

# Compatibilité



# Electromagnétique

## Chapitre II: Sources de perturbations électromagnétique



# Pourquoi étudier la CEM

*Pour quel produit et à quel moment faut-il tenir compte des problèmes de compatibilité ?*

- Pour tout produit :
  - qui risque de se trouver dans un environnement perturbé.
  - qui est particulièrement sensible.
- Au moment de la conception du produit.

la figure résume l'intervention CEM sur le développement de produit (en fonction du temps).

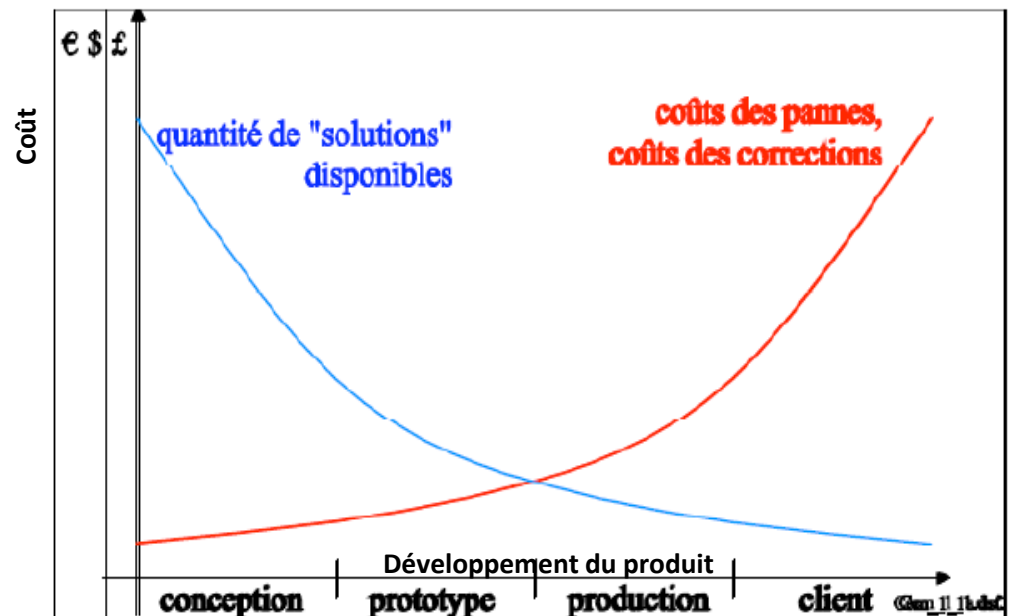
On estime que si la CEM est prise en considération :

- à la conception => coût majoré de 5%.
- après la construction du prototype => coût majoré de 50%.
- quand le produit est sur le marché => coût majoré de 100%.

En Mars 2012 voiture BMW série 5 et 6 : le câble batterie provoque un dysfonctionnement du système de démarrage.

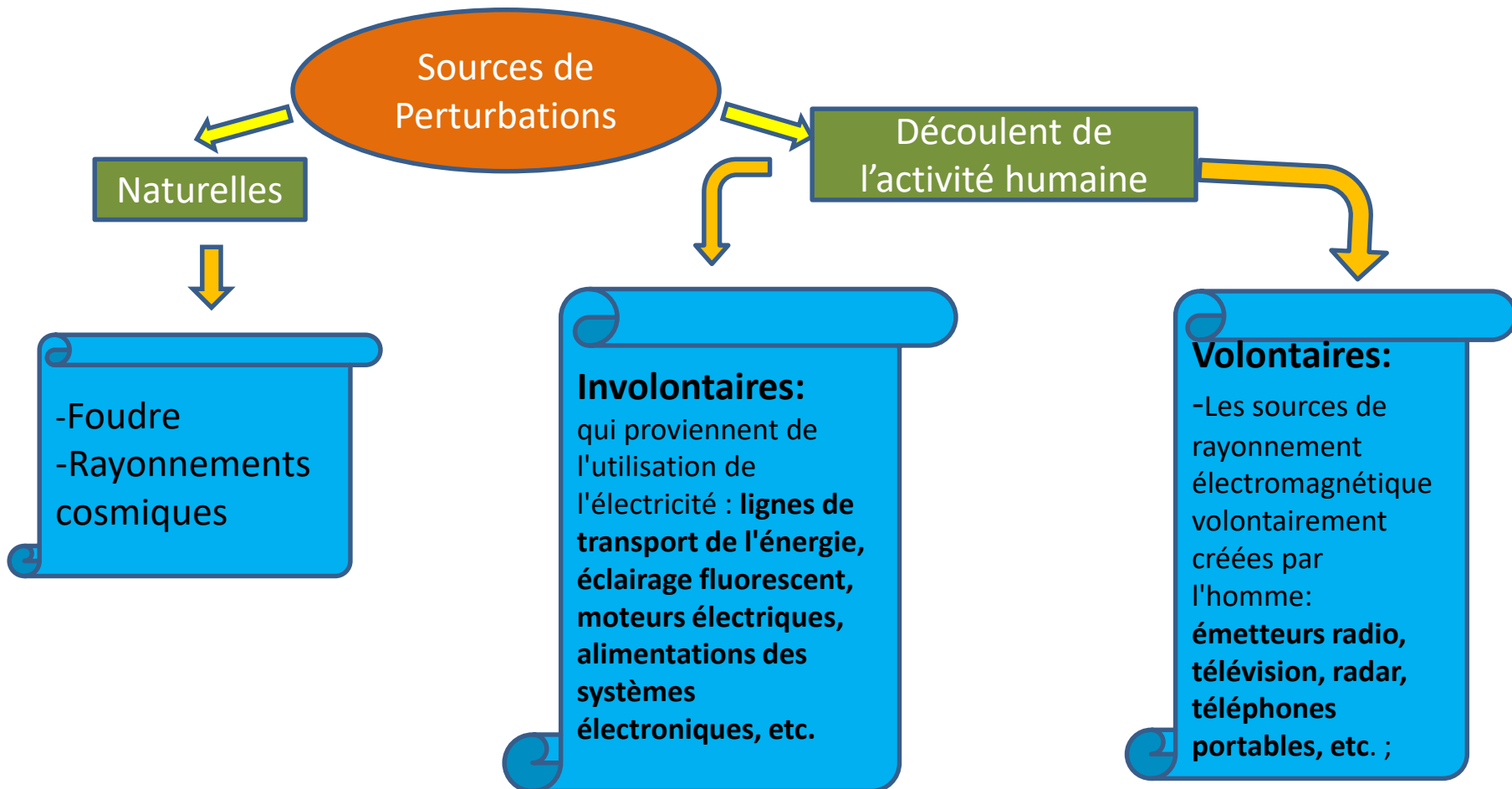
## ■ La CEM ... une affaire de finances !!!

- Où et quand faut-il intervenir en matière de CEM ?



# Sources de perturbations électromagnétique

- La génération des perturbations électromagnétiques provient en général de l'établissement et de la coupure d'un circuit électrique se traduisant par de brutales variations de tension ( $dv/dt$ ) ou de courant ( $di/dt$ ) aux bornes du circuit commandé.



# Classification des perturbations

- Nous proposons trois critères d'analyse des sources de perturbation électromagnétiques en fonction de la nature de perturbations, On peut les classer selon leurs fréquences, le support de transmission et leurs durée.

## 1- Le contenu fréquentiel:

- Les perturbations BF:
- Les perturbations HF:

## 2- Le support de propagation:

- perturbations conduites : courants et ddp
- perturbations rayonnées : amplitudes des champs électriques et magnétiques

## 3- la durée (ou nature temporelle)

- permanentes ou entretenues : circuits analogiques
- Perturbations intermittentes ou transitoires : circuits numériques

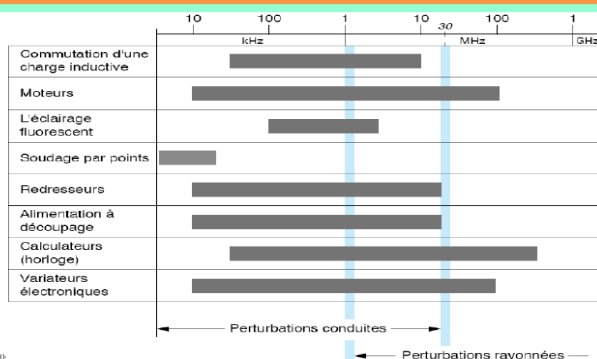
# Contenu fréquentiel

## ■ Perturbations à basse fréquence

- Plage de fréquence : DC ... ~5 MHz
- Couplage : principalement sous **forme conduite** (câbles, ...)
- Durée : souvent **longue** (~10 ms à permanente)
- Energie : l'énergie conduite peut être **importante**  
**dysfonctionnement ou destruction** des appareils « victimes »

