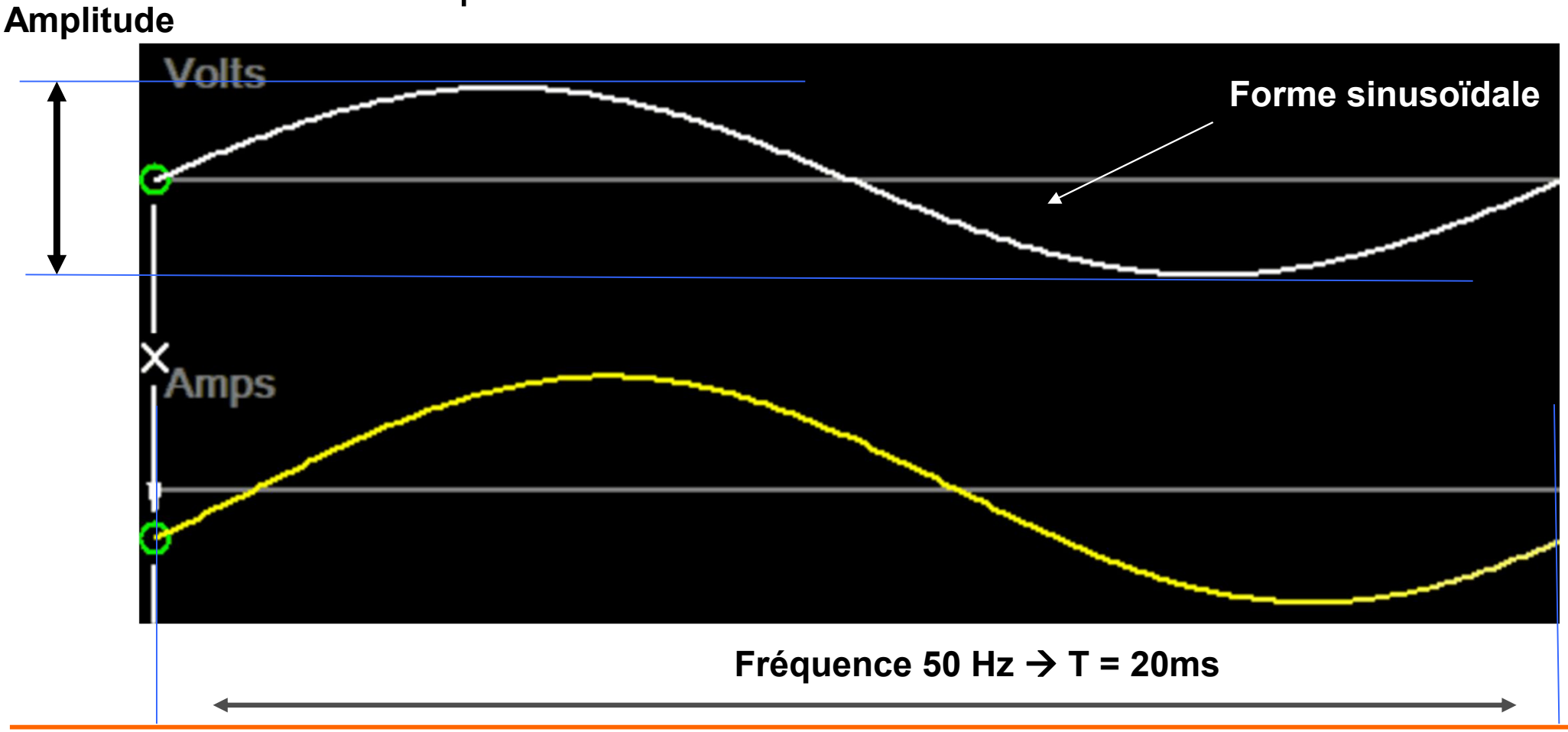
Fig. Prix unitaire moyen courant par semestre (€/kWh HTVA) selon niveau de consommation – Base de données Eurostat, extraction avril 2017




# Qualité de l’énergie: Qu’est ce que c’est au juste?

# C’est quoi la Qualité de l’énergie

- L'énergie électrique est parfaite pour les utilisateurs finaux si la tension et le courant sont correctement équilibrés, restent dans les limites tolérées et décrivent une forme d'onde sinusoïdale pure.



# - Terminologie

- **Qualité d'énergie**

IEC 61000-4-30

"Caractéristiques de l'électricité
À un point donné d'un système électrique,
Évaluées par rapport à un ensemble de paramètres techniques de référence."

≈ qualité de la tension

- **Perturbations**

Ecarts par rapport à une tension idéale

- **Phénomène** → engendre mauvais fonctionnement de l'équipement ou défaut

# - Conformité du signal électrique

Avec:

- Une norme
- Des lois
- Des contraintes de fonctionnement

***Pour éviter tout problème de fonctionnement***

EN50160

IEC 61000-4-30

IEEE 1159

IEEE-519

EN 55022

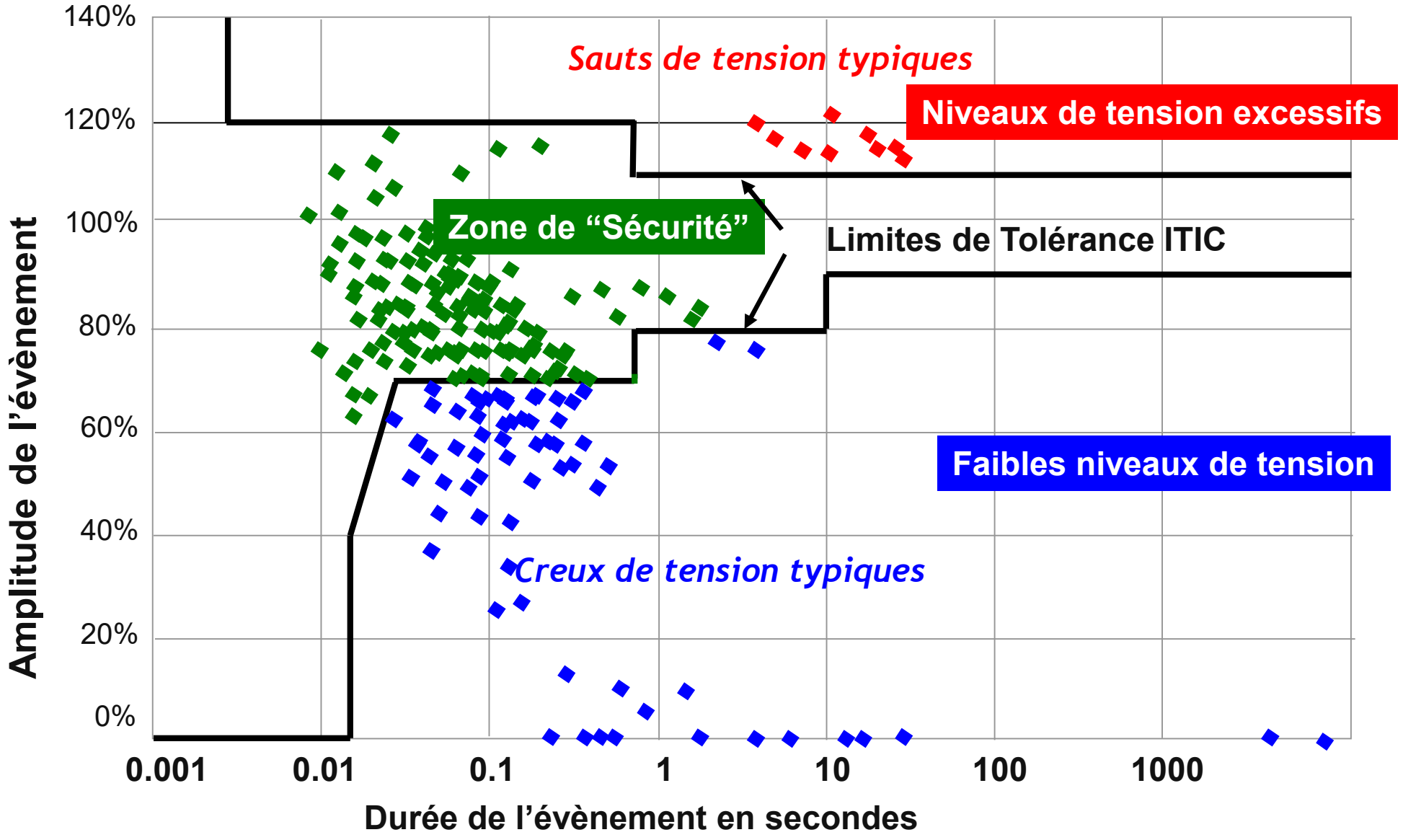
ITIC (CBEMA)

SEMI F47

ANSI C84-1

# - Courbe de sensibilité

ITIC: Information Technology Industry Council



# - Norme Européenne: EN50160

## Présentation

EN50160:2000

« Caractéristiques de tension de l'électricité fournie par les réseaux de distribution publics »

est une norme européenne qui définit la qualité de la tension qu'un client est en droit d'attendre d'un fournisseur d'électricité.

Bien qu'européenne, cette norme est très utilisée au Maroc et aux USA

## Qualité d'énergie vs Perturbations

Les évaluations selon la norme EN50160 peuvent être classées en deux catégories:

— celles fondées sur des données de mesures en fonctionnement normal
— et celles fondées sur des événements anormaux.

# - Norme Européenne: EN50160

EN50160:2000

## Présentation

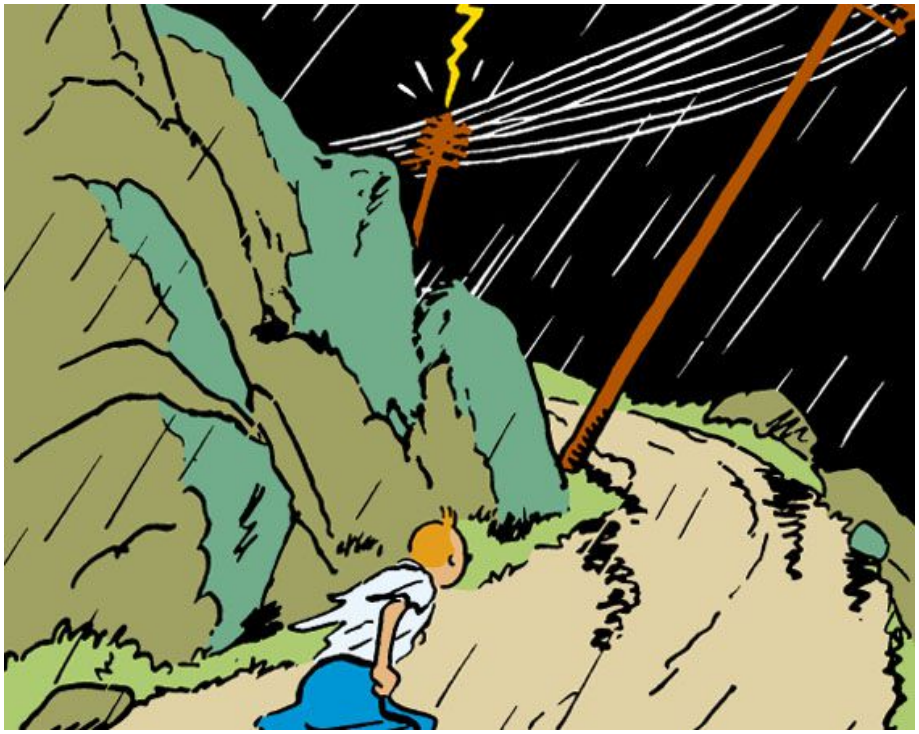
***La norme EN50160 permet d'évaluer les caractéristiques électriques suivantes au point de raccordement au reseau du distributeur d'électricité:***

- Fréquence
- Amplitude de la tension d'alimentation secteur
- Variations de la tension d'alimentation secteur
- Changements rapides de tension – amplitude de tension et papillotement
- Creux de tension d'alimentation secteur
- Brèves interruptions de la tension d'alimentation secteur
- Longues interruptions de la tension d'alimentation secteur
- Surtensions temporaires à la fréquence d'alimentation
- Surtensions transitoires
- Déséquilibre de la tension d'alimentation secteur
- Tension harmonique

# Les 5 phénomènes les plus courants

- **Transitoires**
- **Distorsion Harmonique**
- **Variations de la tension**
  - **Creux de tension**
  - **Interruptions**
- **Variations de fréquence**
- **Déséquilibre de tensions**
- **Fluctuations de tension**

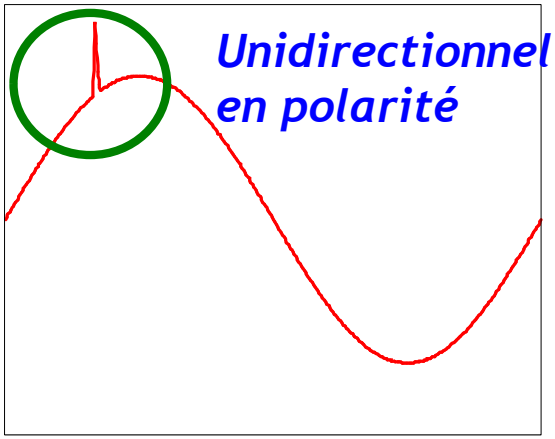
# Surtensions Transitoires



# - deux types différents de polarités

***Une faible quantité d'énergie, mais variation très rapide***

- Transitoire impulsionnel




Temps de montée rapides

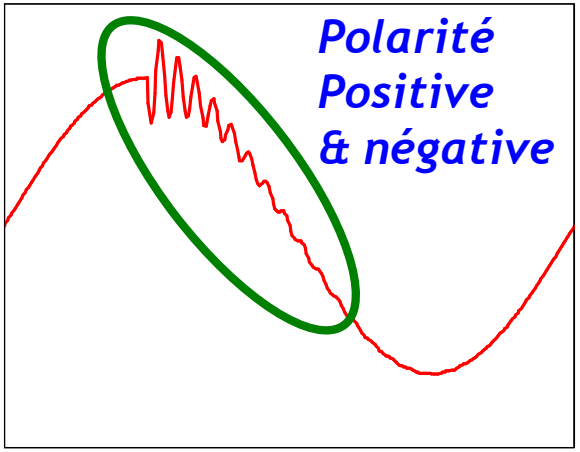
↓

Haute fréquence

↓

**Dommages dans les circuits électroniques!**

- Transitoire Oscillatoire

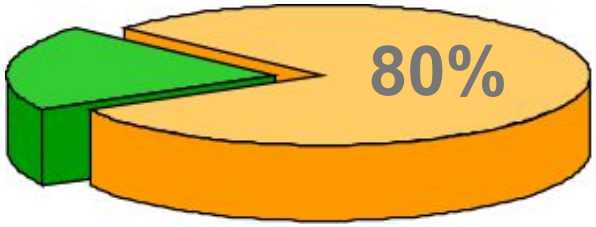



Source d'impulsions ⟷ { charges capacitives / inductives

***Exemple: commutation des gradins d'une batterie de compensation d'énergie réactive***

# - Qu'est ce qu'un transitoire?

# - Sources de transitoires




## Externes

– Foudre

– Commutation de condensateurs

– Commutation de Ligne / Cable

– Mise sous tension d'un transformateur

– Limitation de courant durant la fusion d'un fusible

– Impulsions électromagnétiques, nucléaires

## Internes

– Commutation on / off d'un interrupteur

– Commutation de condensateurs

– Interruption de courant (moteurs, etc.)

– Commutation de convertisseurs statiques (onduleurs, variateurs, etc.)

– Décharge Electrostatique

– Soudage (Arc)

– Câblage et disjoncteurs défectueux

– Fermeture de contact et de relais

– Démarrage ou arrêt de charge

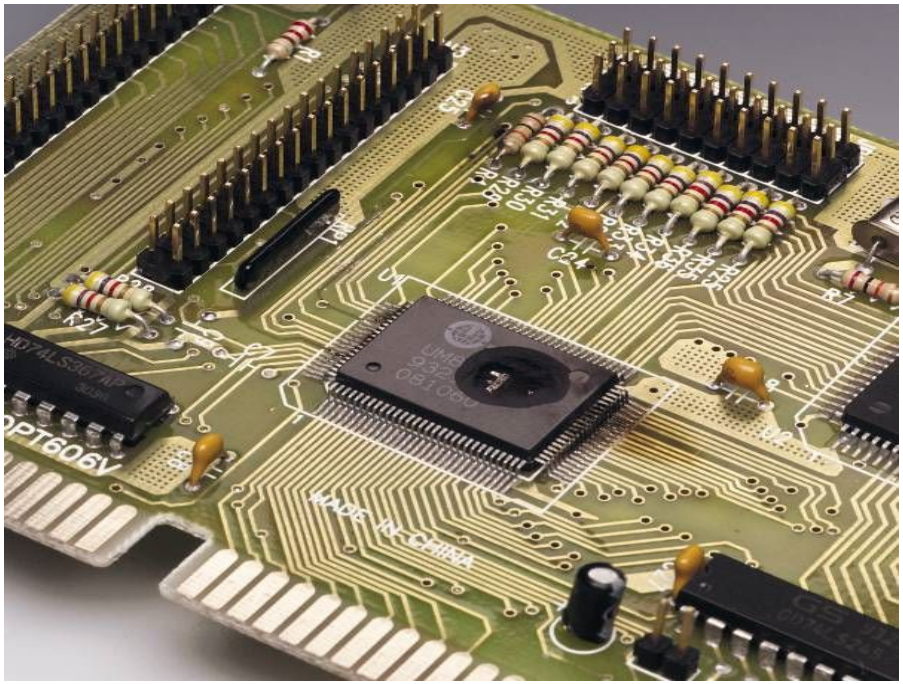
# - Effets des transitoires

***Une faible quantité d'énergie, mais variation très rapide***

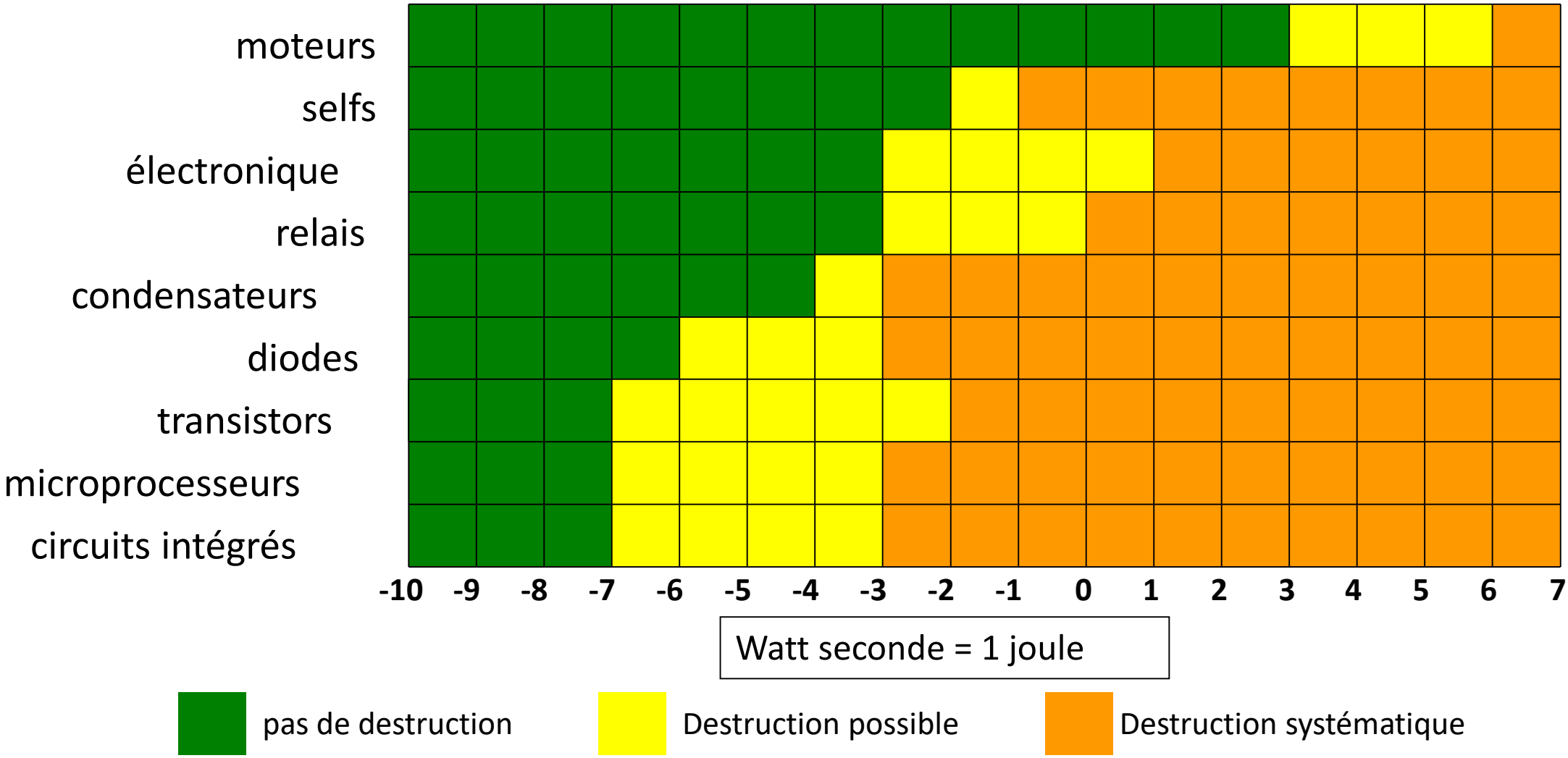
- Dommages
  - Interfaces Data, téléphone et reseaux de communications
  - Alimentations de puissance AC
  - Circuits électroniques en general, capteurs, E/S, etc.

- Rupture
  - Crash système
  - Perte de données

- Dégradation
  - Dommages mineurs qui apparaissent plus tard



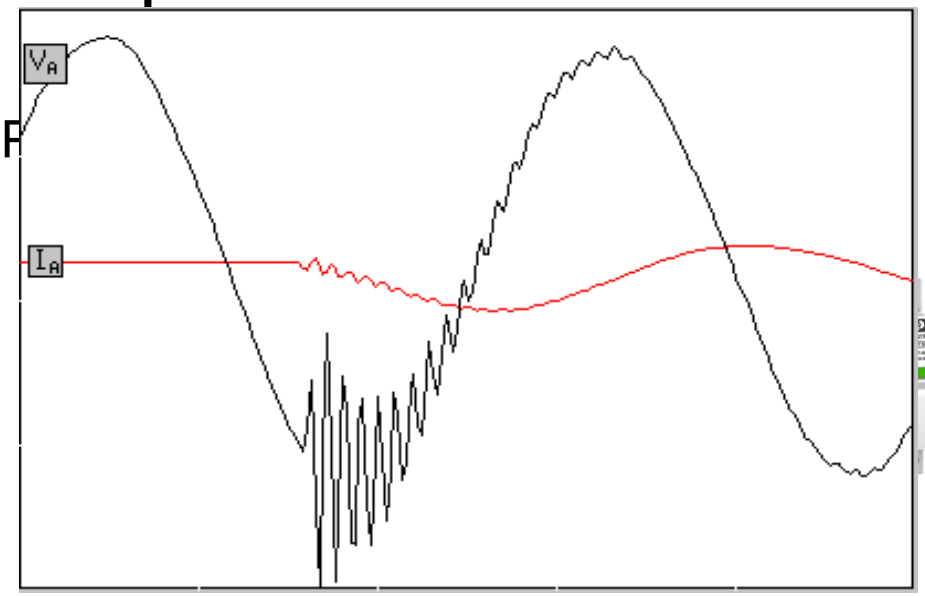
# Tenue énergétique,




Les nouvelles technologies, de plus en plus intégrées ont des tenues aux chocs réduites.
Un microprocesseur est 1000 fois plus sensible qu'un relais électromécanique.

# Exemples de solutions

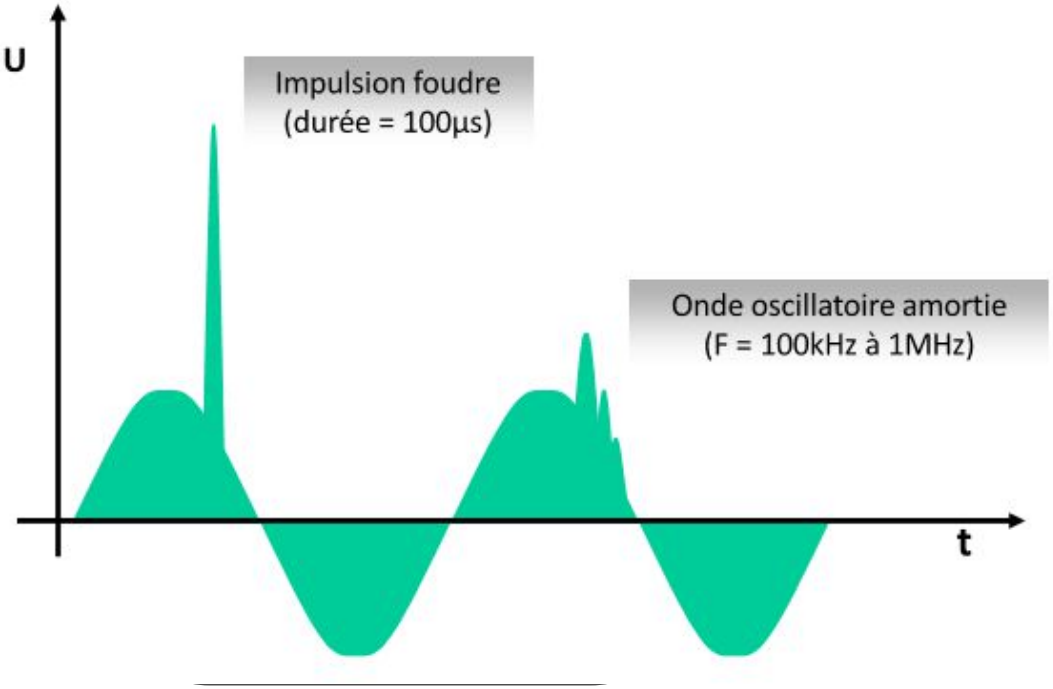
- R

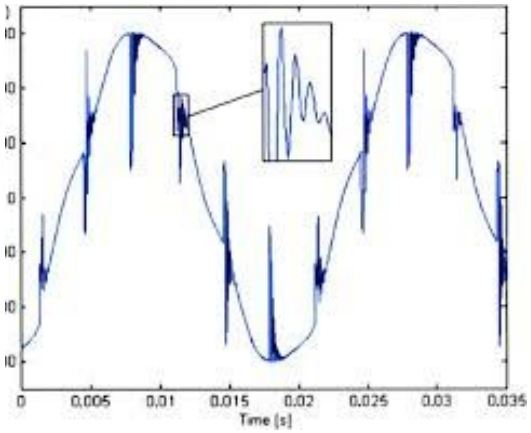



Filtrage des « Notches » dus à la commutation des composants d'électronique de puissance

- I

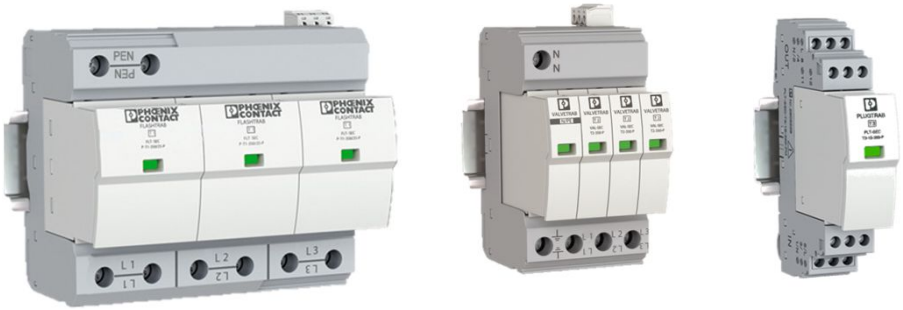
e compensation SVG



# Exemples de solutions

- Parafoudres et parasurtenseurs



- Réactance de ligne (p 4%)

- Batteries de compensation statiques / SVG

# Impact sur la consommation d'énergie

***Pas d'économie d'énergie. Au contraire, légère augmentation de la Consommation entre 0.5% en moyenne pour les solutions passives et 3% pour les solutions actives (électronique de puissance)***

- **Parafoudres et parasurtenseurs**
  - Aucun impact à priori.
  - Surveiller quand-même les fuites de courant à la terre en fin de vie des parasurtenseurs à varistance à oxyde de zinc (Type 2 en général)

- **Réactance de ligne**

Consommations limitées mais non négligeables : **+0.2% à +0.6%**

Exemple:

- Réactance 22kW/400V: 124 W
- Réactance 110kW/400V: 456W
- Réactance 630kW/400V: 1167W

Source: Schaffner

- **Batteries de compensation statiques**

Consommations très limitées: **+0.3%**

Exemple:

- Condensateurs: < 0.4W/kVAR
- SAH 7% - 80kVAR : 241W

Mais significatives pour les SVG : **+3%**

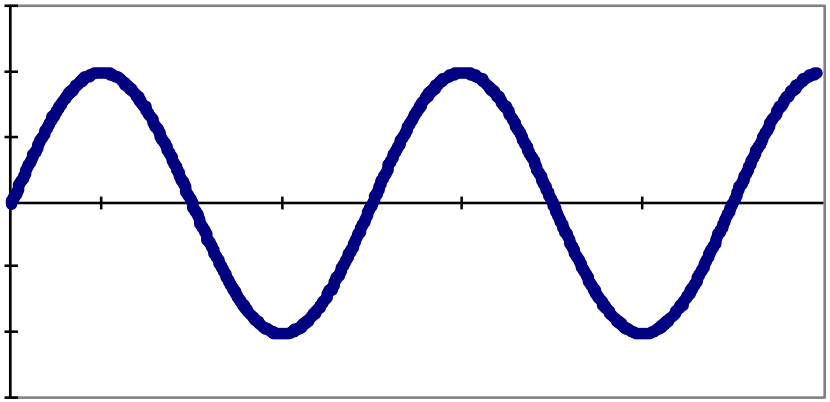
- SVG 100kVAR/400V: 4kW
- SVG 200kVAR/400V: 8 kW

Source: Circutor

# Distorsion harmonique

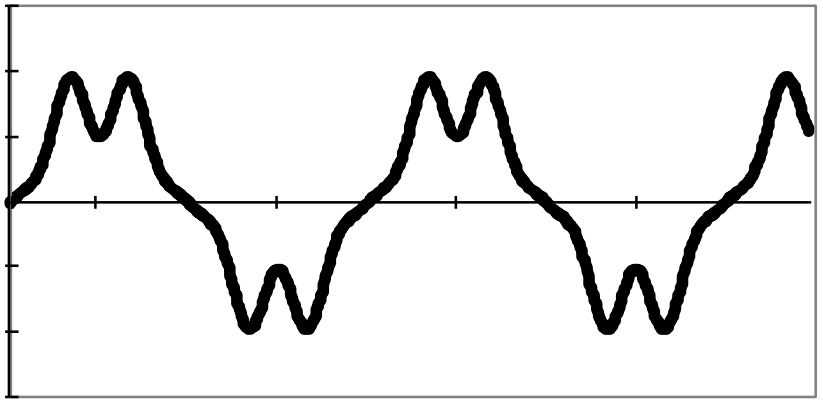
# - Qu’est ce que la distorsion harmonique?

- phénomène se produisant en fonctionnement normal, où les harmoniques modifient la forme d’onde de la tension alternative AC



**COURANT SINUSOIDAL**

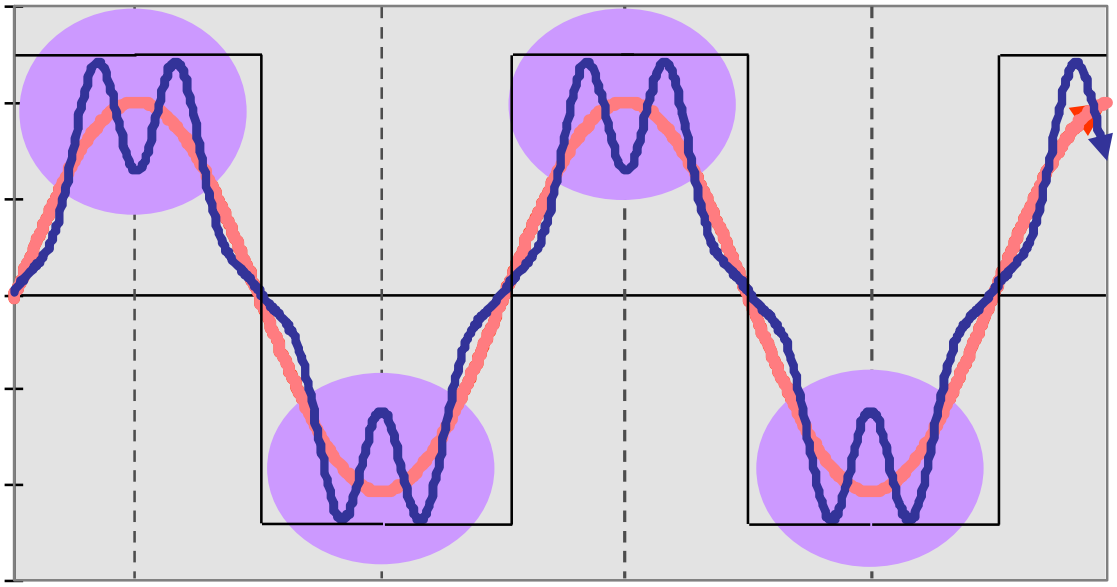
**Charges Linéaires**



**COURANT DISTORDU**

**Charges Non linéaires**

# - Vue de près d'une onde distordue



**Fondamental 50 Hz**

**Forme d'onde de Courant d'une charge non linéaire**

IEC 61000-4-30

Harmoniques = fréquence qui est un **entier multiple** de la fréquence du fondamental

$H_3 = 3 \times H_1$

$= 3 \times 50 = 150$ Hz

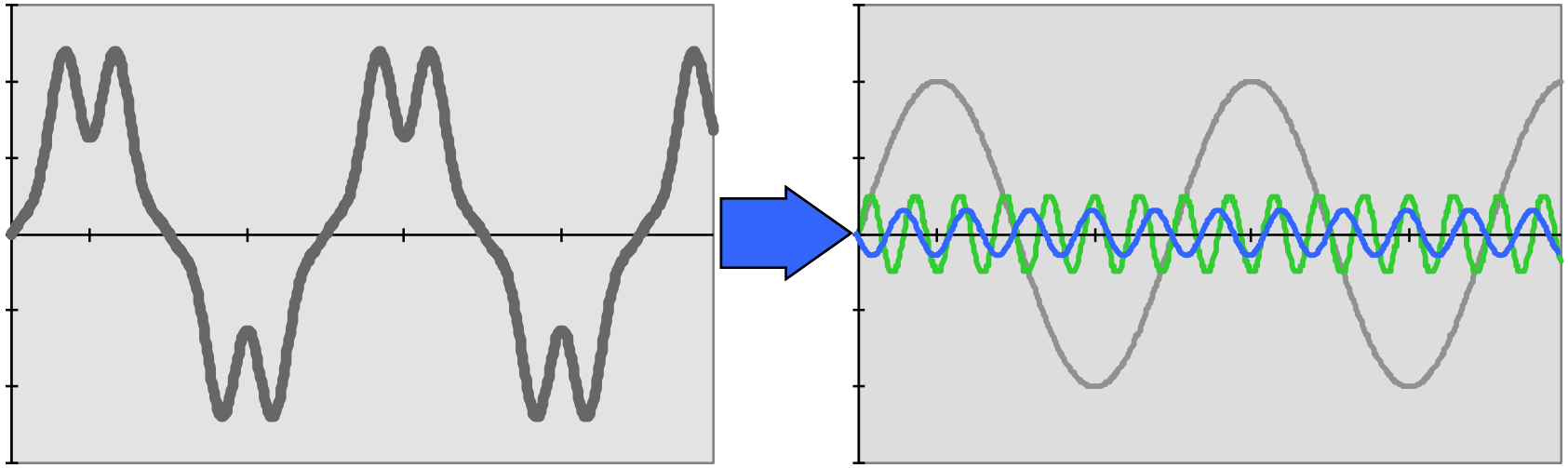
Analyse de Fourier

*Les harmoniques de rang pair (2ème, 4ème, 6ème, ...) posent peu de problèmes*

# - Analyse individuelle des harmoniques

Transformation de Fourier :