## ■ Perturbations à haute fréquence

- Plage de fréquence :  $\geq$  ~30 MHz
- Couplage : principalement sous **forme rayonnée** (air, ...)
- Durée : impulsions **brèves**, temps de montée < 10 ns  
parfois répétitives (redresseurs, horloges)
- Energie : l'énergie conduite est **généralement faible**  
**dysfonctionnement** des appareils « victimes », **non destructif**



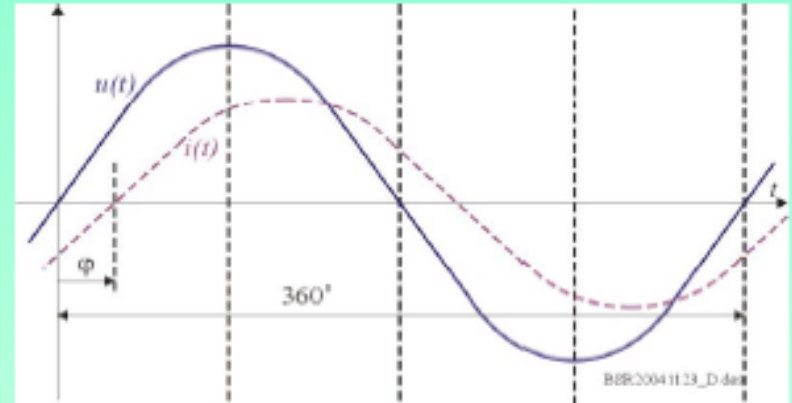
## Les effets de la haute fréquence

### Un peu de théorie

- Tensions et courant sinusoïdaux

$$u(t) = \hat{U} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = \hat{U} \cdot \sin \omega t$$

$$i(t) = \hat{I} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - \varphi) = \hat{I} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

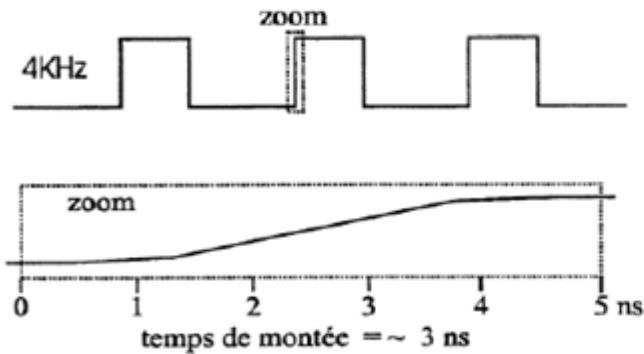


- la **fréquence**  $f$  est le nombre d'alternances par seconde ; elle s'exprime en **hertz** [Hz]
  - on utilise parfois la **pulsation**  $\omega = 2\pi \cdot f$ , exprimée en  $[s^{-1}]$
- la **période**  $T$  est la durée d'un alternance :  $T = 1 / f$  ; elle s'exprime en **seconde** [s]
  - par exemple : si  $f = 50$  Hz,  $T = 20$  ms
- la **longueur d'onde**  $\lambda$ , en [m], dépend de la fréquence et de la vitesse de propagation
  - $\lambda = v / f$ , où  $v$  est la vitesse de propagation [m/s] – 300'000'000 m/s dans le vide

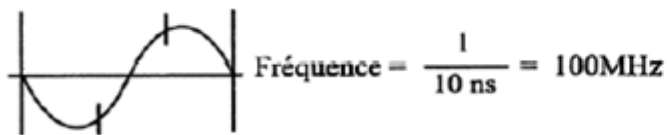
# Contenu fréquentiel:

## La fréquence est plus élevée que l'on pense

Tension hachée à la sortie d'un convertisseur.



$$T_{eq} = \sim 3 \times \text{temps de montée} = \sim 10 \text{ ns}$$



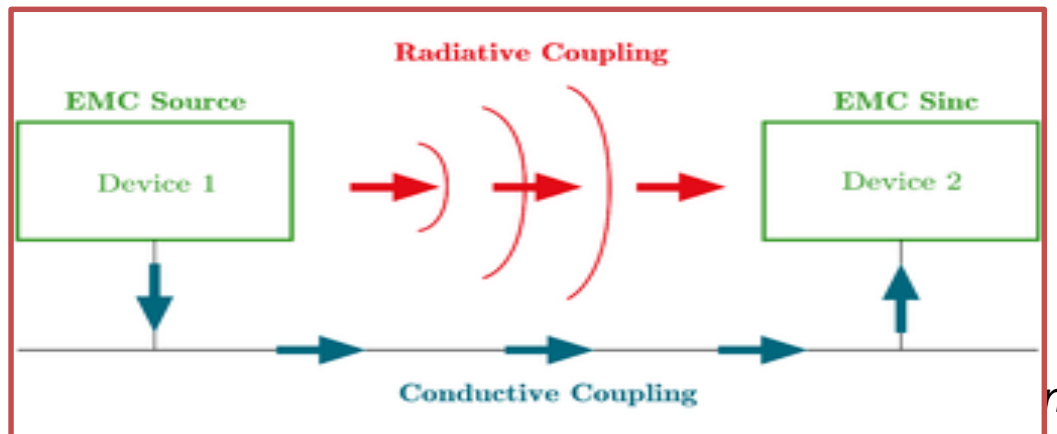
### ■ Fréquence à prendre en compte

- sur le plan de la CEM, la fréquence à prendre en considération n'est pas celle du réseau ou les quelques kHz d'un variateur de fréquence
- il faut considérer le temps de commutation le plus rapide
- la fréquence équivalente d'un flanc de montée correspond à une période égale à ~3 fois le temps de montée



# Support de propagation

- On classe les couplages en deux catégories:
  - couplage par rayonnement: champ électrique, champ magnétique, champ électromagnétique;
  - couplage par conduction : transmission du signal par un conducteur (n'importe quel conducteur, et pas nécessairement un morceau de fil destiné à conduire de courant électrique: un tuyau de climatisation fait parfaitement l'affaire).
- La frontière entre les deux comporte une part d'arbitraire, certaines normes classant certains couplages par champ électrique ou magnétique dans la case « conduction ».



# Support de propagation

- Les perturbations conduites utilisent comme vecteur les matériaux conducteurs :
  - Lignes de données
  - Câbles d'alimentation
  - Réseau de terre déficient
- Les perturbations rayonnées sont transmises par une onde électromagnétique et utilisent comme support les milieux diélectriques :
  - Le plastique
  - Le bois
  - L'air ...

# Champs électromagnétiques

- **Les sources de perturbation et les victimes sont sans liaison galvanique, la perturbation est propagée par une onde électromagnétique composée ainsi :**

- d'un champ magnétique, noté H et d'un champ électrique, noté E

- En haute fréquence ces champs sont couplés

## ➤ Champ magnétique (H en A/m)

- **Origine:** Généré par un courant électrique variable

- **Conséquences:**

- Déformation des images sur les tubes cathodiques

- Bruitage des circuits électroniques analogiques bas niveau

- Bruit dans les boucles de câblage

- Perturbation de certains capteurs, par exemple des capteurs à **effet Hall**



## ➤ Champ électrique (E en V/m)

- **Origine:** Généré par les différences de potentiel variables

Exemple de source : Téléphones mobiles

- **Conséquences:**

- Surtout sensible aux fréquences élevées

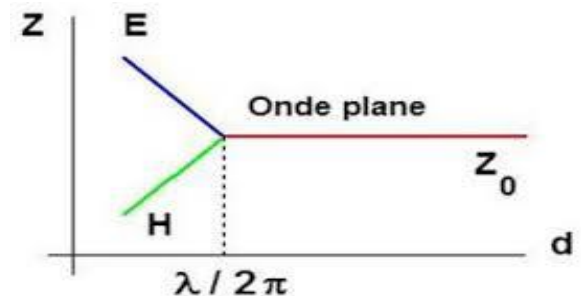
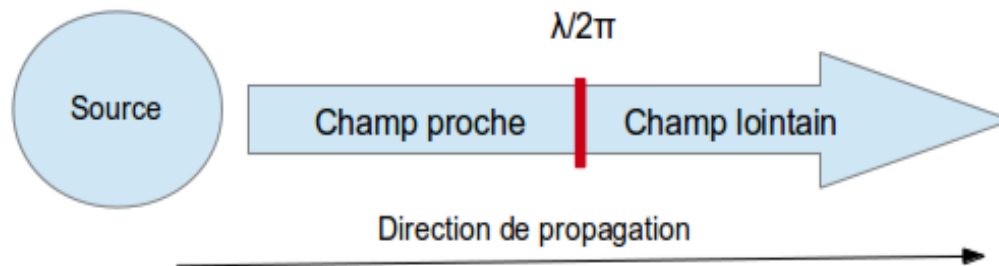
- Perturbation des cartes électroniques analogiques (provoque un processus dans une chaîne de production)

# Evolution d'une onde électromagnétique

- Par ailleurs, pour les couplages par rayonnement, les normes font aussi la distinction entre champs proches et champs lointains:
  - Une source de perturbations électromagnétiques génère au départ souvent soit un champ électrique, soit un champ magnétique; Cependant l'un de ces deux champs est prépondérant (dominant).
  - Mais à une certaine distance de cette source, le champ complémentaire croît, jusqu'à ce que l'onde observée sera une onde électromagnétique "plane" (dite aussi « lointaine »), combinaison d'un champ  $H$  et d'un champ  $E$ .