**FORME D'ONDE DE COURANT DISTORDU** **COMPOSANTS HARMONIQUES EQUIVALENTS**



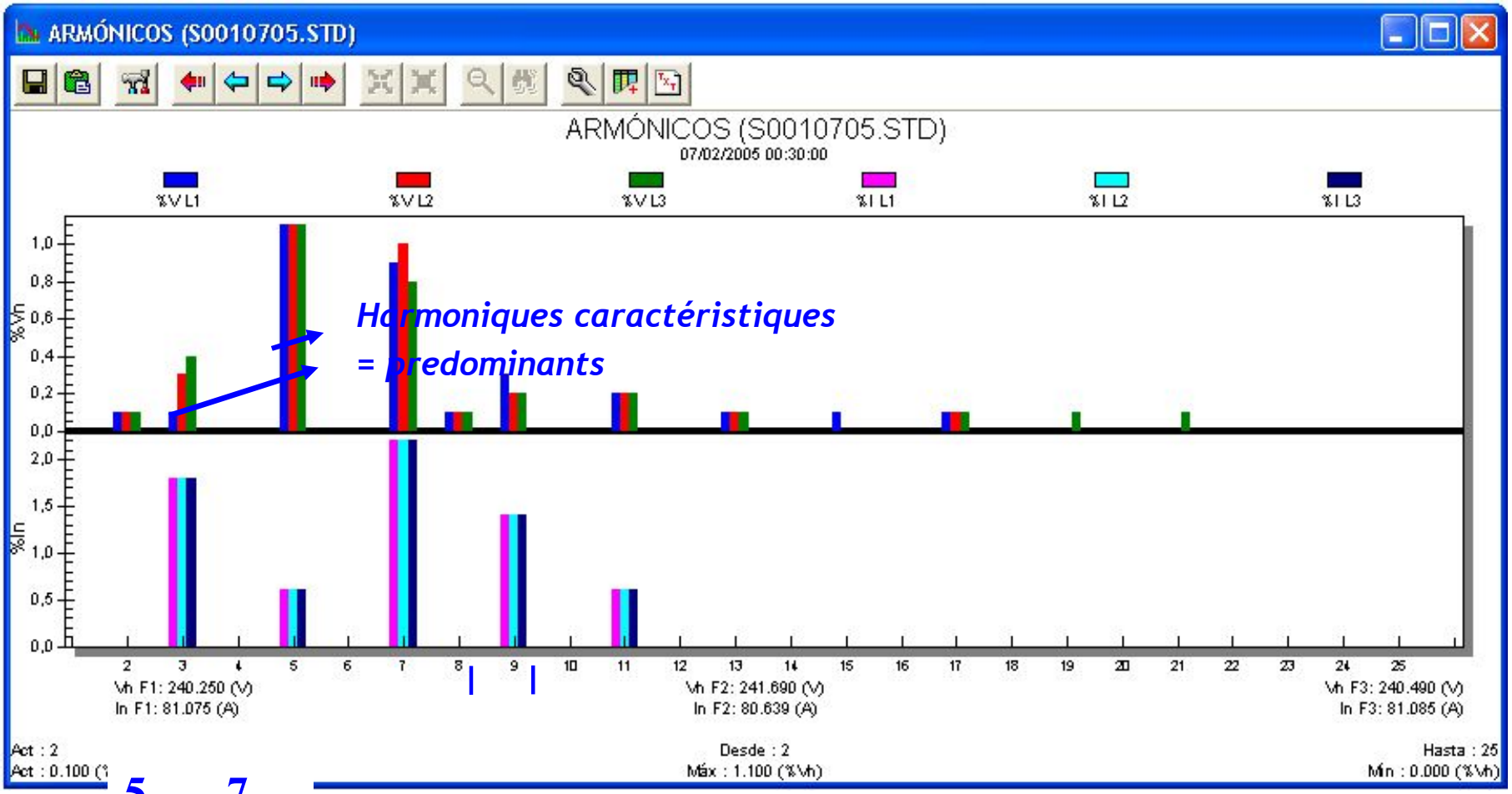
1er Harmonic Elevé (fundamental)

5ème Harmonique petit

7ème Harmonique plus petit

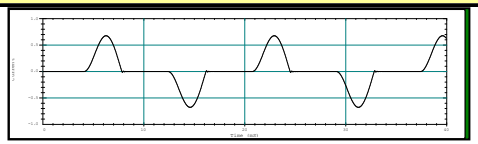
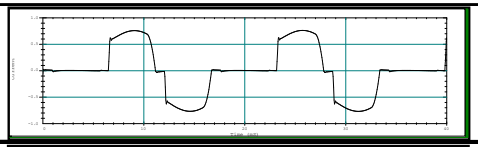
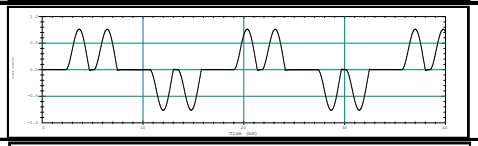
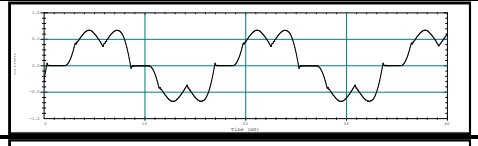
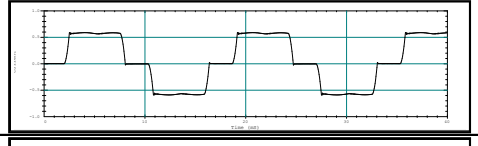
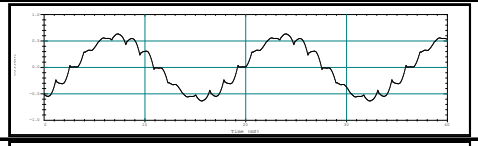
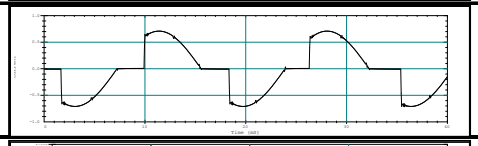
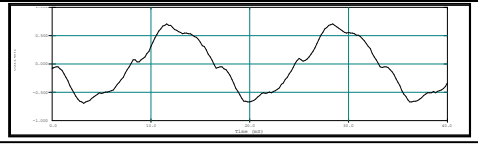
*La complexité de l'évaluation des harmoniques est grandement réduite*

# - Analyse spectrale



# - Signatures caractéristiques & facteurs de poids associés

copyright IEEE 1996

| Type de charge | Forme d'onde typique | Distorsion en courant | Facteur de poids |
|---|---|---|---|
| Alimentation monophasée (redresseur à 4 diodes) |  | 80% (3ème Elevé) | 2.5 |
| Redresseur triphasé contrôlé à 3 thyristors (Semiconverter) |  | 2ème, 3ème, 4ème à charges partielles | 2.5 |
| Redresseur triphasé à 6 diodes, capacité de filtrage, sans réactance de lissage de courant |  | 80% | 2 |
| Redresseur triphasé à 6 diodes, capacité de filtrage et réactance série >3%, ou variateur DC |  | 40% | 1 |
| Redresseur triphasé à 6 diodes, avec réactance élevée de lissage de courant |  | 28% | 0.8 |
| Convertisseur à 12 diodes |  | 15% | 0.5 |
| Gradateur monophasé |  | Varie avec l'angle d'amorçage | 0.7 |
| Eclairage fluorescent |  | 17% | 0.5 |

# - THD ou thd: 2 méthodes de calcul

*Total Harmonic Distortion (THD):*

$$\frac{\text{Harmoniques}}{\text{Fondamental}}$$

*Pour la Tension & le courant*

- Europe

$$thd = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{rms}}$$

**Valeur Rms**

- USA

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

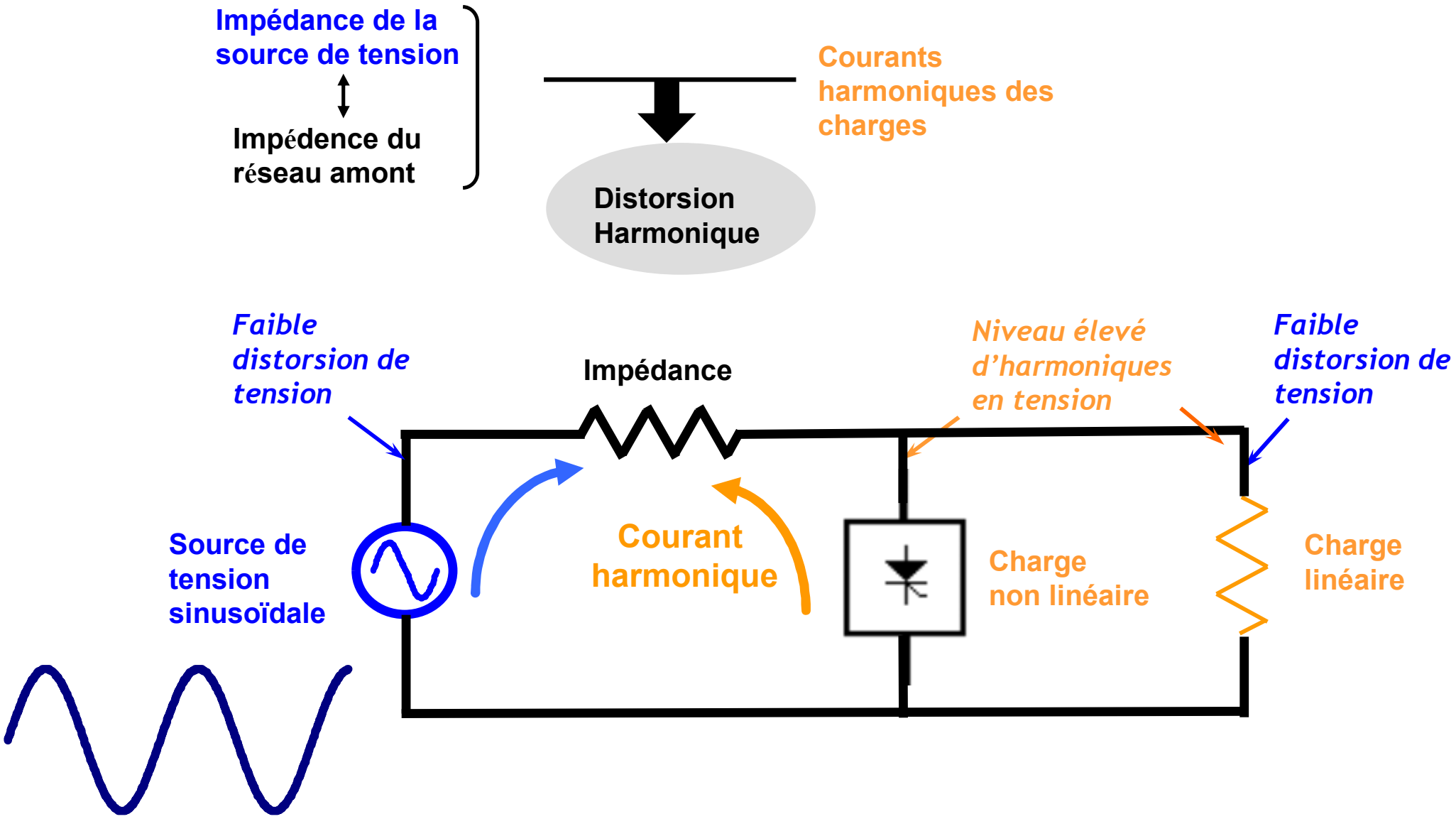
**Fondamental**

$$Irms = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

*Charges linéaires = faible THD*

*Charges non linéaires = THD élevé*

# - Distorsion de tension



# - Norme EN50160

**La norme EN50160 stipule que dans des conditions normales de fonctionnement, au cours de chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennes pendant dix minutes de chaque tension harmonique individuelle seront inférieures ou égales à la valeur inscrite sur le Tableau 6 ci-dessous. De plus, le THD de la tension d'alimentation sera inférieur à 8 %.**

**Tableau 6 : Valeurs des tensions harmoniques individuelles aux bornes d'une alimentation jusqu'au 25e rang (en % de la tension nominale)**

| Harmoniques impairs | | | | Harmoniques pairs | |
|---|---|---|---|---|---|
| Non multiples de 3 | | Multiples de 3 | | | |
| Ordre h | Tension relative | Ordre h | Tension relative | Ordre h | Tension relative |
| 5 | 6 % | 3 | 5 % | 2 | 2 % |
| 7 | 5 % | 9 | 1,5 % | 4 | 1 % |
| 11 | 3,5 % | 15 | 0,5 % | 6...24 | 0,5 % |
| 13 | 3 % | 21 | 0,5 % | | |
| 17 | 2 % | | | | |
| 19 | 1,5 % | | | | |
| 23 | 1,5 % | | | | |
| 25 | | | | | |

*REMARQUE : aucune valeur n'est fournie pour les harmoniques d'un rang supérieur à 25, dans la mesure où ils se sont généralement de faible ampleur, mais néanmoins complètement imprévisibles en raison des effets de résonance.*

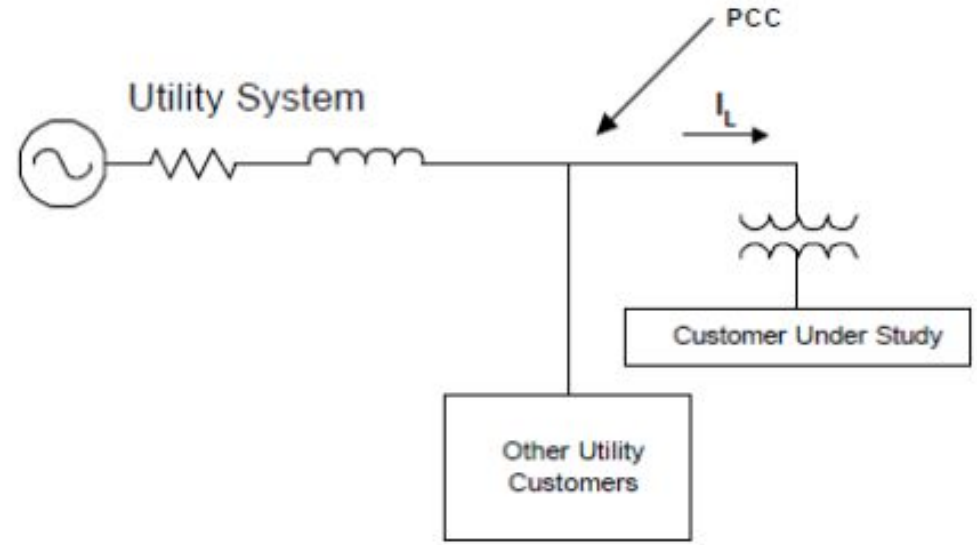
# - Norme IEEE std 519 : 2014

**Table 1—Voltage distortion limits**

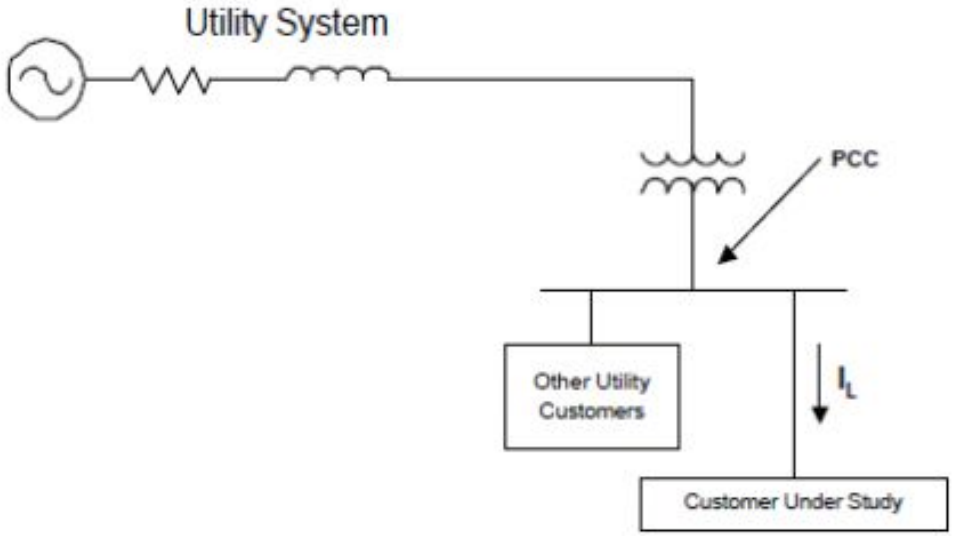
| Bus voltage $V$ at PCC | Individual harmonic (%) | Total harmonic distortion THD (%) |
|---|---|---|
| $V \leq 1.0$ kV | 5.0 | 8.0 |
| 1 kV < $V \leq 69$ kV | 3.0 | 5.0 |
| 69 kV < $V \leq 161$ kV | 1.5 | 2.5 |
| 161 kV < $V$ | 1.0 | 1.5[a] |

[a]High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

# - Norme IEEE std 519 : 2014




PCC at HV side for Industrial users




PCC at LV side for commercial users

# - Norme IEEE std 519 : 2014

**Table 2—Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV**

| Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Individual harmonic order (odd harmonics)[a, b] | | | | | | |
| $I_{SC}/I_L$ | $3 \le h < 11$ | $11 \le h < 17$ | $17 \le h < 23$ | $23 \le h < 35$ | $35 \le h \le 50$ | TDD |
| $< 20$[c] | 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 |
| $100 < 1000$ | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| $> 1000$ | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

[a]Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

[b]Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

[c]All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual $I_{sc}/I_L$.

where

$I_{sc}$ = maximum short-circuit current at PCC

$I_L$ = maximum demand load current (fundamental frequency component) at the PCC under normal load operating conditions

# - Sources de distorsion harmonique

**Charges non-linéaires ➔ Convertisseurs statiques électroniques:**

- **Industrie**: IT, variateurs de vitesse électroniques, ASI (UPS), lampes à décharge, fours à arc
- **Services**: IT, onduleurs, lampes à décharge
- **Résidentiel**: TVs, computers

# - Effets de la distorsion harmonique

| Effets directs | | Effets induits |
|---|---|---|
| **Augmentation de la température dans l'appareillage et les câbles** | → | **Vieillissement prématuré / incendie ...** |
| **Déclenchement intempestifs des Disjoncteurs** | → | **Pertes de production ...** |
| **Vibrations anormales et bruit** | → | **Vieillissement des charges / fatigue des utilisateurs...** |
| **Interférences avec systèmes radio, téléphone, informatique** | → | **Mauvais fonctionnement / pertes de programmes …** |
| **Surcharge du conducteur de neutre (harmoniques multiples de 3)** | → | **Suréchauffement des câbles/ incendie …** |
| **Fréquences élevées dans les batterie de compensation** | → | **Endommagement des condensateurs ...** |

# Problèmes créés par les harmoniques

## Pertes de puissance dans les transformateurs

Baisse de la puissance fournie (ou de la capacité du transformateur) à cause des harmoniques

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{ef}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \cdot \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

$$S_{utile} = S_{transfo} / K$$

***Un* transformateur de *1000* kV·A**
***THDI = 30 %***
***Perte de puissance effective de 10 %***

## Pertes internes

Aussi bien les pertes cuivre (joule) que les pertes fer (Ph + PF) sont proportionnelles au carré du courant. Plus les fréquences des harmoniques sont élevées, plus les pertes PF augmentent

$$P_h = k_h \cdot \sum n \ .I^2 \qquad P_F = k_h \cdot \sum n^2 . I^2 \qquad P_J = R . I^2$$

# Exemples de solutions

- Batteries de compensation avec Selfs anti-harmoniques

- Filtres passifs

- Filtres actifs

# Economies d'énergie potentielles

## Rappels théoriques

Pertes dans un transformateur = Pj + Pfe

Pj: pertes joule (pertes cuivre)

Pfe: pertes fer (perte par hystérésis et courants de foucault)

Rendement d'un transformateur:

$$\eta = Pu/Pabs = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{UI\sqrt{3}\cos\varphi + Pj + Pfe}$$

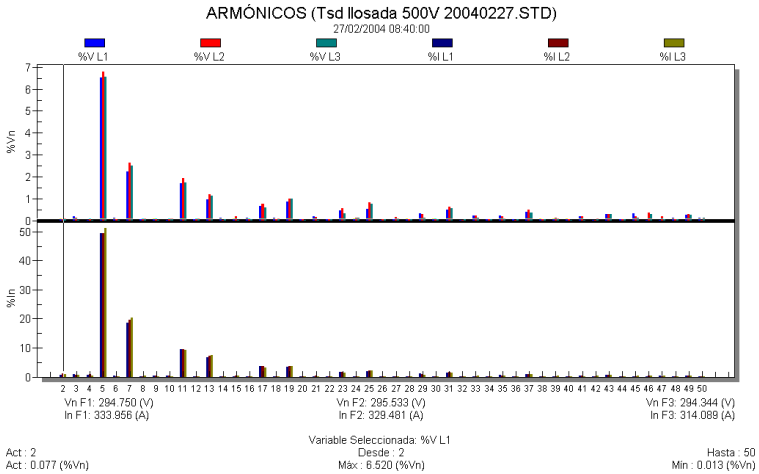
$Pj = Pjn * I^2/In^2$

Pfe = k * P0 (k = facteur de déclassement du transformateur du à la circulation de courants harmoniques)

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e}.\left(\frac{I_1}{I_{ef}}\right)^2.\sum_{n=2}^{40} n^q.\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

# Exemple

## Transformateur 400kVA 20kV/400V
## Alimente une ASI 250kVA




THDI = 40%
K-factor = 4,5 (mesuré par un PQM)
Sappelée = 150kVA – cos phi = 0,93
S fondamental = 127 kVA
Pertes à vide = 930W
Pertes cuivre nominales Pjn = 4600W

$Pcu = Pjn * I^2/In^2 = 4600 * 150^2/400^2 = 647$ W
Pfe = k *P0 = 4,5 * 930 = 4185 kW, Total pertes = 4,83 kW

Si filtrage: réduction Pfe = 3,5*930 + = 3,25kW
réduction $Pcu = 4600 * (150^2-127^2)/400^2 = 0,04$ kW

# Exemple

**Fonctionnement 24/24h – 365j/an :**

**→ Pertes dues aux harmoniques = 3,29*24h*365j = 28.820 kWh/an**

**→ Potentiel d'économie avec filtrage de 100% des harmoniques:**

**2,36% seulement !!** *(sans tenir compte de la consommation du filtre )*

**… mais le vrai intérêt de filtrer les harmoniques**

**S après déclassement = S/k-factor = 400/4,5 = 88,9 kVA**

**Facteur de charge Fc = 150/88,9 = 169%!!!**

**→ Echauffement excessif du transformateur (90°C)**

**→ durée de vie réduite du transformateur (+20°C par rapport à la température maximale → divisée par 4 minimum)**

# Variations de tension

# - Norme EN50160

## VARIATIONS DE TENSION D'ALIMENTATION

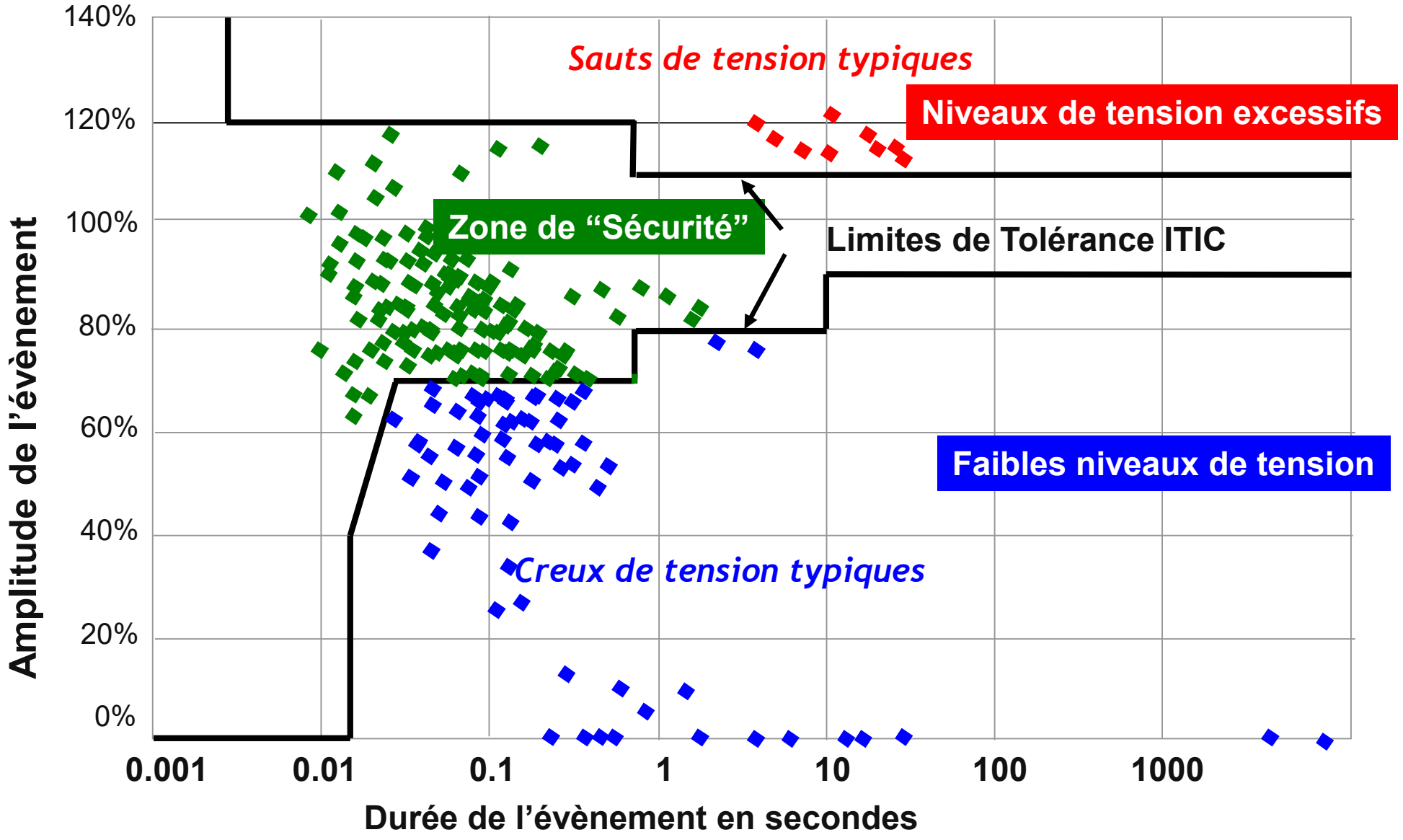
**La norme EN 50160 stipule que dans des conditions normales de fonctionnement, à l'exclusion des situations se produisant à la suite de défaillances ou d'interruption de tension :**

**• Au cours de chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes des tensions d'alimentation doivent se trouver dans la gamme de Un ±10 %.**

**• Les valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes des tensions d'alimentation doivent se trouver dans la gamme Un +10 à –15 %.**

# - Courbe de sensibilité

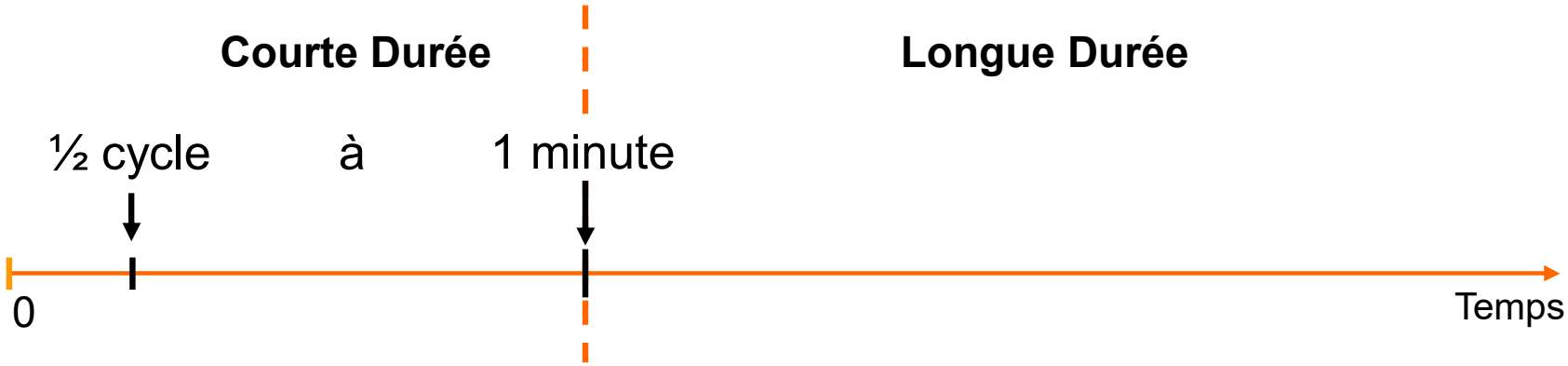
ITIC: Information Technology Industry Council



# - Courtes durées vs. longues durées

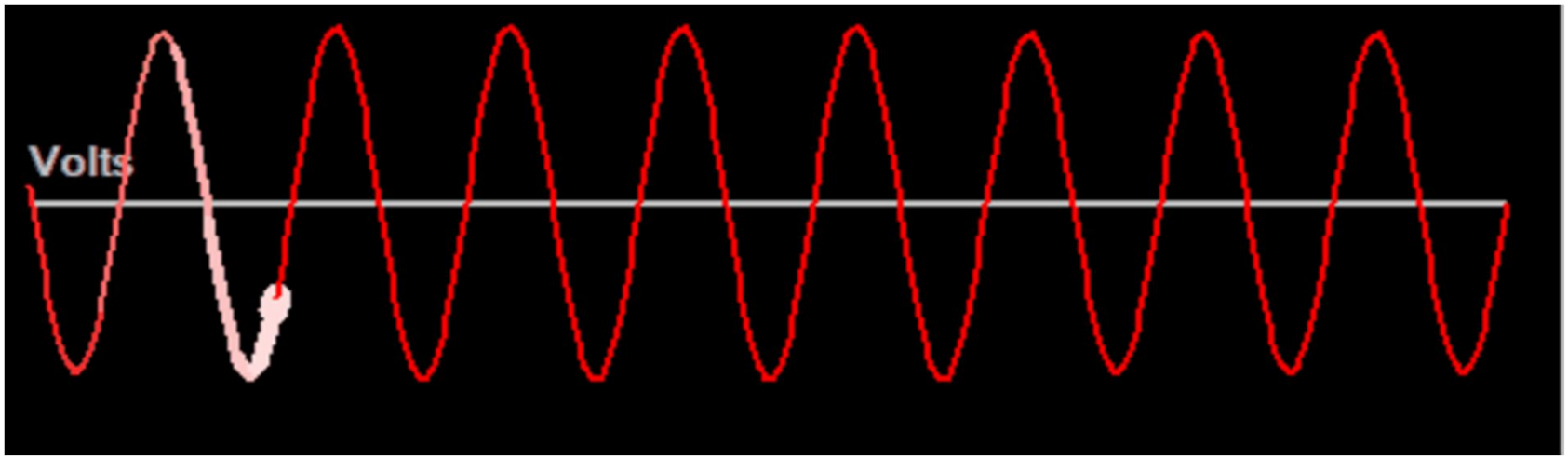
IEEE Std 1159-1995
Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality

Variation de la valeur rms de la tension :