**Champ proche vs champ lointain:** On distingue deux champs :

- **Le champ dit "proche"** où les deux champs sont faiblement liés : un des champs est plus important que l'autre.
- **Le champ dit "lointain"** où l'onde électromagnétique est plane : les deux champs sont fortement liés.



# Evolution d'une onde électromagnétique

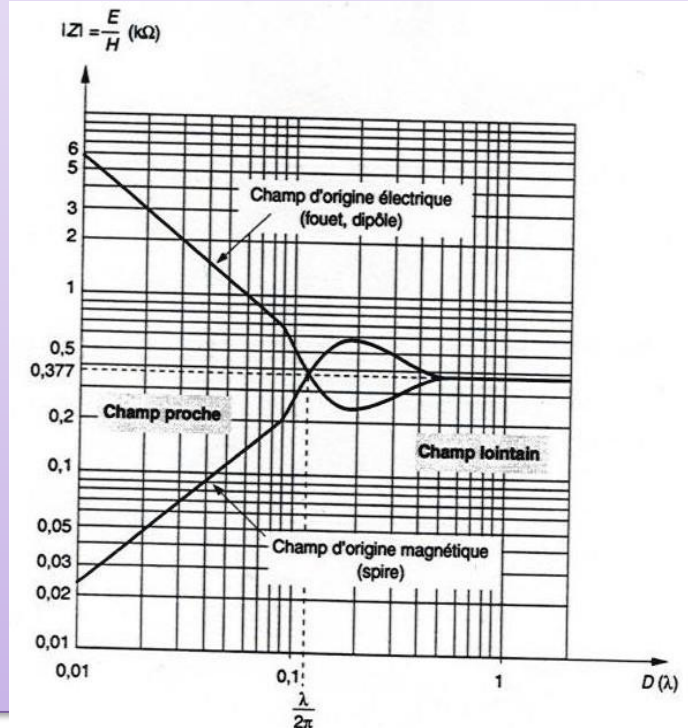
- Pour les fréquences élevées, la longueur d'onde est petite (la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde).
  - Dès que l'onde s'éloigne un peu de la source, elle dépasse la distance  $\lambda/2\pi$ . Dans la pratique, l'onde sera quasiment tout le temps dans le champ lointain, où les deux champs sont très liés l'un à l'autre. Pour les mesures, on étudie donc le champ électromagnétique, qui représente les deux champs électriques et magnétiques.
  - le rapport entre l'intensité du champ électrique sur l'intensité du champ magnétique (nommée impédance) devient constant (377 Ohms).

$$Z_0 = E/H = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} \quad \text{avec } Z_0 \text{ du vide} = 377 \Omega$$

- Pour les fréquences basses (par exemple, pour le réseau de distribution électrique : 50Hz), on distingue les deux champs puisqu'ils sont indépendants (interaction faible).

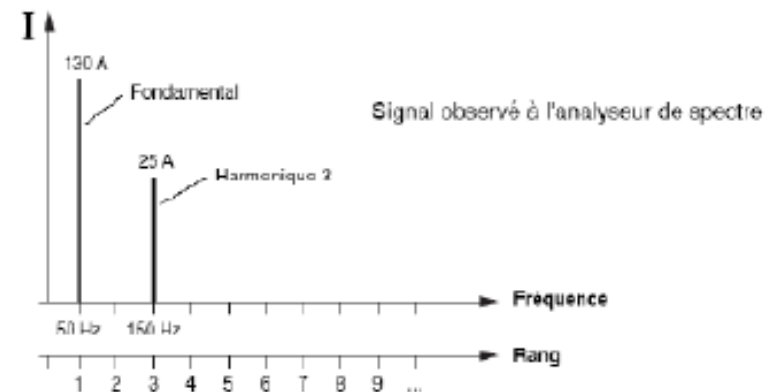
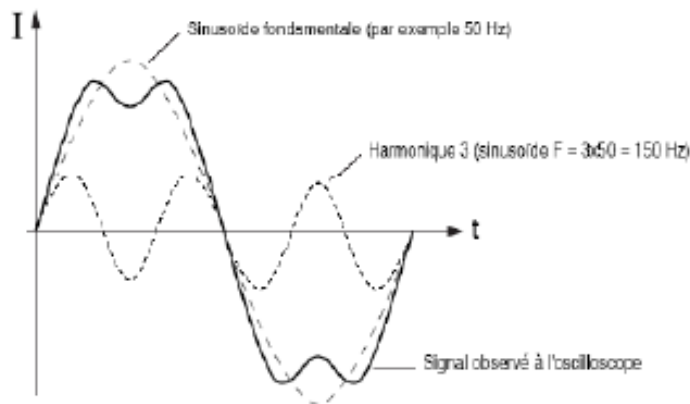
distance limite :  $D = \frac{\lambda}{2\pi}$  où  $\lambda = \frac{v}{f}$

$$D = \frac{0,3 \times 10^9}{2\pi \times f} \quad [\text{m}]$$



# la durée (ou nature temporelle)

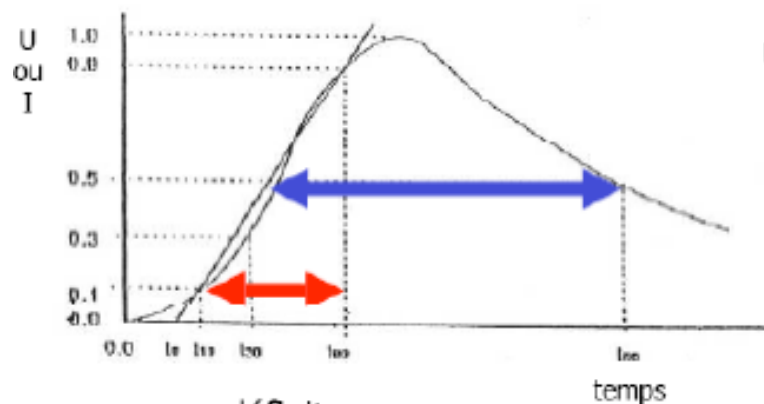
- Les perturbations permanentes sont des signaux périodiques
  - leur forme est généralement quelconque
  - on les décompose en une somme de signaux sinusoïdaux
    - dont la fréquence est un multiple entier du fondamental
    - l'outil mathématique utilisé est la **décomposition en série de FOURIER**



- exemples : émetteur radio/TV, horloge d'un système à microprocesseur, convertisseur de puissance à découpage

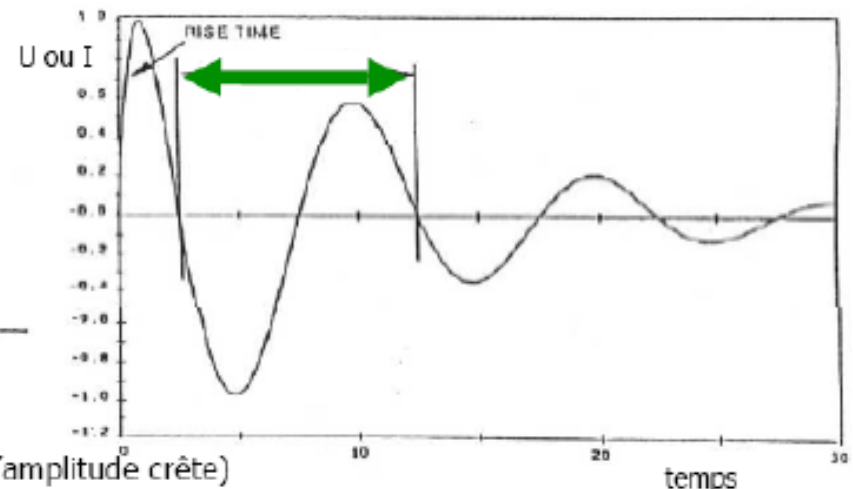
# la durée (ou nature temporelle)

- Les perturbations intermittentes sont des signaux impulsionnels
  - **impulsion unipolaire** ou **oscillation amortie**
    - l'oscillation amortie est la réponse d'un système à une impulsion unipolaire
  - elles peuvent être uniques ou en salves



■ on définit :

- **temps de montée** (10% à 90% de l'amplitude crête)
- **durée** de l'impulsion unipolaire (à 50% de l'amplitude)
- **période** de l'oscillation amortie et taux d'amortissement