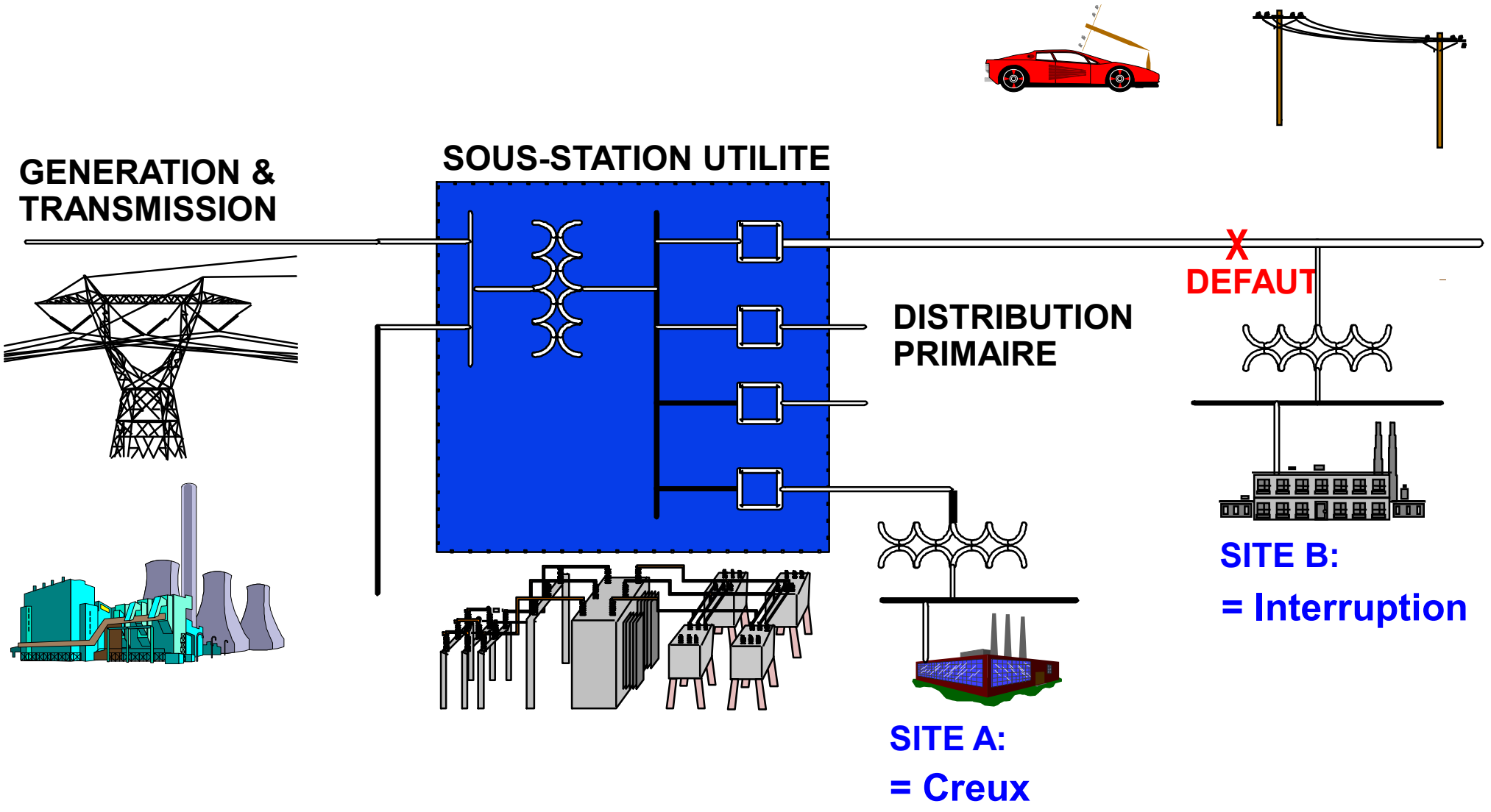


# Variations de tension de courte durée

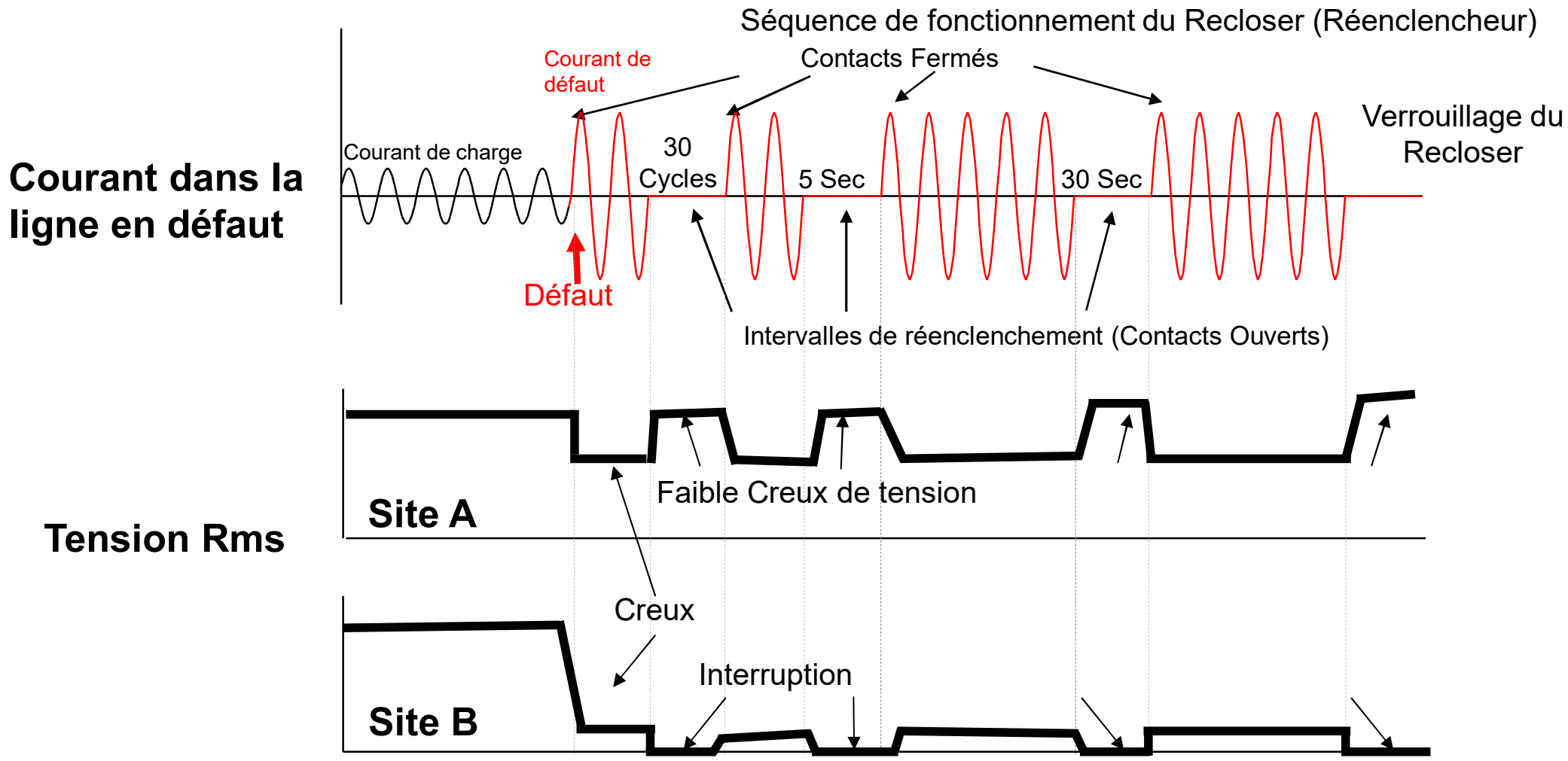
de 10 ms à quelques secondes



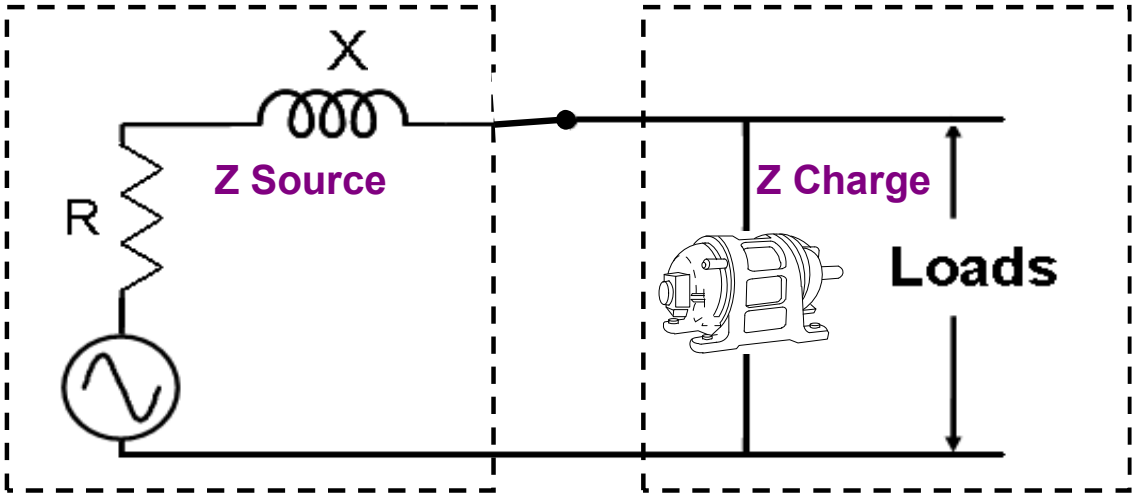
# Creux et interruptions: origine externe … parfois

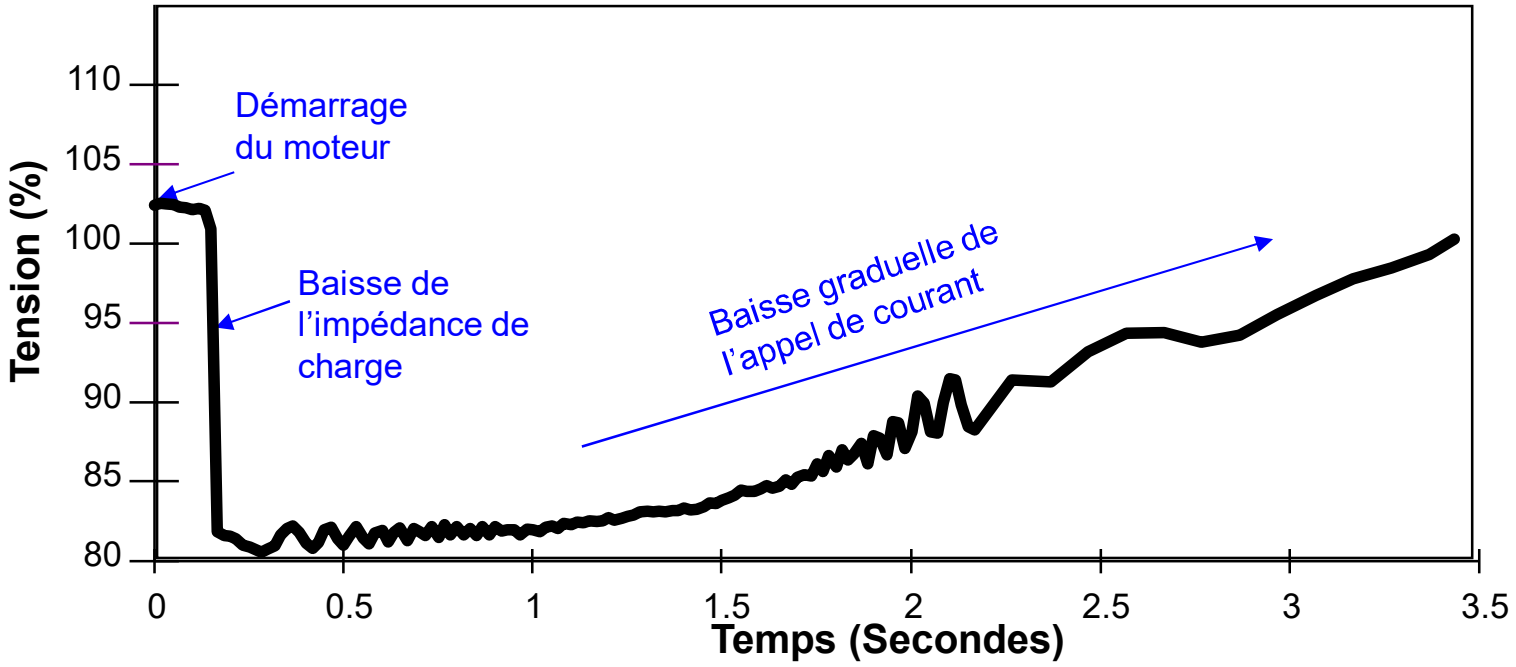


# Creux et interruptions: origine externe … parfois



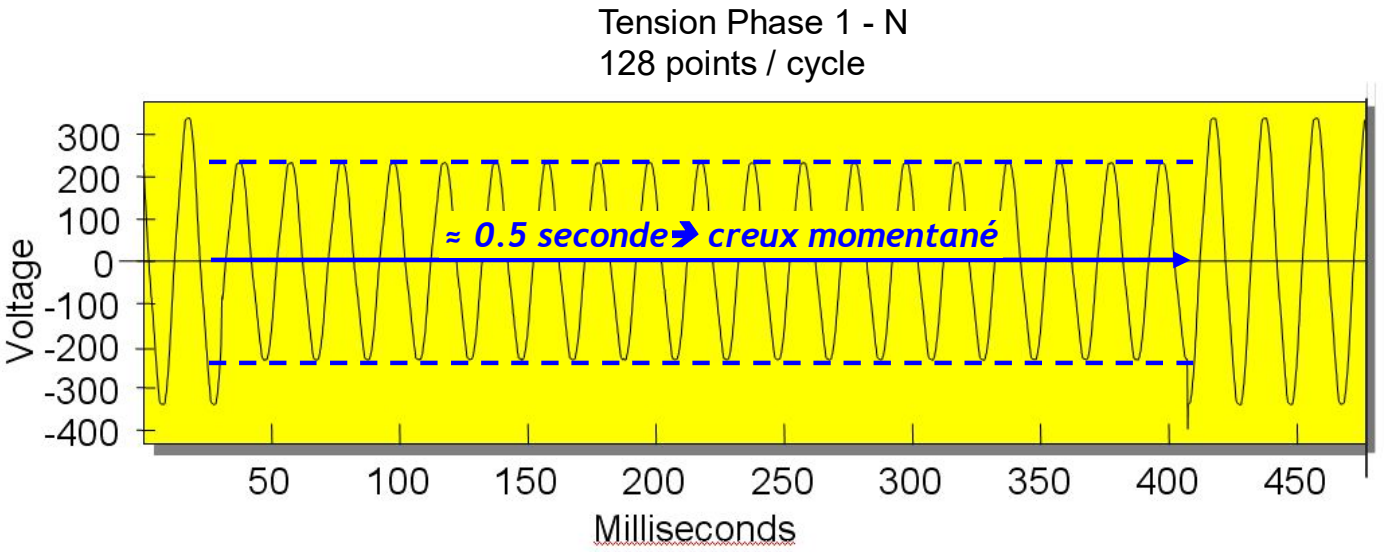
# … générés à l'intérieur de l'installation … souvent

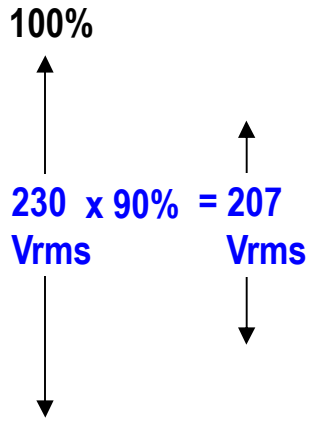


# - creux

IEEE Std 1159-1995
Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality




- Baisse entre 0.1 à 0.9 de la valeur efficace (RMS) nominale de la tension ou du courant
- Durée entre 1/2 cycle (10ms) à 1 minute
- Grandes excursions de tension

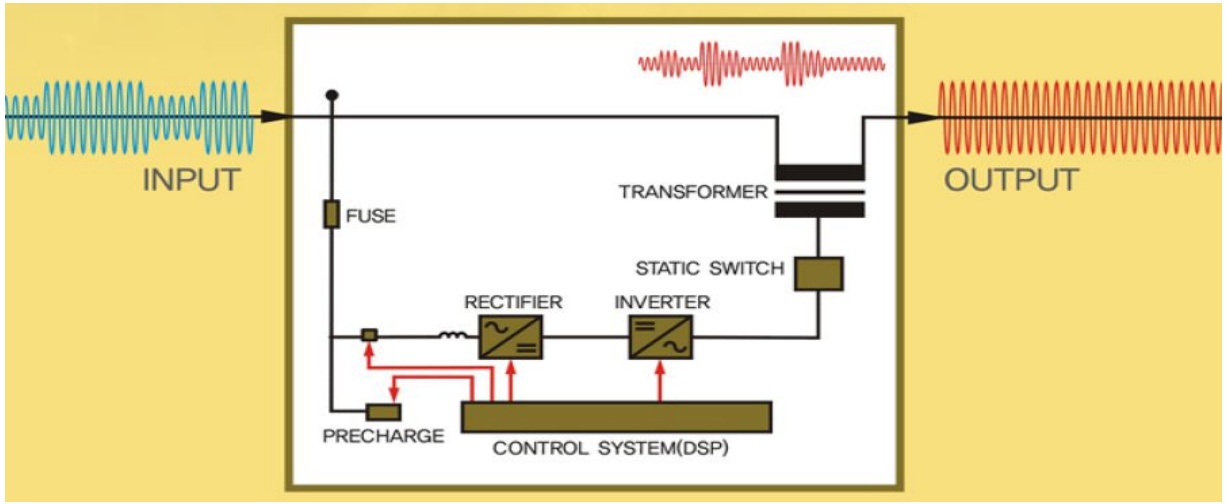
***Plus courants que les sauts***

# -Creux = dommages  dans l'électronique!

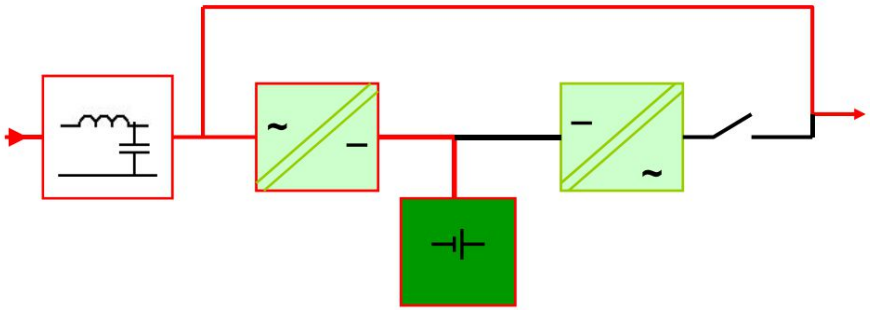
- Reset / redémarrage
- Perte de données
- Déclenchement intempestif des Disjoncteurs
- Interruption du process
- Réduction de la luminosité de l'éclairage
- Appels manqués
- Erreurs dans les logiciels
- Détection de défaut de baisse de tension

# Les principales solutions

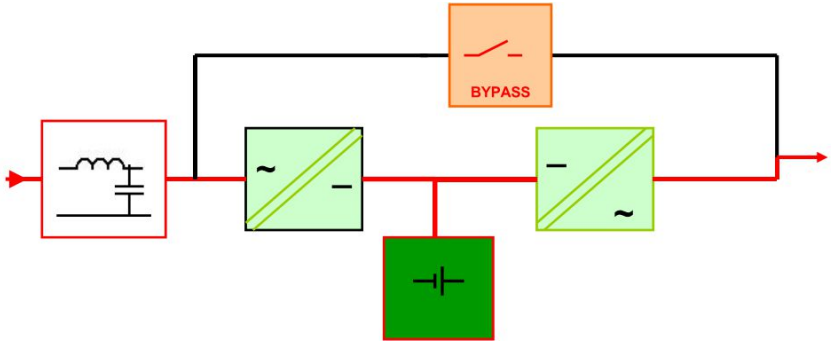
- DVR: Dynamic Voltage Restorer




- ASI (UPS) off-Line

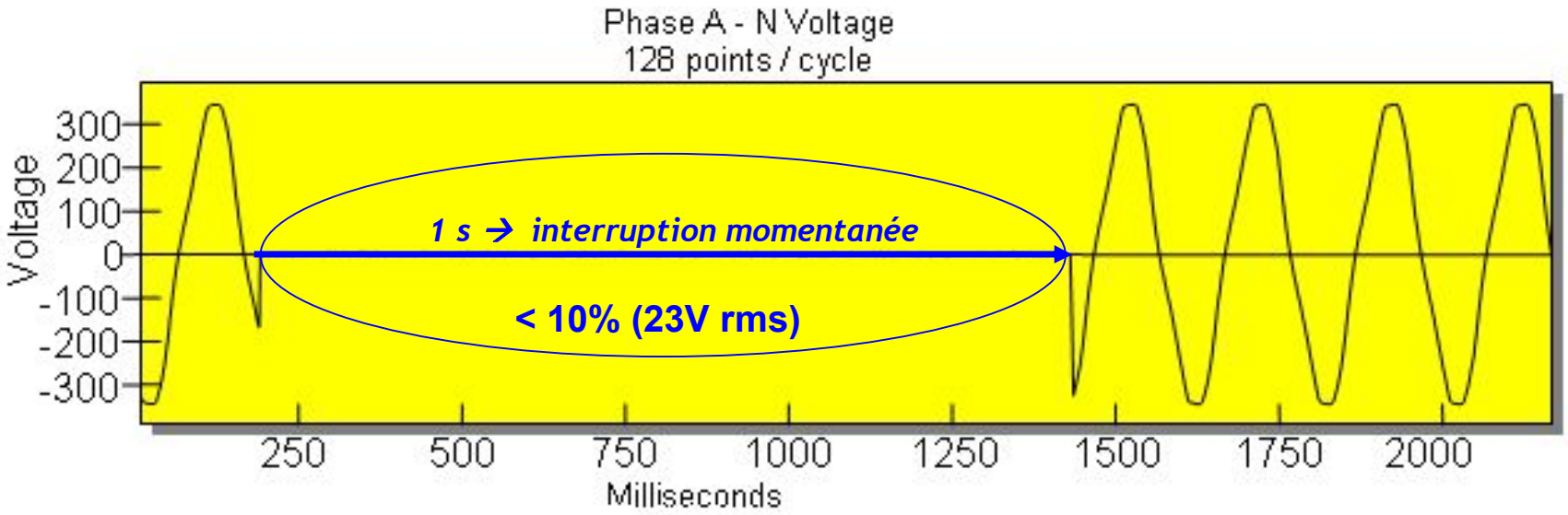


- ASI (UPS) on-Line double conversion



# - Interruptions de tension

IEEE Std 1159
Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality



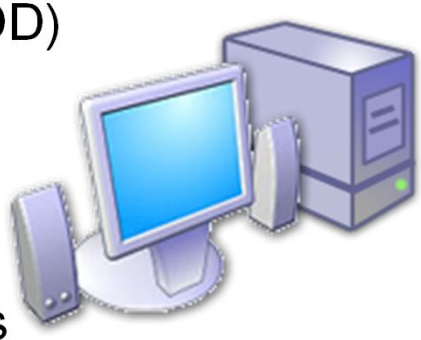

- Perte complète de la tension (< 0.1 pu)
- Sur un ou plusieurs conducteurs
- Pendant moins d'une minute