- exemples d'impulsions uniques : foudre, décharge électrostatique
- exemples d'impulsions en salves : rebonds des interrupteurs sur charge inductive

# Classifications des perturbations électromagnétiques

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension, on distingue d'autres familles de perturbations électriques :

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves, surtensions, et flicker),
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter-harmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

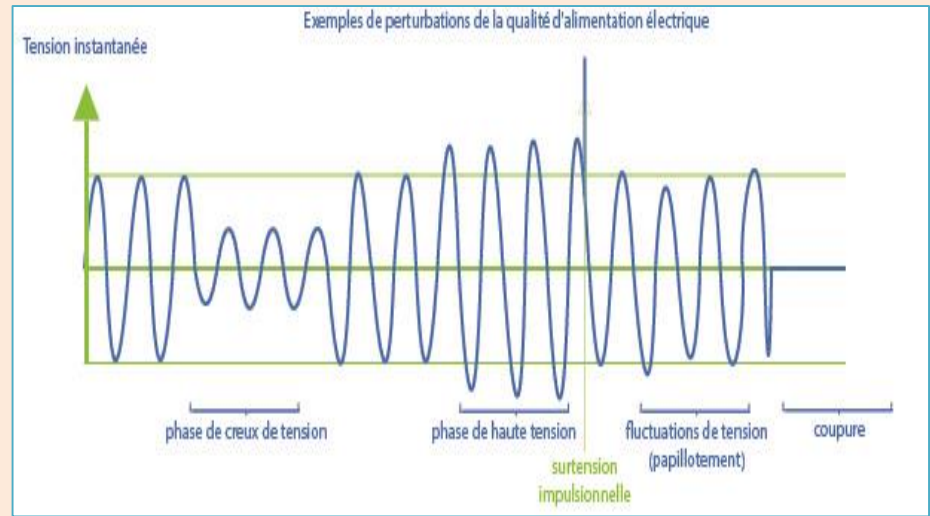
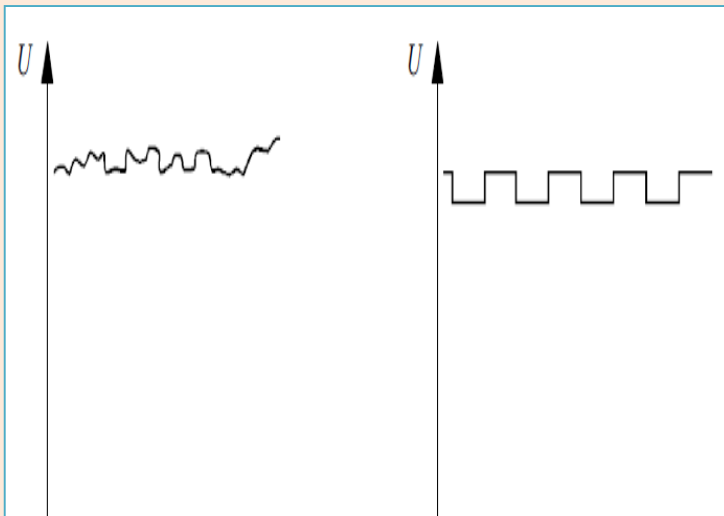


# Variations rapide et fluctuations de tension

## Description du phénomène :

les fluctuations de tension peuvent être décrites comme variation périodique ou aléatoires de l'enveloppe de la tension, Leur amplitude est inférieure à 10 % de la tension nominale.

Sur ces variations, il faut différencier les fluctuations de tension des variations lentes qui sont dues aux variations progressives de la consommation dans les réseaux (dus principalement au branchement et débranchement des charges).



# Fluctuations de tension

**Sources de fluctuation** : dans les réseaux BT les appareils électrodomestiques sont la source principale des fluctuations de tension mais chaque appareil ne gère qu'un nombre limité de consommation.

**En général les principales sources de fluctuation de tension sont les charge industrielle :**

- \* machine à souder à résistance
- \* laminoir
- \* Gros moteur à charges variable
- \* four à arc
- \* installation de soudure à arc

La mise en (hors) service de batterie de condensateur produisant des rations de tension en créneau.

Notons que les fluctuations produites par les activités industrielles peuvent toucher un grand nombre de consommateur à partir de la même source.

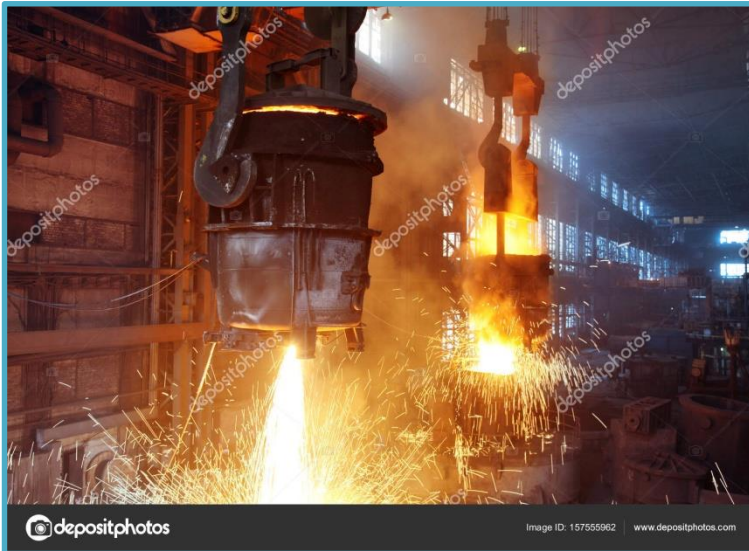
# Fluctuations de tension



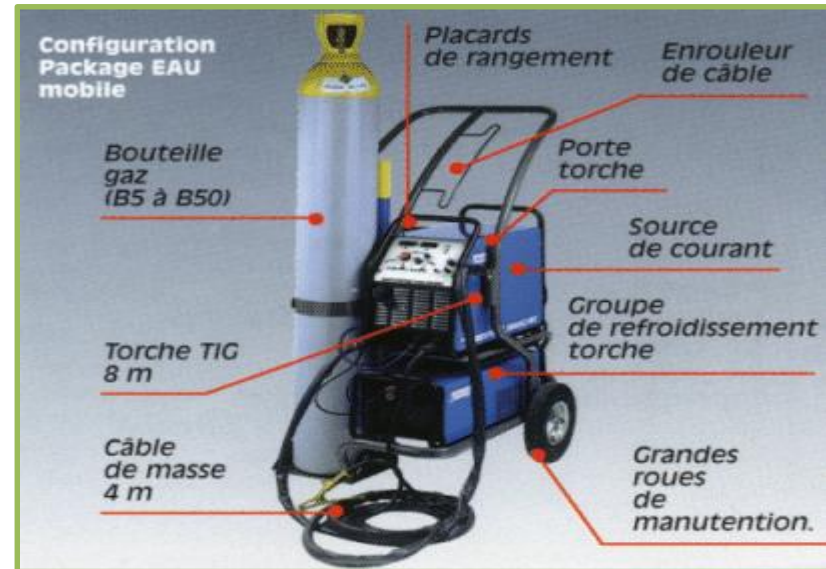
machine à souder à résistance



laminoir



four à arc



installation de soudure à arc

# Fluctuations de tension

## Effets des fluctuations :

- Comme la fluctuation est généralement faible  $< 10\%$ , la plupart des appareils ne sont pas perturbés.
- Le principal désagrément que l'on peut leur attribuer est le flicker ou la fluctuation de luminance des lampes à incandescence.
- Le flicker est défini dans la norme VEl 161-08-13 comme une impression d'instabilité de la sensation visuelle due à un stimulus (excitation) lumineux dont la luminosité ou la couleur fluctuent dans le temps.
- Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en provoquant une fatigue visuelle et nerveuse.
- Toute fois, il existe un seuil de susceptibilité en dessous duquel le flicker n'est pas visible.