***Le plus sévère entre les 3 types des perturbations de courte durée***

***Le moins probable à se produire***

# - interruption: effets sur l'électronique

- Reset et redémarrage
- Crash du Disque Dur (HDD)
- Interruption du process
- Panne d'alimentation
- Epuisement des Batteries
- Panne Moteur
- Surtension à la mise sous tension



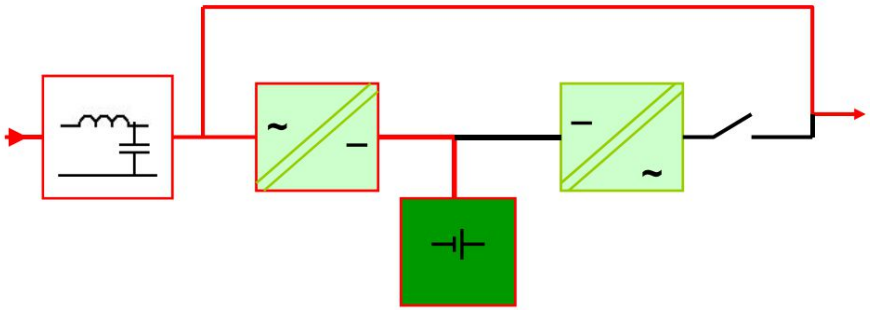
$$v = L \times \frac{di}{dt}$$

*Inductance de la ligne*

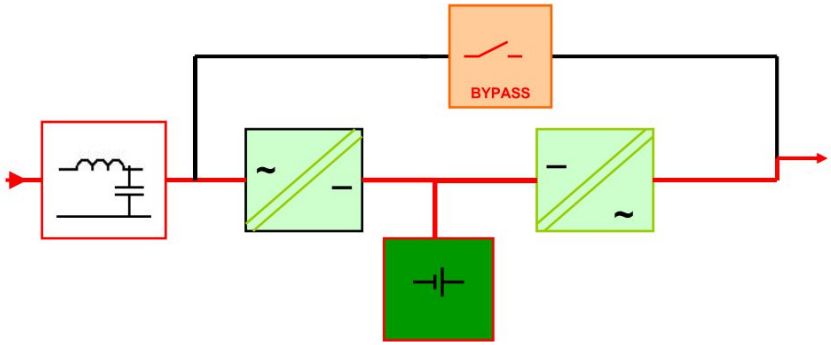
*Taux de variation du courant*

# Les principales solutions

- ASI (UPS) off-Line



- ASI (UPS) on-Line




- Groupe temps zéro

# Réduction des pertes d'énergie électrique

- Importance du choix de son ASI (Alimentation Sans Interruption)
  - les technologies récentes ont permis une amélioration importante du rendement des onduleurs avec un facteur de puissance plus élevé : 94% vs 80%. Il est donc possible de réaliser une économie appréciable en remplaçant des onduleurs anciens

## Exemple 1

**ASI installé en 1999:**

**UPS 160kVA tri-tri 400V**
**Rendement = 80%**
**Charge réelle = 100kW**
**Puissance consommée = 25 kW**
**Consommation = 219 000 kWh/an**
**Coût annuel = 21 900 €**

**ASI installé en 2019:**

**UPS 160kVA tri-tri 400V**
**Rendement = 94%**
**Charge réelle = 100kW**
**Puissance consommée = 6,4 kW**
**Consommation annuelle = 55 900 kWh**
**Coût annuel = 5600 €**

**Gain annuel = 163 100 kWh soit 16300 € → -15%**
**Coût investissement = 26 k€**
**PBT = 19 mois**

# Réduction des pertes d'énergie électrique

- Importance du choix de son ASI (Alimentation Sans Interruption)
  - L'utilisation d'un ASI industriel de type Off-line permet de faire des économies encore plus importantes. Les technologies actuelles permettent d'assurer des temps de commutation en cas de coupure du réseau inférieures à 4ms, ce qui est largement suffisant pour protéger tout récepteur, quelle que soit sa sensibilité

## Exemple 2

**ASI On-Line nouvelle génération:**

**UPS 160kVA tri-tri 400V**
**Rendement = 94%**
**Charge réelle = 100kW**
**Puissance consommée = 6,4 kW**
**Consommation annuelle = 55 900 kWh**
**Coût annuel = 5600 €**

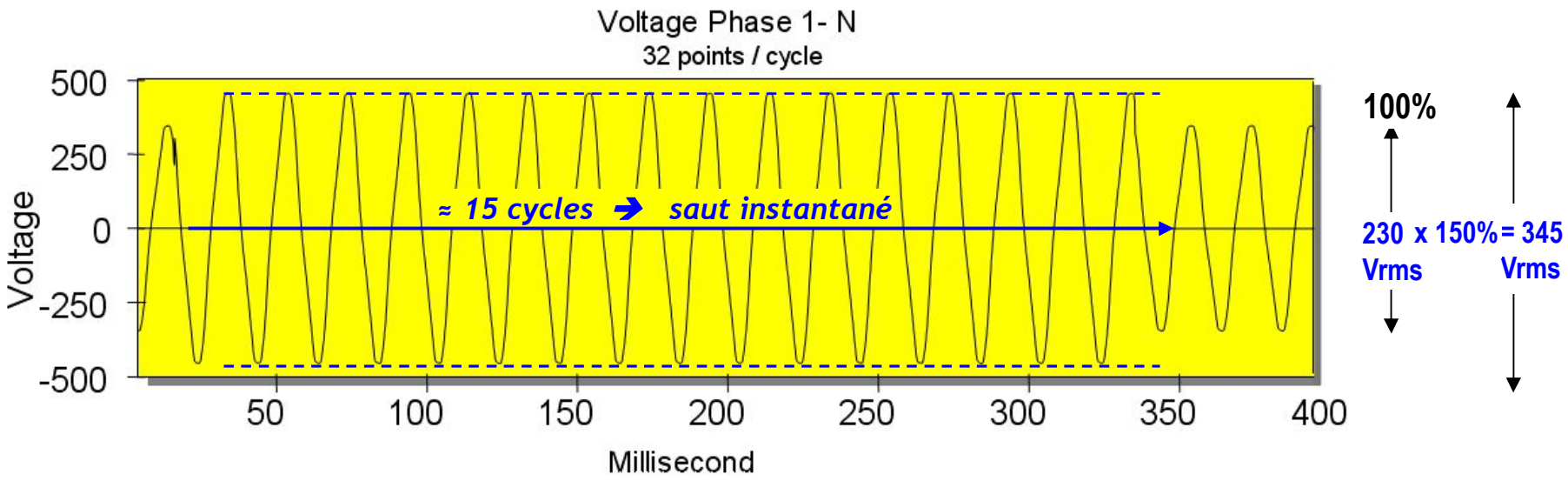
**ASI Off-Line nouvelle génération:**

**UPS 160kVA tri-tri 400V**
**Rendement = 99%**
**Charge réelle = 100kW**
**Puissance consommée = 1 kW**
**Consommation annuelle = 8 760 kWh**
**Coût annuel = 876 €**

**Gain annuel = 4700 kWh soit 470 € → -5%**
**Coût investissement < coût ASI On-Line**

# - Sauts (surtensions)

IEEE Std 1159-1995
Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality




- Elévation entre 1.1 pu et 1.8 pu de la valeur efficace (rms) de la tension ou du courant

***Très destructeurs***

- Durée entre 0.5 cycles à 1 minute

***Moins courants que les creux***

# - causes

Généralement associés aux conditions de défauts dans le réseau

- Défaut  Ligne - Terre
  - simple
  - ou élévation temporaire de la tension dans les phases libres en défaut
- Baisse de la charge

$$v = L \times \frac{di}{dt}$$

*Inductance de la ligne*

*Taux de variation du courant*

# effets

***Plus destructeurs que les creux***

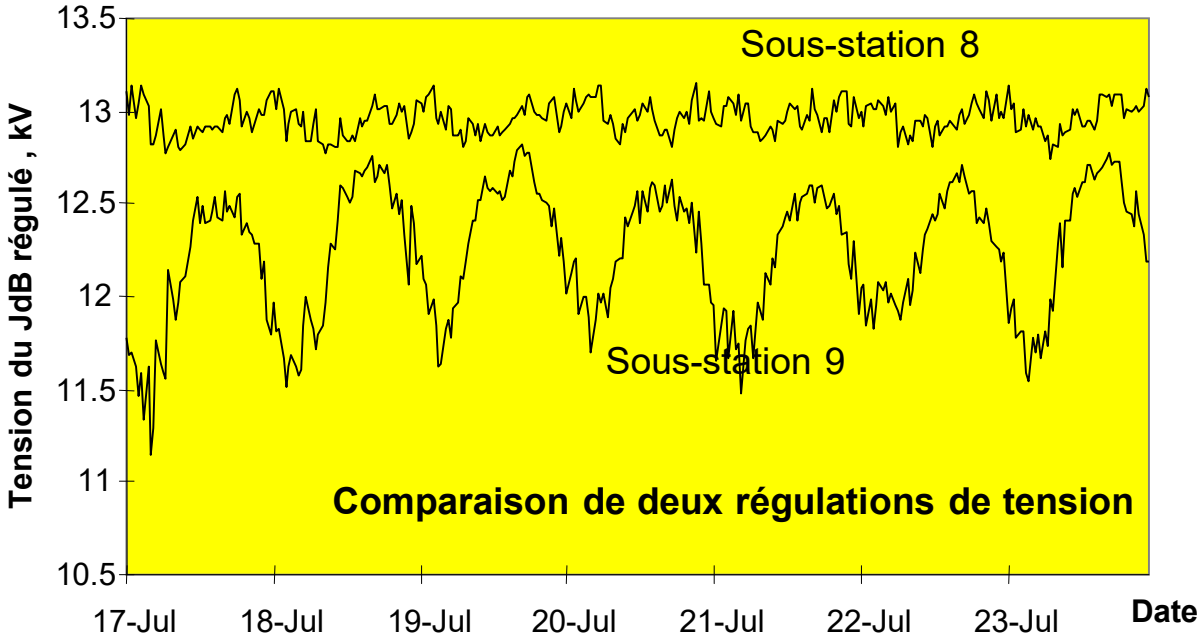
- Destruction des composants (alimentations stabilisées)
- Elévation de  l'éclairement des lampes à incandescence

- Plusieurs machines grillées

# Variations de tension de longue durée

> 1 minute

# - Variations de longue durée

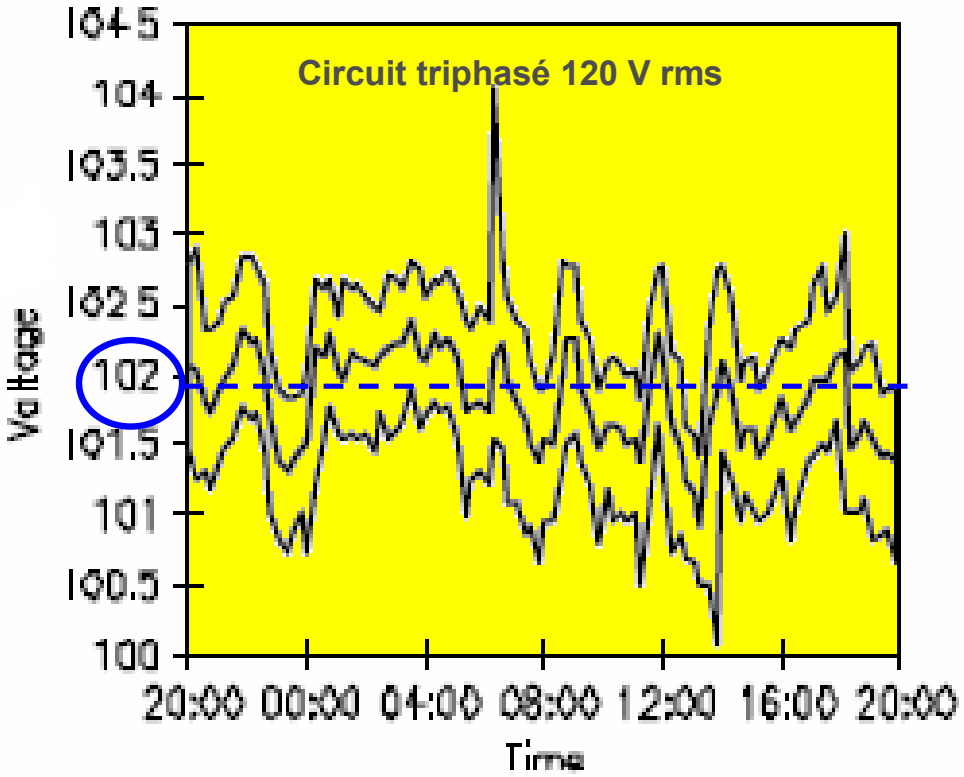



IEEE Std 1159
Recommended Practice
on Monitoring Electric
Power Quality

- Elevation ou baisse de la tension rms
- Pendant plus de 1 minute

  - Sous-tensions
  - Surtensions
  - Interruptions soutenues

# - Sous-tension




*85% du nominal*

- Niveau de tension rms à long-term = 90% du nominal (ou moins)
- Tension simple 230V ⟶ 207V
  (Tension simple 110V ⟶ 99V)

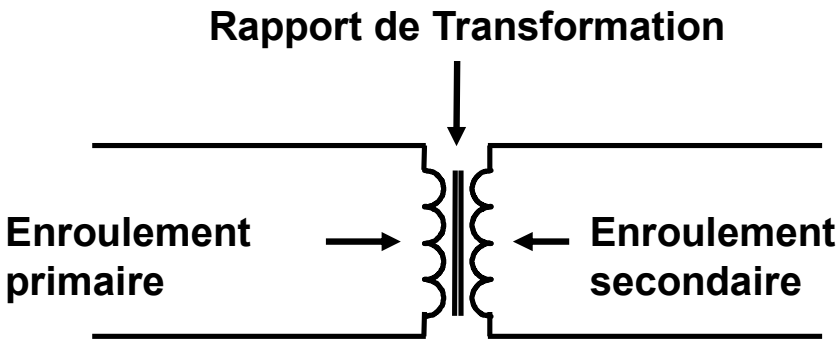
*Assez courant*

*Sous-tension chronique → performance erratique del'équipment ou du réseau*

# - causes

## Transformateurs:

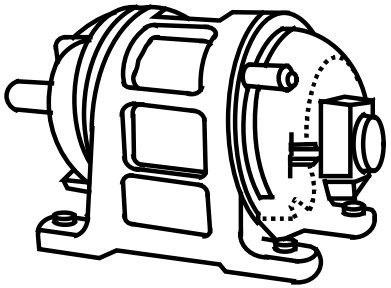
Courant ou tension alternatifs changés par induction électromagnétique




*Rapport Incorrect* → *sous / sur* } *tension*

# effets

## Moteurs à induction



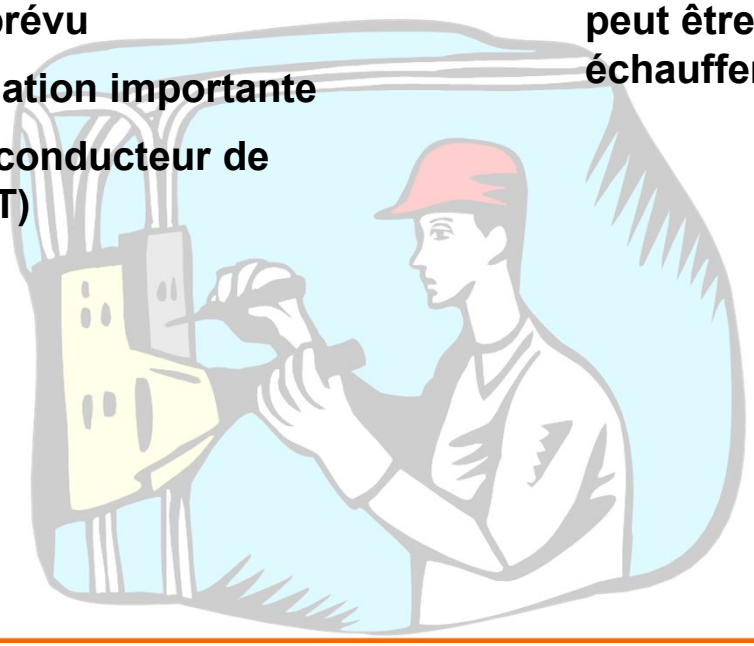
- Couples de démarrage et maximum proportionnels à $V^2$
- Courant de démarrage proportionnel à V
- Glissement % proportionnel à 1 / $V^2$
- Elévation de Température approx. proportionnelle à V

# - surtension

- Niveau de tension rms à long terme:  110% du nominal ou plus
- Pour V = 230 volts → 253 volts
- Pour U =  400 volts → 440 volts