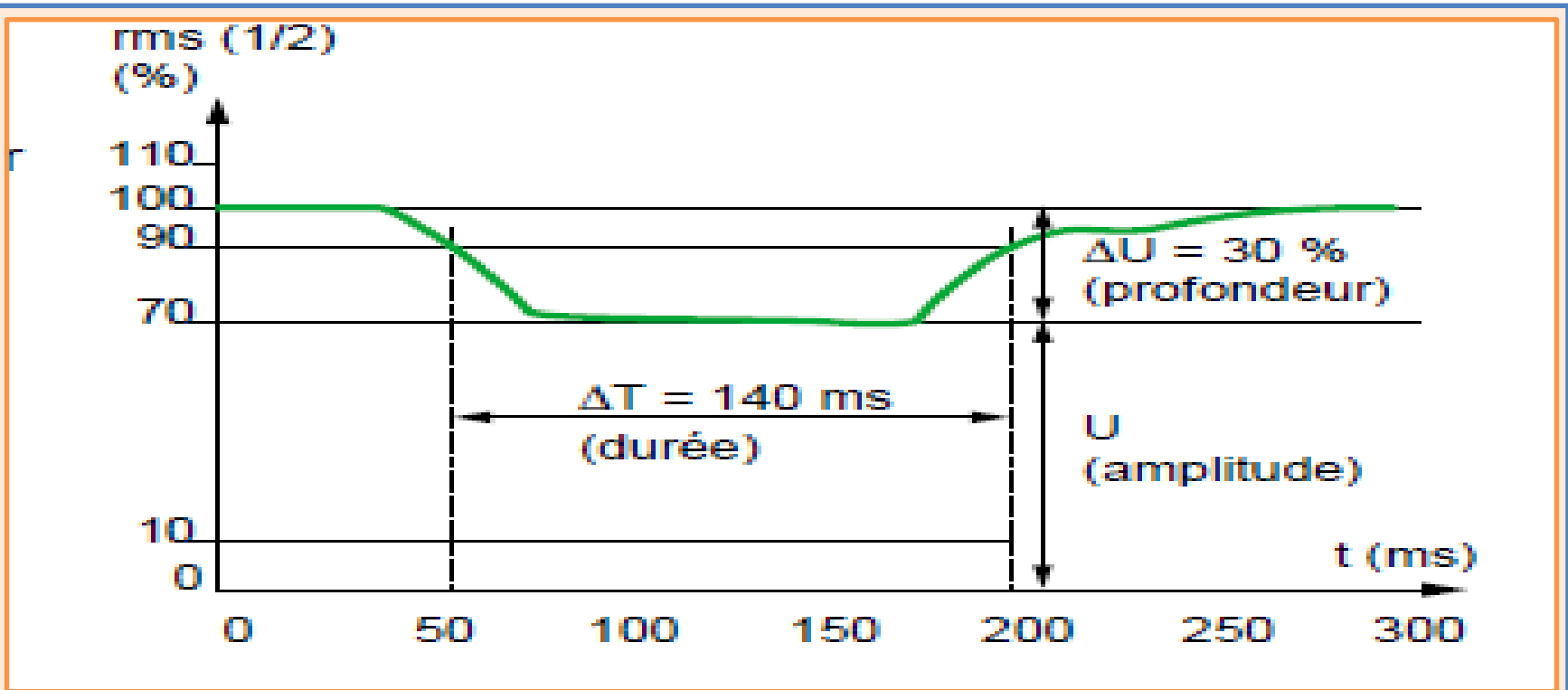
# creux de tension et coupures brèves

- Un **creux de tension** est une baisse brutale de la tension comprise entre **90%** et **1%** (par convention) (CEI 61000-2-1) ;(CENELEC EN50160) d'une **tension de référence** ou entre **90%** et **10%** (IEEE 1159) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris **entre la demie période** fondamentale du réseau (10ms à 50 Hz et 15 ms à 60 Hz ) et une **minute**.

$T/2=10$  ms a 50Hz     $T/2=15$  ms a 60Hz.

- La **tension de référence** est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée pour les réseaux MT et HT.

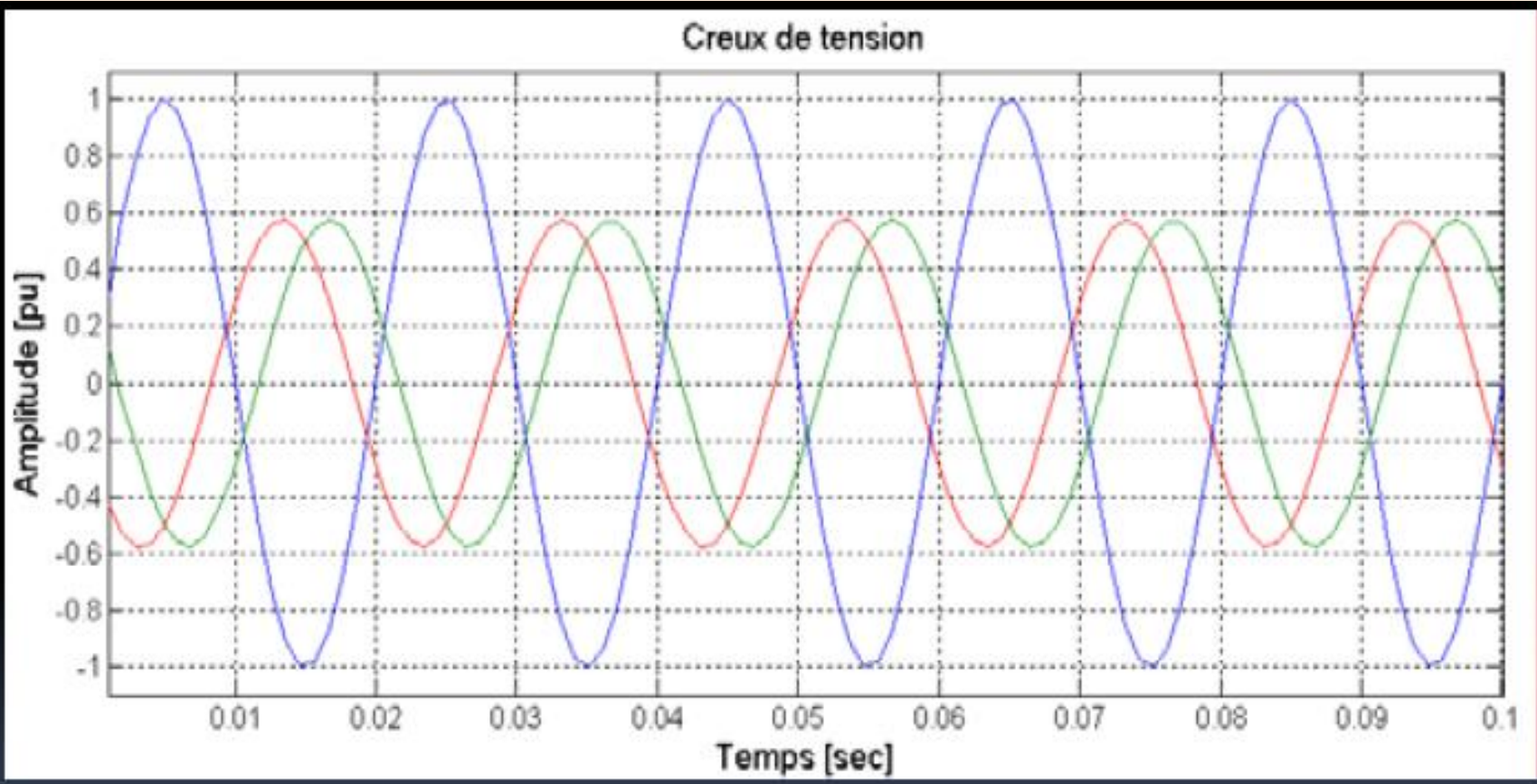
# Creux de tension et coupures brèves



- Habituellement la méthode utilisée pour détecter et caractériser un creux de tension est le calcul de la valeur efficace  $\langle rms \frac{1}{2} \rangle$  du signal sur une période du fondamental toutes les demi-périodes (1/2 peut être demi période).

- les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont donc sa **profondeur  $\Delta U$**  ou (son amplitude :  $U$ ) et la **durée  $\Delta T$**  définie comme le laps de temps pendant lequel la tension de référence inférieure à 90% ( $\Delta U = 10\%$ ).

# Creux de tension et coupures brèves

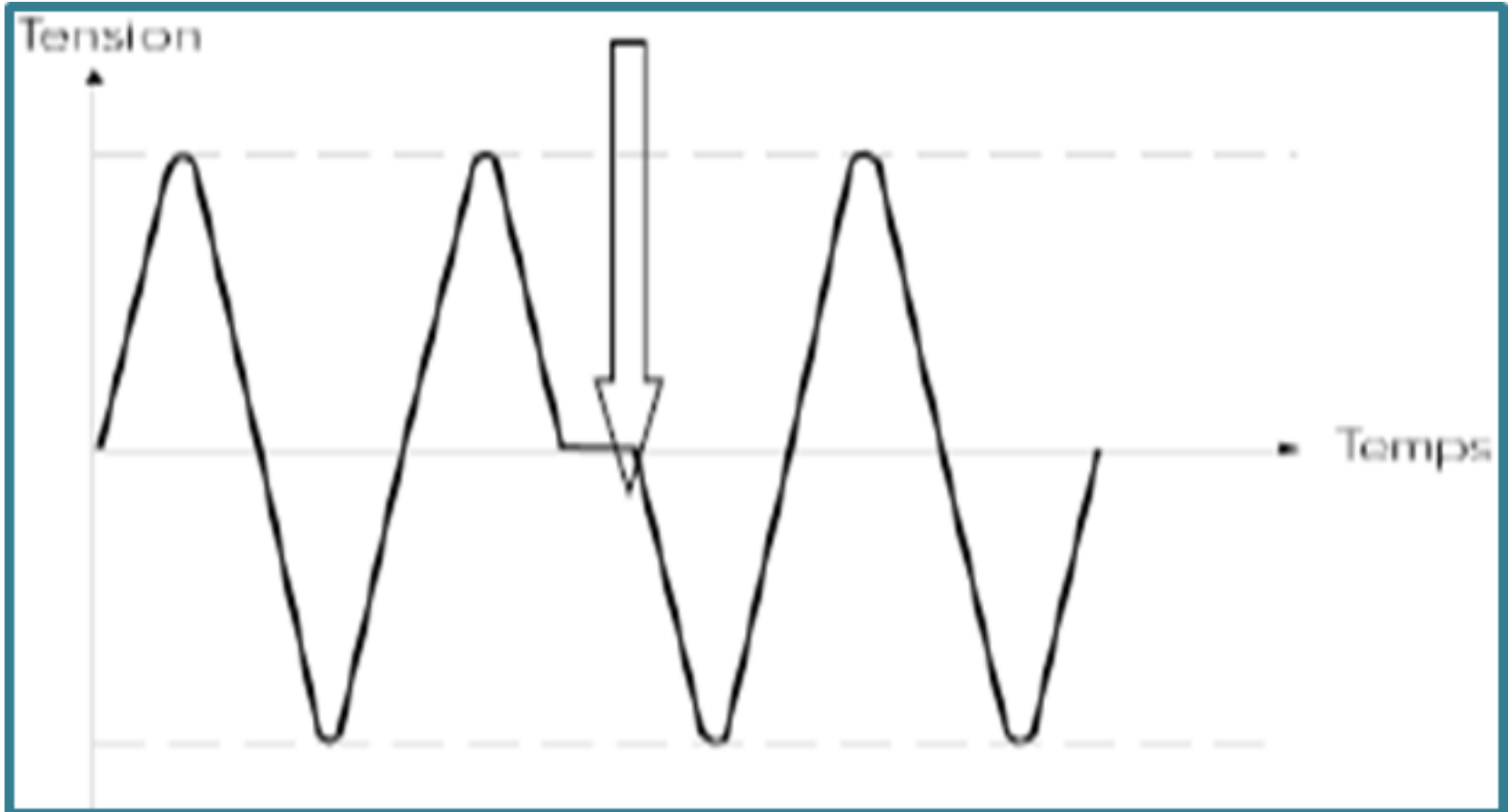


# Creux de tension et coupures brèves

- les coupures brèves sont un cas particulier de creux de tension.
- Une *coupure brève* représente une chute de tension de profondeur  $>90\%$  pour IEEE et  $>99\%$  pour CEI et CENELEC.
- Elles sont caractérisées par un seul paramètre: la durée .
- Les coupures brève sont de durée inférieure à 3mn (CENELEC) et 1mn (CEI, IEEE). DR
- Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur sensibilité et de nombre d'appareillages présents dans les réseaux.
- Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes.



# Creux de tension et coupures brèves



**Microcoupure de tension (secteur)**

# Variations lentes de tension

- **Causes**

- Elles sont dues aux variations de charge sur le réseau de distribution.

- **Conséquences**

- Chute de tension pour les abonnés situés près de gros consommateurs d'énergie.
- Surintensité ou surconsommation à puissance constante.

# Surintensions

- **Surintensions d'origine humaine**

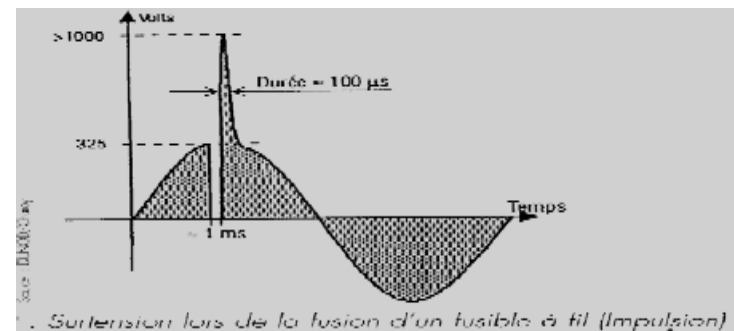
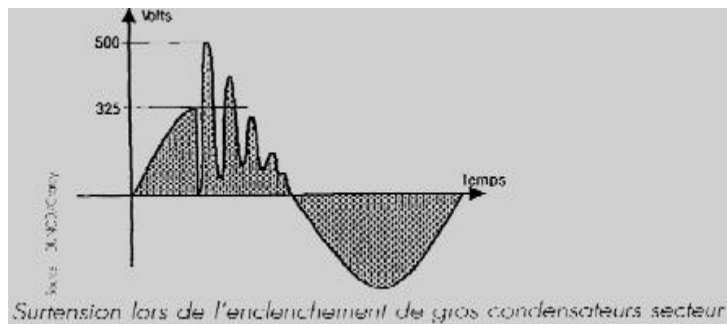
- Elles sont créées localement et leur énergie peut se compter en centaines de joules

- **Causes**

- Résonances de circuits inductifs et capacitifs.
- Délestage du réseau
- Fonctionnement d'une protection (ouverture d'un disjoncteur, ...)

- **Conséquences**

- La surtension provoque l'endommagement de circuits voisins



## Surintensions d'origine humaine

# Décharges électrostatiques

-Par frottement, des charges électriques peuvent s'accumuler et engendrer des potentiels très élevés. Quand la décharge se produit (DES), un courant de forte valeur circule et peut endommager des circuits fragiles.

## ■ Les charges électrostatiques non atmosphériques résultent de l'échange d'électrons par frottement

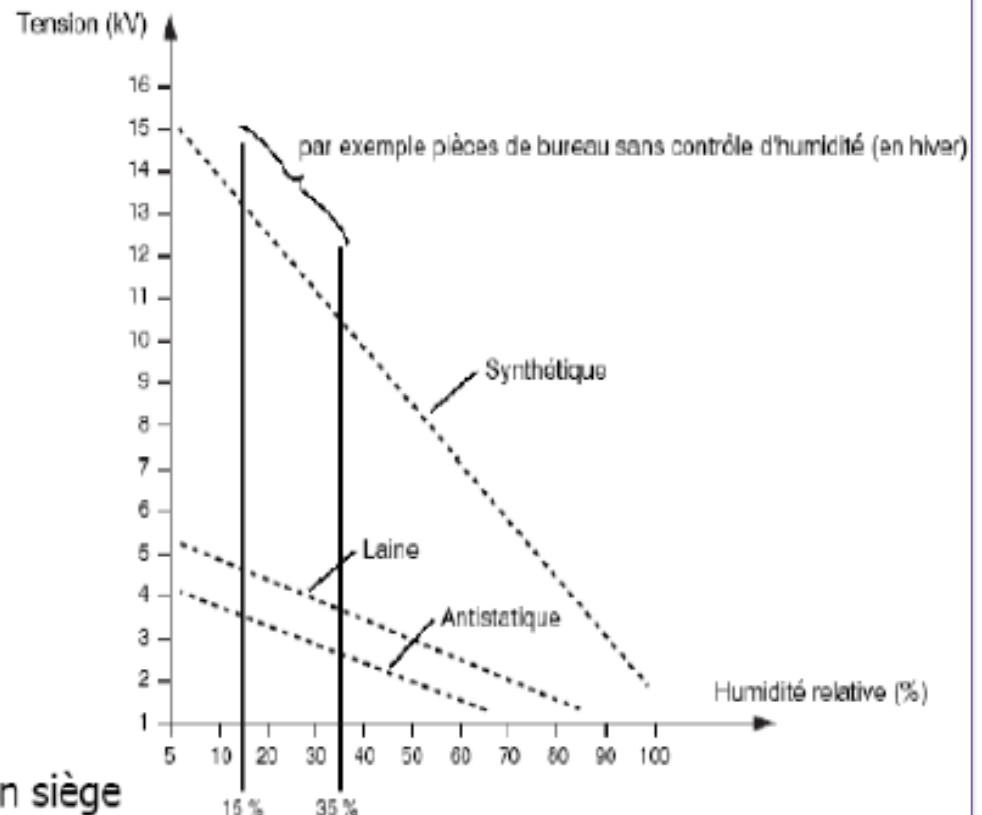
- entre matériaux
- entre le corps humain et son environnement

## ■ Ce phénomène est favorisé par

- les **matériaux synthétiques**
- une **atmosphère sèche** (local chauffé en hiver)

## ■ Une personne peut se charger

- en marchant sur une moquette
- par frottement des habits sur son siège



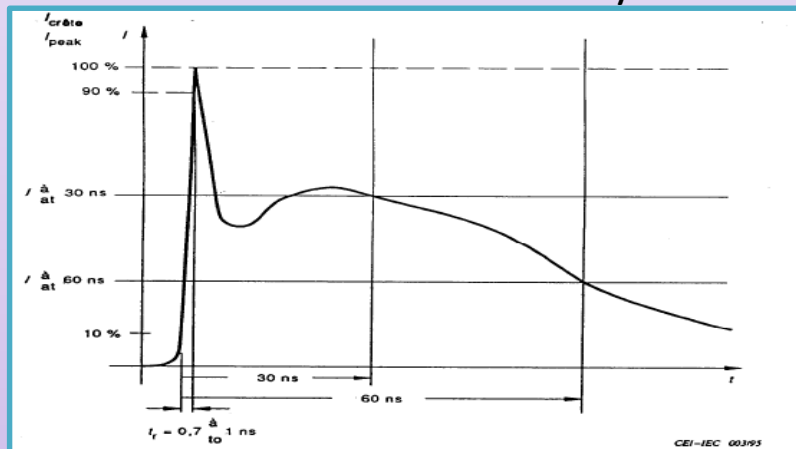
# Décharges électrostatiques

- **Causes**

- Transfert de charges électriques entre un homme et le système.
- Tensions de quelques kV courantes

- **Conséquences**

- Risques de destruction de composants fragiles (diode, microprocesseur....)
- Vieillessement prématuré des composants
- Arrêt ou remise à zéro des systèmes



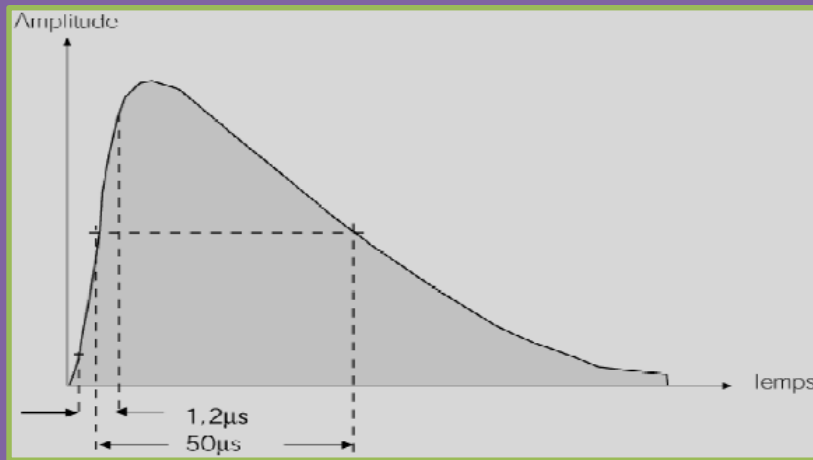
Electricité Statique\_un danger quotidien.mp4

- Porter des gants/bracelets métalliques raccordés à la masse pour manipuler les circuits.

# Surtensions atmosphériques

## Caractéristiques

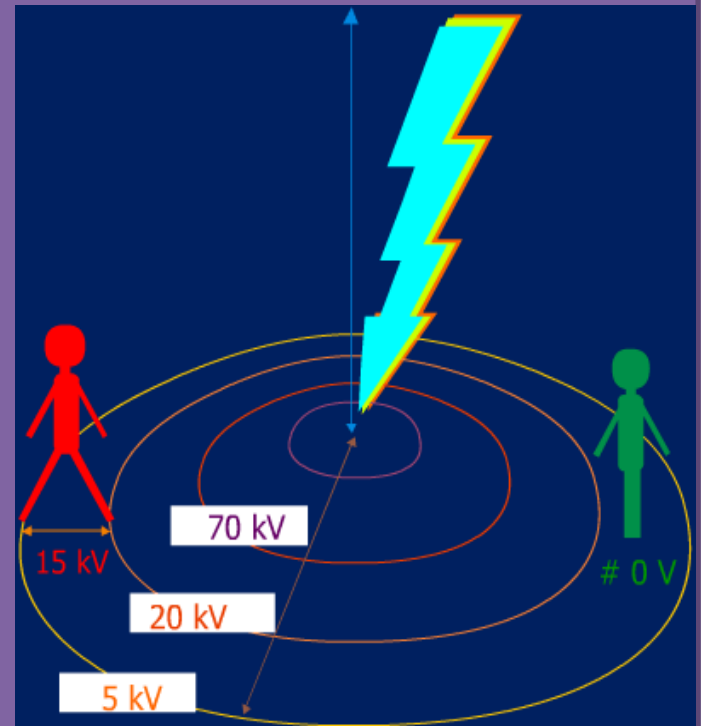
- la foudre est un **arc électrique** entre deux nuages ou entre un nuage et le sol
- l'arc s'établit lorsque le potentiel atteint 100 à 1'000 MV
- les parties ayant été chargées électriquement, il y a éclatement de l'air (un isolant), ce qui produit un parcours ionisé entre les deux parties chargées



## Effets

- destruction ou dysfonctionnement
  - des appareils connectés à des lignes aériennes
  - des appareils mis à masse, à cause de l'effet de pas

«La **tension de pas**» est la **tension** entre les pieds d'une personne se tenant debout près d'un point d'injection du courant à la terre.



# Perturbations harmoniques

- Les composantes sinusoïdales d'un signal de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale s'appellent harmoniques. L'harmonique de fréquence  $kf_0$ , où  $f_0$  est la fréquence fondamentale et  $k$  est un nombre réel positif est dit de rang  $k$ .
- Les composantes sinusoïdales dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal sont nommées les *inter harmoniques*.
- Les composantes sinusoïdales, dont la fréquence est inférieure à la fréquence fondamentale sont appelées *infra harmoniques*.

Les perturbations harmoniques sont dues à l'insertion au réseau des charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, etc.).

# Perturbations harmoniques

## - Les principales sources d'harmoniques:

Ce sont des charges, il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

### Les charges industrielles:

- équipements d'électronique de puissance : **variateurs de vitesse, redresseurs** à diodes ou à thyristors, **onduleurs, alimentations à découpage** ;
- **charges utilisant l'arc électrique** : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents).
- **Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques** et les

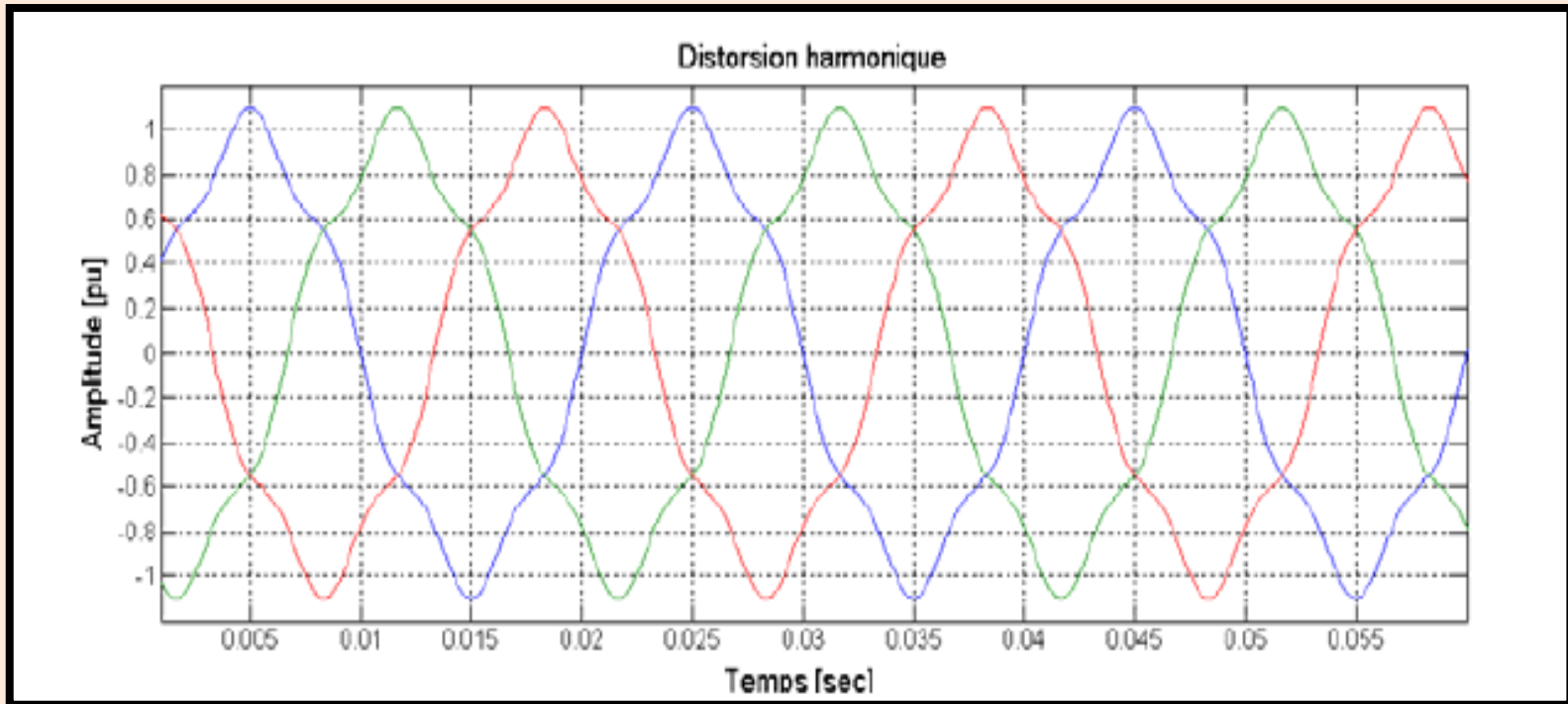
**Les charges domestiques** munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage : téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateur.



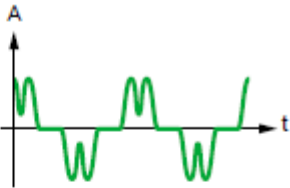
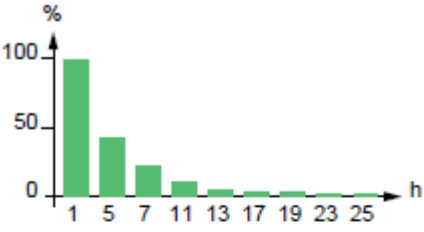
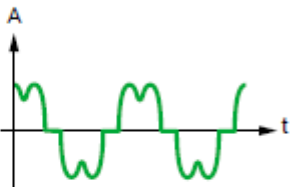
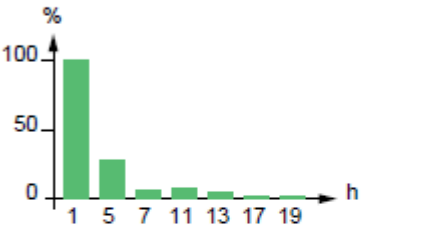

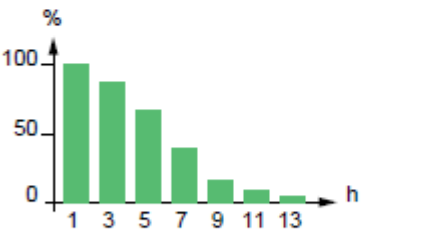

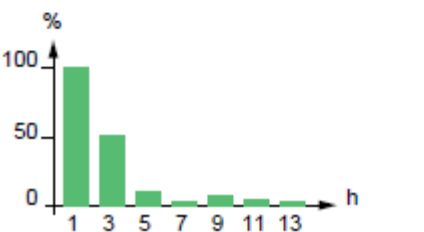
# Perturbations harmoniques

**Conséquences:** Les harmoniques sont des perturbations:

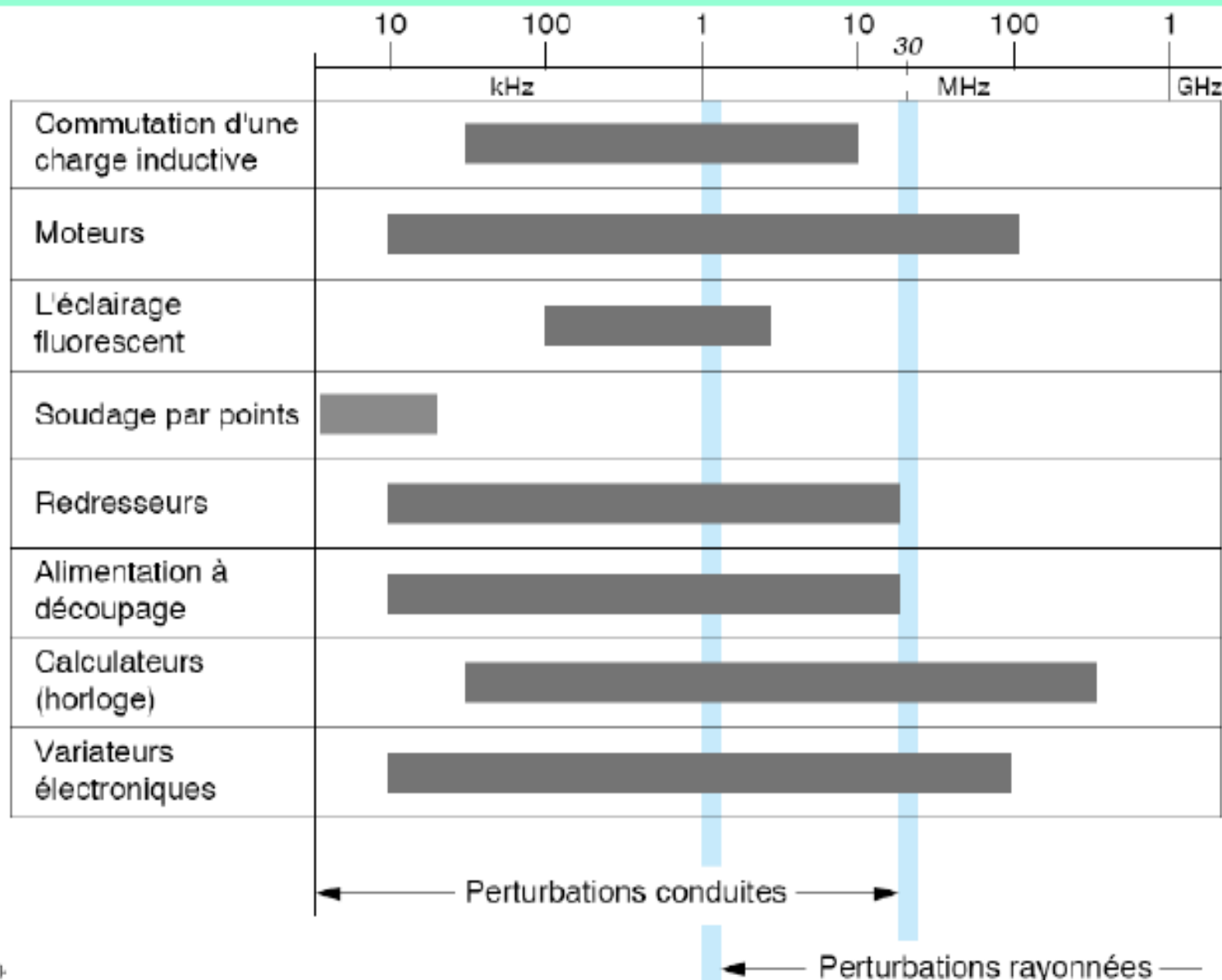
- Ils déforment la tension du réseau
- Échauffement des câbles (fil du neutre en triphasé )
- Vieillesse prématuré des composants électroniques
- Ils consomment de l'énergie inutilement



# Perturbations harmoniques

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

# Répartition spectrale des perturbations



# Décibels

Les grandeurs utilisées en CEM sont souvent exprimées en quantité logarithmique dB (décibel). Ceci est dû d'une part au fait que les calculs deviennent plus simples. D'autre part, dans les problèmes d'interférences, il est souvent nécessaire de comparer des signaux de très grande et de très faible amplitudes. **Le rapport des amplitudes se transforme alors en leur différence en dB.**

Le dB représente un rapport logarithmique de deux valeurs. Il est donc sans unité.

Initialement, le dB a été utilisé pour exprimer le rapport de deux puissances  $P_1$  et  $P_2$  :

$$r = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{U_1^2 / R}{U_2^2 / R} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{U_1}{U_2} \right)$$

où  $U_1$  et  $U_2$  sont les tensions associées aux puissances  $P_1$  et  $P_2$ , déterminées aux bornes de la même résistance  $R$ .

Si le rapport se réfère à une valeur spécifique de référence, par exemple  $U_2 = 1 \mu\text{V}$ , on dit alors que la tension est exprimée en  $\text{dB}\mu\text{V}$  :

$$U_1 (\text{dB}\mu\text{V}) = 20 \log_{10} (U_1 (\mu\text{V}))$$

# Décibels

*Les valeurs de références communes dans la CEM :*

<b>Grandeur</b>	<b>unité</b>	<b>Valeur de référence</b>
Tension	$\text{dB}\mu\text{V}$	$\mu\text{V}$
Courant	$\text{dB}\mu\text{A}$	$\mu\text{A}$
Puissance	$\text{dBmW}$	$\text{mW}$
Champ E	$\text{dB}\mu\text{V/m}$	$\mu\text{V/m}$
Champ H	$\text{dB}\mu\text{A/m}$	$\mu\text{A/m}$