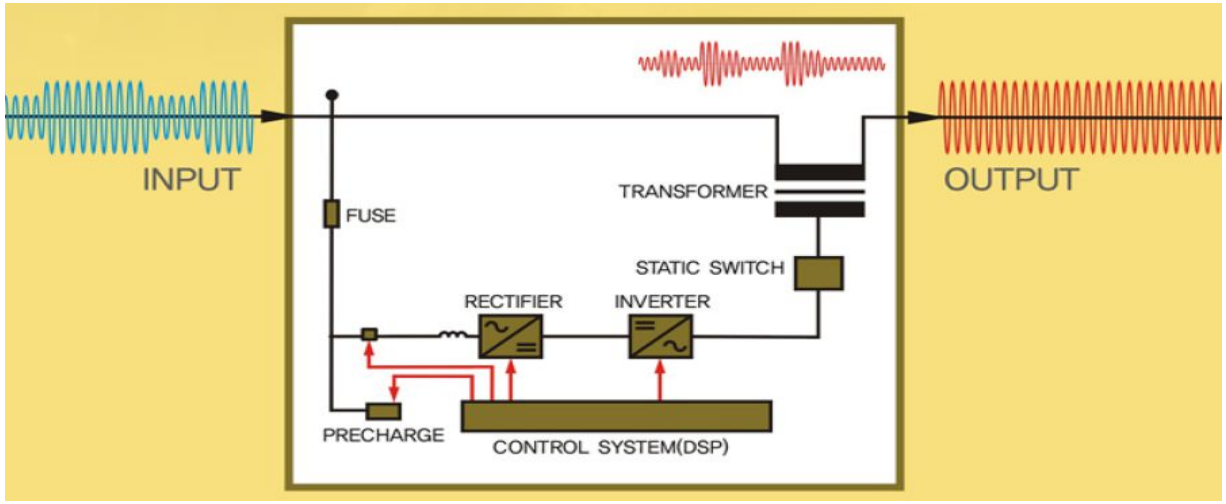
- Causes
  - **Régulateurs de tension internes mal ajustés**
  - **Charges dans le circuit,  plus faibles que prévu**
  - **Surcompensation importante**
  - **Coupure de conducteur de neutre (en BT)**

- Effets
  - **Déclenchements intempestifs des protections de surintensité**
  - **La durée de vie des moteurs peut être réduite à cause des échauffements.**

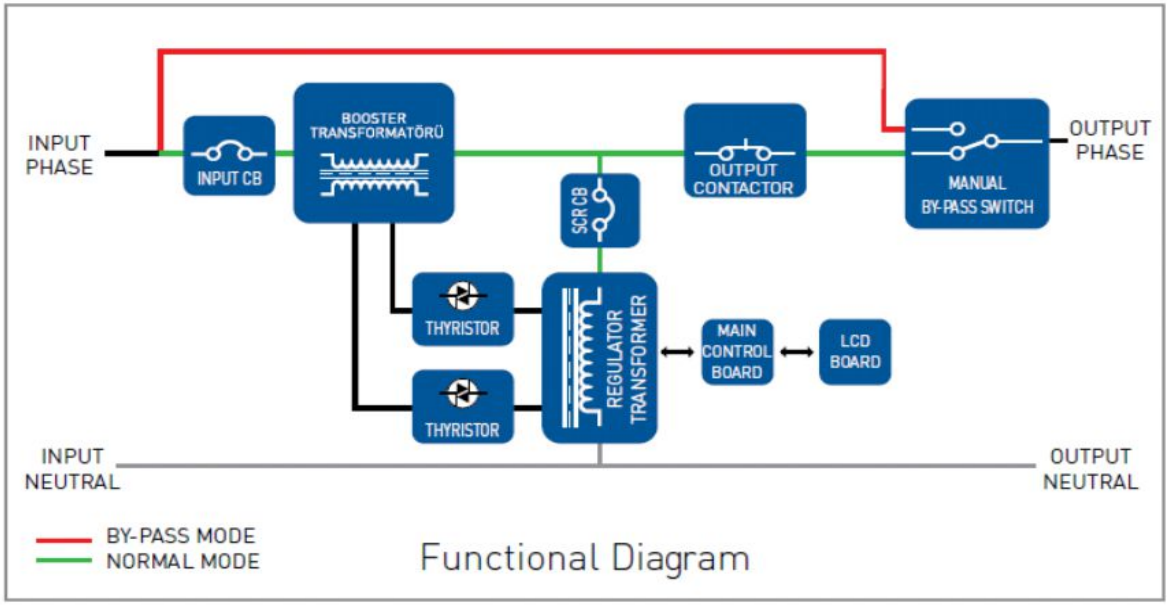


# Les principales solutions

- DVR




- Stabilisateur de tension (statique ou dynamique)




- **Rendement 97% à pleine charge si statique**
- **seulement 90% si stabilisateur dynamique (autotransformateur motorisé)**
- **Attention aux coûts d'entretien des stabilisateurs dynamiques**

# - Interruptions de longue durée

- La tension d'alimentation baisse à un tel niveau que les équipements ne peuvent plus fonctionner correctement.
- De une minute à plusieurs heures ou plus

**Causes**

- Interruptions soutenues de court-terme
  - Résultat du déclenchement d'un Disjoncteur de l'utilité pour effacer un défaut.
- Interruptions soutenues de long-terme
  - Résulte d'accidents implicant les lignes de puissance ou un défaut du transformateur de l'utilité (météo, etc.)

# Les principales solutions

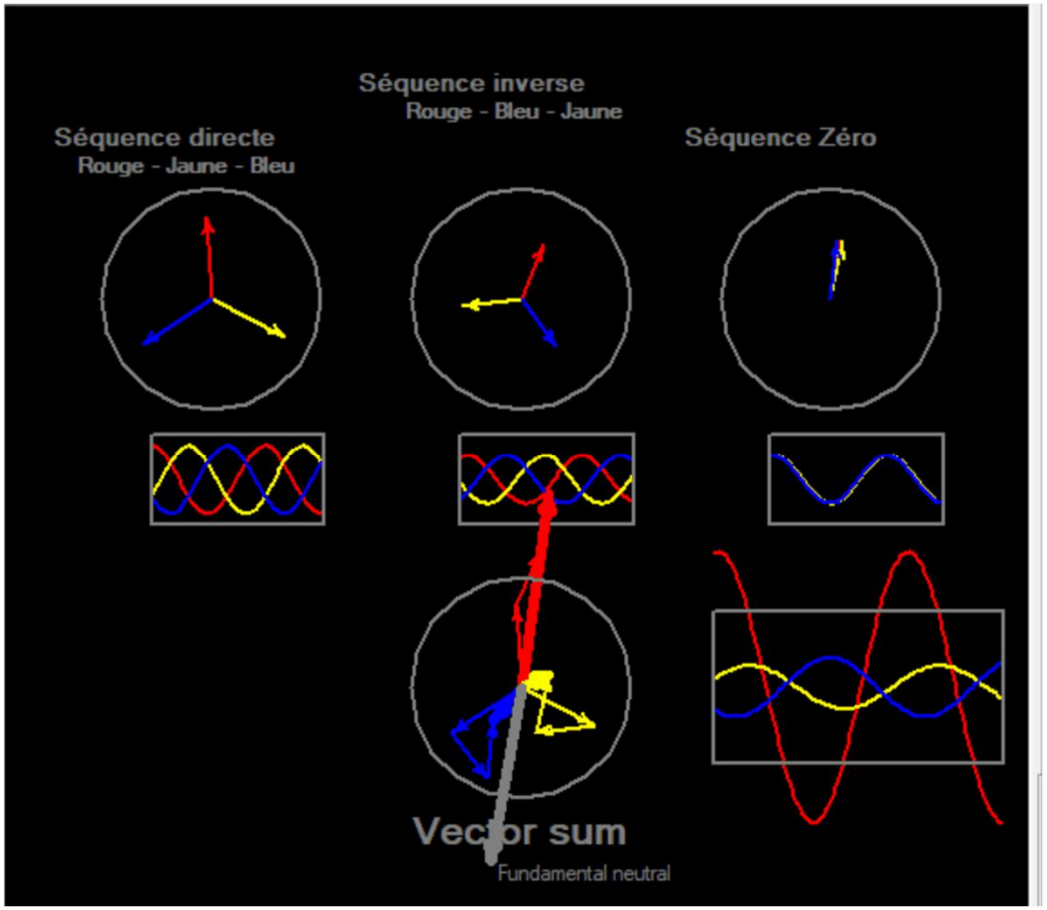
- ASI Industriels

- Groupes Electrogènes

- **Rendement 94% à pleine charge**
- **seulement 90% à 50% de charge**
- **Rendement 99% en mode Eco (ASI On-line) ou pour ASI Off-Line**

**Coût du kWh généré = 2,5 à 3,5 fois le coût du kWh acheté chez le distributeur d'électricité, selon les pays**

# Déséquilibre de tensions



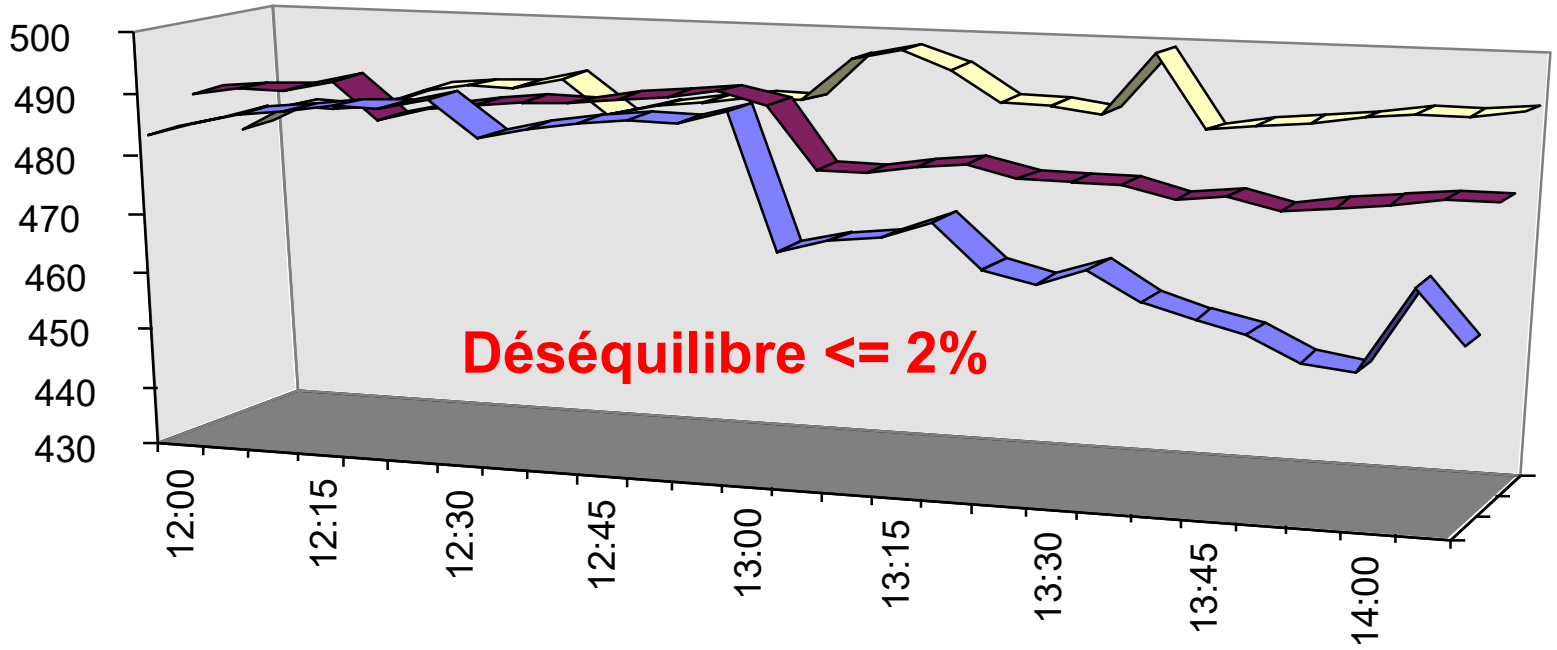
# - Déséquilibre de tension

NEMA MG 1 [2]
National Equipment Manufacturer's Association

- Déviation de chaque phase par rapport à la moyenne des tensions des trois phases.

IEC 61000-4-30

- Rapport de la tension de la séquence négative sur la tension de la séquence positive.



# - Norme EN50160

## DESEQUILIBRE DE LA TENSION D'ALIMENTATION

**La norme EN50160 stipule que dans des conditions normales de fonctionnement, au cours de chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennes pendant dix minutes de la composante de la séquence de la phase négative d'une alimentation se trouveront dans une plage de 0 à 2 % de la composante de la séquence de la phase positive.**

# - Méthode NEMA: % du déséquilibre de tension

NEMA MG 1 [2]
National Equipment Manufacturer's Association

- Déviation de chaque phase par rapport à la moyenne des tensions des trois phases.

$$\text{Déséquilibre de tension} = \frac{\text{Ecart maximal entre les tensions de deux phases}}{\text{Moyenne des tensions}} \times 100$$

$$\text{Moyenne des tensions} = \frac{\Sigma \text{ Tension de chaque phase}}{3}$$

- Exemple

différences de tension entre phases:

L1 vs L2 230
L2 vs L3 236
L3 vs L1 237

Moyenne des tensions = 703 volts / 3 = 234.33 volts

Max différence (ou déviation) = 237 - 230 = 7 volts

$$\text{\% déséquilibre de tension} = \frac{7}{234.33} \times 100$$

= 2.987 %

***Plus de 2 % n'est pas acceptable !***

# - Echauffement des enroulements

% Elévation de température dans les enroulements moteur

$$= 2 \times (\%\ \text{Déséquilibre de tension})^2$$

$$= 2 \times (2.987)^2 = 2 \times 8.92216$$

$$= 17.84\ \%$$

| % Déséquilibre de tension | % Elévation de température |
|---|---|
| 2% | 8% plus chaud |
| 3% | 18% plus chaud |
| 4% | 32% plus chaud |
| 5% | 50% plus chaud |

***La Température augmente de façon exponentielle !***

# - Causes des déséquilibres de tension

- Problèmes dans les condensateurs (perte de capacité inégale entre les phases, fusibe HS sur une phase, )
- Transformateurs
  - Court-circuits entre spires
  - Couplage Triangle ouvert
- Charges monophasées non équilibrées entre phases (déséquilibre > 5%)
- Chute de tension sur une phase plus importante que sur les autres, causée par des longueurs de cables ou sections différentes
- Manque de phase (fusible HS, déconnection, etc.

# Rendement des moteurs en fonction du déséquilibre de tensions

Table 1. Example Motor Efficiency* Under Conditions of Voltage Unbalance

| Motor Load % Full | Motor Efficiency, % | | |
|---|---|---|---|
| | Voltage Unbalance | | |
| | Nominal | 1% | 2.5% |
| 100 | 94.4 | 94.4 | 93.0 |
| 75 | 95.2 | 95.1 | 93.9 |
| 50 | 96.1 | 95.5 | 94.1 |

*Source: Washington State University Energy Program*

# Impact du déséquilibre sur les coûts énergétiques

- **Exemple**
  - **Moteur 100 hp fonctionnant à 100% de sa charge nominale**
  - **8000 h/an**
  - **Déséquilibre de tension: 2,5%**
  - **Coût de l'énergie: 0.1€/kWh**
- Les économies annuelles d'énergie et de coûts obtenues après correction du déséquilibre de **2,5% à 1%** sont:

- Economie/an = 100 hp x 0.746 kW/hp x 8,000 hrs/yr x (100/93 – 100/94.4)
  **= 9517 kWh** soit **1,5% d'économie d'énergie**
- Gain économique = 9,517 kWh x €0.1/kWh
  **= 951,7 € / an**

**Exemple de déséquilibre de 2,5%**
U12 = 400V
U23 = 405V
U31 = 395

**Exemple de déséquilibre de 1%**
U12 = 400V
U23 = 402V
U31 = 398

# Actions suggérées

- Surveillez périodiquement les tensions aux bornes du moteur pour vérifier que le déséquilibre de tension est maintenu en dessous de 1%. Pensez à programmer des alarmes sur votre système de gestion d'énergie ou de monitoring par exemple.

- Vérifiez que vos charges monophasées sont uniformément réparties entre les phases

- Vérifiez que les batteries de compensation d'énergie réactive sont bien équilibrées. Remplacer les condensateurs ou gradins présentant un déséquilibre de plus de 10% entre phases

- Installez des indicateurs de défaut à la terre au besoin et effectuez des inspections thermographiques annuelles.

- Un autre indicateur que le déséquilibre de tension peut être un problème est la vibration de 100 Hz (Harmonique H2). Un constat de vibration à 100 Hz devrait entraîner une vérification immédiate de l'équilibre de tension.

# Autres solutions

## Compensation d’énergie réactive

# Avantages de la compensation

**Extrait de la présentation d'un grand fabricant mondial de batteries de compensation**

## Economiques :

- réduction de la facture d'électricité par :
- diminution de la puissance appelée
- Évitement des pénalités pour cos phi insuffisant
- diminution des kWh facturés (pertes Joules)

## Techniques :

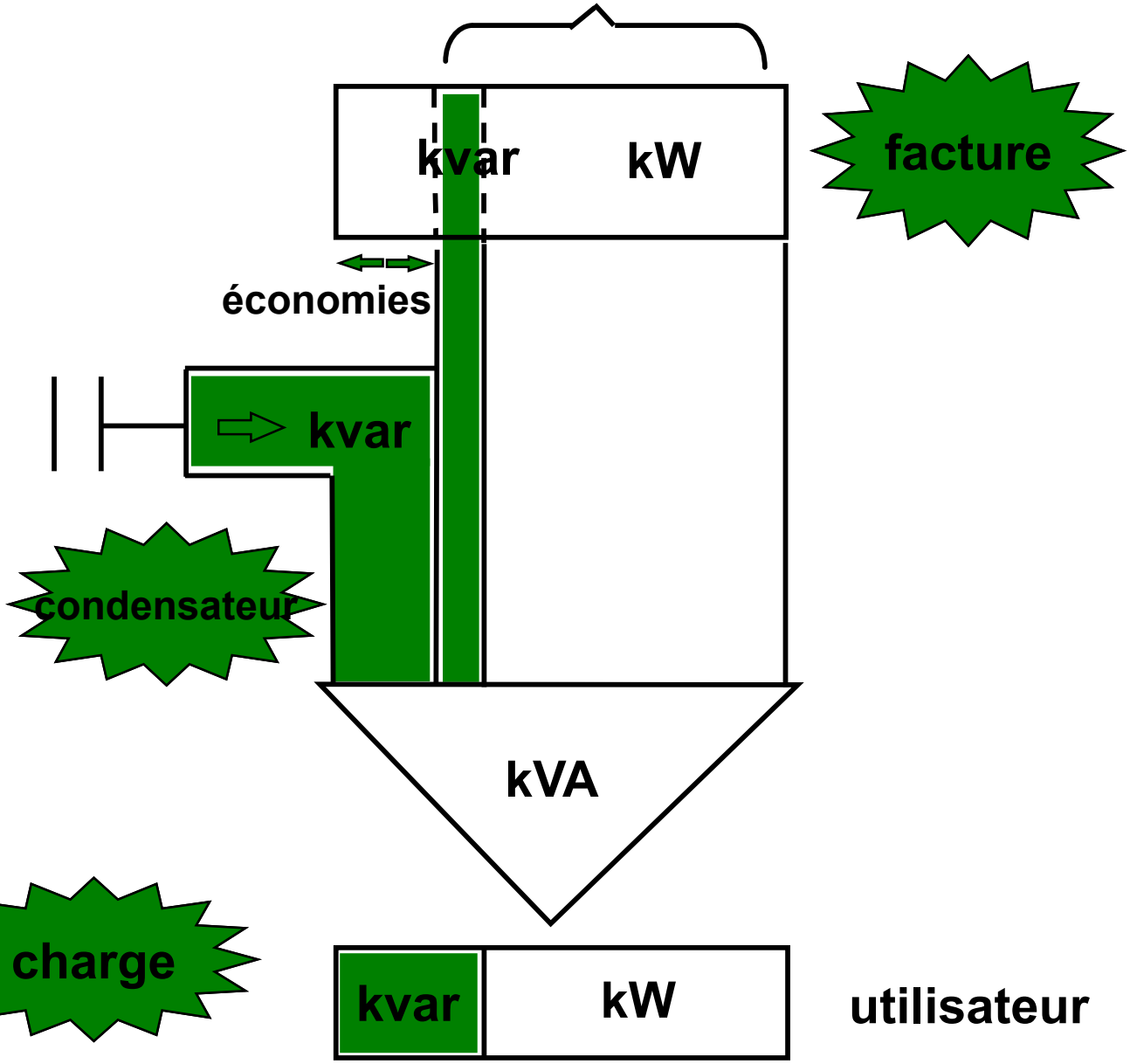
- diminution des chutes de tension
- augmentation de la puissance disponible
- amélioration de la qualité de l'installation électrique dans le cas de filtrage : association condensateurs+inductances

**Exemple : passer de cos φ = 0,8 à cos φ = 0,93 permet de :**

- **diminuer les pertes en ligne de 30% (à puissance active constante)**
- **augmenter la puissance active transportée de 20% (à pertes actives constantes)**

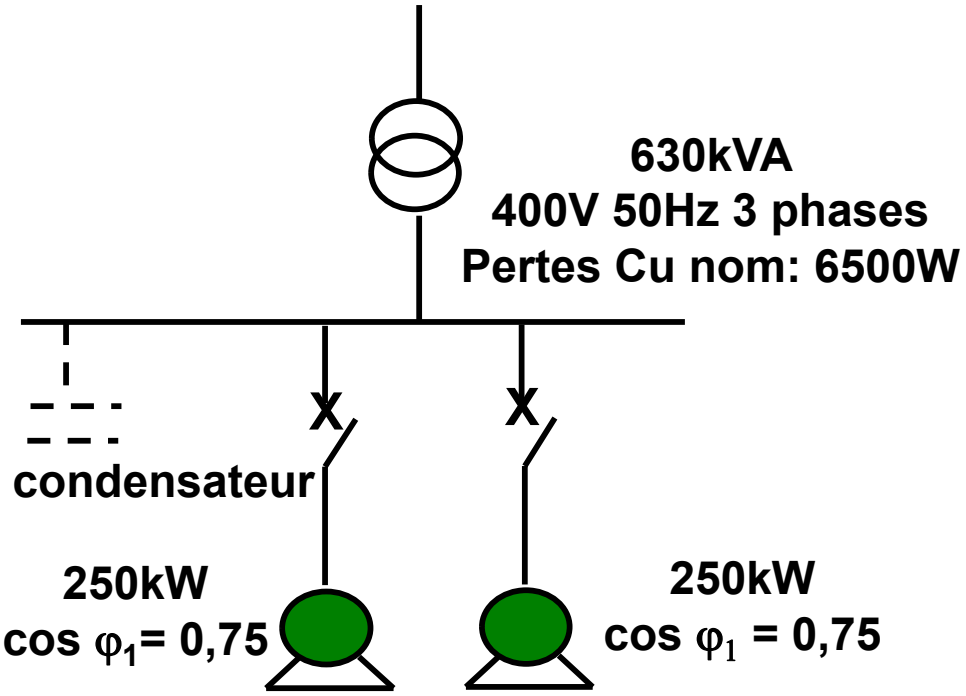
# Amélioration du cos phi (aspect financier)

- Cos $\varphi = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2+kvarh^2}}$
- Kvar(h) ↘
- cos $\varphi$ ↗



# Exemple : avantage de l'amélioration du facteur de puissance

## Installation sans condensateur




- puissance appelée :

$$S = \frac{P}{\cos \varphi_1} = 665 \text{ kVA}$$

- transformateur surchargé (FC = 105%)
- Puissance souscrite = 665 kVA
- Pertes cuivre = (665/630)²*6,5 = 7,24 kW

## Installation avec condensateurs

- objectif : cos $\varphi_2$ = 0,97
- puissance réactive nécessaire :
- Q = P (tan $\varphi_1$ - tan $\varphi_2$) = 315 kvar
- nouvelle puissance appelée :

$$S = \frac{500}{0,92} = 515\text{kVA}$$

Conclusion :

- transformateur soulagé
- 115 kVA disponibles
- facture d'électricité réduite : puissance souscrite = 515 kVA
- Pertes cuivre = 4,3kW → - 40%
- Réduction facture: -0,6%

# Impact économique de la compensation

## Diminution des pertes Joules

$$W_j = \frac{10^3 RL}{U^2} \times \frac{P^2}{\cos\varphi^2} \times t$$

R : résistance linéaire (Ω/km)

P : puissance active (kW)

L : longueur (km)

t : durée annuelle d'utilisation de la puissance P (heures)

Pertes annuelles dans le câble en cuivre :

section : 240 mm²

longueur : 240 m

t = 4 200 heures/an

charge : P = 279 kW

cos φ = 0,74  Wj = 46 kWh/an

cos φ = 0,99  Wj = 25,7 kWh/an

**Réduction des pertes en ligne: -44% !!**

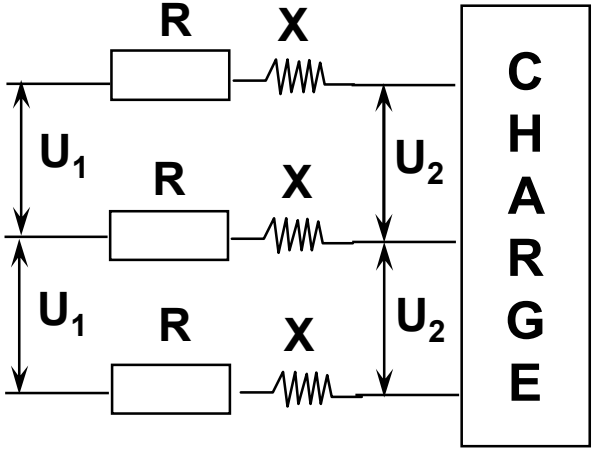
**Gain annuel: 20 kWh → -0,0006%**

**Impact indéniable sur le dimensionnement et l'échauffement des câbles**

**En BT : Impact insignifiant sur la consommation d'énergie**

# Impact technique de la compensation

## Chutes de tension




$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

R = résistance de la ligne

X = réactance de la ligne

P = puissance active de la charge

Q = puissance réactive de la charge

$$\Delta U = U_1 - U_2 \cong \frac{RP + XQ}{U_2}$$

# Diminution des chutes de tension

$$\Delta U = U_1 - U_2 \cong \frac{RP + XQ}{U_2}$$

Exemple :

- **chute de tension sur** une liaison BT
- **Longueur: 240m**
- **conducteur : 1x240mm² en Cuivre disposé en nappe serrée**
- **impedance : Z = R + jX =** 12,34 **+ j 22,8 mOhms**

**tg φ = 0,9 P = 279 kW**
**Cosφ = 0,74 Q = 253 kvar**

$$\Delta U = \frac{12{,}3 \times 279 + 22{,}8 \times 253}{3 \times 230} = 13{,}3V(5{,}8\%)$$

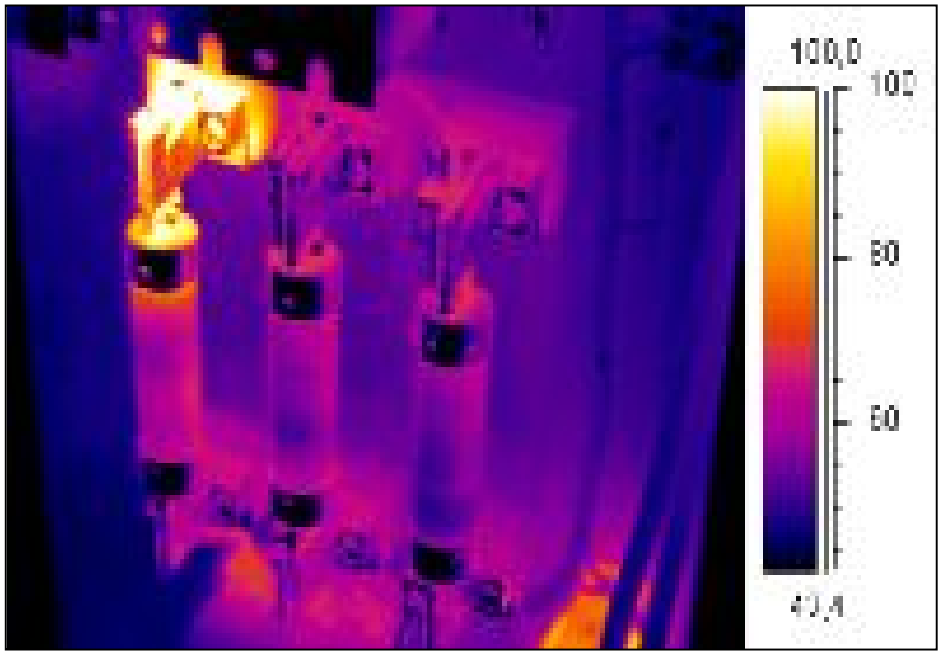
**tg φ = 0,14 P = 279 kW**
**Cosφ= 0,99 Q = 40 kvar**

$$\Delta U = \frac{12{,}3 \times 279 + 22{,}8 \times 40}{3 \times 400} = 6{,}3V(2{,}7\%)$$

# IMPORTANCE DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE ET THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

# Mauvaises connexions: une des principales causes des incidents dans l'industrie

- **Mauvaise connexion**
- **Augmentation résistance**
- **Augmentation Température**

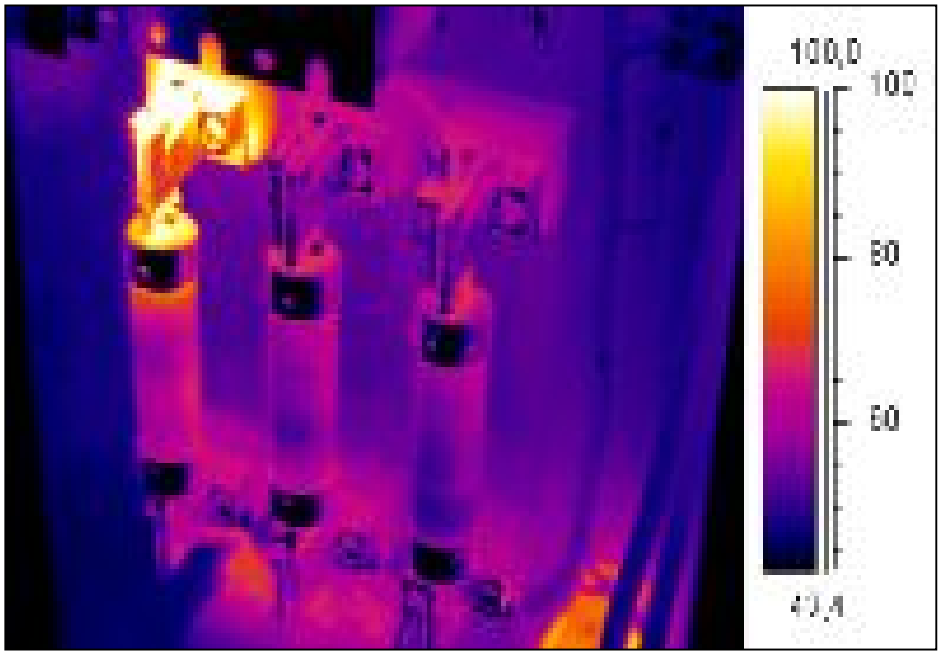


# Impact économique

**Mauvaise connexion**

**$P = R \times I^2$**

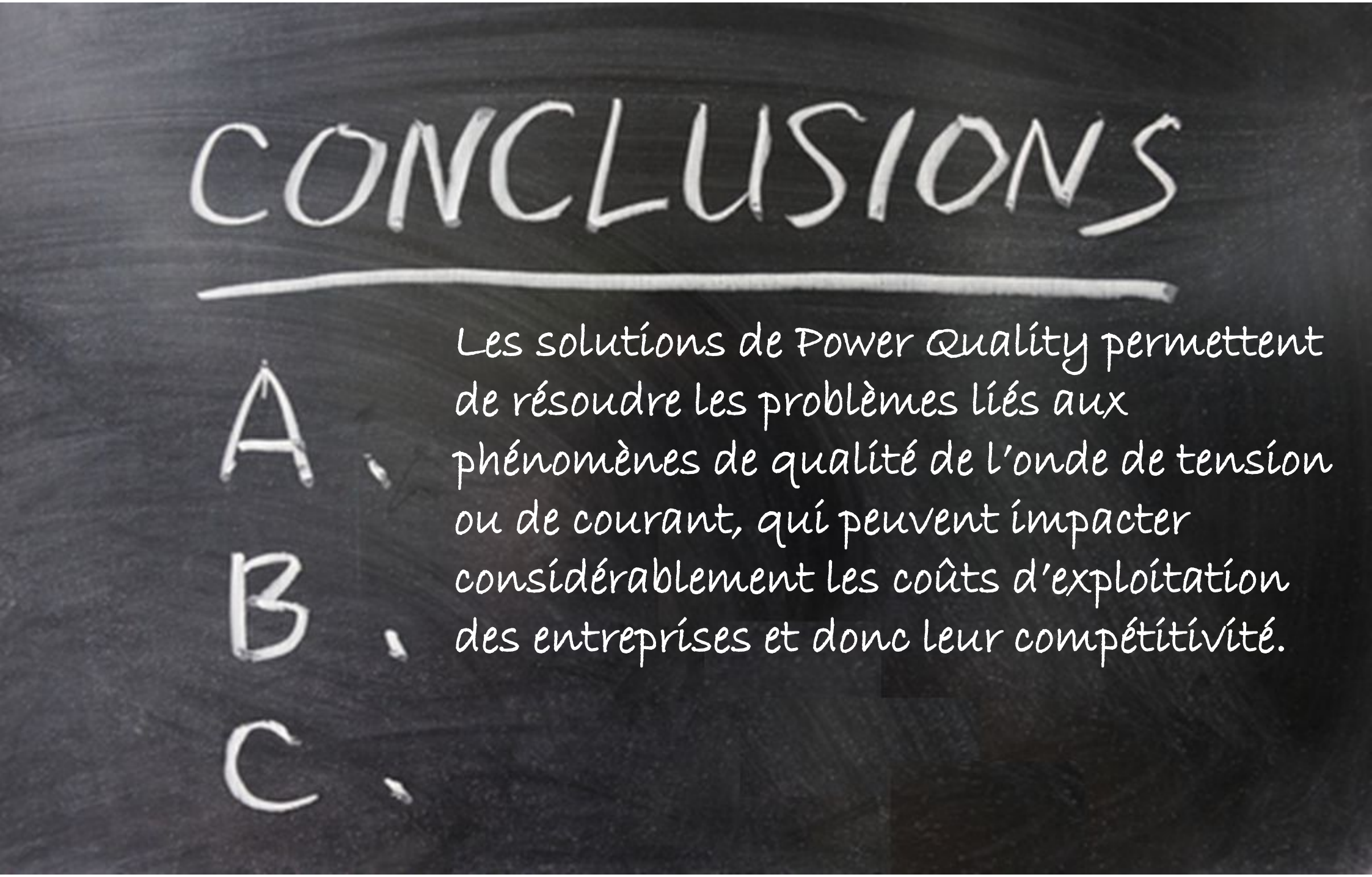
**R = 0,01 ohms**
**I= 1000A**
**Perte : P = 10KW**
**énergie : E = P x t**
**= 7200 kwh/mois**




**Coût annuel : 8640 € !!!**

# Autres conséquences

- Arrêt de production
- Incendie
- Pannes transformateurs
- Coûts élevés


CONCLUSIONS
A .
B .
C .
Les solutions de Power Quality permettent de résoudre les problèmes liés aux phénomènes de qualité de l'onde de tension ou de courant, qui peuvent impacter considérablement les coûts d'exploitation des entreprises et donc leur compétitivité.

# CONCLUSIONS

A. Elles permettent certes de réduire la consommation d'énergie dans certains cas particuliers (compensation d'énergie réactive, filtrage des harmoniques, correction de déséquilibres), mais cette réduction est généralement très limitée.

B.

C.

# CONCLUSIONS

A. Ces solutions devraient être choisies d'abord pour résoudre un problème de qualité d'énergie électrique, quand il existe.

B. La réduction de la consommation d'énergie est un plus. Elle ne devrait donc pas constituer la principale motivation d'achat, car la rentabilité économique dans ce cas ne sera jamais atteinte.

C.

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION