

Ce travail est le fruit d'une étroite collaboration avec le milieu industriel. Il répond à un besoin de formation clairement identifié et repose sur une forte complémentarité entre l'expérience et le savoir-faire industriel de M. G. GAY, responsable de la formation CEM de l'Institut Schneider formation et l'approche pédagogique de M. Y. PELLICIER, enseignant au lycée Pablo Neruda de Saint Martin d'Hères.

Le document est composé d'un article de vulgarisation sur les perturbations électromagnétiques basse et haute fréquence et la présentation d' HARMOCEM, un banc d'étude développé pour répondre au besoin de formation.

<i>Etude des phénomènes Harmoniques Basse Fréquence</i>	<i>p 3</i>
<i>Etude des phénomènes Harmoniques Haute Fréquence</i>	<i>p 11</i>
<i>Présentation du Banc HARMOCEM</i>	<i>P 17</i>
<i>Extrait du manuel des activités pédagogiques</i>	<i>p 23</i>

# Les perturbations électromagnétiques basse et haute fréquence

*Cet article a pour objectif de présenter les phénomènes électromagnétiques basse et haute fréquence et de proposer les principales solutions industrielles permettant d'y remédier.*

- Les perturbations harmoniques sont situées dans un spectre basse fréquence s'étendant jusqu'à quelques kHz.
- Les perturbations haute fréquence se situent dans un spectre s'étendant jusqu'à plusieurs GHz.

## Définition d'une perturbation électromagnétique

Il s'agit de tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif ou d'un système.

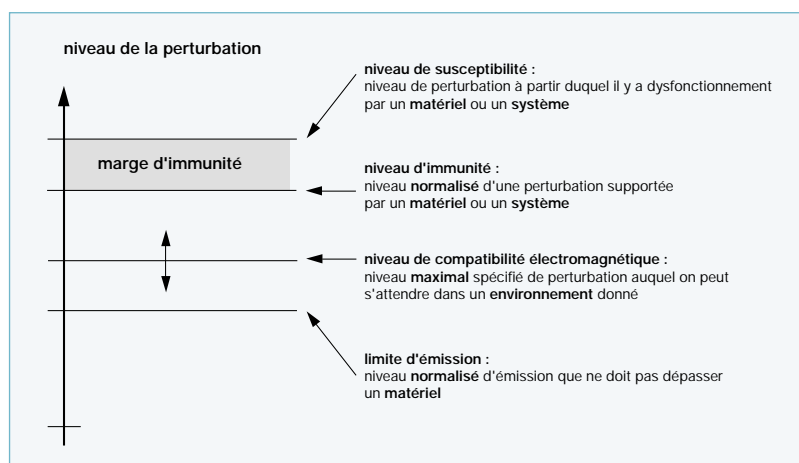
## Les différents niveaux de perturbations rencontrés

**p.3**

***Etude des phénomènes harmoniques basse fréquence***

**p.11**

***Les perturbations électromagnétiques haute fréquence***



# Etude des phénomènes harmoniques basse fréquence

Le domaine d'application des phénomènes harmoniques basse fréquence s'étend jusqu'à environ 2 kHz.

## Origine

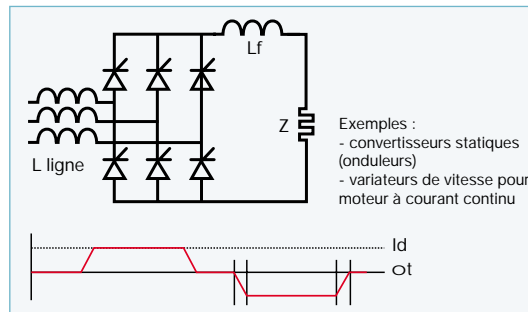
Dans les secteurs industriel et domestique on constate une recrudescence de générateurs d'harmoniques imposant un courant alternatif non sinusoïdal.

Les générateurs d'harmoniques sont des charges non linéaires, c'est-à-dire qu'ils n'absorbent pas un courant sinusoïdal, bien qu'ils soient alimentés par une tension sinusoïdale. Ils comprennent deux types :

### Les redresseurs en courant

Il s'agit des redresseurs en pont de **Graetz** débitant sur une charge inductive.

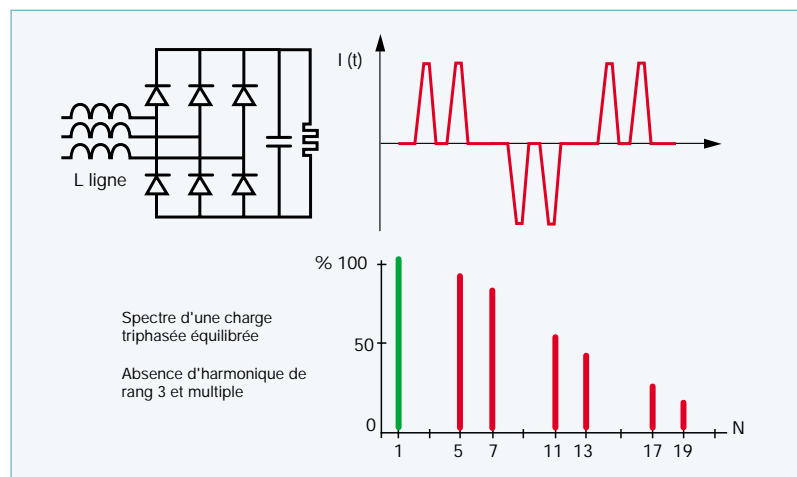
La forme du courant est composée de créneaux liés à la commutation rapide des thyristors.



### Les redresseurs en tension

Il s'agit des redresseurs en pont de **Graetz** chargés par un condensateur.

La forme du courant est composée de pointes élevées et fines liées à la charge du condensateur.



Il est à noter que sur un système monophasé ou triphasé avec neutre câblé le spectre contient des harmoniques de rang 3.

### Exemple

- alimentation à découpage
- variation de vitesse pour moteur asynchrone
- éclairage.

## Quelques définitions importantes

**Rappel du théorème de Fourier (Joseph)**  
mathématicien français né à Auxerre (1768-1830).

Toute fonction périodique de fréquence  $f$  peut être représentée sous la forme d'une somme composée :

- d'un terme sinusoïdal à la fréquence  $f$  de valeur efficace  $Y_1$  (**fondamental**)
- de termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à :
  - $n$  fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces  $Y_n$  (**harmonique**)
  - $n$  multiple entier étant le rang de chaque harmonique
- d'une éventuelle composante continue de valeur  $Y_0$

$$y(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n r^n \sin(n\omega t - \varphi_n) + Y_0$$

$Y_0$  = valeur de la composante continue

$Y_1$  = valeur efficace du fondamental

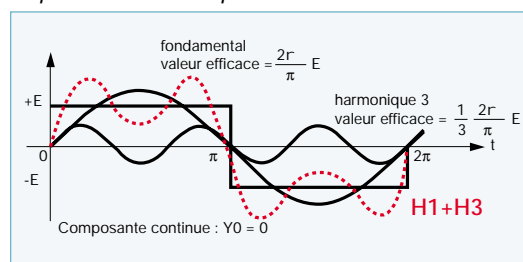
$Y_n$  = valeur efficace de l'harmonique de rang  $n$

$\omega$  = pulsation de la fréquence fondamentale

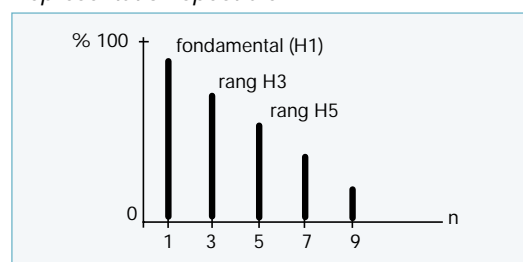
$\varphi_n$  = déphasage de la composante harmonique

## Exemple d'application du théorème de Fourier sur un signal carré

### Représentation temporelle



### Représentation spectrale



Le spectre est observé avec un analyseur de spectre.

*Remarque :* l'amplitude (donc l'énergie) des raies harmoniques décroît en fonction de leur rang.

*Nota :* Nous constatons que le signal résultant de la sommation (H1 + H3) se rapproche du signal carré.

## Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale

La valeur efficace de la grandeur déformée conditionne les échauffements, donc habituellement les grandeurs harmoniques sont exprimées en valeurs efficaces.

Pour une grandeur sinusoïdale :  $V_{eff} = \frac{V_{max}}{r}$

Pour une grandeur déformée et en régime permanent, l'énergie dissipée par effet Joule est la somme des énergies dissipées par chacune des composantes harmoniques, soit l'application de la formule générale :

$$y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2 dt} \quad \text{donne avec la représentation harmonique :} \quad y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}$$

### Exemple d'application

IH1 = 104 A ) Valeurs données par l'analyseur  
IH3 = 30 A ) de spectre dans l'exemple  
IH5 = 10 A ) du signal carré

$$y_{eff} = \sqrt{104^2 + 30^2 + 10^2} = 109 \text{ A}$$

### Conclusions

Nécessité d'effectuer la mesure de courant avec un ampèremètre RMS (Root Mean Square) intégrant les rangs harmoniques (valeur efficace).

Le calcul de la section des conducteurs sera adapté au courant efficace et non pas au seul fondamental.

## Notion de taux de distorsion

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques : c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental seul.

Taux de distorsion (selon définition donnée par le dictionnaire CEI) : ce paramètre, appelé encore distorsion harmonique ou facteur de distorsion, représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental Y1.

$$THD (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (Y_n^2)}}{Y_1}$$

### Exemple d'application (signal carré)

$$THD = 100 \frac{\sqrt{30^2 + 10^2}}{104} = 28 \%$$

## Facteur de puissance et cos φ

Le **facteur de puissance** est le rapport de la puissance active P à la puissance apparente S

$$FP = \frac{P}{S}$$

Le **facteur de déphasage** cos φ1 représente le cosinus de l'angle entre les fondamentaux de la tension et du courant

$$\cos \phi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

P1 puissance active de la composante fondamentale

S1 puissance apparente de la composante fondamentale

### Conclusions

FP = cos φ1 sur une charge linéaire

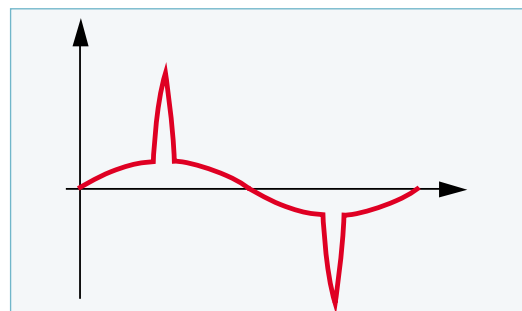
FP ≠ cos φ1 sur une charge non linéaire

- le facteur de déformation FD représente le lien entre FP et cos φ

$$FD = \frac{FP}{\cos \phi_1} \quad \text{donc} \quad FP = \cos \phi_1 \cdot FD$$

- le facteur de crête c'est le rapport de la valeur de crête à la valeur efficace d'une grandeur périodique

$$F_c = \frac{Y_{crête}}{Y_{eff}}$$



# Principaux générateurs d'harmoniques

- Onduleurs, hacheurs.
- Ponts redresseurs : électrolyse, machine à souder.
- Fours à arc et à induction.
- Variateurs de vitesse électroniques pour moteur à courant continu ou pour moteur asynchrone ou synchrone.
- Appareils domestiques tels que téléviseurs, lampes à décharges, lampes fluorescentes à ballast électronique.
- Alimentation à découpage informatique.

Ces équipements connaissent une diffusion croissante, ils entraînent une source de pollution harmonique importante.

# La normalisation en vigueur

## Limites d'émission en courant

Elles sont fixées par la norme CEI 61000-3-2 pour les appareils raccordés au réseau public en basse tension consommant moins de 16 A par phase. Au delà une norme CEI 61000-3-4 est en préparation.

Pour les abonnés "tarif vert" en France, EDF propose un contrat EMERAUDE qui engage ses abonnés à limiter leur niveau de pollution et EDF à fournir une énergie de qualité.

*Nota* : Un "club" FIABELEC en partenariat avec EDF peut servir d'assistance aux industriels.

## Niveau de compatibilité

La norme CEI 61000-2-2 définit des niveaux de compatibilité de tensions harmoniques pour les réseaux publics basse tension et CEI 61000-2-4 pour les installations industrielles basse et moyenne tension.

# Les effets indésirables et les retombées économiques des harmoniques sur les installations

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés.

Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés,
- soit des effets à terme dus aux échauffements.

## Les effets instantanés

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les liaisons et les équipements "courants faibles", **entraînant des pertes d'exploitation.**

Les compteurs d'énergie présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques : par exemple un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3 % avec un taux de 5 % d'harmonique 5 sur le courant et la tension.

Les récepteurs de télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système.

## Vibrations, bruits

Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes. Ils peuvent entraîner une destruction du matériel.

## Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande)

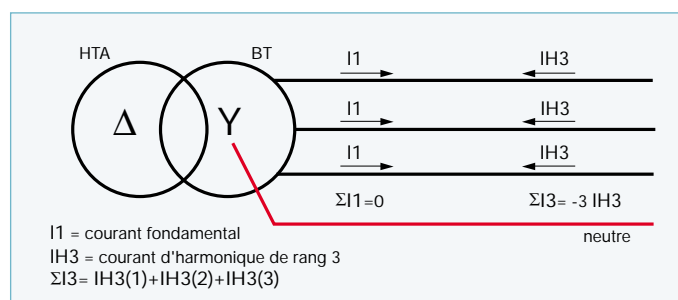
Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés.

## Les effets à terme

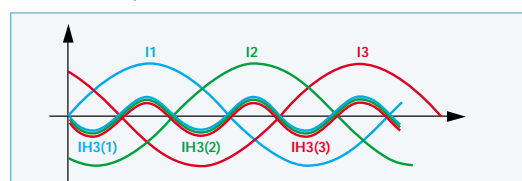
Victimes	Les effets à terme
Les condensateurs	<b>Echauffement, vieillissement</b> Risque de résonance avec le circuit amont (inductance réseau), suite à la circulation de certains rangs harmoniques. Ce phénomène peut entraîner un facteur d'amplification du courant dans le condensateur provoquant sa surcharge et pouvant conduire à son claquage.
Les transformateurs	<b>Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs</b> c Pertes supplémentaires dans les machines, dans leur stator (cuivre et fer) et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) par suite des différences importantes de vitesse, entre les champs tournants harmoniques et le rotor. c Pertes supplémentaires dans les transformateurs dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis et aux courants de Foucault (dans le circuit magnétique). c Couple pulsatoire.
Les câbles et les équipements	<b>Echauffement des câbles et des équipements</b> Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, on peut citer : c l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau ; c l'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable. D'une façon générale, tous les équipements (tableaux électriques) soumis à des tensions ou traversés par des courants harmoniques ont des pertes accentuées et devront faire l'objet de déclassements éventuels.

## Particularités de l'harmonique 3

Les harmoniques de rang 3 étant en phase, ils s'ajoutent algébriquement dans le neutre ; il y a donc surcharge importante sur le neutre notamment en régime déséquilibré.



Il faudra adapter la section des conducteurs.



# Les principaux remèdes envisagés

## Solutions générales

Abaissier les impédances harmoniques

Agir sur la structure de l'installation :

- augmentation de la puissance de court-circuit
- choisir le bon schéma de liaison à la terre ;

éviter le TNC

- utilisation de transformateurs à couplage spécifique (exemple : DY/n<sup>11</sup>)
- confiner les charges polluantes
- déclassement des équipements.

## Solutions de neutralisation

Protection des condensateurs de compensation d'énergie réactive (suite au phénomène de résonance).

- Installation d'inductances anti-harmoniques (LAH)

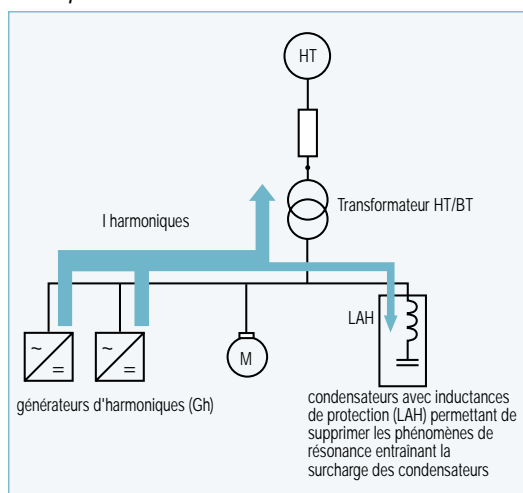
**But** : réaliser l'accord du circuit LAH à une fréquence pauvre en harmonique pour supprimer les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs

**Moyen** : montage en série avec le condensateur d'une inductance dite anti-harmonique (LAH).

**Fréquences typiques d'accord** :

- 135 Hz rang 2,7 si 1<sup>er</sup> rang significatif est 3
- 215 Hz rang 3,8 (BT) si 1<sup>er</sup> rang significatif est 5 en BT
- 225 Hz rang 4,5 si 1<sup>er</sup> rang significatif est 5 en MT.

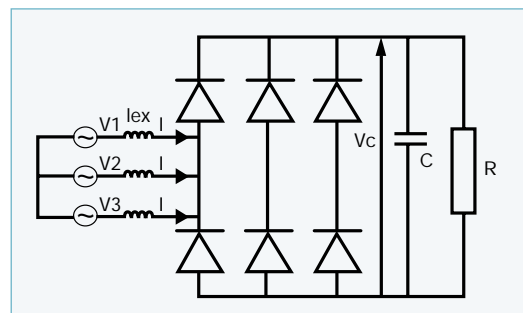
Principe



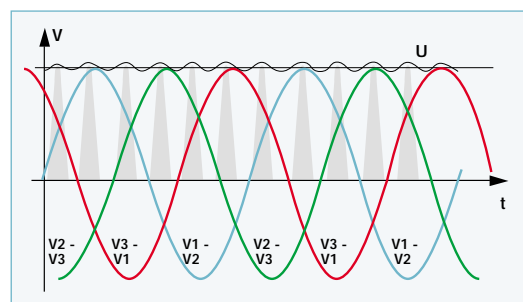
Filtrage anti-harmonique permettant de dépolluer le réseau lorsque le niveau d'harmonique est trop élevé

- Lisser le courant

Schéma de l'étage d'entrée classique des variateurs, alimentations à découpage



La forme et donc le spectre harmonique dépend de L et de C



- Filtrage passif shunt résonnant

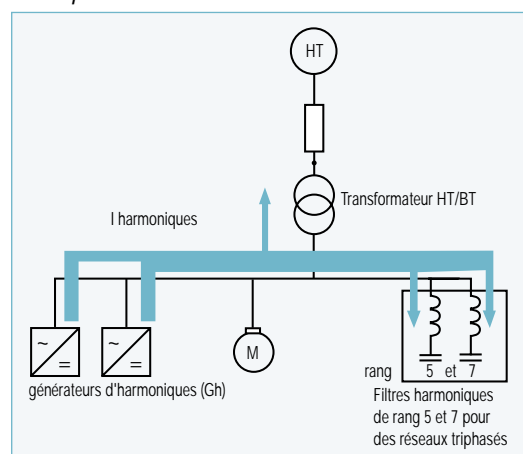
**But** : piéger les harmoniques dans des "courts-circuits harmoniques" appelés filtres d'harmoniques pour réduire la distortion de tension.

**Moyen** : montage en série avec le condensateur d'une inductance accordée sur un rang riche en harmoniques ( $LC\omega^2 = 0$ ).

**Fréquences typiques d'accord**

- 250, 350, 550, 650 Hz (rangs 5, 7, 11 et 13).

Principe

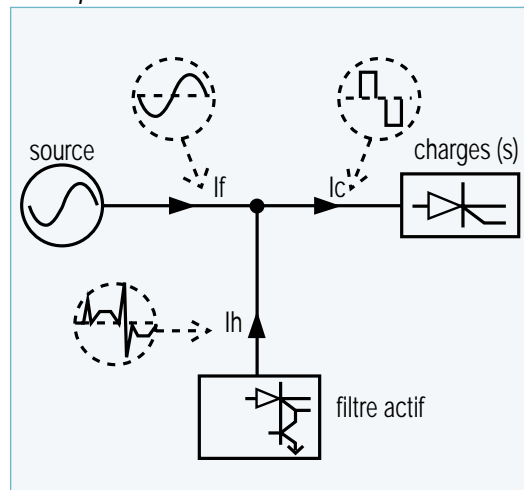


### - Filtrage actif ou compensateur actif

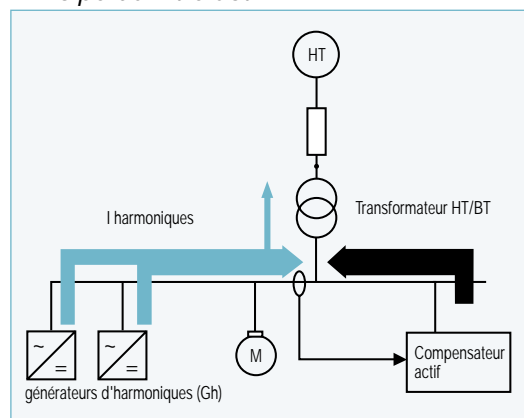
#### Une des définitions

Un filtre actif est un convertisseur statique qui permet d'injecter dans le réseau des harmoniques en opposition de phase et d'amplitude afin que l'onde résultante soit sinusoïdale.

#### Principe



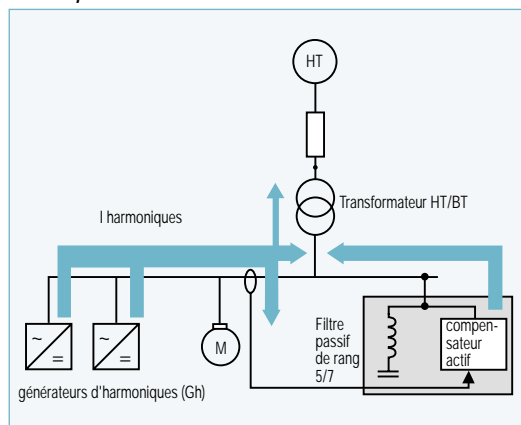
#### Principe du filtre actif



### - Filtrage hybride

- Principe : association des solutions passives et actives permettant la dépollution de tout le spectre. La compensation d'énergie réactive possible.
- Solution bien adaptée à un filtrage "réseau".
- Cette solution permet d'obtenir un compromis technico-économique idéal car il permet de réduire la puissance de dimensionnement du filtre actif.

#### Principe



*Nota :* le filtre passif traitera les rangs 5 et 7 par exemple, et le compensateur actif les rangs suivants.



# Etude d'un cas de pollution par des harmoniques de courant

## Les faits : match de football

Le Mans-Guingamp, pour le compte du championnat de France de 2<sup>ème</sup> division.

- 21 h 44 : Le Mans - 2, Guingamp - 1
- 21 h 45 : panne d'éclairage, impossibilité de réenclencher le disjoncteur de tête
- 22 h 00 : match définitivement arrêté
- décision : match perdu pour Le Mans sur "tapis vert"

## L'étude

### Explication du problème

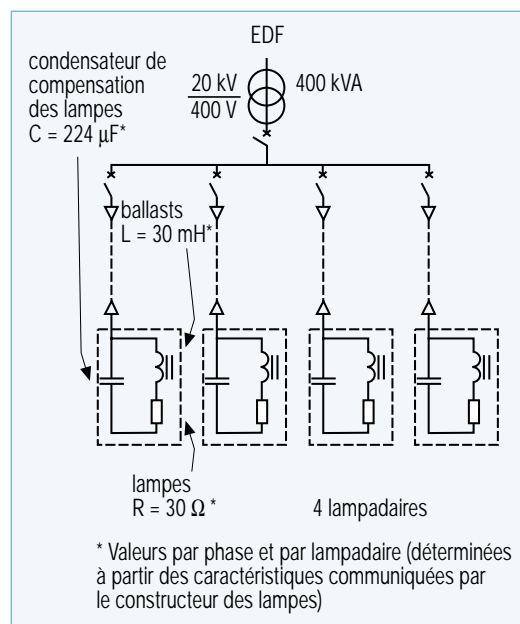
Résonance de l'installation sur le rang 5, excitée par les tensions harmoniques présentes sur le réseau EDF, du fait, qu'à cette heure, tout le monde est devant son téléviseur pour suivre le match.

L'ouverture du disjoncteur a été entraînée par surcharge thermique.

Les mesures effectuées par les experts de Schneider Electric ont mis en évidence un taux d'harmonique 5 identique au fondamental.

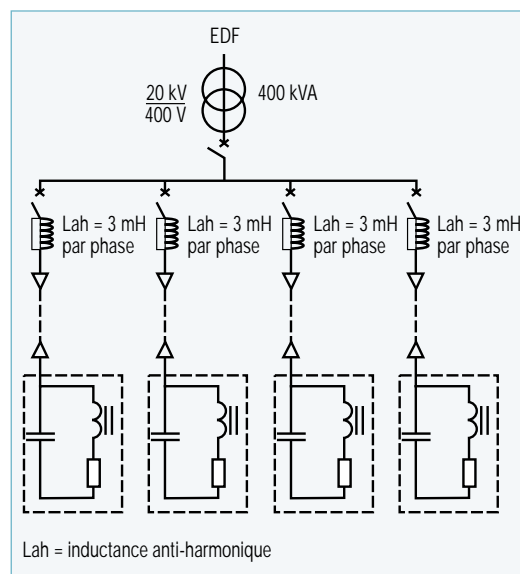
Le disjoncteur Merlin Gerin a donc rempli sa mission en mettant l'installation hors tension

Schéma équivalent simplifié du réseau pollué



## La solution proposée

Déplacement de la fréquence de résonance par installation d'une inductance série de 3 mH sur chaque lampadaire (valeur déterminée par le logiciel expert).



# Les perturbations électromagnétiques haute fréquence

## La compatibilité électromagnétique (CEM)

Les perturbations électriques créées par la proximité d'équipements électriques de puissance sur les transmissions de données de niveaux faibles sont de plus en plus fréquentes. Elles obligent les responsables de sites industriels et tertiaires à s'en prémunir.

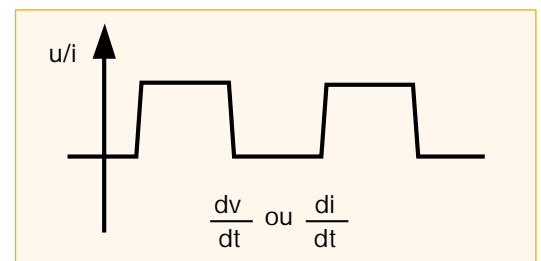
*Notions de courants forts et de courant faibles*

Les **courants forts** sont ceux qui s'appliquent aux installations de distribution de l'énergie électrique. Les **courants faibles** sont ceux qui s'appliquent aux transmissions d'informations ou de signaux entre dispositifs électroniques.

La **compatibilité électromagnétique** : c'est l'art de les faire coexister, sans créer de dysfonctionnement.

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  $\frac{dv}{dt}$  ou de courant  $\frac{di}{dt}$

aux bornes du circuit commandé.

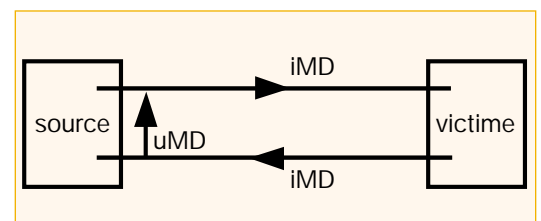


Ces perturbations peuvent être rayonnées ou conduites en mode Différentiel et/ou en mode Commun.

Elles créeront des dysfonctionnements sur les appareils sensibles tels que les : systèmes de mesure, récepteurs radio, téléphones, capteurs, régulateurs.

### Définition du mode Différentiel

Le courant se propage sur l'un des conducteurs, traverse l'appareil victime, en le polluant et revient sur l'autre conducteur en sens inverse.



iMD : courant de mode Différentiel  
uMD : tension de mode Différentiel

## Les sources de perturbations haute fréquence

### Principales sources d'origine naturelle

- atmosphériques (foudre),
- bruit thermique terrestre.

### Principales sources d'origine artificielle

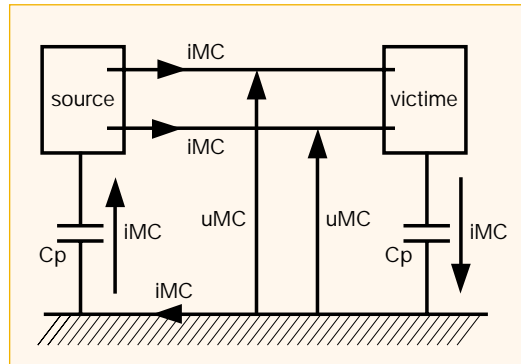
- émetteurs intentionnels : radioélectriques, talkie-walkie, GSM...
- émetteurs non intentionnels : les moteurs électriques, l'appareillage, les ordinateurs, les tubes fluorescents...

### ...et dans le même temps :

- prolifération de l'électronique numérique,
- sensibilité croissante des composants.

## Définition du mode Commun

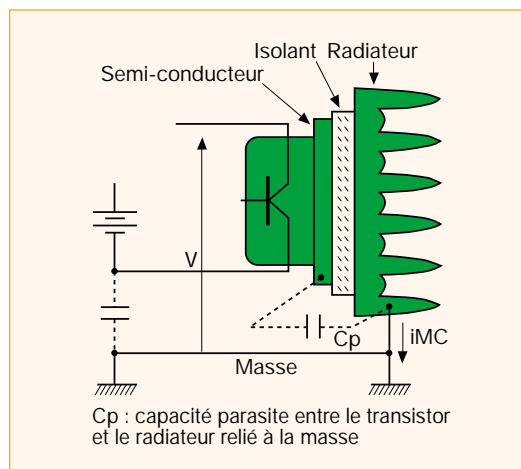
Le courant se propage en phase sur tous les conducteurs et se reboucle par les circuits de masse via les capacités parasites ( $C_p$ ).



iMC : courant de mode Commun  
uMC : tension de mode Commun

*Nota* : Principe de génération du courant de mode Commun.

La capacité parasite du radiateur de refroidissement des composants électroniques est un élément pris en compte dans la conception des "bras convertisseurs".

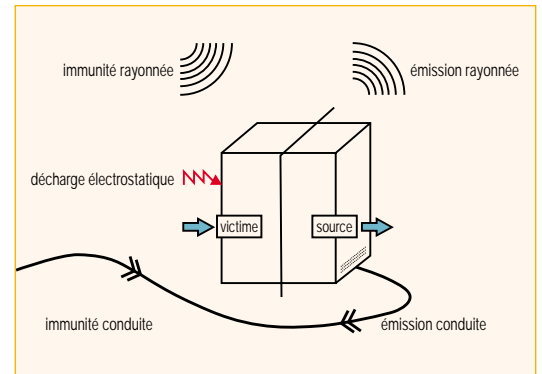


Le courant iMC de mode Commun circulant dans  $C_p$  provient des variations de tension liées à la commutation du transistor. Ce courant circule donc du transistor vers la masse via  $C_p$ .

Le remède principal permettant de limiter les perturbations conduites, consiste à insérer un filtre accordé haute fréquence en série dans la liaison au plus près du pollueur.

Ce filtre doit être raccordé en respectant scrupuleusement les règles de câblage préconisées par les fabricants (placage au plan de masse...). Le phénomène prépondérant est surtout le mode Commun (i de fuite, rayonnement des câbles...).

## Les cinq familles de mesure utilisées en CEM



Les perturbations conduites se propagent par voie filaire.  
Les perturbations rayonnées se propagent par voie hertzienne.

## La normalisation

Une directive a pris naissance en 1989. Il s'agit de la directive 89/336/CEE modifiée par les directives 92/31/CEE et 93/68/CEE.

Le champ d'application de cette directive concerne tous les appareils électriques et électroniques ainsi que les équipements et installations qui contiennent des composants électriques ou électroniques. Son respect est obligatoire depuis le 01/01/96. Ceux-ci doivent être construits de façon à ce qu'ils respectent les exigences essentielles de la directive c'est-à-dire :

- avoir un niveau de perturbations électromagnétiques limitées de façon à ne pas provoquer des dysfonctionnements périphériques.
- avoir un niveau d'immunité adéquat face à l'environnement auquel ils sont confrontés. Ces niveaux d'émission et d'immunité sont fixés par une série de normes correspondantes.

Les appareils conformes aux exigences de la directive doivent comporter le marquage CE au titre de la CEM.

*Nota* : deux autres directives exigent également le marquage CE (Basse Tension et machine). Voir guide technique Intersections novembre 1999.

## En CEM deux catégories d'essais sont effectuées

- les essais de labo (de type) dont l'objectif final consiste (via les normes) à atteindre le marquage CE sur le produit de façon à garantir sa bonne intégration dans l'environnement.
- les essais de site dont l'objectif consiste à assurer (préventif) ou à rendre (curatif) une installation conforme.

# Les différents modes de couplage des perturbations électromagnétiques

Les trois types de couplage principaux sont :

- le couplage par impédance commune (phénomène conduit)
- le couplage électrique
- le couplage magnétique.

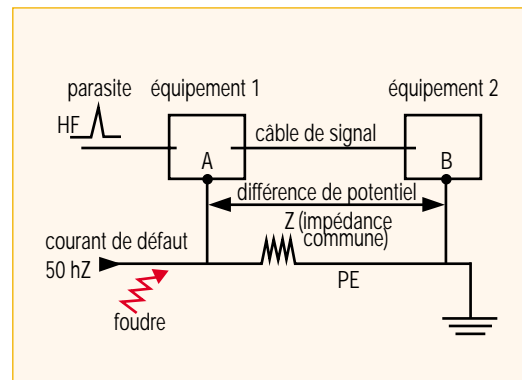
## Le couplage par impédance commune

Il provient de la présence d'un circuit commun entre différents appareils.

Par exemple :

- le circuit d'alimentation
- le circuit de masse
- le réseau de protection PE, PEN.

Figure 1



La figure 1 montre que lorsque des courants (haute fréquence, de défaut 50 Hz, foudre) circulent dans des impédances communes (Z) ; les deux équipements vont être soumis à une différence de potentiel  $V_A - V_B$  indésirable (risque pour les circuits électroniques bas niveau).

Tous les câbles, y compris le PE, présentent une impédance qui augmente avec la fréquence.

*Nota :* Un câble rond quelle que soit sa section est équivalent à une inductance de  $1 \mu\text{H/m}$ .

### Remèdes

Réduction de l'impédance commune par :

- maillage des circuits communs
- liaison des chemins de câble métallique
- utilisation de câbles blindés reliés des deux côtés
- utilisation de tresses plates
- filtre haute fréquence.

## Le couplage électrique

Diaphonie capacitive.

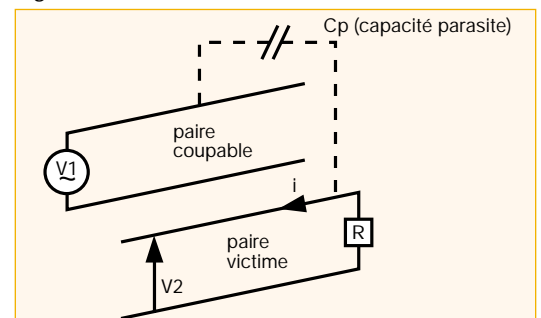
Transmission de perturbations entre deux câbles par capacité parasite ( $C_p$ ).

On distingue deux cas :

### La diaphonie capacitive

Une variation brutale de tension  $V_1$  entre un fil et un plan de masse ou entre deux conducteurs va générer un champ électrique qui va induire un courant ( $i$ ) sur le conducteur voisin par effet capacitif. On récupère donc une tension  $V_2$  sur le câble victime.

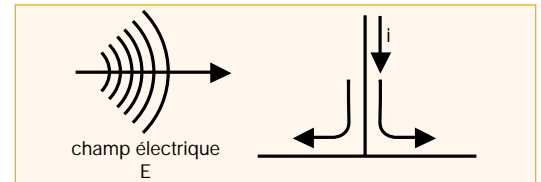
Figure 2



### Le couplage champ à câbles

Lorsque le conducteur est soumis à un champ électrique variable (talkie-walkie, GSM, manœuvre d'appareillage, radar...), un courant ( $i$ ) est induit sur ce conducteur.

Figure 3



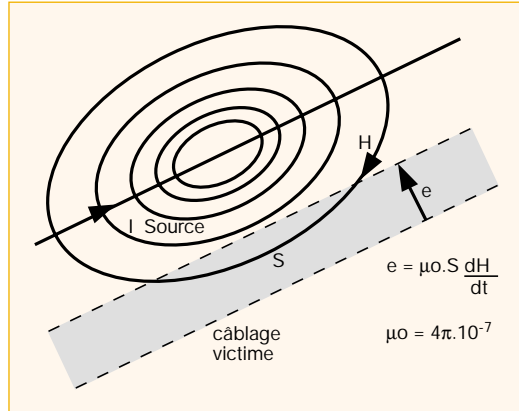
### Remèdes :

- éloignement source/victime
- plaquer les câbles victimes près des structures métalliques (chemin de câble, conduit métallique...) évitant les phénomènes d'antenne
- ajouter des câbles d'accompagnement de masse
- blinder les câbles victimes en soignant le raccordement à la masse des deux côtés
- filtrage haute fréquence ou ferrites sur le câble victime.

## Le couplage magnétique ou diaphonie inductive

Une variation de courant dans un conducteur génère un champ magnétique (H) variable. Il va créer une force contre-électromotrice qui développera une tension perturbatrice (e) dans un câblage victime présentant une boucle de surface (S).

Figure 4



### Sources de champ magnétique haute fréquence

- foudre
- four à induction
- système de commutation de puissance
- décharge électrostatique.

### Remèdes

- réduction des surfaces de boucle de câblage
- torsadage des câbles de nature identique
- solutions du couplage champ électrique.

## Quelques règles de câblage importantes préconisées

### L'analyse de la situation

#### Problème

faire cohabiter courants forts / courants faibles.

#### Risques

perturber les liaisons courants faibles et l'électronique associée :

- dysfonctionnements (disponibilité, fiabilité...)
- erreurs de mesures, de transmissions
- destruction de matériels.

### Mécanismes

- couplages câbles à câbles, champs à câbles
- tensions de mode Commun
- $dv/dt$ ,  $di/dt$
- surtensions.

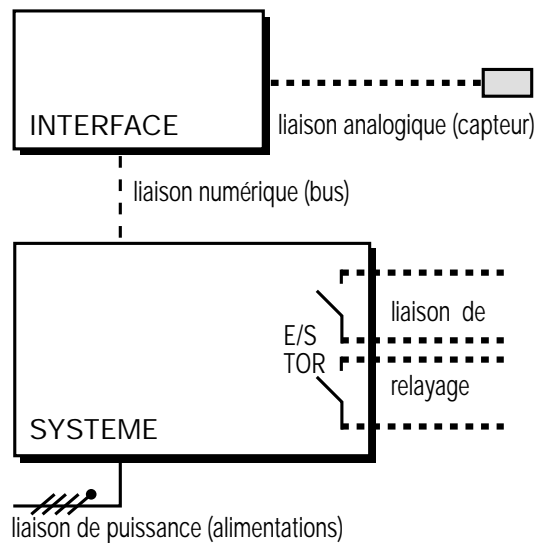
### Solutions

- séparer les câbles véhiculant des signaux différents
- soigner la mise en œuvre du câblage, l'équipotentialité, maillage des masses
- blinder
- filtrer
- protéger contre les surtensions.

## Classification des signaux

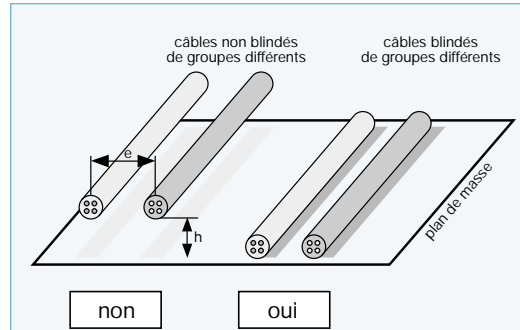
### Groupes distincts

- groupe 4 : très sensible
- groupe 3 : sensible aux impulsions, perturbe le groupe précédent
- groupe 2 : peu sensible mais perturbe les groupes précédents
- groupe 1 : peu sensible mais perturbe les groupes précédents.

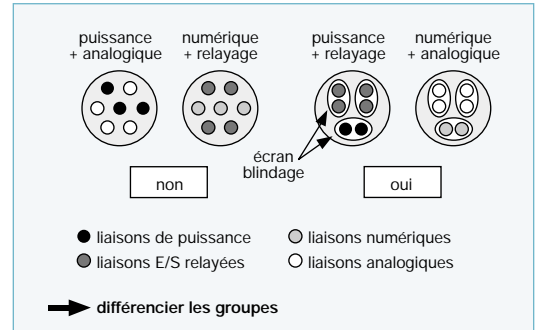


## Les règles de câblage

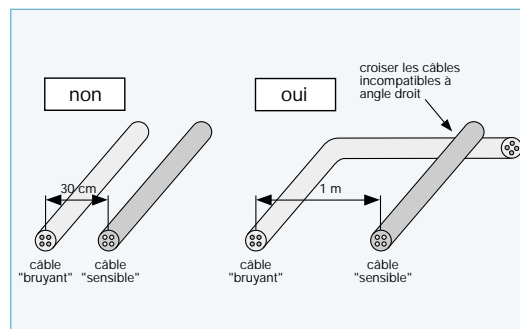
Risques de diaphonie en mode commun si  $e < 3h$



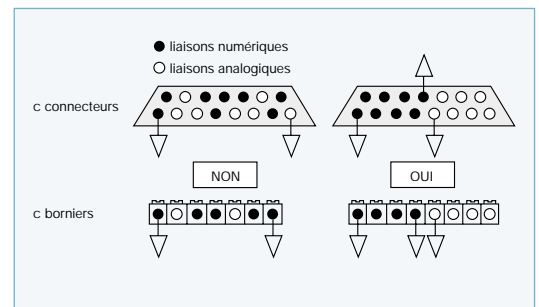
Signaux incompatibles : câbles et torons différents



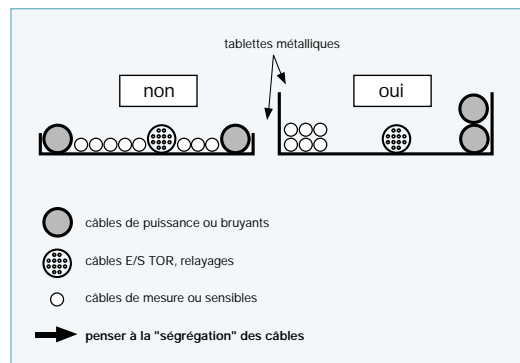
Eloigner les câbles incompatibles



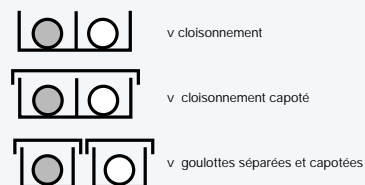
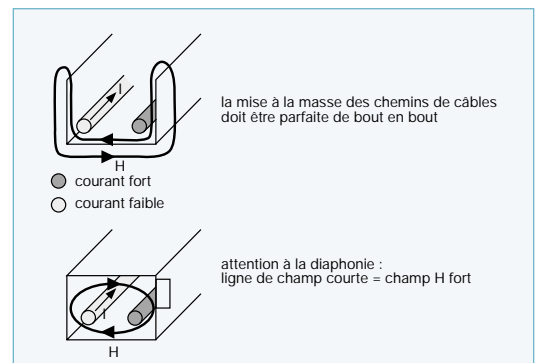
La "ségrégation" s'applique aussi aux raccordements



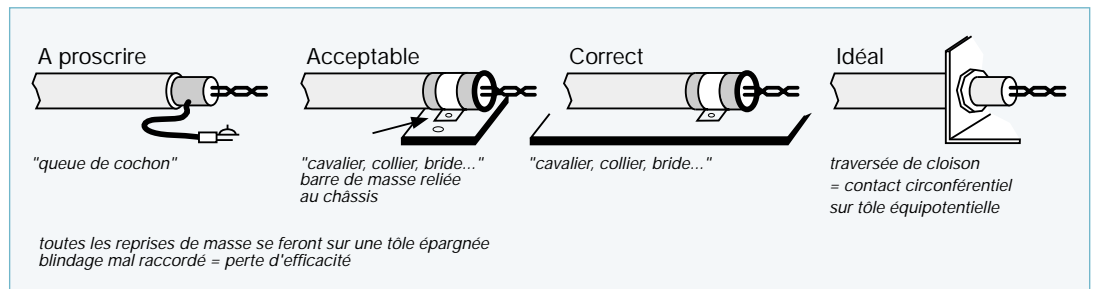
Répartition des câbles dans une tablette



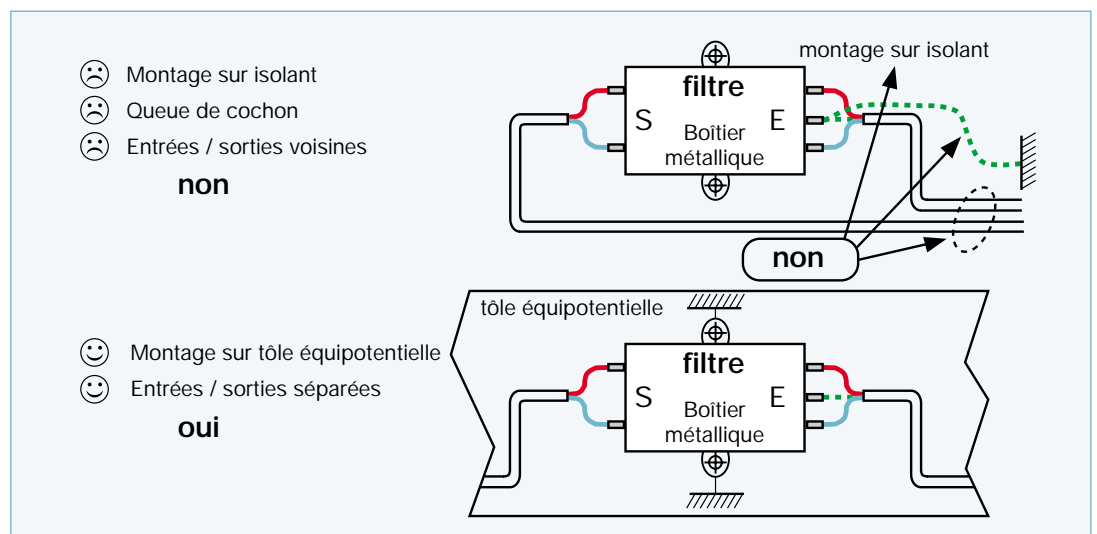
Chemin de câbles métallique



## Le raccordement des blindages

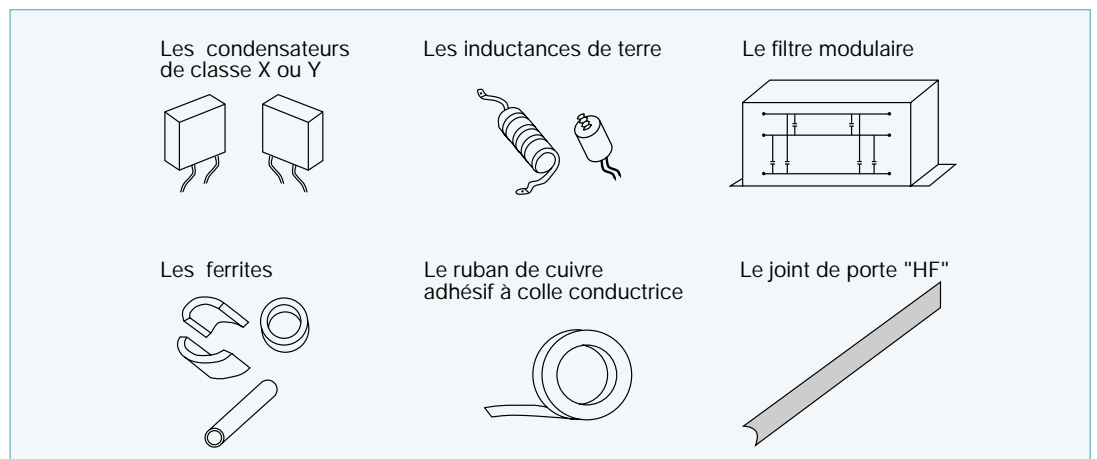


## La mise en œuvre des filtres



## La valise magique

### Les principaux composants CEM



# Etude de cas de perturbation par rayonnement

Prenons le cas de deux ordinateurs en réseau (figure A) et examinons ce qui se passe lors d'un coup de foudre. Supposons que la foudre tombe à 200 m du bâtiment avec un  $di/dt$  de  $25.10^9$  A/s (Icrête = 25 kA ;  $t_m = 1 \mu s$ ). Si la boucle, formée par le réseau 50 Hz et les liaisons numériques (figure A) présente une surface de  $50 \text{ m}^2$  au champ impulsionnel, la f.e.m. développée est :

$$e = \frac{d\phi}{dt} = \mu_0 S \frac{dH}{dt} = \frac{\mu_0 S}{2\pi d} \frac{di}{dt}$$

$$e = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{2\pi \cdot 200} \cdot 25 \cdot 10^9 = 1,25 \text{ kV}$$

Elle est dangereuse pour les circuits émetteurs-récepteurs numériques et si la boucle est fermée, c'est le courant résultant qui va entraîner des détériorations.

## Quelle est la parade ?

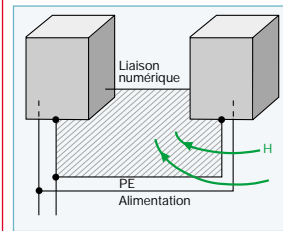
Minimiser la surface des boucles, câbles de puissance, câbles courants faibles ; en effet si la boucle est ouverte une tension dangereuse pour l'électronique est développée et si elle est fermée, le courant induit va (impédance de transfert) perturber le signal, voire détruire les circuits émetteurs-récepteurs. La figure A montre que la boucle peut être de grande dimension. Un conducteur d'accompagnement, ou un chemin de câble ou un tube métallique (figure B) permet de minimiser la surface de la boucle.

Mais attention, on a ainsi créé une boucle entre masses. La liaison conductrice entre les deux équipements communicants doit donc être de faible impédance pour ne pas développer de tension induite entre les masses des équipements communicants (éviter les queues de cochons)...

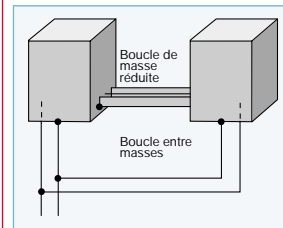
Il faut noter que si cette impédance de liaison est faible, elle va voir passer en cas de défaut d'isolement une part importante du courant de défaut.

La solution est encore une fois le maillage des masses le plus intense possible pour diviser les courants, (figure C).

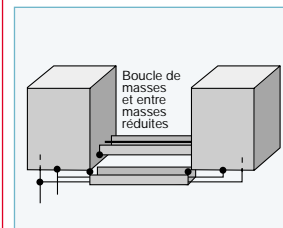
## Perturbation d'une liaison numérique par boucle inductive et remède.



A. Boucle formée par le réseau et la liaison numérique.



B. Le chemin de câbles, connecté aux masses des deux appareils, minimise l'effet de courant induit avec la liaison numérique.



C. Utilisation de chemins de câbles parallèles pour l'alimentation et la liaison numérique : boucles réduites, plans réduits et effets atténués par maillage.

## Bibliographie

### Cahiers techniques Schneider Electric

La CEM.....	CT 149
Coexistence courants forts, courants faibles.....	CT 187
Perturbations harmoniques et leur traitement.....	CT 152
Harmoniques convertisseur et compensateur actifs.....	CT 183
Manuel didactique CEM.....	ART. 62920
Les singularités de l'harmonique 3.....	à paraître

### Collection technique

Les harmoniques et les installations électriques.....	MD1 HRM1F
La compatibilité électromagnétique.....	MD1 CEM1F



L'utilisation croissante de dispositif électrique utilisant des semi-conducteurs, tant dans les installations industrielles que pour les besoins électrodomestiques, est à **l'origine des perturbations harmoniques et électromagnétiques** dans les installations électriques mais aussi sur les réseaux de distribution et de transport.

Les exigences des clients industriels et tertiaires en matière de **qualité de courant** électrique sont de plus en plus fortes. Aux raisons techniques (développement des automatismes et de l'informatique) s'ajoutent les besoins induits par les démarches qualité, la recherche du zéro défaut, pour lesquels les utilisateurs doivent parfaitement **maîtriser le fonctionnement de leur équipement**.

Chasser les perturbations harmoniques et électromagnétiques devient  
une préoccupation majeure des responsables d'exploitation.

Le banc d'étude des perturbations des réseaux électriques **"HARMOCEM"** **répond au besoin de formation** sur les phénomènes Harmoniques et CEM **quel que soit le niveau recherché**, d'une simple sensibilisation par identification des pollueurs à une investigation complète menant aux calculs et à la mise en œuvre des remèdes.

**Offre Complète  
et évolutive**

**Offre adaptée  
à tous les budgets**

**Pédagogie  
multidisciplinaire  
progressive**

**Adaptée à tous  
les niveaux**

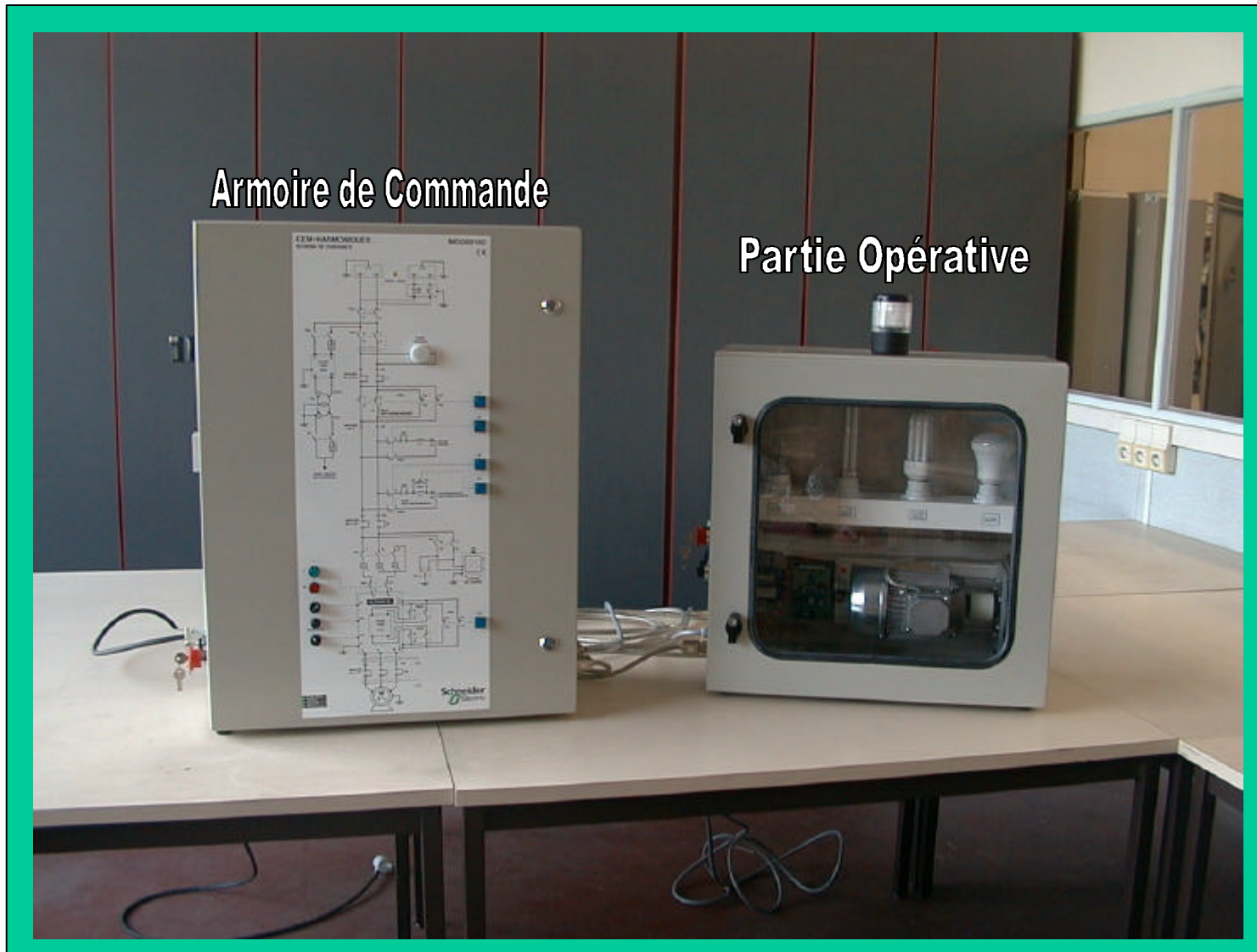
**Rapidité de  
mise en oeuvre**

**Multi-métiers**

**Prise en compte  
de solutions industrielles**

**A l'ordre du jour sur des  
domaines industriels  
d'actualités**

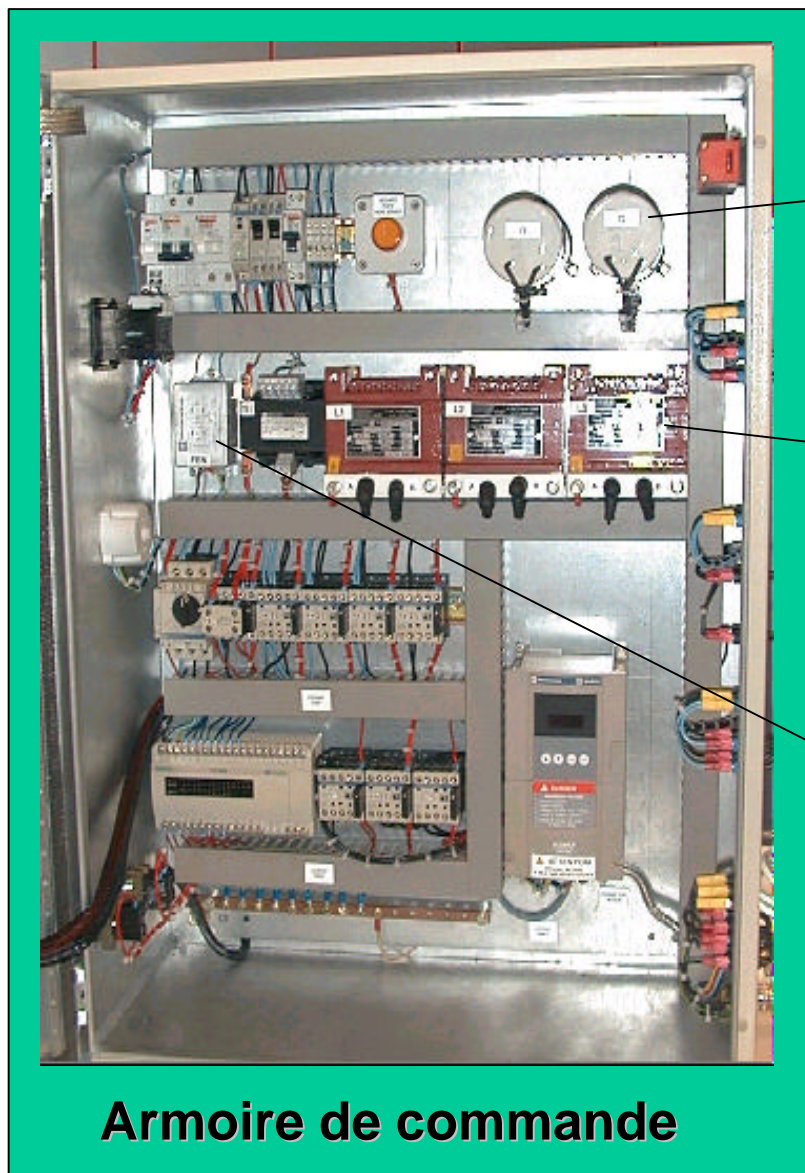




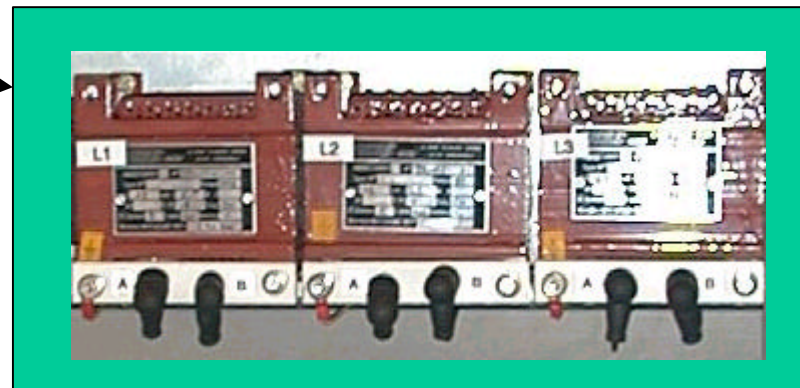
Armoire de Commande

Partie Opérative

**HARMOCEM**

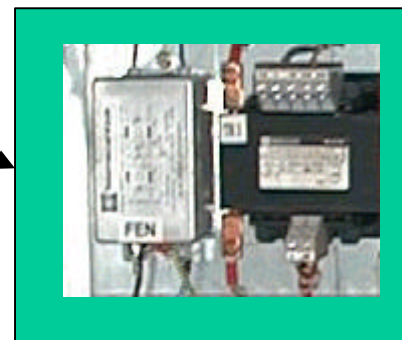


**Condensateurs**

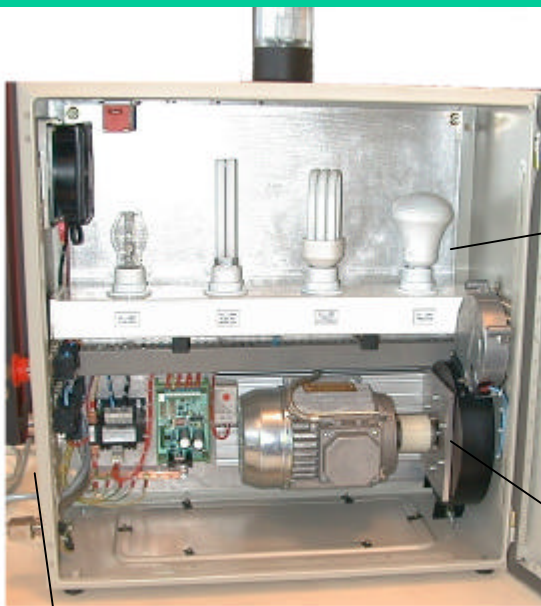


**Selfs**

**Filtre CEM**







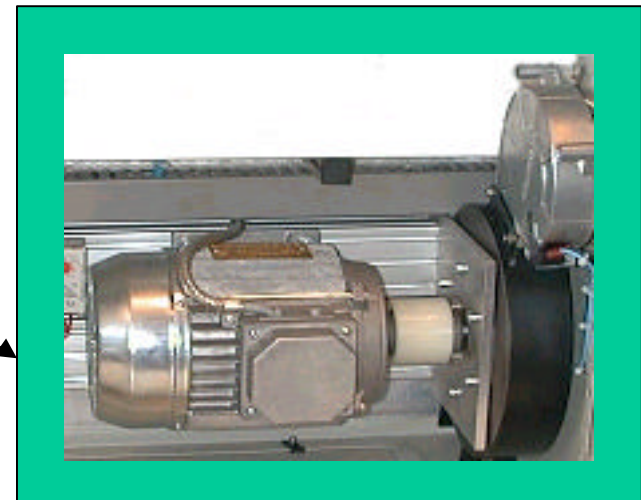
**Partie Opérative**



**Rampe éclairage multi-technologie**



**Connecteur métallique**



**Moteur et frein à poudre**

# Références

Composition	Référence
Banc d'études des perturbations des réseaux électriques (notice,manuel pédagogique et matériels de mesure)	MDG99150
Banc d'études des perturbations des réseaux électriques livré avec analyseurs HF et BF	MD1AG150
Filtre actif harmonique	MDG99159

**Filtre actif harmonique**



# Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques

Extrait du Manuel des activités  
pédagogiques



# Sommaire général

	Page
<b>1</b> <b>Introduction</b>	<b>5</b>
1.1 Perturbations provoquées par les harmoniques	
1.2 La CEM : généralités	
1.3 Compétences et stratégie pédagogiques	
<b>2</b> <b>Cours et TP «Harmoniques»</b>	<b>15</b>
2.1 TP 1 : Étude de différentes charges d'éclairage	
2.2 Harmoniques : cours de synthèse	
2.3 Évaluation harmoniques : QCM	
2.4 TD : Étude des perturbations harmoniques sur la distribution (l'éclairage)	
2.5 TP 2 : Étude des remèdes	
2.6 TP 3 : Étude «Harmoniques et compensation d'énergie réactive»	
2.7 TP 4 : Influence de l'impédance de source sur le taux de distorsion en tension	
<b>3</b> <b>Cours et TP «CEM»</b>	<b>149</b>
3.1 Cours «CEM»	
3.2 TP 1 : Mesure du rayonnement d'un câble en sortie variateur	
3.3 TP 2 : Mesure du rayonnement d'un câble sur un écran cathodique	
3.4 TP 3 : Mesure de l'efficacité d'une armoire CEM sur le champ rayonné	
3.5 TP 4 : Mesure d'émission conduite HF réinjectée sur le réseau	
3.6 TP 5 : Corrélation entre mesure sur site et en laboratoire	



### 1.3 Compétences et stratégie pédagogiques

#### A - Compétences du technicien dans ce domaine

L'utilisation croissante de dispositif électrique utilisant les semi-conducteurs, tant dans les installations industrielles que pour les besoins électro-domestiques, est à l'origine de perturbations harmoniques et électromagnétiques dans les installations électriques mais aussi sur les réseaux de distribution et de transport. Les exigences des clients industriels et tertiaires en matière de qualité de courant électrique sont de plus en plus fortes. Aux raisons techniques (développement des automatismes et de l'informatique) s'ajoutent les besoins induits par les démarches qualités, la recherche du zéro défaut, pour lesquels les utilisateurs doivent parfaitement maîtriser le fonctionnement de leur équipement. Chasser les perturbations harmoniques et électromagnétiques devient une des préoccupations majeures des responsables d'exploitation.

■ Pour ceci, en présence d'un système automatisé, les schémas et la documentation technique étant fournis, un électrotechnicien doit être capable de :

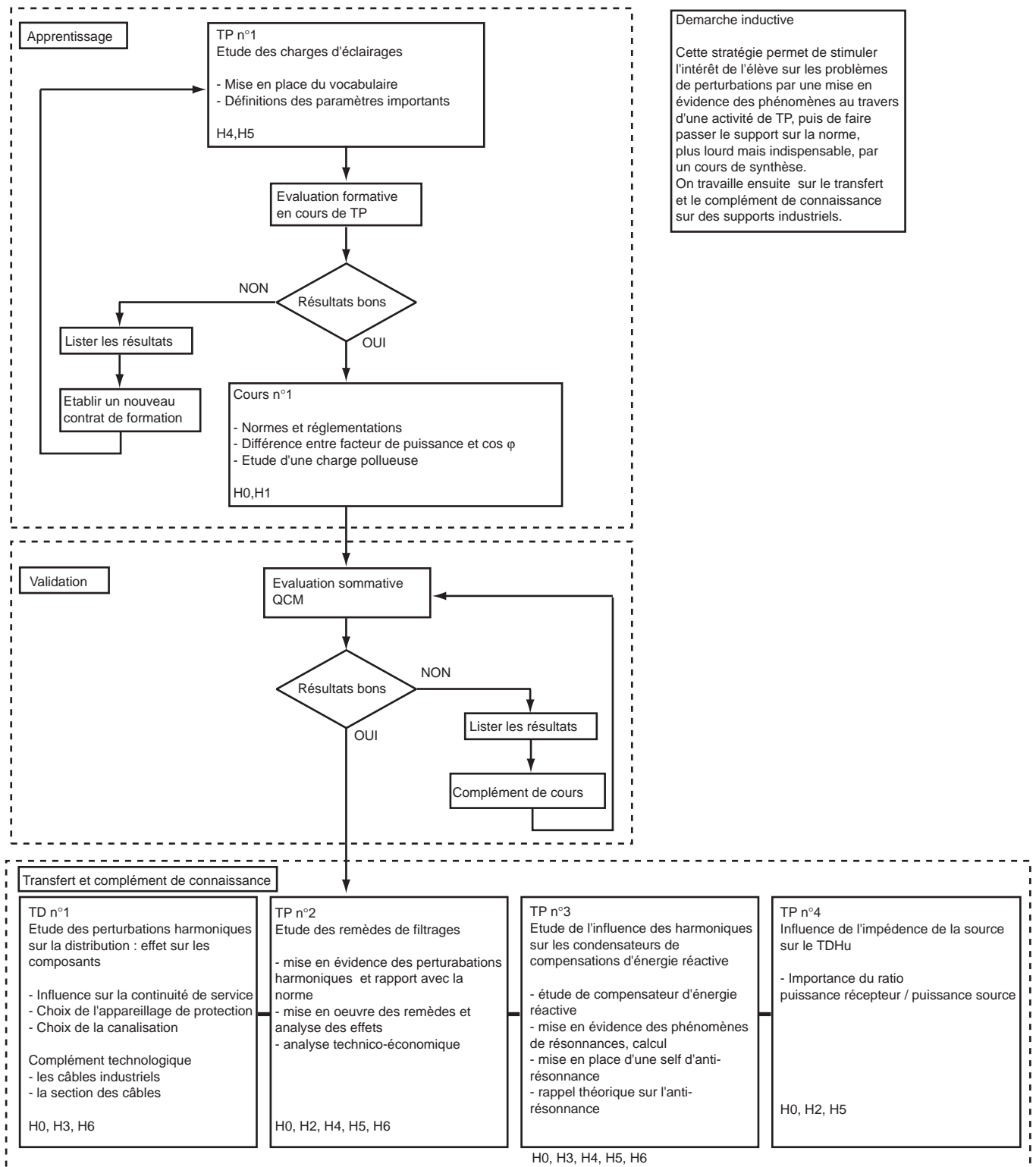
- ☐ H0 : **Connaître** les normes en vigueur BF et HF, le marquage CE, ainsi que leurs champs d'application ;
- ☐ H1 : **Connaître** et **savoir mettre en œuvre** les règles de câblage et d'installation pour assurer la coexistence des différents courants (forts et faibles) ;
- ☐ H2 : **Choisir** et **Appliquer** une stratégie de protection en fonction des données constructeur (montage et remèdes) ;
- ☐ H3 : **Identifier**, sur une installation, les supports de propagation des perturbations (courants forts et les courants faibles) ;
- ☐ H4 : **Identifier** les différents pollueurs et victimes de l'installation ;
- ☐ H5 : **Proposer** un protocole d'investigation et de mesures sur site, face à un problème de dysfonctionnement de l'installation ;
- ☐ H6 : **Déterminer**, en fonction de critères prédéfinis, la stratégie de protection utilisée sur l'installation, **Calculer** et **Justifier** cette dernière.

## B - Stratégie pédagogique Harmoniques/CEM

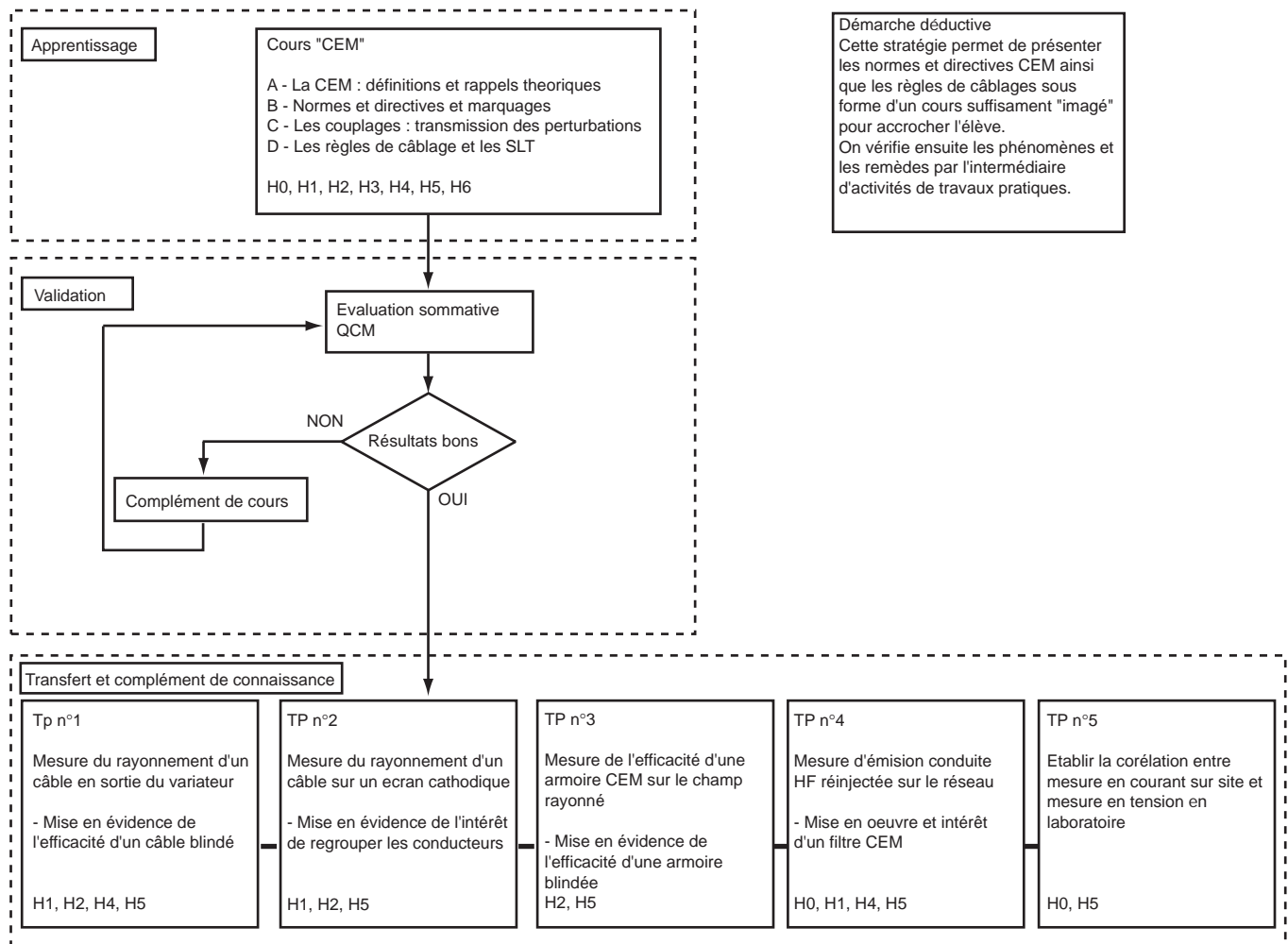
			H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Niveau 1	Information, compréhension du sujet ...	Connaissance	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>
Niveau 2	Expression, maîtrise du savoir	Compréhension			<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Niveau 3	Maîtrise d'un outil, d'un savoir faire	Application		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Niveau 4	Maîtrise méthodologique d'un démarche	Analyse				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		Synthèse						<input type="checkbox"/>	
		Evaluation							<input type="checkbox"/>

Harmoniques	Etude des charges d'éclairages	TP n°1					○	○	
	Normes et réglementation	Cours	○	○					
	La distribution : effet sur les composants	TD n°1	○			○			○
	Etudes des remèdes	TP n°2	○		○		○	○	○
	Harmoniques et capa. de $\cos \varphi$	TP n°3	○			○	○	○	○
	Impédance de source	TP n°4	○		○			○	
CEM	La C.E.M.	Cours 1							○
	Les normes et directives	Cours 2	○					○	
	Les couplages	Cours 3			○	○	○		
	Les règles de câblage et les SLT	Cours 4		○		○			
	Rayonnement d'un câble	TP n°1		○	○		○	○	
	Influence du rayonnement d'un câble	TP n°2		○	○			○	
	Efficacité d'une armoire CEM	TP n°3		○				○	
	Mesure d'émission conduite	TP n°4	○	○			○	○	
	Corrélation Site/Laboratoire	TP n°5	○					○	

## C- Développement de la stratégie pédagogique Harmoniques



## D- Développement de la stratégie pédagogique CEM



# 2

## Chapitre

### Cours et TP «Harmoniques»

Titre	page
2.1 TP 1 : Étude de différentes charges d'éclairage	17
2.2 Harmoniques : cours de synthèse	46
2.3 Évaluation harmoniques : QCM	57
2.4 TD : Étude des perturbations harmoniques sur la distribution (l'éclairage)	58
2.5 TP 2 : Étude des remèdes	67
2.6 TP 3 : Étude «Harmoniques et compensation d'énergie réactive»	123
2.7 TP 4 : Influence de l'impédance de source sur le taux de distorsion en tension	139

## 2.1 TP 1 : Étude de différentes charges d'éclairage

### Étude des phénomènes harmoniques

Lieu  
d'activité

Laboratoire d'essai de  
système

Apprentissage

Conditions de  
réalisation

#### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au maximum les risques d'origine électrique :

- ☐ Tous les points de mesure sont accessibles sur le coté de l'armoire par bornes de sécurité.
- ☐ Le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

#### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un analyseur d'harmoniques.

#### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique.

Conditions de  
mesure

#### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder le câble d'alimentation de la partie opérative sur l'armoire principale.
- ☐ Utiliser des cordons de sécurité pour raccorder l'analyseur harmonique aux bornes U1, permettant la mesure de la tension réseau.
- ☐ Remplacer un des cavaliers I1 (phase ou neutre) par le cordon «10 spires» fourni pour permettre la mise en place de la pince TI de l'analyseur harmonique et réaliser la mesure du courant réseau.
- ☐ Agir sur les commutateurs C1 à C4 correspondants aux différentes charges d'éclairage.

Objectif de  
l'activité

- ☐ Acquérir le vocabulaire, les notions et les définitions importantes liées à l'étude des phénomènes harmoniques au travers de l'étude des charges d'éclairage.
- ☐ H4 : Identifier les différents pollueurs et victimes de l'installation.
- ☐ H5 : Proposer un protocole d'investigation et de mesures sur site.

## **2.2 Harmoniques : cours de synthèse**

Ce cours sur les Harmoniques comprend :

- Normes et réglementations
- Rappel théorique d'électrotechnique
- Etude d'une charge non linéaire (alimentation à découpage)

## **2.4 TD : Étude des perturbations harmoniques sur la distribution (l'éclairage)**

L'objectif de ce TD est d'étudier l'incidence des harmoniques générés par l'éclairage sur une installation.

On y abordera aussi la détermination de la protection et de la section des câbles en fonction des différentes technologies d'éclairage.

Ce TD est structuré comme suit :

**A - Sur une installation industrielle ne présentant pas de courant harmoniques**

**B - Sur une installation présentant des courants harmoniques**

**C - Rappels de quelques définitions pour la détermination de la section d'un câble**

**D - Informations sur le choix des câbles par rapport aux types de disjoncteur**

**E - Précautions à prendre pour l'étude d'une installation présentant des courants harmoniques (alimentations à découpage par exemple)**



## 2.5 TP 2 : Étude des remèdes

### Étude des phénomènes harmoniques

**Lieu d'activité**

Laboratoire d'essai de système

Transfert et complément de connaissance

**Conditions de réalisation**

#### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au maximum les risques d'origine électrique :

- ☐ Tous les points de mesure sont accessibles sur le coté de l'armoire par bornes de sécurité.
- ☐ Le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

#### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un analyseur d'harmoniques, un ampèremètre non RMS, un ampèremètre RMS.

#### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique.
- ☐ Connaissance des normes et définitions liées à l'études des harmoniques.
- ☐ Connaissance de base de l'électrotechnique.

**Conditions de mesure**

#### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de la partie opérative.
  - le câble d'alimentation du variateur repéré (raccordé CEM).
- ☐ Utiliser des cordons de sécurité pour raccorder l'analyseur harmonique aux bornes U1, pour réaliser la mesure de la tension réseau,
- ☐ Remplacer les cavaliers I1 (phase ou neutre) et IFP par un cordon de sécurité pour permettre la mise en place de la pince TI de l'analyseur harmonique et réaliser la mesure du courant réseau.
- ☐ Agir sur les boutons poussoirs correspondant aux différents filtres mis en oeuvre.
- ☐ Remplacer un des cavaliers  $I_M$  courant de sortie VV par un ampèremètre RMS pour réaliser la mesure du courant de charge réglé par le frein à poudre.

**Objectif de l'activité**

- ☐ Mise en oeuvre et analyse des différents remèdes.
- ☐ H0 : Connaître les normes en vigueur BF et HF, le marquage CE, ainsi que leurs champs d'application ;
- ☐ H2 : Choisir et appliquer une stratégie de protection en fonction des données constructeur (montage et remèdes) ;
- ☐ H4 : Identifier les différents pollueurs et victimes de l'installation ;
- ☐ H5 : Proposer un protocole d'investigation et de mesures sur site ;
- ☐ H6 : Déterminer, en fonction de critères prédéfinis, la stratégie de protection utilisé sur l'installation et justifier cette dernière.

## Procédure de démarrage du variateur ATV18 et de freinage du moteur par frein à poudre.

### Sur l'armoire de commande

- ☐ Mise sous tension du variateur par le bouton poussoir **I/O** situé sur la face avant.
- ☐ ordre de démarrage, de sens rotation et d'arrêt du moteur par le commutateur à trois positions AV, O, AR situé sur la face avant.

### Sur la partie opérative

- ☐ validation et réglage du freinage du moteur.
- ☐ Validation ou arrêt du freinage par action sur le commutateur C5.
- ☐ Réglage du freinage par le potentiomètre P1.

Le freinage sera réglé pour ajuster le courant de sortie du variateur par exemple à  $I_N = 2,1A$  grâce à un ampèremètre situé en série sur un cavalier de sortie IM.

**Note :** Lors des manipulations, il est conseillé pour arrêter ou démarrer le moteur, de se servir du commutateur AV, O, AR et non pas du BP (**I/O**) de façon à éviter de solliciter trop fréquemment la protection de l'étage d'entrée du variateur.

## A- Mise en évidence du pollueur

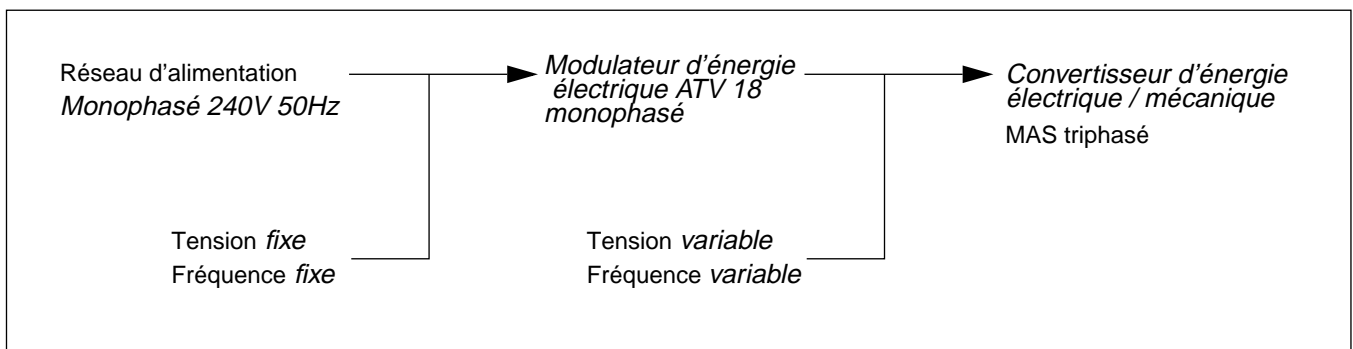
■ Vous êtes concepteur de l'armoire d'alimentation d'une MAS, en BT, < 16 A donc soumis à une réglementation produit avec des restrictions par cordon (CEI 61000-3-2).

### Analyse de l'installation

☐ Armoire sans filtre : points de mesure U1-I1.

1 - Mettre en évidence, grâce au schéma, la chaîne de transfert de l'énergie électrique.

☐ Utiliser un surligneur pour suivre le parcours de l'énergie sur le schéma puis compléter la représentation suivante :



2 - Relever en toute sécurité la valeur du courant de ligne avec un appareil non RMS (i1) puis un appareil RMS (i2).

☐ Que constate-t-on ?

*$i1 \neq i2$ , il est donc important de prendre le bon appareil de mesure.*

3 - Relevez en toute sécurité l'allure du couple tension/courant sur la ligne d'alimentation.

☐ Le courant est-il sinusoïdal ?

*On constate que le courant est alternatif non sinusoïdal.*

*Cette allure permet d'expliquer la différence de relevé constaté à la question 1 par la présence d'harmoniques.*

4 - En fonction de ces informations, la charge que constitue cette armoire est-elle une charge linéaire ?

☐ Identifier l'élément pollueur de cette installation.

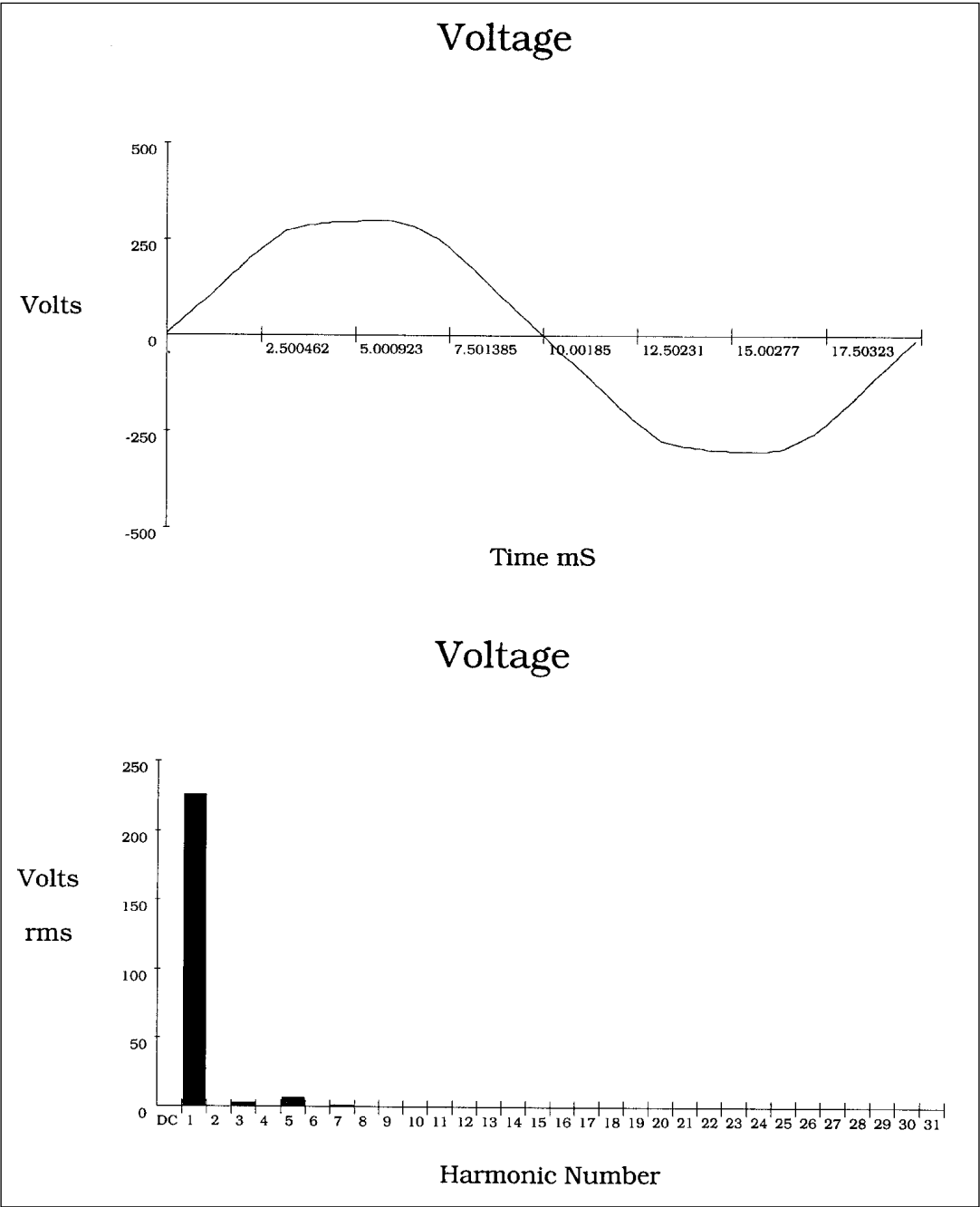
*La charge n'est pas linéaire et le pollueur est le modulateur ATV 18.*

**Étude harmonique : ■ Utilisation d'un analyseur de spectre.**

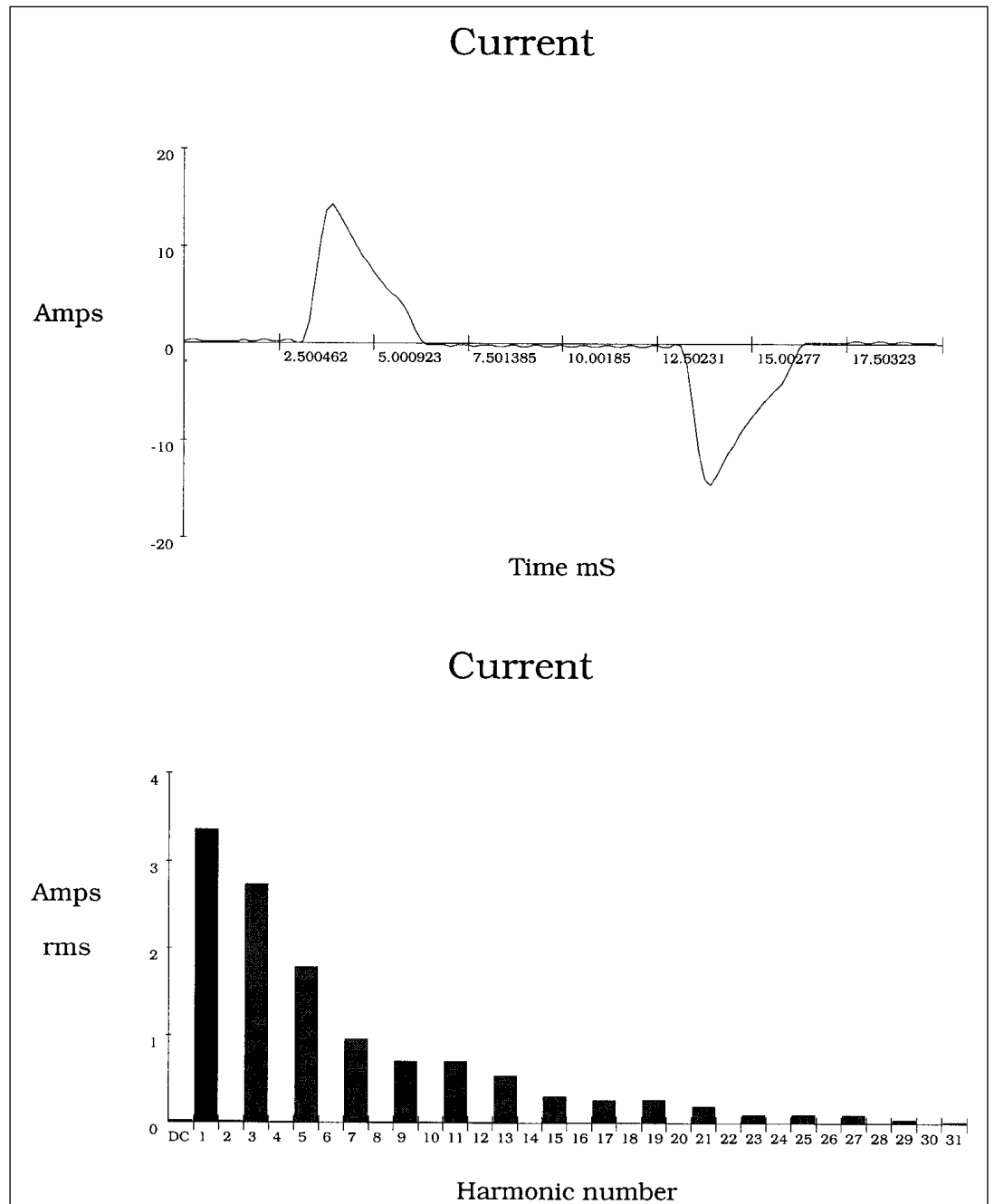
Réaliser en toute sécurité le relevé des paramètres suivant à l'aide d'un analyseur, les paramètres de l'alimentation en énergie électrique du coffret aux points de mesure U111. L'analyseur nous offre de nombreuses mesures, nous nous limiterons aux valeurs suivantes :

- ☐ TDH pour le taux de distorsion de tension et de courant par rapport au fondamental (THD Fund),
- ☐ le courant efficace (IRMS),
- ☐ H1 pour le fondamental,
- ☐ le Facteur de Puissance (PF),
- ☐ le Cos  $\varphi$  (DPF),
- ☐ Le facteur de crête (CF),
- ☐ la puissance active (KW),
- ☐ la puissance apparente (KVA),
- ☐ ainsi qu'aux allures de la tension, du courant, de la puissance et de leur spectre harmonique.
- ☐ Exploitation des relevés :

TDHu (%)	TDHi (%)	IRMS	IH1 (A)	IH3 (A)	IH5 (A)	IH7 (A)	IH9 (A)	PF	Cos $\varphi$	P (kW)	Q (kVA)
3,3	108,2	4,96	3,36	2,74	1,8	0,96	0,7	0,65	0,98	0,72	1,12



☐ Mesure de la tension en U1



- ☐ Mesure de la tension en I1
- ☐ VV à In
- ☐ Spectre riche

Étude des  
phénomènes  
harmoniques

## TP 2 : Étude des remèdes

6/54

Readings - 02/02/99 11:14:26

## Summary Information

Frequency 50,0  
Power  
KW 0,72  
KVA 1,12  
KVAR 0,17  
Peak KW 4,41  
Phase 13° lead  
Total PF 0,65  
DPF 0,98

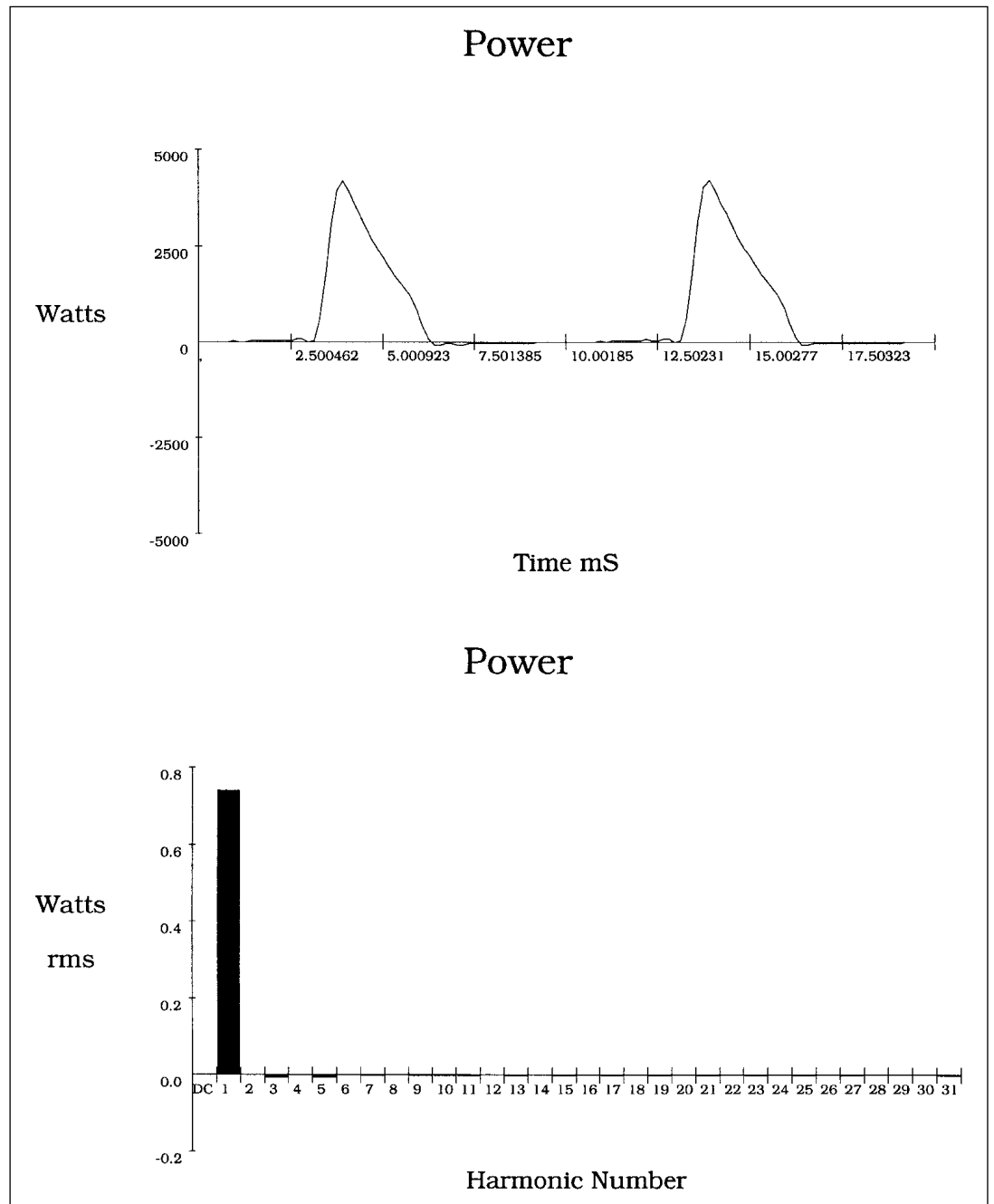
Voltage 226  
Current 4,96  
Peak 307  
DC Offset 0  
Crest 1,36  
THD Rms 3,3  
THD Fund 3,3  
HRMS 8  
KFactor 18,7

## Record Information

Max Average Min  
V RMS  
A RMS  
V Peak  
A Peak  
V THD-R%  
A THD-R%  
KWatts  
KVAR  
TPF  
DPF  
Frequency

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,0	0	0,03	0,6	0	0,00
1	50,0	226	100,0	0	3,36	68,1	13	0,74
2	100,0	0	0,1	51	0,02	0,5	105	0,00
3	150,0	3	1,2	31	2,74	55,5	-149	-0,01
4	200,0	0	0,0	-3	0,01	0,2	-71	0,00
5	250,0	7	3,0	-179	1,79	36,2	58	-0,01
6	299,9	0	0,0	-22	0,00	0,1	-58	0,00
7	349,9	2	0,7	43	0,96	19,4	-79	0,00
8	399,9	0	0,0	98	0,01	0,2	132	0,00
9	449,9	0	0,2	-15	0,70	14,2	170	0,00
10	499,9	0	0,0	123	0,01	0,2	-29	0,00
11	549,9	0	0,1	-84	0,70	14,3	39	0,00
12	599,9	0	0,0	-129	0,01	0,2	174	0,00
13	649,9	0	0,2	48	0,54	10,9	-103	0,00
14	699,9	0	0,0	-13	0,00	0,1	82	0,00
15	749,9	0	0,2	-49	0,31	6,3	130	0,00
16	799,9	0	0,0	117	0,01	0,2	-39	0,00
17	849,8	0	0,1	-94	0,26	5,3	25	0,00
18	899,8	0	0,0	89	0,01	0,2	169	0,00
19	949,8	0	0,1	124	0,27	5,5	-108	0,00
20	999,8	0	0,0	-137	0,00	0,1	22	0,00
21	1049,8	0	0,1	-56	0,20	4,0	110	0,00
22	1099,8	0	0,0	53	0,00	0,1	-30	0,00
23	1149,8	0	0,0	-139	0,10	2,0	-8	0,00
24	1199,8	0	0,0	-146	0,01	0,1	168	0,00
25	1249,8	0	0,1	127	0,10	2,0	-108	0,00
26	1299,8	0	0,0	136	0,00	0,1	-5	0,00
27	1349,8	0	0,1	-13	0,10	2,0	112	0,00
28	1399,7	0	0,0	129	0,00	0,0	146	0,00
29	1449,7	0	0,0	-124	0,05	1,0	-28	0,00
30	1499,7	0	0,0	90	0,00	0,0	-160	0,00
31	1549,7	0	0,0	140	0,02	0,5	-90	0,00





**Travail sur les relevés :** 5 - Notre installation est-elle conforme à la norme ?

☐ Quel paramètre est important ?

*Notre armoire n'est pas conforme.*

*CEI 61000-3-2 : norme d'émission pour l'appareillage BT < 16 A :  
IH3 < 2,3 A*

*Note : elle serait conforme en milieu industriel avec une distribution  
privée (grande parties des applications).*

6 - Comparer la valeur IH1 avec le relevé du courant effectué par  
l'appareil non RMS (i1).

☐ Que peut-on en conclure ?

*IH1 = i1, un appareil non RMS mesure le fondamental du courant*

7 - Comment calculer IRMS en fonction du spectre harmonique ?

$$IRMS = \sqrt{\sum (IH_n)^2}$$

8 - Rechercher les définitions de FP et de cos φ.

☐ Que traduisent ces deux valeurs ?

*Il n'y a pas de déphasage en amont d'un variateur de vitesse  
cosφ = 1 mais la richesse du spectre harmonique dégrade fortement  
le facteur de puissance PF = 0,68.*

9 - Analyse des spectres :

☐ Expliquer la pauvreté du spectre de puissance et conclure sur le  
transport de l'énergie active.

*La puissance active est la somme des puissances actives dues aux  
tensions et courants de même rang.*

*Dans notre cas, malgré un spectre de courant très riche, la puis-  
sance active ne transite que par le fondamental. Ceci s'explique par  
la tension qui est sinusoïdale donc uniquement composé du fonda-  
mental.*

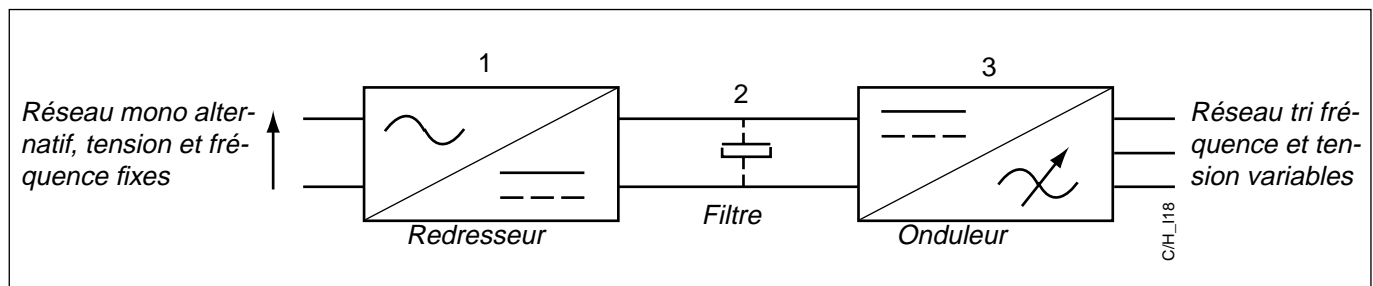
$$P = URMS \cdot IRMS \cdot PF = UH1 \cdot IH1 \cdot \cos\varphi + UH2 \cdot IH3 \cdot \cos\varphi_2 + UHn \cdot IHn \cdot \cos\varphi_n + \dots \text{ avec } UH2 = 0 \dots UHn = 0.$$

## B - Etude du pollueur

**Le générateur d'harmoniques est un convertisseur de fréquence (CdF) ATV 18.**

1 - Expliquer son rôle en donnant le principe de variation de vitesse d'une MAS.

2 - A l'aide des documents constructeur, compléter le synoptique interne du modulateur.



1 - Convertisseur alternatif/continu fixe, généralement constitué par un pont de diode.

2 - Filtre constitué par une batterie de condensateur.

3 - Convertisseur continu/alternatif à modulation de largeur d'impulsion MLI constitué de transistors IGBT.

Ce pont onduleur a pour but de fournir au moteur un système de tension alternative triphasée d'amplitude et de fréquence variables.

□ **Analyse des paramètres constructeur :**

Réseau			Moteur Puissance indiquée sur la plaque		ATV 18U09M2		
U1	U2	Courant de ligne (A)	0,37 kW	0,5 HP	Courant de sortie permanent (A)	Courant transitoire (A)	Puissance dissipée à charge nominale (W)
200	240				2,1	3,1	23
mono-phasé 50/60 Hz		U1 4,4    U2 3,9					

**3** - Calculer la puissance active absorbée par le variateur pour une tension réseau  $U_2$  de 240 V.

Décoder les paramètres constructeur et utiliser l'un des deux facteurs suivant :  $FP = 0,65$  ou  $\cos\phi = 0,98$ .

$$P_a = U_{eff}.I_{eff}.FP = 226 \times 4,96 \times 0,65 = 728W$$

**4** - Calculer la puissance de sortie du variateur ( $P_u$ ), pour un courant de sortie sinusoïdal, une tension efficace de sortie de 240 V, le facteur de puissance est lié au  $\cos\phi$  imposé par la charge soit 0,6.

$$P_u = 240 \times 2,1 \times 0,8 \times \sqrt{3} = 698 W$$

*On retrouve bien les 23W de puissance dissipé à la charge nominale dans le variateur.*

**5** - Que représente la puissance de 0,37 kW indiquée sur le variateur ?

*Elle représente la puissance disponible sur l'arbre moteur en prenant un rendement de l'ordre de 0,6.*

**Les remèdes industriels envisageables**

■ **Solutions générales :**

- abaisser les impédance des harmoniques
- agir sur la structure de l'installation :
  - ☐ augmentation de la puissance de court-circuit
  - ☐ choisir le bon schéma de liaison à la terre
  - ☐ utilisation de transformateurs spécifiques
  - ☐ confiner les charges polluantes
  - ☐ déclassement des équipements

■ **Solution de neutralisation :**

- protection des condensateurs de compensation d'énergie réactive
  - ☐ Installation de self anti-harmoniques (SAH)
- filtrage anti-harmoniques :
  - ☐ lisser le courant
  - ☐ filtrage passif shunt résonnant
  - ☐ filtrage actif
  - ☐ filtrage hybride

## C- Les remèdes

Les relevés précédents mettent en évidence que le taux de distortion en courant, à l'entrée du redresseur, est trop important.

Il est donc nécessaire de réduire les courants harmoniques. Pour ce faire, quatre méthodes sont utilisées :

- ☐ mettre une inductance supplémentaire à l'entrée du redresseur pour atténuer globalement l'amplitude des harmoniques ;
- ☐ utiliser un Filtre Passif accordé sur une fréquence particulière, riche en harmonique ;
- ☐ utiliser un Filtre Actif capable de balayer tout le spectre harmonique ;
- ☐ utiliser un Filtre Hybride pour optimiser le filtrage.

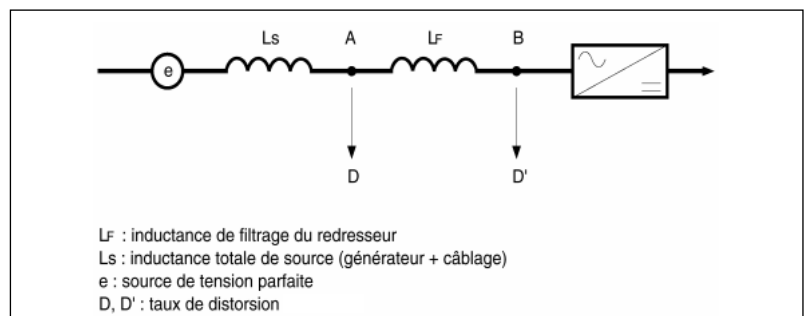
### Mise en place d'une inductance à l'entrée du redresseur : lissage du courant

Il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs en intercalant entre leur point de raccordement et leur entrée une inductance dite de lissage. Cette disposition est utilisée en particulier pour les redresseurs avec condensateurs en tête ; l'inductance pouvant même être proposée en option par les constructeurs.

**1** - Que préconise le constructeur et comment justifie t-il l'emploi d'une inductance de ligne ? (catalogue ATV18)

*Réduction du taux d'harmoniques et protection contre les surtensions réseau, norme EN 50178, la valeur de la self est définie pour une chute de tension comprise entre 3 et 5 % de la tension nominale du réseau pour éviter une perte de couple du moteur.*

*Inductance proposée 10 mH 4A*



**2** - Réaliser en toute sécurité le relevé des paramètres suivant à l'aide d'un analyseur, les paramètres de l'alimentation en énergie électrique du coffret aux points de mesure U1I1. L'analyseur nous offre de nombreuses mesures, nous nous limiterons aux valeurs suivantes :

- ☐ TDH pour le taux de distorsion de tension et de courant par rapport au fondamental (THD Fund),
- ☐ le courant efficace (IRMS),
- ☐ H1 pour le fondamental,
- ☐ le Facteur de Puissance (PF),
- ☐ le  $\cos \varphi$  (DPF),
- ☐ Le facteur de crête (CF)
- ☐ la puissance active (KW),
- ☐ la puissance apparente (KVA),
- ☐ ainsi qu'aux allures de la tension, du courant, de la puissance et de leur spectre harmonique.
- ☐ Exploitation des relevés :

0,89	TDHi (%)	IRMS	IH1 (A)	IH3 (A)	IH5 (A)	IH7 (A)	IH9 (A)	PF	Cos $\varphi$	P (kW)	Q (kVA)
3	59,8	3,95	3,38	1,92	0,5	0,34	0,14	0,82	0,95	0,95	0,72

**3** - Comment à évolué le TDHi de l'installation ?

- ☐ Commenter l'évolution des IH, de FP et du  $\cos \varphi$ .

*La self permet de lisser le courant mais n'annule pas les harmoniques, le TDHi est pratiquement divisé par 2, on se rend bien compte que la self n'agit pas sur le fondamental mais atténue fortement les harmoniques donc permet d'améliorer le PF sans trop dégrader le  $\cos \varphi$ .*

*L'utilisation d'inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence a les effets suivants :*

- Réduction des harmoniques de courant et donc de la valeur efficace du courant demandé au réseau.
- Conservation de la valeur de IH1 (fondamental) pour maintenir le couple moteur.
- Augmentation du facteur de puissance FP sans introduire de déphasage  $\cos \varphi$  reste constant.
- Diminution du facteur de crête.

4 - Calculer la valeur de la self en fonction des données constructeur.

■ Calcul de la valeur de self

□ chute de tension :  $\Delta u$  total admissible pour maintenir le couple moteur  $\leq 3\%$  de 240V

$$\Delta u \leq 7V$$

$$\square L1 = \frac{\Delta u}{\omega \cdot I_{h1}} = \frac{7}{2\pi \cdot 50 \cdot 2,4} = 10mH$$

■ Calcul courant de la self L1

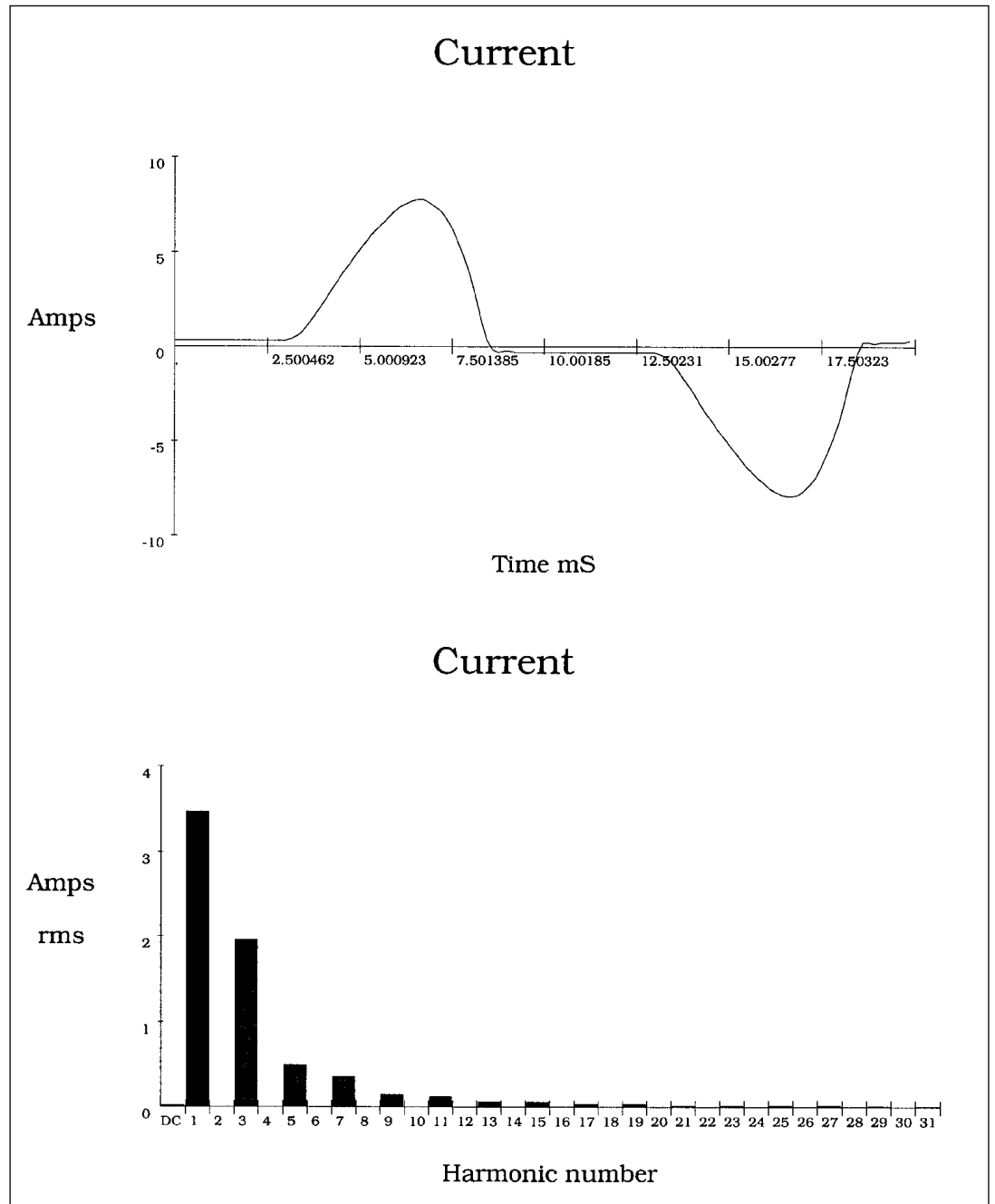
□  $I_{effL1} = I_{eff}$  du variateur = 4A

□ Nota : tenir compte des éventuels courants harmoniques pré-existant sur le réseau

□ Choix de L1 : n° 18175 AGECELEC ; 15 mH ; 6,5A.

**Note :** le choix volontaire d'une self plus forte a été faite à des fins pédagogiques de façon à mieux visualiser le TDHu (cf question 4),

par contre le couple moteur sera légèrement diminué.



- ☐ Mesure sur réseau
- ☐ L1 = 15 mH
- ☐ VV à IN
- ☐ IN = courant nominal = 2,1A
- ☐ Légère atténuation de tout les spectres



Étude des  
phénomènes  
harmoniques

## TP 2 : Étude des remèdes

16/54

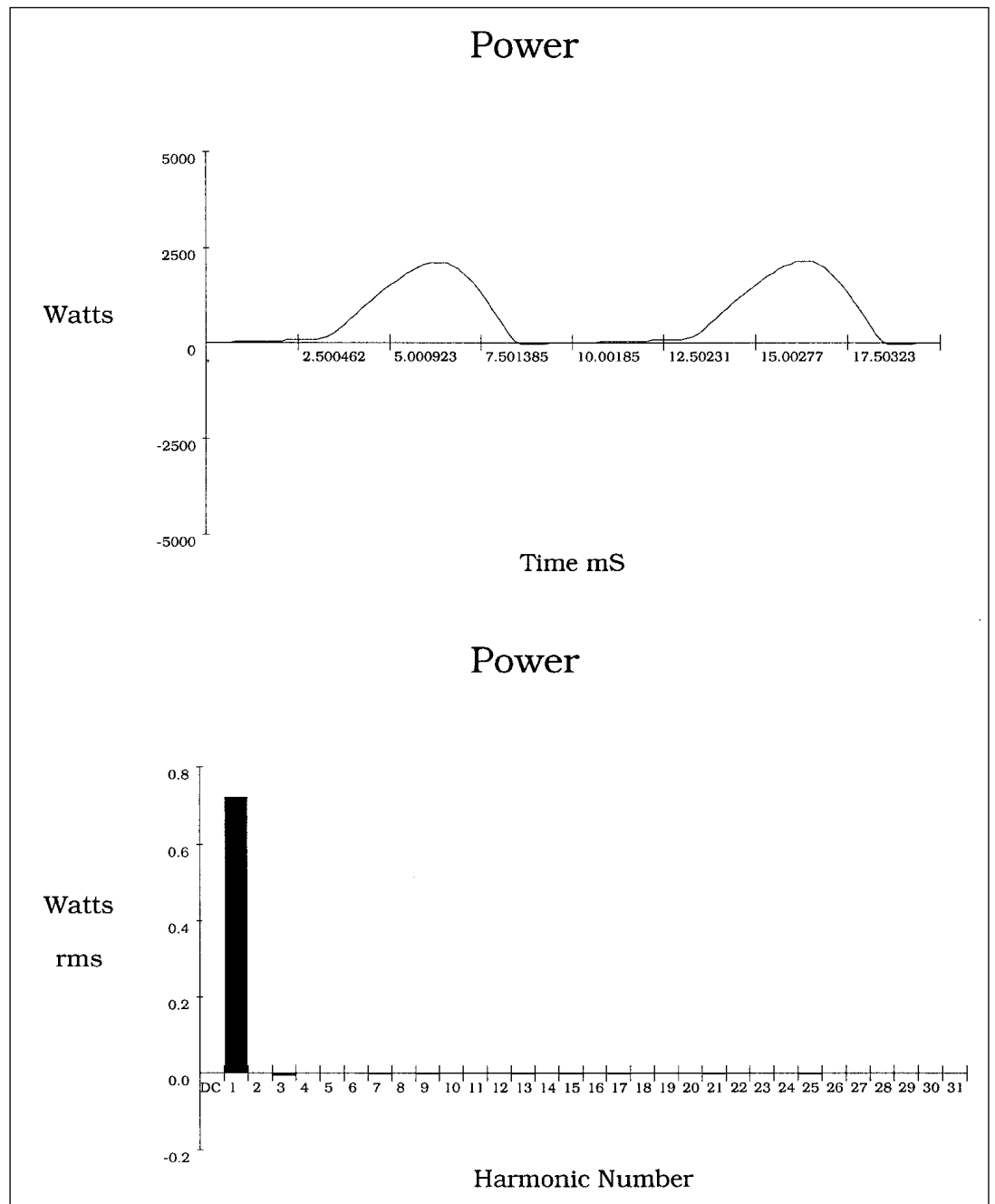
Readings - 02/02/99 12:02:54

## Summary Information

		Voltage	Current	Record Information	Max	Average	Min
Frequency	50,0	RMS	225	3,95	V RMS		
Power		Peak	308	7,88	A RMS		
KW	0,72	DC Offset	0	-0,02	V Peak		
KVA	0,89	Crest	1,37	2,0	A Peak		
KVAR	0,24	THD Rms	3,1	51,3	V THD-R%		
Peak KW	2,27	THD Fund	3,1	59,8	A THD-R%		
Phase	18° lag	HRMS	7	2,02	KWatts		
Total PF	0,81	KFactor		4,1	KVAR		
DPF	0,95				TPF		
					DPF		
					Frequency		

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,0	0	0,02	0,5	0	0,00
1	50,0	225	100,0	0	3,38	86,2	-18	0,72
2	100,0	0	0,1	48	0,02	0,5	42	0,00
3	150,0	3	1,3	-51	1,92	48,9	114	-0,01
4	200,0	0	0,0	17	0,01	0,2	156	0,00
5	250,0	6	2,5	150	0,50	12,6	-146	0,00
6	299,9	0	0,0	108	0,00	0,0	-164	0,00
7	349,9	2	1,0	28	0,34	8,7	-101	0,00
8	399,9	0	0,0	135	0,00	0,0	-79	0,00
9	449,9	1	0,2	-139	0,14	3,5	-13	0,00
10	499,9	0	0,0	141	0,00	0,0	-159	0,00
11	549,9	0	0,2	18	0,12	3,0	16	0,00
12	599,9	0	0,0	80	0,00	0,1	-20	0,00
13	649,9	1	0,3	-21	0,06	1,6	90	0,00
14	699,9	0	0,0	127	0,00	0,0	62	0,00
15	749,9	0	0,1	-84	0,06	1,6	135	0,00
16	799,9	0	0,0	35	0,00	0,0	99	0,00
17	849,8	0	0,1	32	0,04	0,9	-160	0,00
18	899,8	0	0,0	-63	0,00	0,0	165	0,00
19	949,8	0	0,0	-51	0,04	1,0	-108	0,00
20	999,8	0	0,0	17	0,00	0,0	-132	0,00
21	1049,8	0	0,1	-174	0,02	0,5	-51	0,00
22	1099,8	0	0,0	53	0,00	0,0	-89	0,00
23	1149,8	0	0,0	-84	0,02	0,6	6	0,00
24	1199,8	0	0,0	36	0,00	0,0	-167	0,00
25	1249,8	0	0,0	-68	0,02	0,5	53	0,00
26	1299,8	0	0,0	127	0,00	0,0	39	0,00
27	1349,8	0	0,0	-149	0,02	0,4	114	0,00
28	1399,7	0	0,0	-98	0,00	0,0	53	0,00
29	1449,7	0	0,0	0	0,01	0,3	169	0,00
30	1499,7	0	0,0	-114	0,00	0,0	122	0,00
31	1549,7	0	0,0	-63	0,01	0,3	-126	0,00



## ■ Principe

**Utilisation de filtres passifs  
d'harmoniques :**

Une mesure préliminaire est nécessaire pour accorder le filtre et pour vérifier que le réseau n'amène pas d'harmoniques qui pourrait saturer le filtres.

Il s'agit ici d'utiliser un condensateur en série avec une inductance de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donnée. Cet ensemble placé en dérivation sur l'installation présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré.

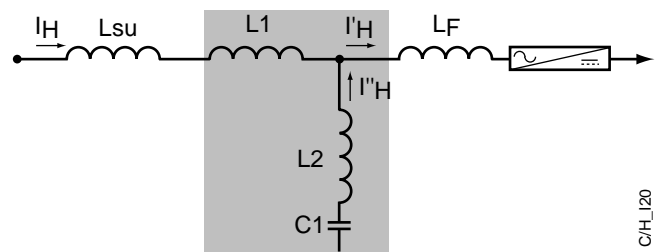
Il est possible d'utiliser simultanément plusieurs ensembles accordés sur des fréquences différentes afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques.

D'apparence simple ce principe demande toutefois une étude soignée de l'installation car si le filtre se comporte bien comme un court-circuit pour la fréquence désirée, il peut présenter des risques de résonnance avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences et ainsi faire augmenter des niveaux d'harmoniques.

## □ Schéma de principe :

Principe : La branche parallèle du filtre est constituée d'un circuit accordé sur l'harmonique le plus important qui présentera une impédance nulle pour ce dernier.

La branche série du filtre comporte une inductance  $L1$  destinée à réaliser un découplage de la branche parallèle vis-à-vis de la source.



□ En appelant  $Z_{pn}$  et  $Z_{sn}$  les impédances des branches parallèle et série du filtre pour l'harmonique de rang  $n$ , et si le courant généré par le redresseur pour ce rang est  $I'_{Hn}$ , le courant fourni par la source est :

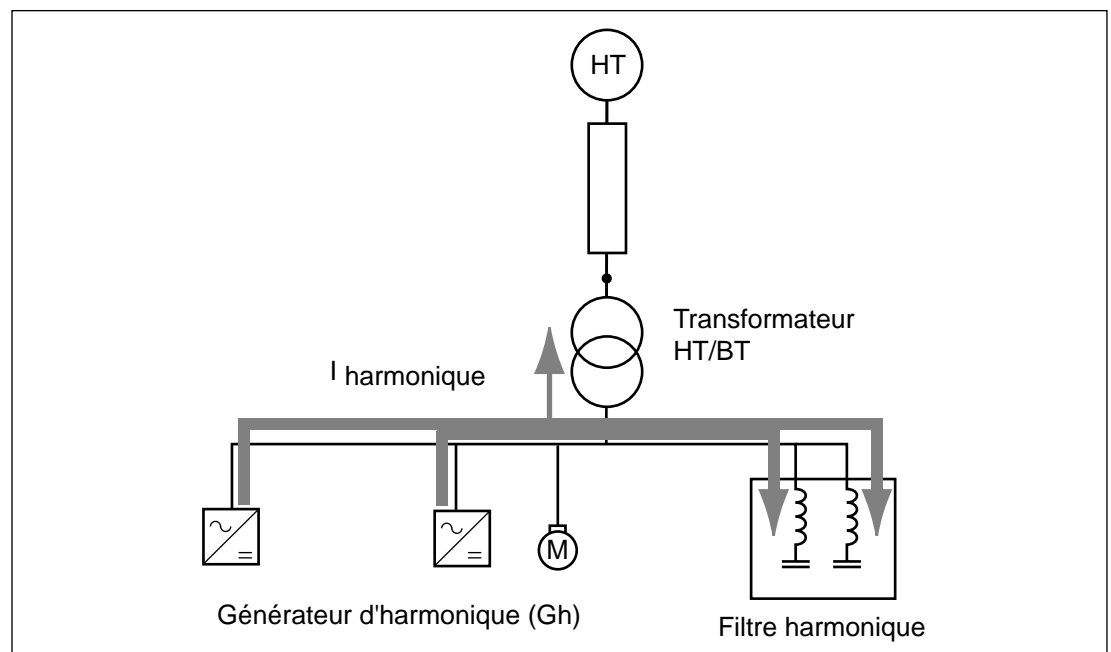
$$I_{Hn} = I'_{Hn} \cdot (Z_{pn} / (Z_{pn} + Z_{sn}))$$

- pour l'harmonique accordé, l'impédance parallèle est nulle. Tout le courant d'harmonique traverse donc la branche parallèle du filtre et cet harmonique n'affecte plus les autres utilisations.

- pour l'harmonique supérieur, du fait de la proximité de l'accord, l'impédance parallèle est encore faible et une grande partie de cet harmonique est aussi éliminée.

- enfin, pour les harmoniques de rangs élevés, l'impédance parallèle du filtre est très proche de celle de son inductance  $L_p$  : le filtre fonctionne en diviseur de courant.

Pour les harmoniques de rangs élevés :  $I_{Hn} = I'_{Hn} \cdot L_2 / (L_2 + L_1 + L_s)$ . Si  $L_2$  est choisi de façon à avoir :  $L_2 = L_s + L_F$ , alors  $I_{Hn} = 0,5 \cdot I'_{Hn}$



□ Rang d'accord des filtres harmoniques :

- rangs 5 et 7 en triphasé
- rangs 3 et 5 en monophasé

## ■ Mesure

1 - Mettre en service les selfs L1 et le filtre passif L2-C1 (filtre accordé sur l'harmonique de rang 3).

Réaliser en toute sécurité le relevé des paramètres suivant à l'aide d'un analyseur les paramètres de l'alimentation en énergie électrique du coffret aux points de mesure U111 (sur le réseau).

TDH pour le taux de distorsion de tension et de courant par rapport au fondamental (THD Fund), le courant efficace (IRMS), H1 pour le fondamental, le Facteur de Puissance (PF), le  $\cos \varphi$  (DPF), le facteur de crête  $\cos \phi$ , la puissance active (KW), la puissance apparente (KVA).

Ainsi que l'allure de la tension, du courant, de la puissance et de leur spectre harmonique.

TDHu (%)	TDHi (%)	IRMS	IH1 (A)	IH3 (A)	IH5 (A)	IH7 (A)	IH9 (A)	PF	Cos $\varphi$	P (kW)	Q (kVA)
3,4	19,6	3,78	3,7	0,47	0,48	0,10	0,22	0,88	0,89	0,74	0,85

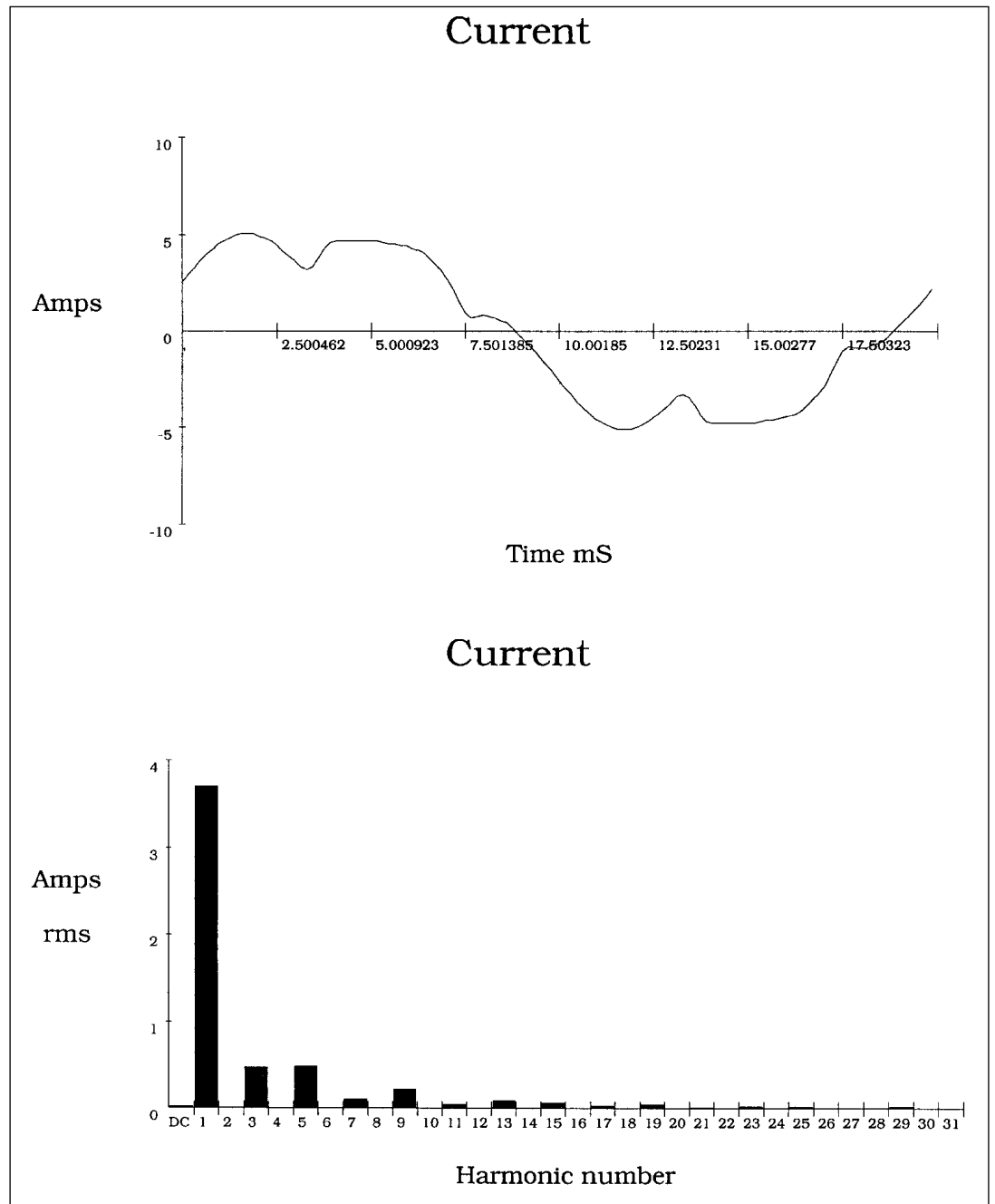
2 - Comment à évolué le TDHi de l'installation ?

□ Commenter l'évolution des IH, de FP et du  $\cos \varphi$ .

*Le filtre passif permet de «taper» sur un rang harmonique mais ne traite pas tout le spectre, le TDHi est pratiquement divisé par 4, on se rend bien compte que le fondamental n'est pas affecté, que le filtre est accordé sur le rang 3 (fréquence de résonance) mais agit aussi sur les rangs proches (5,7,9) le PF et le Cos  $\varphi$  sont pratiquement unitaire. On tient largement la norme 1 A de IH3.*

*L'utilisation du filtre passif en amont des convertisseur de fréquence a les effets suivants :*

- Réduction des harmoniques de courant et donc de la valeur efficace du courant demandé au réseau.
- Conservation de la valeur IH1 (fondamental) pour maintenir le couple moteur.
- Augmentation du facteur de puissance FP.
- Diminution du facteur de crête.



- ☐ Mesure **sur réseau** en I1.
- ☐ VV seul à IN.
- ☐ Filtre passif connecté avec  $L2 = 46\text{mH}$ .
- ☐ Réduction très forte du rang 3 grâce au filtre passif accordé sur ce rang.
- ☐ Le reste du spectre demeure.

Étude des  
phénomènes  
harmoniques

## TP 2 : Étude des remèdes

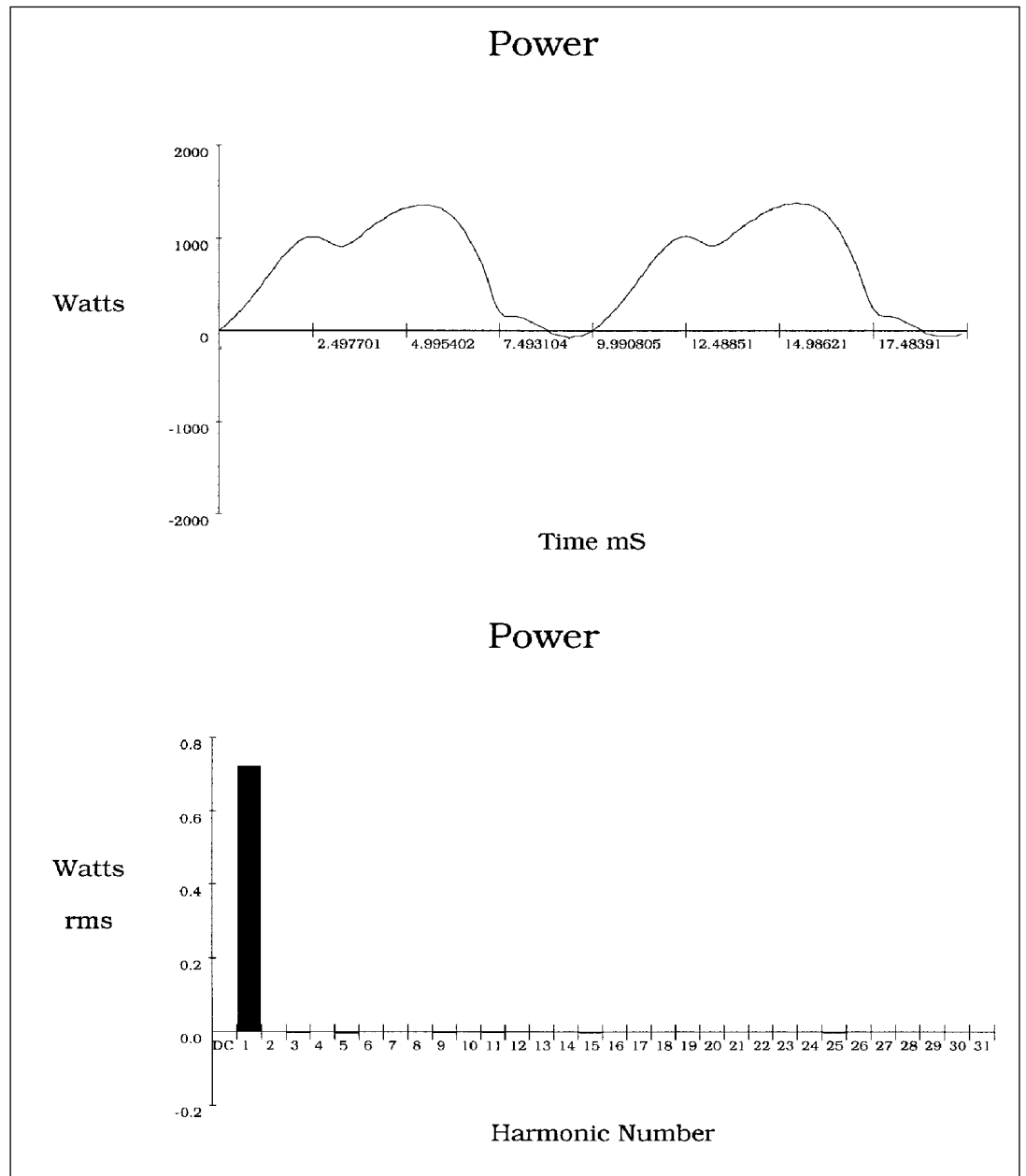
22/54

## Summary Information

		Voltage		Current	Record Information			
		RMS	Peak		Max	Average	Min	
Frequency	50,0	225	307	3,78	V RMS			
Power		DC Offset	0	5,21	A RMS			
KW	0,74	Crest	1,36	-0,02	V Peak			
KVA	0,85	THD Rms	3,4	19,3	A Peak			
KVAR	0,37	THD Fund	3,4	19,6	V THD-R%			
Peak KW	1,51	HRMS	8	0,73	A THD-R%			
Phase	27° lead	KFactor		2,1	KWatts			
Total PF	0,88				KVAR			
DPF	0,89				TPF			
					DPF			
					Frequency			

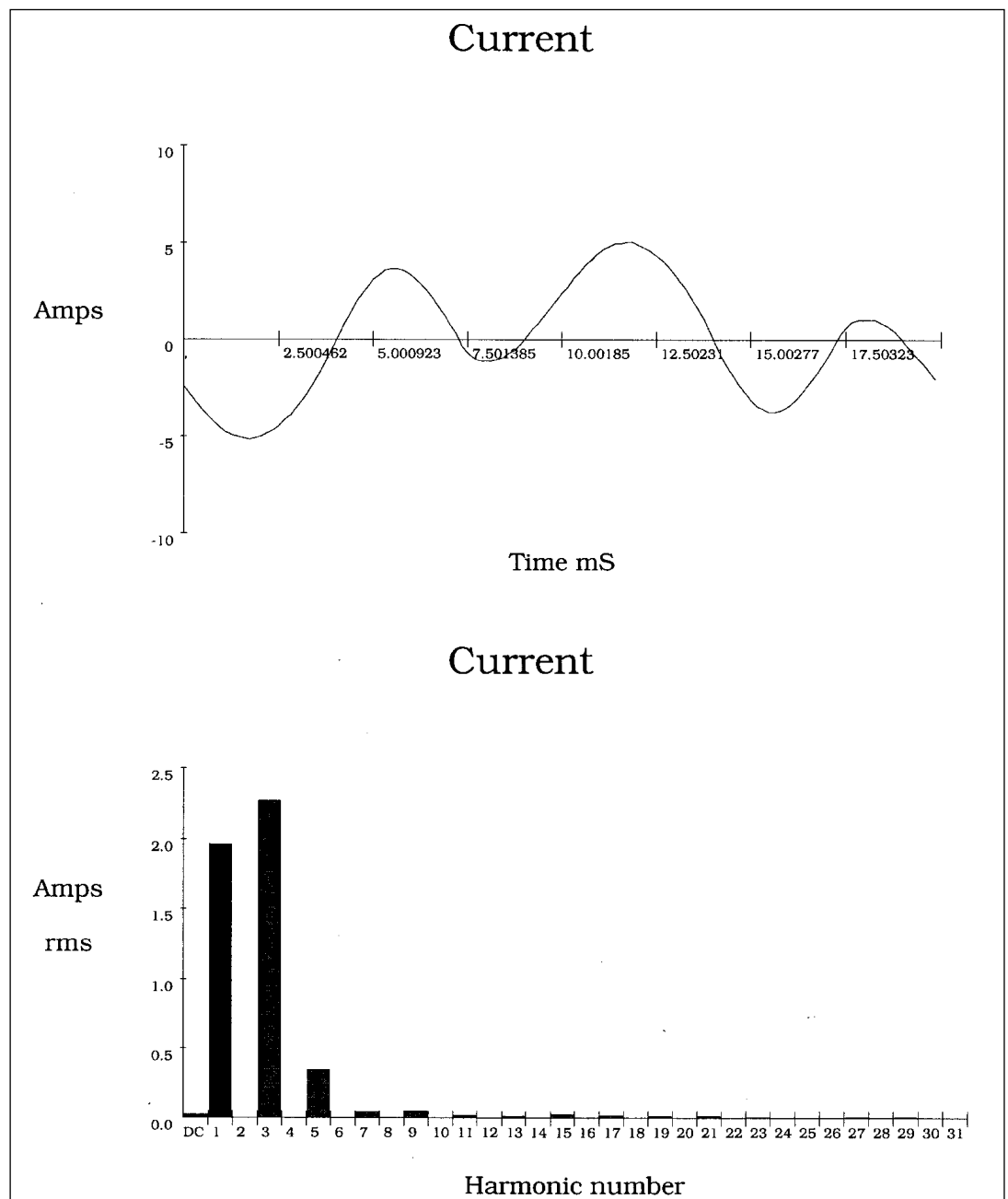
## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,0	0	0,02	0,6	0	0,00
1	50,0	225	100,0	0	3,70	98,6	27	0,74
2	100,0	0	0,1	51	0,01	0,4	65	0,00
3	150,0	1	0,5	-98	0,47	12,6	74	0,00
4	200,0	0	0,0	-16	0,00	0,0	110	0,00
5	250,0	7	3,1	171	0,48	12,7	-32	0,00
6	299,9	0	0,0	80	0,00	0,1	-123	0,00
7	349,9	2	0,9	-13	0,10	2,8	-45	0,00
8	399,9	0	0,0	98	0,00	0,1	-15	0,00
9	449,9	1	0,4	-63	0,22	5,8	124	0,00
10	499,9	0	0,0	162	0,00	0,0	-90	0,00
11	549,9	1	0,4	35	0,05	1,3	-75	0,00
12	599,9	0	0,0	-26	0,00	0,0	0	0,00
13	649,9	1	0,3	7	0,09	2,5	-93	0,00
14	699,9	0	0,0	103	0,00	0,0	13	0,00
15	749,9	0	0,1	-122	0,06	1,6	70	0,00
16	799,9	0	0,0	108	0,00	0,0	68	0,00
17	849,8	0	0,1	55	0,03	0,7	26	0,00
18	899,8	0	0,0	-136	0,00	0,1	141	0,00
19	949,8	0	0,1	-49	0,04	1,2	-153	0,00
20	999,8	0	0,0	32	0,00	0,0	121	0,00
21	1049,8	0	0,0	-117	0,01	0,4	25	0,00
22	1099,8	0	0,0	51	0,00	0,0	163	0,00
23	1149,8	0	0,0	56	0,02	0,6	-2	0,00
24	1199,8	0	0,0	113	0,00	0,0	-134	0,00
25	1249,8	0	0,0	-74	0,02	0,6	153	0,00
26	1299,8	0	0,0	-177	0,00	0,0	-77	0,00
27	1349,8	0	0,0	-172	0,01	0,1	152	0,00
28	1399,7	0	0,0	112	0,00	0,0	-37	0,00
29	1449,7	0	0,0	0	0,02	0,5	-75	0,00
30	1499,7	0	0,0	-34	0,00	0,0	-4	0,00
31	1549,7	0	0,0	-72	0,00	0,1	51	0,00





3 - Mesurer en toute sécurité, à l'aide d'un analyseur d'harmoniques, les paramètres du filtre passif aux points de mesure U1 IFP



- ☐ Mesure I dans le filtre passif.
- ☐ VV à IN
- ☐ avec L1 = 15 mH et L2 = 46 mH
- ☐ Ih3 élevé dans le filtre passif

**Étude des  
phénomènes  
harmoniques**
**TP 2 : Étude des remèdes**

25/54

## Summary Information

		Voltage		Current	Record Information		Average	Min
Frequency	50,0	RMS	225	3,02	V RMS	Max		
Power		Peak	308	5,22	A RMS			
KW	-0,03	DC Offset	0	-0,03	V Peak			
KVA	0,68	Crest	1,37	1,73	A Peak			
KVAR	0,44	THD Rms	3,0	76,1	V THD-R%			
Peak KW	1,17	THD Fund	3,0	117,1	A THD-R%			
Phase	94° lag	HRMS	7	2,30	KWatts			
Total PF	-0,04	KFactor		**OL**	KVAR			
DPF	-0,07				TPF			
					DPF			
					Frequency			

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,1	0	0,03	0,9	0	0,00
1	50,0	225	100,0	0	1,96	65,4	-94	-0,03
2	100,0	0	0,1	40	0,00	0,1	-81	0,00
3	150,0	1	0,5	-63	2,27	75,7	169	0,00
4	200,0	0	0,1	7	0,00	0,2	125	0,00
5	250,0	6	2,8	167	0,35	11,6	-61	0,00
6	299,9	0	0,0	71	0,00	0,1	-70	0,00
7	349,9	1	0,6	-15	0,05	1,6	50	0,00
8	399,9	0	0,0	131	0,00	0,0	-132	0,00
9	449,9	1	0,3	-82	0,05	1,8	86	0,00
10	499,9	0	0,0	163	0,00	0,0	-39	0,00
11	549,9	1	0,3	53	0,02	0,5	-137	0,00
12	599,9	0	0,0	79	0,00	0,0	136	0,00
13	649,9	0	0,2	-36	0,01	0,5	-81	0,00
14	699,9	0	0,0	141	0,00	0,0	-105	0,00
15	749,9	0	0,1	-98	0,02	0,8	38	0,00
16	799,9	0	0,0	-84	0,00	0,0	72	0,00
17	849,8	0	0,1	37	0,02	0,6	130	0,00
18	899,8	0	0,0	-48	0,00	0,0	-87	0,00
19	949,8	0	0,0	-98	0,01	0,4	-171	0,00
20	999,8	0	0,0	106	0,00	0,0	106	0,00
21	1049,8	0	0,1	-139	0,01	0,4	-77	0,00
22	1099,8	0	0,0	-134	0,00	0,0	-44	0,00
23	1149,8	0	0,0	112	0,01	0,2	77	0,00
24	1199,8	0	0,0	-160	0,00	0,0	53	0,00
25	1249,8	0	0,0	-41	0,00	0,0	93	0,00
26	1299,8	0	0,0	0	0,00	0,0	75	0,00
27	1349,8	0	0,0	110	0,01	0,2	-114	0,00
28	1399,7	0	0,0	23	0,00	0,0	-172	0,00
29	1449,7	0	0,0	51	0,01	0,3	-8	0,00
30	1499,7	0	0,0	-30	0,00	0,0	-115	0,00
31	1549,7	0	0,0	-77	0,00	0,2	0	0,00

## ■ Calcul du filtre passif

## □ Introduction:

La branche parallèle du filtre constituée d'un condensateur  $C_p$  en série avec une inductance  $L_p$  à une impédance complexe  
 $Z_p = r + j(L\omega - 1/C\omega)$

Où  $r$  est la résistance de l'inductance  $L_p$ .

L'étude de cette impédance en fonction de la fréquence présente :

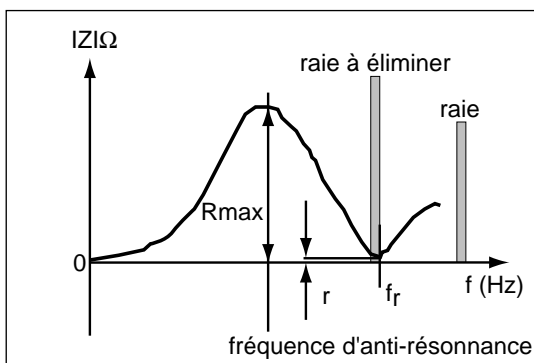
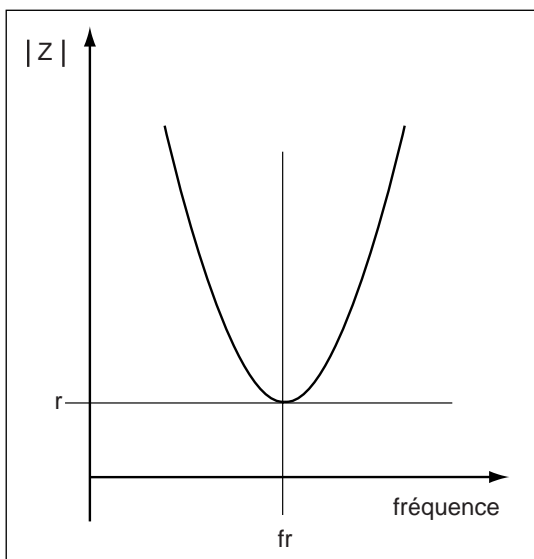
- une valeur minimale résistive à la fréquence de résonance  $f_r$  ;
- une impédance capacitive pour les fréquences inférieures à  $f_r$  ;
- une impédance inductive pour les fréquences supérieures à  $f_r$  ;

L'objectif est d'accorder ce filtre sur le rang le plus riche en harmoniques, ainsi ce courant produit par la charge se dirige vers le filtre et non vers le réseau. Le filtre est donc un absorbeur de courants harmoniques.

L'ensemble de l'installation présente une impédance  $A$  dont le comportement représenté sur le graphe suivant : ou l'on met en évidence une fréquence d'anti-résonance ou  $Z$  a une impédance maximale. Il est important de bien connaître le spectre harmonique pour caler correctement notre filtre. Dans notre cas celui-ci est déterminé pour une éliminer les IH3 donc accordé sur 150 Hz.

Il faut :

- bien vérifier que l'anti-résonance n'est pas sur un rang riche en harmoniques ;
- tenir compte des harmoniques préexistantes sur le réseau qui pourraient entraîner un échauffement supplémentaire des condensateurs ;



## ■ Spectre Harmonique de l'ATV18 (370W)

IRMS ligne	= 4A
IH1	= 2,4A
IH3	= 2,3A
IH5	= 2A
IH7	= 1,8A
IH9	= 2,3A

Sans self de ligne à  $U_n = 240V$

## □ Calcul

1 - Calcul de la puissance apparente SN (d'entrée) de l'ATV18.

□ Sans la self de ligne L1 :

$$S(KVA) = U_{eff}.I_{eff} = 240 \times 4 = 960VA.$$

□ Avec la self de ligne L1 :

Cette self limite le spectre harmonique par conséquent la puissance apparente va être réduite. Cette self doit être obligatoirement associée au filtre passif de façon à s'affranchir par «découplage impédant» des variations de courants harmoniques pré-existants sur le réseau.

Le filtre passif sera ainsi dimensionner que pour les seuls harmoniques générés par la charge à dépolluer.

□ Calcul de SN :

La valeur du condensateur de filtre étant déterminée sur le fondamental :

$$SN = U1.I1 = 240. 2,4 = 570 VA$$

2 - Calcul de QC.

## ■ Hypothèse de travail :

□ Si présence de condensateur de compensation d'énergie réactive sur l'installation :

$(QC / SN) < 15\%$  avec QC filtre passif et SN puissance du transformateur d'alimentation.

□ Si absence de condensateur :

$(QC / SN) < 30\%$  avec QC filtre passif et SN puissance du transformateur d'alimentation.

**Note :** si la puissance de la charge est très inférieure de celle du transformateur d'alimentation pour calculer QC, on choisira le SN de la charge. Ce sera le cas dans notre application.

$$\frac{QC}{570} < 30 \% \text{ donc } QC = 170 \text{ VAR}$$

**3 - Calcul de C1**

$$Q = U^2 \cdot C \omega$$

$$C = \frac{Q}{U^2 \cdot \omega} = \frac{170}{270^2 \cdot 2\pi \cdot 50} = 7,4 \mu\text{F}$$

**4 - Calcul de la tension de dimensionnement Ud du condensateur C1**

$$U_d = U(50\text{Hz}) \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} + \sum_{n=2}^{n=\infty} U_n n^2$$

$$U_d = U(50\text{Hz}) \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} + U_{h3} + U_{h5}$$

Le terme  $\frac{n^2}{n^2 - 1}$  permet de tenir compte de la surtension de la self sur la circulation des courants harmoniques.

Dans notre cas on prendra  $n = 3$  car filtre de rang 3 donc

$$\frac{n^2}{n^2 - 1} = 1,125$$

$$\square \text{ Calcul de } U_{h3} = \frac{I_{h3}}{C\omega} = \frac{2,3}{7,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 150} = 330\text{V}$$

$\square$  Calcul de  $U_{h5}$  :

Par hypothèse nous fixerons une valeur de 30% de circulation de  $I_{h5}$  dans le filtre.

$$U_{h5} = \frac{I_{h5} \cdot 0,3}{C\omega} = \frac{2 \cdot 0,3}{7,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 250} = 51\text{V}$$

$\square$  Calcul de  $U_d$

$$U_d = (240 \times 1,125) + 330 + 51 = 651\text{V}$$

**Note :** l'addition est faite algébriquement de façon à prendre une marge de sécurité.

Cette tension est très élevée pour cette faible valeur de condensateur et ne correspond pas à un produit standard. Nous opterons pour une valeur standard de condensateur de  $24,8 \mu\text{F}$ . Cette donnée technologique modifie les hypothèses de départ et permettra d'abaisser la tension de dimensionnement  $U_d$ .

□ Nouveau calcul de  $U_d$

$$U_{h3} = \frac{I_{h3}}{C\omega} = \frac{2,3}{24,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 150} = 98V$$

$$U_{h5} = \frac{I_{h5} \cdot 0,3}{C\omega} = \frac{2 \cdot 0,3}{24,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 250} = 15V$$

$$U_d = 240 \cdot \frac{9}{9-1} + 98 + 15 = 385V$$

**5 - Calcul de dimensionnement en courant de la capacité C1**

$$I_{eff} = \sqrt{I_{cH1}^2 + I_{cH3}^2 + I_{cH5}^2} \text{ (dans la capa)}$$

$$I_{cH1} = U_1 C \omega_1 = 240 \cdot 24,8 \cdot 2\pi \cdot 50 = 1,8A$$

$$I_{cH3} = U_3 C \omega_3 = 98 \cdot 24,8 \cdot 2\pi \cdot 150 = 2,3A$$

$$I_{cH5} = U_1 C \omega_5 = 2 \cdot 0,3 = 0,6A$$

$$I_{eff} = \sqrt{1,8^2 + 2,3^2 + 0,6^2} = 3A$$

□ Choix du condensateur C1 :

RECTIPHASE : référence D12A

3,3A ; 600V ; 50Hz ; 24,8μF

Ce condensateur standard est adapté à la nouvelle tension de dimensionnement  $U_d$ .

**6 - Calcul de la self L2**

$$LC\omega^2 = 1 \text{ à l'accord au rang } 3 = 150 \text{ hz.}$$

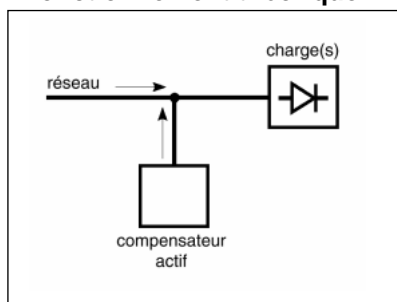
$$L = \frac{1}{C\omega^2} = \frac{1}{24,8 \cdot 10^{-6} \cdot (2\pi \cdot 150)^2} = 46mH$$

□ Nota : on peut tenir compte de la dérive de la valeur du condensateur dans le temps en accordant le filtre à une valeur légèrement inférieur au rang 3 (par exemple 2,95).

□ Choix de la self L2 :

AGECELEC n°181120 ; 46mH ; 3,5A

### Le compensateur actif : explication du fonctionnement théorique.

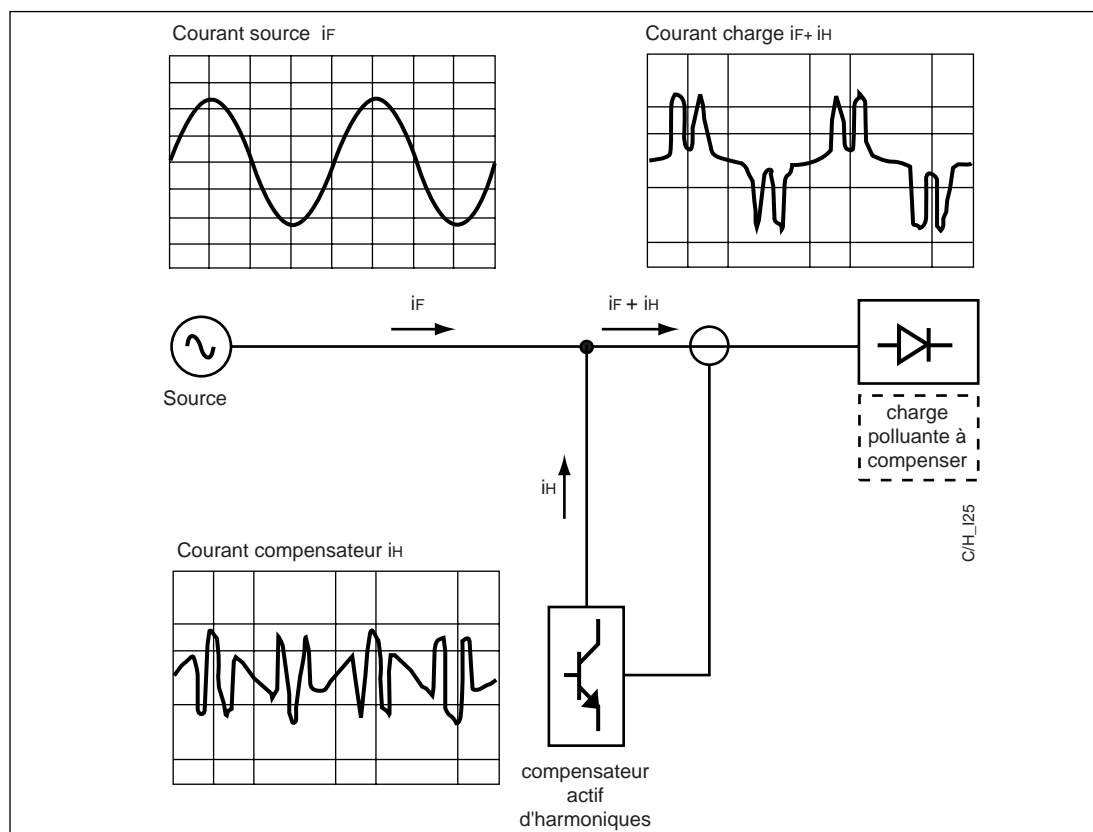


### ■ Présentation du compensateur actif

■ L'objectif est de minimiser - sinon d'annuler - au point de raccordement les harmoniques du courant (ou de la tension), par injection d'un courant (ou d'une tension) «complémentaire».

■ Sous réserve que le dispositif soit apte à injecter à tout instant un courant dont chaque composante harmonique est de même amplitude que celle du courant dans la charge, et de phase opposée, alors la loi de sommation des courants en A garantit que le courant fourni par la source est purement sinusoïdal.

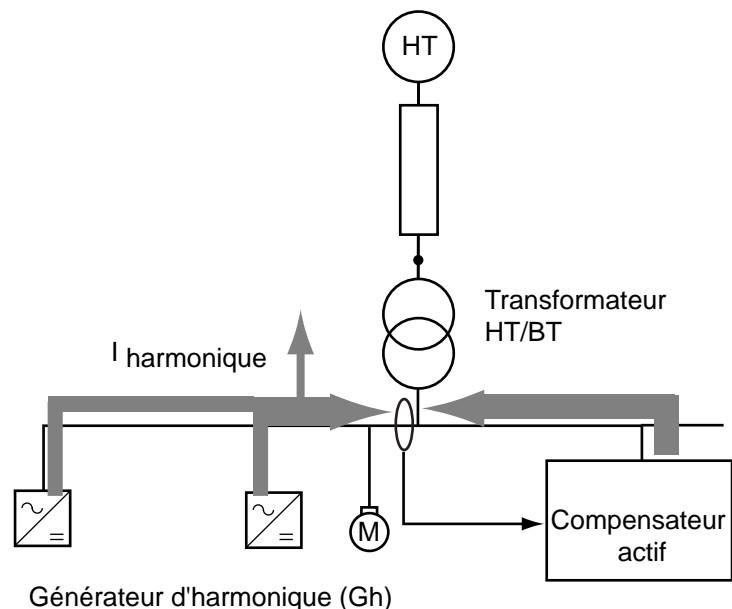
L'association «charges perturbatrices + compensateur actif» constitue une charge linéaire.



■ Ce type de dispositif est particulièrement bien adapté à la dépollution des réseaux BT, et ce quel que soit le point de raccordement choisi et le type de charge (car ce dispositif est auto-adaptatif). Le compensateur actif «shunt» constitue une source de courant indépendante de l'impédance réseau, et qui présente les caractéristiques intrinsèques suivantes :

- ❑ sa bande passante est suffisante pour garantir la suppression des composantes harmoniques majoritaires (en termes statistiques) du courant de la charge. Typiquement, nous considérons que la plage H 2 - H 23 est satisfaisante ; car plus le rang est élevé, plus le niveau de l'harmonique est faible.
- ❑ son temps de réponse est tel que la compensation harmonique soit effective non seulement en régime établi, mais encore en régime transitoire «lent» (quelques dizaines de ms),
- ❑ sa puissance permet d'atteindre les objectifs de dépollution fixés, ce qui ne signifie pas nécessairement la compensation totale et permanente des harmoniques générés par la (ou les) charge(s). Sous réserve que ces trois objectifs soient simultanément atteints, alors le compensateur actif «shunt» constitue un excellent dépollueur, car auto-adaptatif, et ne présentant aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau.

## Schémas de principe

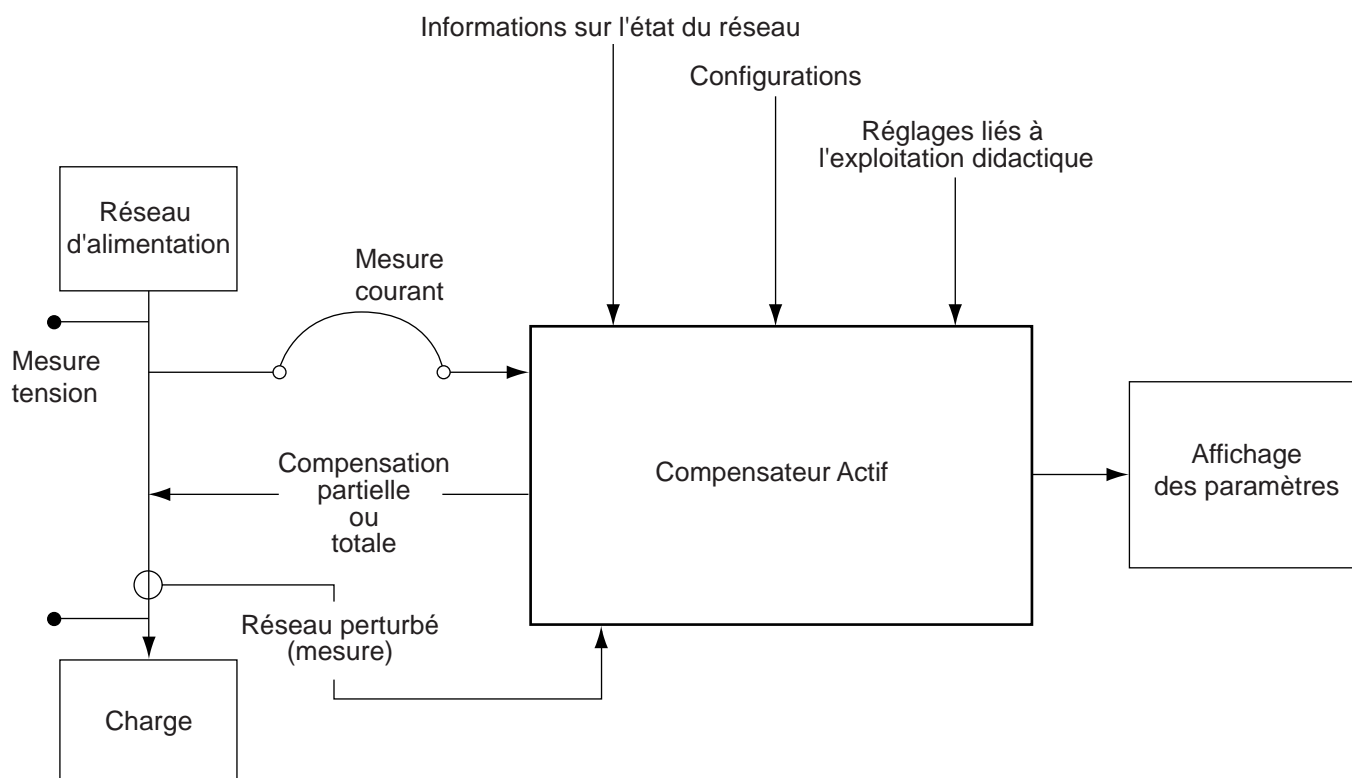




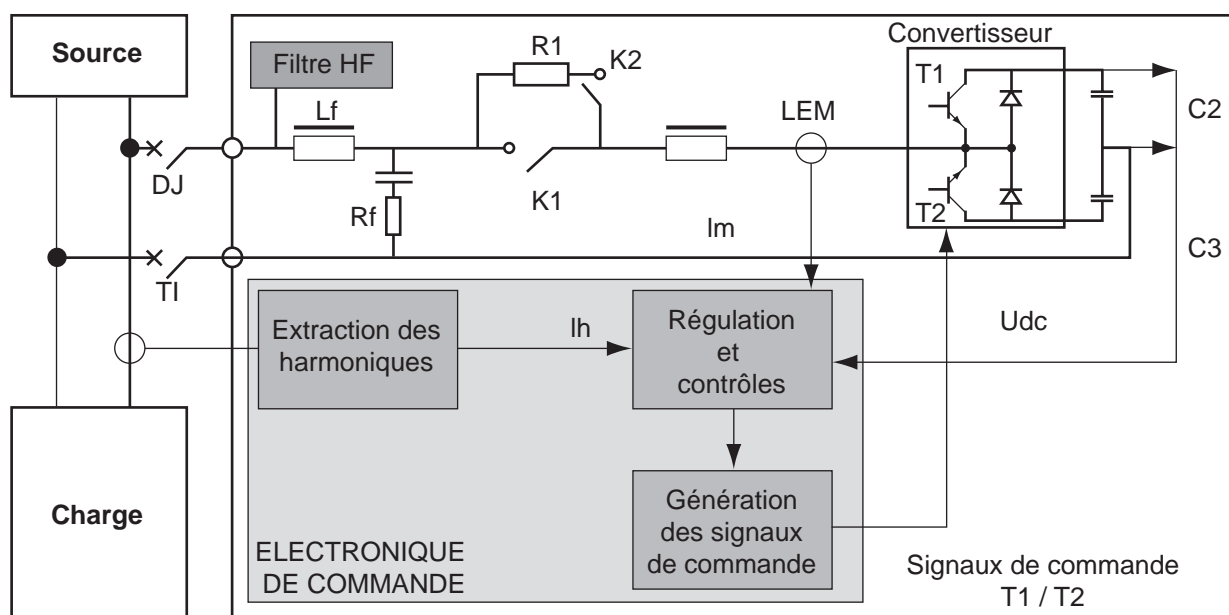
Étude des  
phénomènes  
harmoniques

## TP 2 : Étude des remèdes

32/54



## Schéma de principe unifilaire



### ■ Descriptif

## Technologie du filtre actif

### Transistor de type IGBT (Insolated Gate Bipolar Transistor)

Mixage des technologies MOS et bi-polaire permettant de réunir l'avantage du bi-polaire (bonne capacité de sortie en courant) e MOS (Rapidité, faible consommation de courant de commande)

H22 Interfaces d'alimentation

# Compensateur actif d'harmoniques SineWave™ de 20 à 480 A de la marque MGEUPS

## Présentation

Le compensateur actif d'harmoniques SineWave de 20 à 480 A permet une dépollution harmonique des installations de 10 à 2000 kVA.

### Principe de fonctionnement

Le compensateur actif analyse les harmoniques consommés par la charge et restitue ensuite à cette dernière le même courant harmonique avec la phase convenable. Conséquence : au point considéré, il y a neutralisation complète des courants harmoniques. Ainsi, ces courants ne circulent plus en amont et ne sont plus fournis par la source.

SineWave™ réduit les harmoniques en courant dans un rapport de 10 pouvant aller jusqu'à 20 en fonction de la nature des charges. Cette compensation des harmoniques va du rang 2 jusqu'au rang 25 et donne ainsi une large plage de réglage en fonction de chaque type de charge.

2 modes de fonctionnement sont possibles :

- c compensation globale
- c compensation d'un rang déterminé.

SineWave contribue aussi à l'amélioration du cosinus  $\phi$  et du facteur de puissance apportant ainsi une réduction du coût de l'énergie.

### Intégration dans l'installation

L'encombrement de SineWave est réduit. Il peut se placer sur un mur, dans un tableau ou dans une armoire électrique.

SineWave s'adapte automatiquement à toute charge monophasée ou triphasée, informatique, éclairage fluorescent, variateurs de vitesse...

## Fonctions

- c Compensation des harmoniques : globale ou rang par rang (paramétrable).
- c Compensation du facteur de déphasage ( $\cos \phi$ ) (paramétrable).
- c Paramétrage du type de charges : informatique, redresseur...
- c Compensation du facteur de puissance.
- c Technologie IGBT et contrôle par circuit DSP
- c 3 DEL de signalisation du fonctionnement.
- c Afficheur alphanumérique 7 langues.
- c Système de diagnostic et de maintenance.
- c Menu de configuration et paramétrage.
- c Relayage pour report à distance.
- c Commande à distance (verrouillable).
- c Conformité aux normes et marquage CE.
- c Redondance et mise en parallèle.
- c Grande variété de capteurs de courant.
- c Interface de communication JBUS / RS 485 (option).

Il est compatible avec tout réseau triphasé d'alimentation.

Son raccordement en parallèle sur le réseau ne nécessite aucune coupure de la partie puissance (capteur ouvrant) et peut se situer en n'importe quel point de l'installation (tableau général basse tension, tableaux divisionnaires, coffrets de distribution terminale).

Plusieurs compensateurs peuvent être répartis dans une même installation afin de renforcer l'efficacité de la dépollution (par exemple en cas d'insertion d'une nouvelle machine).

On peut mettre en parallèle jusqu'à 4 compensateurs actifs SineWave ou les brancher en cascade.

### Interface homme-machine

L'interface homme-machine (IHM) en face avant de SineWave permet :

- c l'aide à la mise en service et à la maintenance
- c le paramétrage (langue de l'affichage, type de compensation harmonique)
- c l'exploitation (états, mesures, alarmes, commandes).

Cet IHM est détachable (cordon de 3 mètres) et peut être installé sur la face avant du tableau contenant SineWave. Par ailleurs, la commande à distance est possible par contacts secs et liaison série RS 485 (en option).

Etudes des alimentations sans  
interruption : page K(1k).

Schneider - Catalogue distribution BT 98

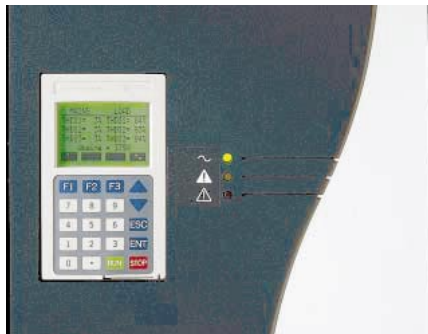
## Caractéristiques

	SW20 n	SW30 n	SW45 n	SW60 n	SW90 n	SW120 n
capacité de compensation par phase	20 A eff	30 A eff	45 A eff	60 A eff	90 A eff	120 A eff
capacité de compensation dans le neutre (1)	60 A eff	90 A eff	135 A eff	180 A eff	270 A eff	360 A eff
entrée réseau						
tension nominale (2)	400 V - 20 + 15 %					
fréquence nominale	50 Hz, 60 Hz, +/- 8 %					
nombre de phases	3 phases avec ou sans neutre (fonctionnement possible sur charges monophasées ou déséquilibrées)					
capteurs de courant	calibres de 300/1 à 4000/1					
caractéristiques techniques						
courants harmoniques compensés	rang 2 à 25, compensation globale ou rang par rang					
taux d'atténuation harmonique	THDI charge / THDI réseau supérieur à T0, à capacité nominale du compensateur					
compensation du cos φ	jusqu'à 1.0					
temps de réponse	< 40 ms					
surcharge	limitation au courant nominal, fonctionnement permanent en limitation possible					
courant d'appel	< 2 fois courant nominal crête					
pertes	1000 W	1300 W	2100 W	2600 W	4200 W	5200 W
bruit acoustique (ISO 3746)	< 55 dBA	< 55 dBA	< 60 dBA	< 60 dBA	< 65 dBA	< 65 dBA
couleur	RAL 9002					
conditions d'environnement						
température de fonctionnement	0 à 30 °C permanent, < 25 °C recommandé					
humidité relative	0 à 95 % sans condensation					
altitude de fonctionnement	< 1000 m					
normes de référence						
construction et sécurité	EN 50091-1					
conception	CEI 146					
protection	IP 30 suivant CEI 529					
compatibilité électromagnétique						
émission conduite et rayonnée	EN 55011 niveau A					
immunité aux décharges électrostatiques	CEI 1000-4-2 niveau 3					
immunité aux champs rayonnés	CEI 1000-4-3 niveau 3					
immunité aux ondes de choc	CEI 1000-4-4 et CEI 1000-4-5 niveaux 4					

(1) Capacité maximum sur charge informatique de type PC, et sur réseau triphasé équilibré.

(2) Autres tensions 208 V, 220 V, 480 V disponibles sur demande.

**Note d'exploitation et  
paramétrage du filtre actif**



- Programmation du compensateur actif


■ Mise sous tension par l'interrupteur face AR

■ Mise en service de l'appareil

□ Mise en marche : Touches **RUN** + **ENT**


□ Mise à l'arrêt : Touches **STOP** + **ENT**

■ Paramétrages des rangs d'harmoniques : modification de la programmation

□ Déplacement dans le menu général avec les touches  jusqu'à **CONFIGURATION**

□ Validation par la touche **ENTER**

□ Entrer le mot de passe : taper 5555 au clavier + **ENT**

□ Dans le nouveau menu de configuration, rechercher le paramètre **CHOIX DES HARMONIQUES** avec les touches  + **ENT**

□ Sélectionner les rangs d'harmoniques désirés avec les touches **F2** = OUI ; **F3** = NON ; + **ENT** en fin de programmation

□ Confirmation de la mémorisation (MEM) de cette programmation : **F2** + **ENT**

FIN DE PROGRAMMATION


■ Nota :

□ Programmer H2 à H25 = NON ; **Filtre Actif Seul**

Programmer H2 / H3 = NON ; H4 à H25 = OUI ;  
**Filtrage Hybride Passif + Actif**

- Procédure de Marche / Arrêt du filtre actif :

- ☐ Mise sous tension de l'appareil par l'interrupteur face AR


LED  allumée (présence tension)

Nota : la charge est alimentée par le réseau EDF

- ☐ Mise en marche par les touches  +  ; LED  allumée (filtre actif en service)

- ☐ Mise à l'arrêt par les touches  +  ; LED  allumée (présence tension)

Nota : la charge est alimentée par le réseau EDF

- ☐ Fonctionnement en surcharge : LED contrôle  allumée lorsque l'appareil centrale dépasse sa capacité de dépollution, environ 2A de courant harmonique

**Mesure**

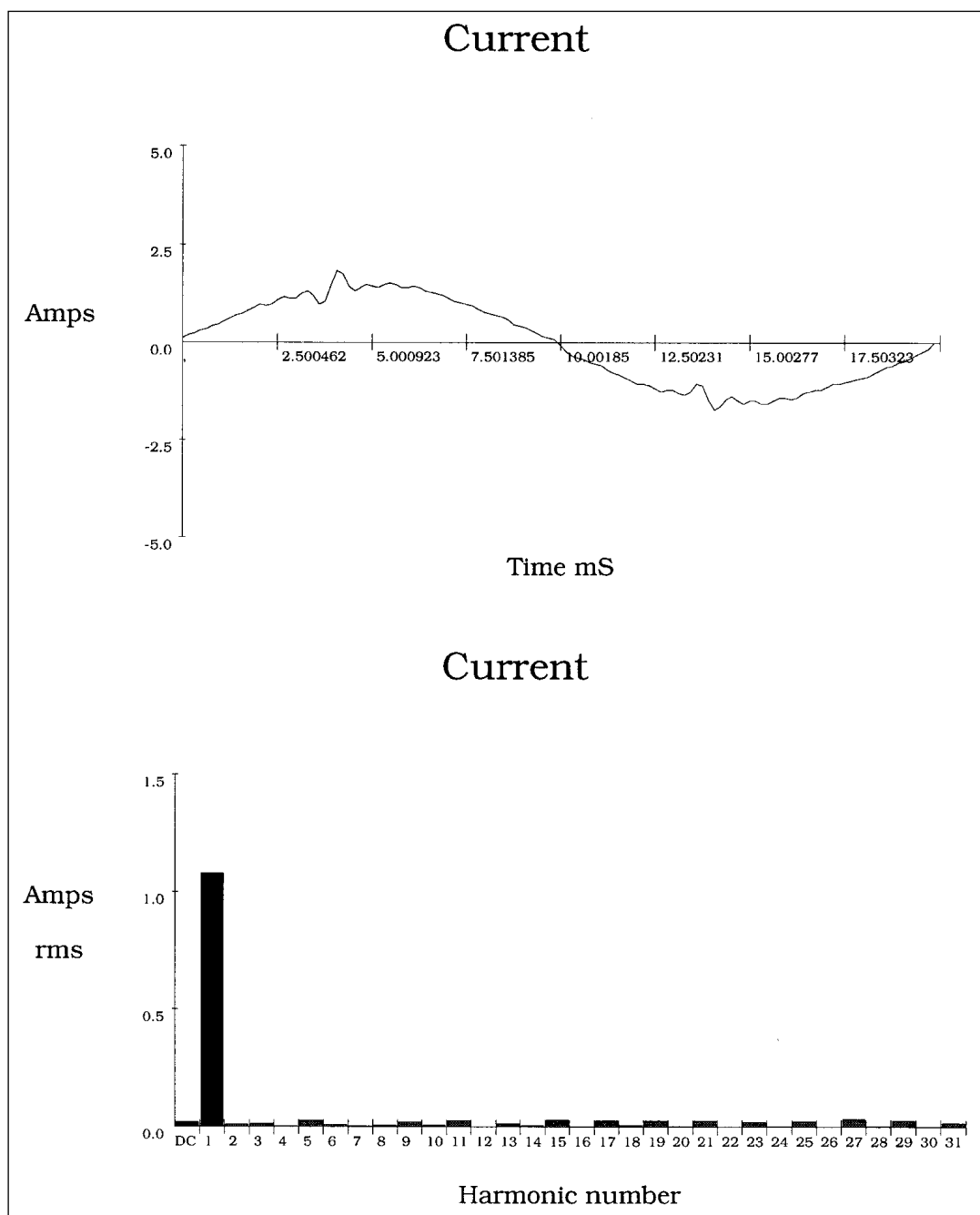
- ☐ Mettre en service le filtre actif et paramétrer celui-ci pour balayer l'ensemble du spectre.
- ☐ Mesurer en toute sécurité, à l'aide d'un analyseur d'harmoniques, les paramètres de l'alimentation en énergie électrique aux points de mesure U «tension», I «réseau» et I «filtre» situés sur le compensateur actif et **non plus sur les points test U111 de l'armoire de commande.**

Choix des harmoniques : OUI sur tous les rangs

- ☐ Réaliser pour les trois situations suivantes :

- Faiblement chargé
- Filtre actif en limite de surcharge
- A In moteur

- ☐ Relevé et analyse : à In Variateur, le filtre est en surcharge donc ne dépollue pas complètement notre installation.



- ☐ Mesure sur I Réseau (sur compensateur actif)
- ☐ VV seul faiblement chargé
- ☐ Filtre actif seul programmé des rangs H2 à H25
- ☐ Dépollution totale du spectre

**Étude des  
phénomènes  
harmoniques**
**TP 2 : Étude des remèdes**

39/54

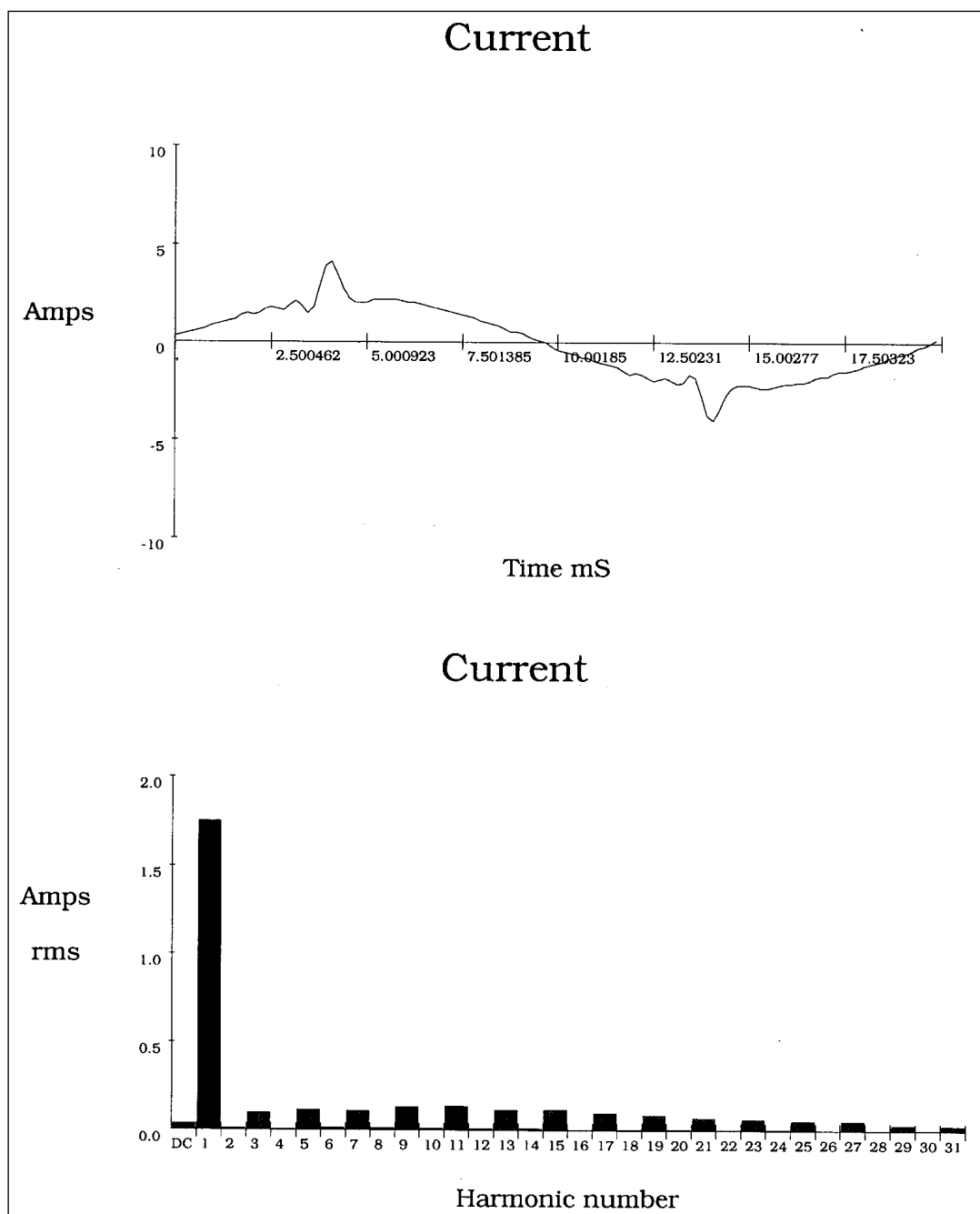
## Summary Information

			Voltage	Current	Record Information		
					Max	Average	Min
Frequency	50,0	RMS	226	1,09	V RMS		
Power		Peak	310	1,81	A RMS		
KW	0,24	DC Offset	0	-0,02	V Peak		
KVA	0,25	Crest	1,37	1,66	A Peak		
KVAR	0,01	THD Rms	2,6	8,8	V THD-R%		
Peak KW	0,58	THD Fund	2,6	8,9	A THD-R%		
Phase	3° lead	HRMS	6	0,10	KWatts		
Total PF	0,99	KFactor		4,0	KVAR		
DPF	1,00				TPF		
					DPF		
					Frequency		

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,1	0	0,02	2,1	0	0,00
1	50,0	226	100,1	0	1,08	101,5	3	0,24
2	100,0	1	0,4	-146	0,01	1,1	-110	0,00
3	150,0	0	0,1	-49	0,01	1,4	41	0,00
4	200,0	0	0,1	155	0,00	0,4	73	0,00
5	250,0	5	2,3	174	0,03	2,6	-18	0,00
6	299,9	0	0,1	113	0,01	1,2	67	0,00
7	349,9	2	1,1	-8	0,00	0,4	149	0,00
8	399,9	0	0,1	-61	0,01	0,9	-136	0,00
9	449,9	0	0,1	82	0,02	1,8	82	0,00
10	499,9	0	0,1	-55	0,01	0,6	79	0,00
11	549,9	0	0,2	50	0,03	2,5	-22	0,00
12	599,9	0	0,0	131	0,00	0,2	50	0,00
13	649,9	1	0,2	-29	0,01	1,2	174	0,00
14	699,9	0	0,0	-158	0,01	0,8	122	0,00
15	749,9	0	0,1	-88	0,03	2,8	40	0,00
16	799,9	0	0,0	-18	0,00	0,1	0	0,00
17	849,8	0	0,1	38	0,03	2,5	-96	0,00
18	899,8	0	0,0	137	0,01	0,6	165	0,00
19	949,8	0	0,0	-87	0,03	2,5	108	0,00
20	999,8	0	0,0	128	0,00	0,4	73	0,00
21	1049,8	0	0,0	-139	0,03	2,6	-29	0,00
22	1099,8	0	0,0	124	0,00	0,2	-120	0,00
23	1149,8	0	0,0	43	0,02	1,9	-174	0,00
24	1199,8	0	0,0	-33	0,01	0,6	128	0,00
25	1249,8	0	0,0	-138	0,02	2,3	54	0,00
26	1299,8	0	0,0	89	0,00	0,2	23	0,00
27	1349,8	0	0,0	33	0,03	3,1	-76	0,00
28	1399,7	0	0,0	10	0,01	0,5	169	0,00
29	1449,7	0	0,0	12	0,03	2,6	122	0,00
30	1499,7	0	0,0	72	0,00	0,2	170	0,00
31	1549,7	0	0,0	-164	0,02	1,5	-8	0,00





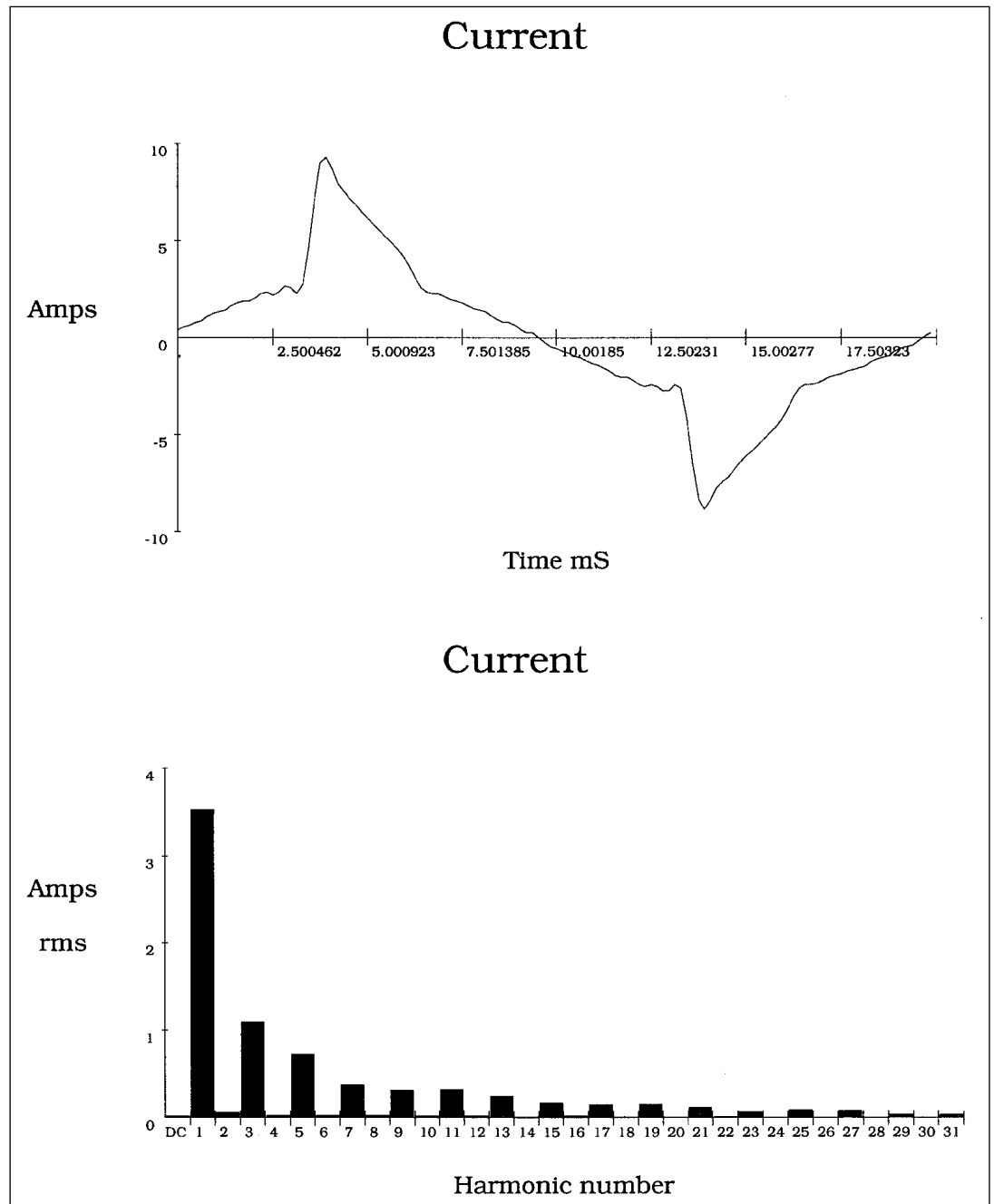
- ☐ Mesure sur le Réseau
- ☐ VV seul
- ☐ Filtre actif en limite de surcharge (1,7A RMS) programmé des rangs H2 à H25

## Summary Information

			Voltage	Current		Record Information	Max	Average	Min
Frequency	50,0	RMS	224	1,79	V RMS				
Power		Peak	307	4,16	A RMS				
KW	0,39	DC Offset	0	-0,04	V Peak				
KVA	0,40	Crest	1,37	2,32	A Peak				
KVAR	0,05	THD Rms	2,5	20,3	V THD-R%				
Peak KW	1,29	THD Fund	2,5	20,8	A THD-R%				
Phase	7° lead	HRMS	6	0,36	KWatts				
Total PF	0,97	KFactor		9,0	KVAR				
DPF	0,99				TPF				
					DPF				
					Frequency				

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,1	0	0,04	2,0	0	0,00
1	50,0	224	100,1	0	1,75	99,7	7	0,39
2	100,0	1	0,4	-147	0,01	0,6	-115	0,00
3	150,0	0	0,1	-6	0,09	5,4	-134	0,00
4	200,0	0	0,1	170	0,00	0,3	151	0,00
5	250,0	5	2,2	178	0,11	6,4	78	0,00
6	299,9	0	0,0	142	0,02	1,0	58	0,00
7	349,9	3	1,1	-8	0,11	6,3	-60	0,00
8	399,9	0	0,1	-59	0,01	0,9	-125	0,00
9	449,9	0	0,1	45	0,13	7,5	146	0,00
10	499,9	0	0,1	-64	0,01	0,5	104	0,00
11	549,9	0	0,2	63	0,14	7,7	6	0,00
12	599,9	0	0,0	169	0,01	0,6	-79	0,00
13	649,9	1	0,3	-18	0,12	6,6	-144	0,00
14	699,9	0	0,0	180	0,01	0,6	148	0,00
15	749,9	0	0,1	-103	0,12	6,8	72	0,00
16	799,9	0	0,0	-83	0,00	0,2	21	0,00
17	849,8	0	0,1	63	0,10	5,6	-75	0,00
18	899,8	0	0,0	102	0,01	0,4	-123	0,00
19	949,8	0	0,0	-46	0,09	5,0	141	0,00
20	999,8	0	0,0	-143	0,01	0,4	117	0,00
21	1049,8	0	0,1	-160	0,07	4,1	5	0,00
22	1099,8	0	0,0	51	0,01	0,4	-70	0,00
23	1149,8	0	0,1	55	0,06	3,5	-139	0,00
24	1199,8	0	0,0	-91	0,00	0,3	-179	0,00
25	1249,8	0	0,0	-114	0,05	3,0	85	0,00
26	1299,8	0	0,0	36	0,00	0,1	-169	0,00
27	1349,8	0	0,0	-141	0,05	3,1	-39	0,00
28	1399,7	0	0,0	62	0,00	0,2	-23	0,00
29	1449,7	0	0,0	65	0,03	1,9	-162	0,00
30	1499,7	0	0,0	-49	0,00	0,2	-150	0,00
31	1549,7	0	0,0	-75	0,03	1,7	91	0,00



- ☐ Mesure sur I Réseau
- ☐ VV seul à In
- ☐ Filtre actif seul programmé des rangs H2 à H25
- ☐ Conclusion : on constate une dégradation des paramètres. En effet le filtre se limitant par protection électronique à son courant nominal, il ne peut ainsi plus atteindre les objectifs de dépollution
- ☐ Le filtre actif est en surcharge

## Summary Information

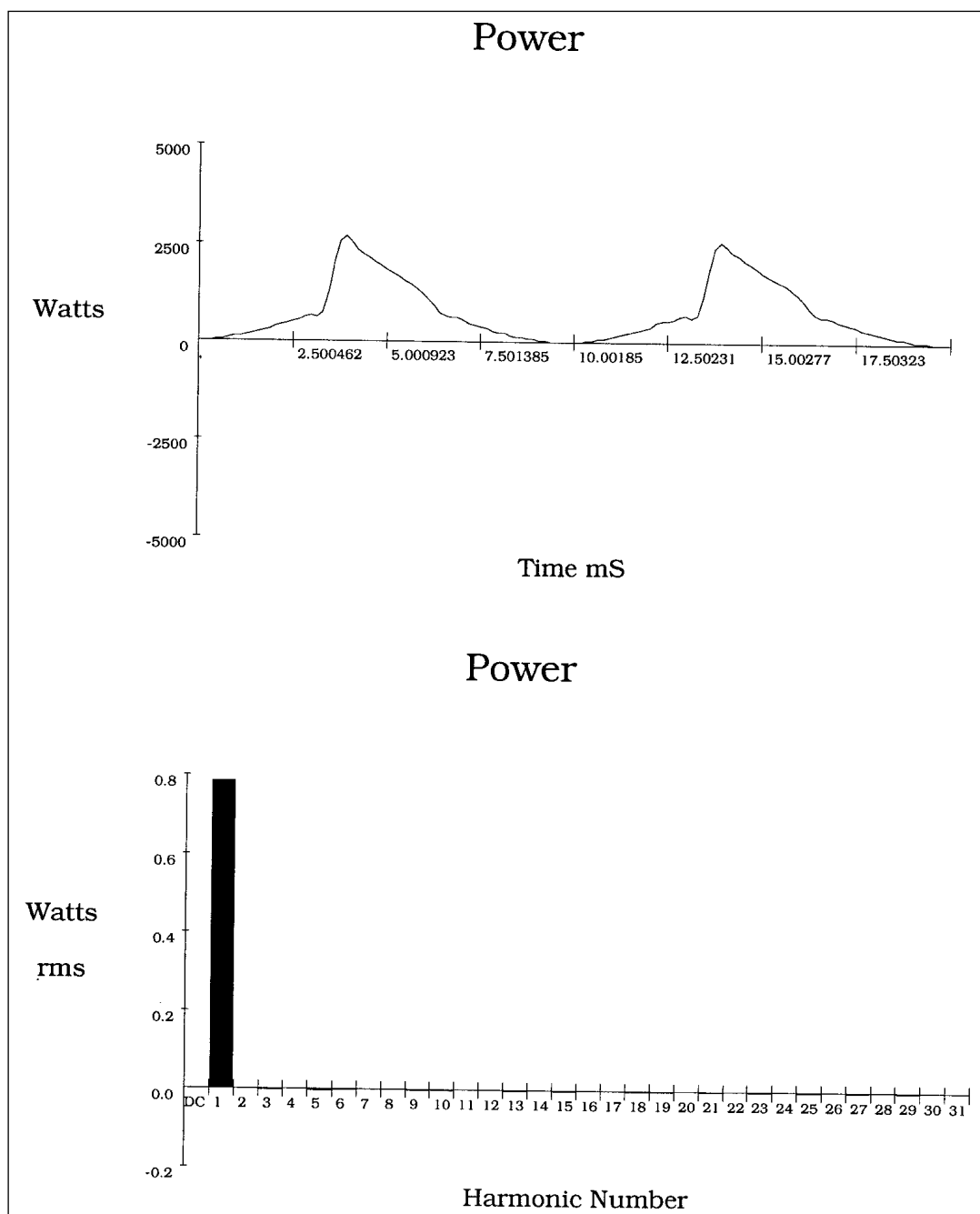
		Voltage	Current
Frequency	50,0	RMS 224	3,84
Power		Peak 306	9,29
KW	0,78	DC Offset 0	-0,02
KVA	0,86	Crest 1,36	2,42
KVAR	0,11	THD Rms 2,8	39,0
Peak KW	2,84	THD Fund 2,8	42,4
Phase	8° lead	HRMS 6	1,50
Total PF	0,91	KFactor	8,0
DPF	0,99		

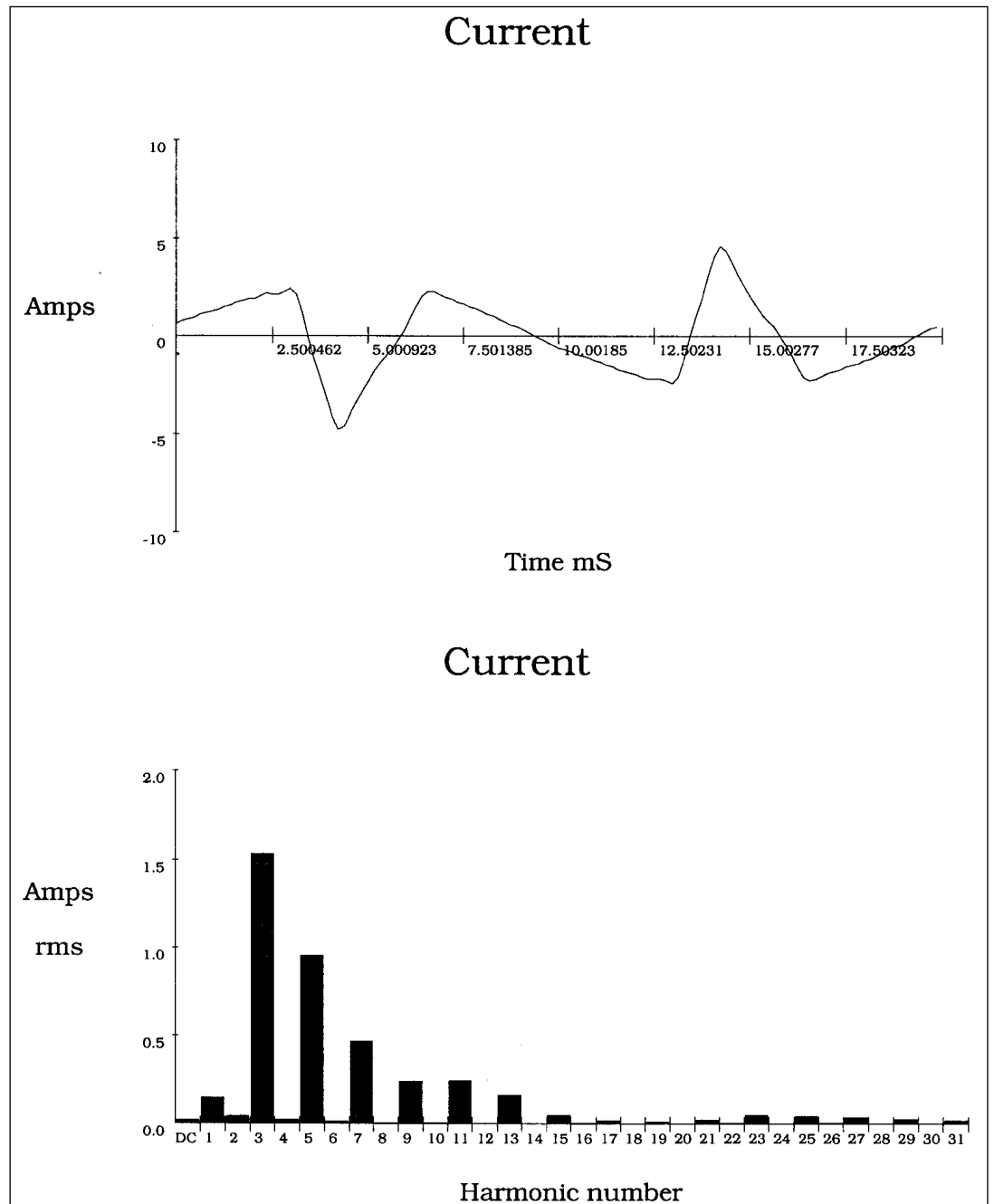
## Record Information

Max	Average	Min
V RMS		
A RMS		
V Peak		
A Peak		
V THD-R%		
A THD-R%		
KWatts		
KVAR		
TPF		
DPF		
Frequency		

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,1	0	0,02	0,6	0	0,00
1	50,0	224	100,0	0	3,54	92,6	8	0,79
2	100,0	1	0,4	-152	0,06	1,7	-72	0,00
3	150,0	1	0,5	27	1,10	28,7	-153	0,00
4	200,0	0	0,2	176	0,03	0,9	150	0,00
5	250,0	5	2,4	-172	0,72	18,8	51	0,00
6	299,9	0	0,0	170	0,03	0,8	38	0,00
7	349,9	2	1,1	-6	0,38	9,9	-84	0,00
8	399,9	0	0,1	-58	0,03	0,8	-91	0,00
9	449,9	0	0,2	49	0,31	8,2	162	0,00
10	499,9	0	0,1	-65	0,02	0,6	147	0,00
11	549,9	0	0,0	68	0,33	8,6	30	0,00
12	599,9	0	0,0	78	0,02	0,5	12	0,00
13	649,9	1	0,2	-5	0,24	6,4	-112	0,00
14	699,9	0	0,0	-167	0,02	0,4	-105	0,00
15	749,9	0	0,1	-65	0,17	4,5	121	0,00
16	799,9	0	0,0	-13	0,02	0,5	115	0,00
17	849,8	0	0,0	-75	0,15	4,0	8	0,00
18	899,8	0	0,0	180	0,01	0,3	-38	0,00
19	949,8	0	0,1	63	0,15	4,0	-131	0,00
20	999,8	0	0,0	136	0,00	0,1	-135	0,00
21	1049,8	0	0,1	-96	0,11	3,0	94	0,00
22	1099,8	0	0,0	132	0,01	0,2	112	0,00
23	1149,8	0	0,0	139	0,08	2,0	-25	0,00
24	1199,8	0	0,0	134	0,01	0,2	-35	0,00
25	1249,8	0	0,0	108	0,09	2,3	-154	0,00
26	1299,8	0	0,0	79	0,00	0,1	-101	0,00
27	1349,8	0	0,0	-86	0,08	2,1	78	0,00
28	1399,7	0	0,0	15	0,01	0,2	135	0,00
29	1449,7	0	0,0	139	0,03	0,9	-46	0,00
30	1499,7	0	0,0	142	0,01	0,2	-17	0,00
31	1549,7	0	0,0	93	0,04	1,0	-132	0,00





- ☐ Mesure du courant absorbé dans le filtre actif
- ☐ VV seul à In donc filtre actif en surcharge
- ☐ Filtre actif seul programmé des rangs H2 à H25
- ☐ Conclusion : Absence de fondamental ; présence du spectre harmonique dans le filtre actif (dans sa limite de dépollution) de lh3 à lh25

Étude des  
phénomènes  
harmoniques

## TP 2 : Étude des remèdes

46/54

## Summary Information

			Voltage	Current		Record Information	Max	Average	Min
Frequency	50,0	RMS	224	1,92	V RMS				
Power		Peak	305	4,78	A RMS				
KW	0,03	DC Offset	0	-0,02	V Peak				
KVA	0,43	Crest	1,36	2,49	A Peak				
KVAR	0,02	THD Rms	2,8	99,7	V THD-R%				
Peak KW	-1,48	THD Fund	2,8	**OL**	A THD-R%				
Phase	48° lead	HRMS	6	1,91	KWatts				
Total PF	0,07	KFactor		**OL**	KVAR				
DPF	0,67				TPF				
					DPF				
					Frequency				

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,1	0	0,02	1,3	0	0,00
1	50,0	224	100,1	0	0,15	7,8	48	0,02
2	100,0	1	0,4	-149	0,04	2,3	101	0,00
3	150,0	1	0,5	36	1,53	81,1	25	0,00
4	200,0	0	0,1	174	0,02	1,2	-89	0,00
5	250,0	5	2,4	-170	0,95	50,5	-139	0,00
6	299,9	0	0,0	-175	0,02	0,9	69	0,00
7	349,9	3	1,2	-6	0,47	24,6	76	0,00
8	399,9	0	0,1	-65	0,01	0,4	176	0,00
9	449,9	1	0,3	58	0,24	12,6	-38	0,00
10	499,9	0	0,1	-69	0,01	0,4	-82	0,00
11	549,9	0	0,0	60	0,24	12,9	-173	0,00
12	599,9	0	0,0	-115	0,00	0,2	-68	0,00
13	649,9	0	0,2	-12	0,16	8,5	31	0,00
14	699,9	0	0,0	-125	0,00	0,2	147	0,00
15	749,9	0	0,1	-54	0,05	2,6	-148	0,00
16	799,9	0	0,0	-37	0,01	0,4	-61	0,00
17	849,8	0	0,0	-21	0,02	1,0	-97	0,00
18	899,8	0	0,0	-134	0,00	0,0	-34	0,00
19	949,8	0	0,0	48	0,01	0,5	113	0,00
20	999,8	0	0,0	-111	0,00	0,1	105	0,00
21	1049,8	0	0,1	-106	0,02	1,2	77	0,00
22	1099,8	0	0,0	-27	0,01	0,3	-10	0,00
23	1149,8	0	0,0	173	0,05	2,7	-77	0,00
24	1199,8	0	0,0	151	0,00	0,1	180	0,00
25	1249,8	0	0,0	82	0,04	2,3	142	0,00
26	1299,8	0	0,0	37	0,01	0,3	60	0,00
27	1349,8	0	0,1	-71	0,04	2,0	31	0,00
28	1399,7	0	0,0	46	0,00	0,1	-27	0,00
29	1449,7	0	0,0	-124	0,03	1,6	-96	0,00
30	1499,7	0	0,0	112	0,00	0,1	174	0,00
31	1549,7	0	0,0	101	0,02	1,1	119	0,00

**Calcul du dimensionnement  
d'un filtre actif**

- Mesure du courant efficace absorbé par la charge déformante :

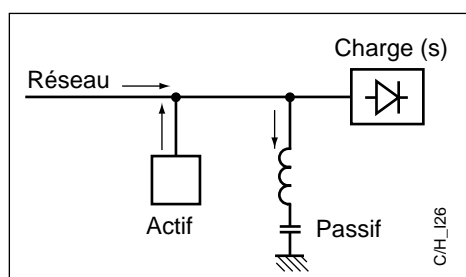
$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_{hn}^2}$$

- Dimensionnement du filtre passif :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_{hn}^2}$$

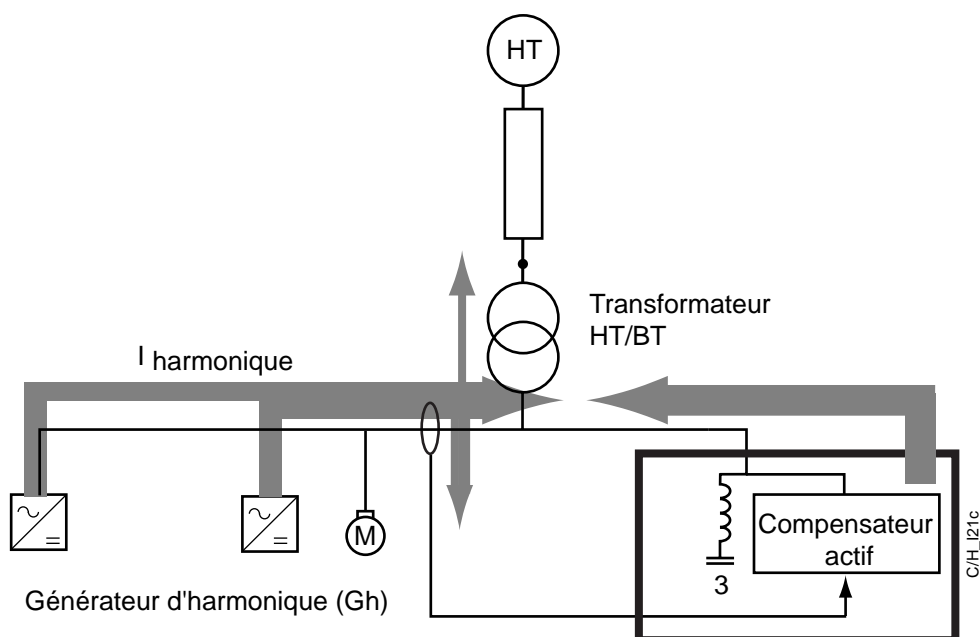
- Nota : les filtres actifs industriels travaillent jusqu'au rang 25 environ.



**Filtrage hybride****■ Intérêt de cette méthode.**

□ Parmi les nombreuses variantes dites «hybrides», nous nous intéresserons plus particulièrement au type dit «série/parallèle» associant compensateurs actif(s) et passif(s) qui présente un intérêt certain pour la dépollution au plus près de convertisseurs de grosses puissances.

□ Le passif «tape» sur les rangs faibles de forte amplitudes et évite la saturation de l'actif qui peut se consacrer au rang élevés de plus faible amplitudes.

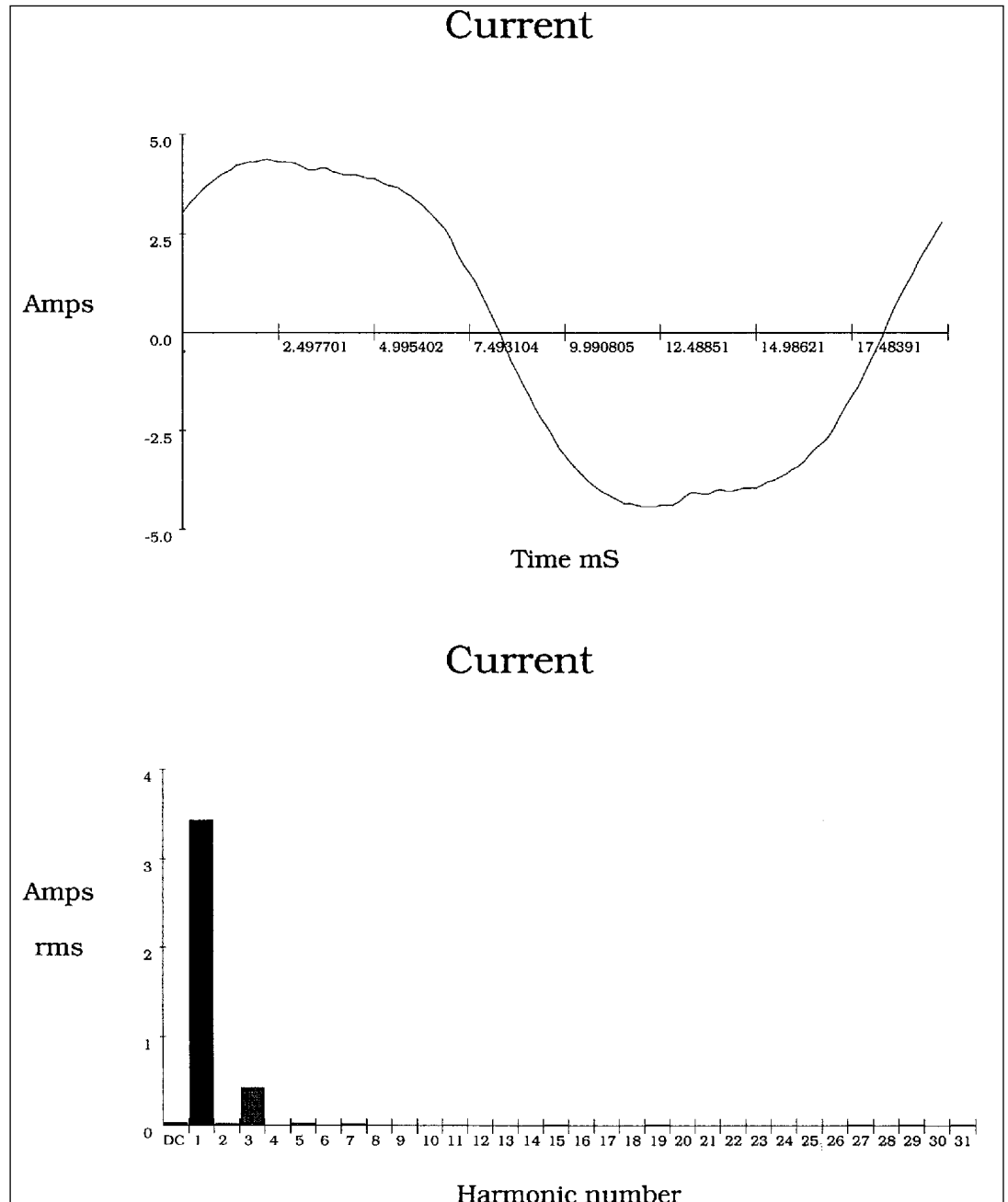


**Mesure avec filtre hybride**

☐ Mettre en service le filtre passif, la self L1 et le filtre actif paramétré pour balayer le spectre lors du rang 4 à 25.

**Note :** le rang 3 sera abordé par le filtre passif

☐ Mesurer en toute sécurité, à l'aide d'un analyseur d'harmoniques, les paramètres de l'alimentation en énergie électrique du coffret aux points de mesure U tension ; I réseau et I filtre situé sur le compensateur actif.



■ Montage hybride :

□ Mesure sur réseau

□ VV seul à In

□ Filtre actif programmé des rangs H4 à H25

□ Self de ligne L1 et filtre passif (rang 3) connectés

□ Conclusion : le filtre actif n'étant plus en surcharge (grâce à la contribution du filtre passif), la dépollution est totale

□ Ceci permet de sous-dimensionner le compensateur actif

□ Nota : Le résidu de lh3 correspond au facteur de qualité du filtre passif

**Étude des  
phénomènes  
harmoniques**
**TP 2 : Étude des remèdes**

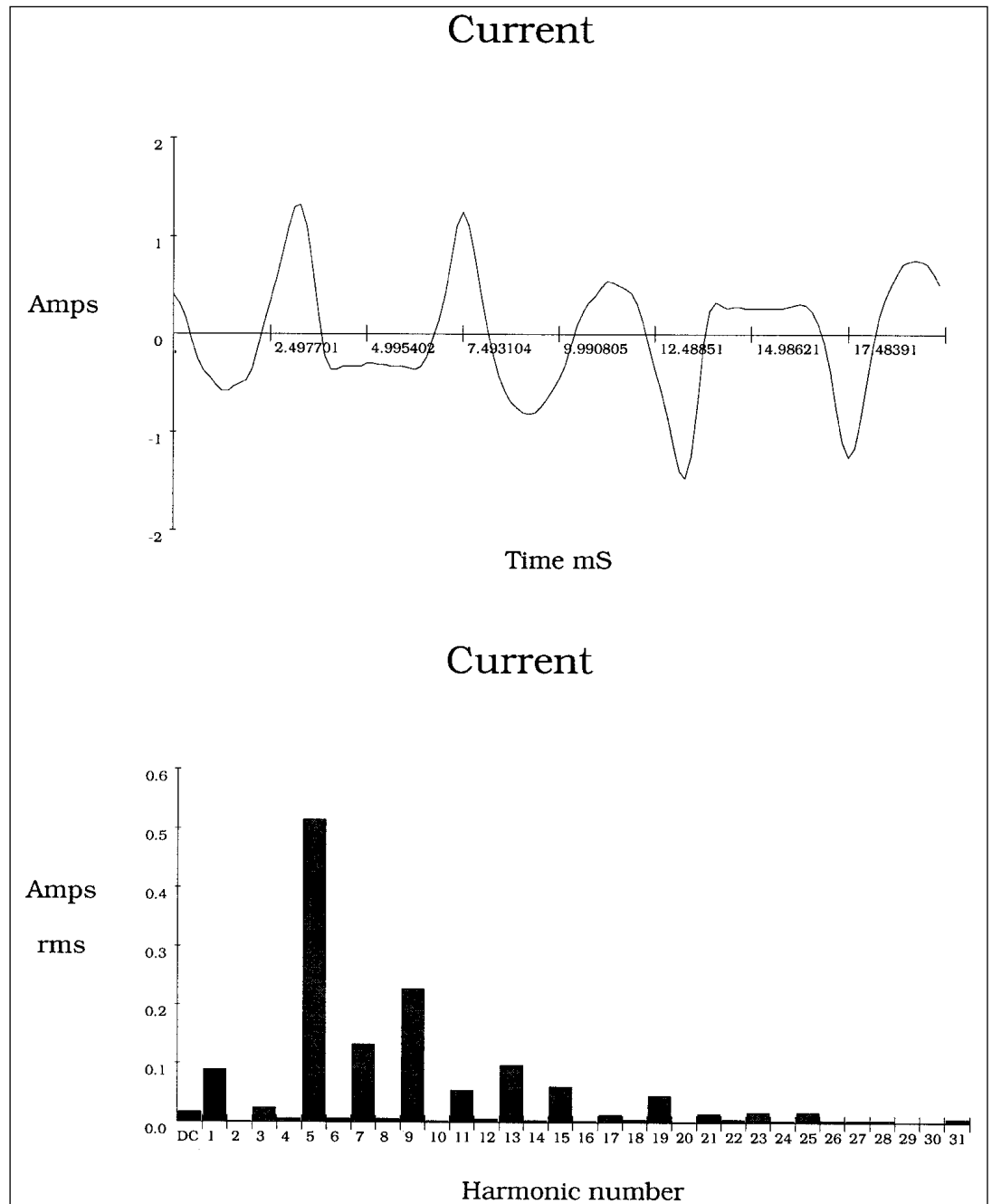
51/54

## Summary Information

		Voltage		Current	Record Information			
		RMS	Peak		Max	Average	Min	
Frequency	50,0	232	313	3,47	V RMS			
Power		DC Offset	0	4,49	A RMS			
KW	0,67	Crest	1,35	-0,03	V Peak			
KVA	0,81	THD Rms	8,4	1,3	A Peak			
KVAR	0,43	THD Fund	8,4	12,4	V THD-R%			
Peak KW	1,30	HRMS	19	12,5	A THD-R%			
Phase	32° lead	KFactor		0,43	KWatts			
Total PF	0,84			1,2	KVAR			
DPF	0,84				TPF			
					DPF			
					Frequency			

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (KW)
DC	0,0	0	0,2	0	0,03	0,8	0	0,00
1	50,0	232	99,8	0	3,43	99,9	32	0,67
2	100,1	0	0,2	-124	0,02	0,5	-64	0,00
3	150,1	8	3,5	-25	0,43	12,5	79	0,00
4	200,2	0	0,1	-173	0,00	0,1	105	0,00
5	250,2	15	6,5	-141	0,03	0,8	-152	0,00
6	300,3	0	0,0	134	0,00	0,1	68	0,00
7	350,3	4	1,6	-7	0,02	0,5	-166	0,00
8	400,4	0	0,0	-54	0,01	0,2	-77	0,00
9	450,4	5	2,3	53	0,00	0,1	46	0,00
10	500,5	0	0,0	8	0,00	0,1	97	0,00
11	550,5	3	1,4	-179	0,01	0,3	-58	0,00
12	600,6	0	0,0	82	0,00	0,1	100	0,00
13	650,6	2	1,0	-99	0,00	0,1	-10	0,00
14	700,6	0	0,0	-172	0,00	0,1	-106	0,00
15	750,7	3	1,3	14	0,01	0,3	77	0,00
16	800,7	0	0,0	-59	0,00	0,1	-95	0,00
17	850,8	2	0,7	100	0,00	0,1	103	0,00
18	900,8	0	0,0	61	0,00	0,1	118	0,00
19	950,9	2	0,9	-154	0,01	0,3	-124	0,00
20	1000,9	0	0,0	139	0,00	0,0	-77	0,00
21	1051,0	1	0,6	-50	0,01	0,2	57	0,00
22	1101,0	0	0,0	-146	0,00	0,1	-88	0,00
23	1151,1	2	0,7	37	0,00	0,1	17	0,00
24	1201,1	0	0,0	-86	0,00	0,0	-175	0,00
25	1251,2	1	0,5	148	0,01	0,2	-136	0,00
26	1301,2	0	0,0	0	0,00	0,0	83	0,00
27	1351,2	1	0,5	-127	0,01	0,3	80	0,00
28	1401,3	0	0,0	-43	0,00	0,1	-56	0,00
29	1451,3	1	0,5	-17	0,01	0,3	46	0,00
30	1501,4	0	0,0	-143	0,00	0,0	-35	0,00
31	1551,4	1	0,4	75	0,01	0,3	-169	0,00



■ Montage hybride :

□ Mesure sur de courant absorbé dans le filtre actif

□ Filtre actif programmé des rangs H4 à H25

□ Self de ligne L1 et filtre passif (rang 3) connectés

□ Conclusion : absence de fondamental ; présence du spectre harmonique de lh5 à lh25 dans le filtre (le rang lh3 étant absorbé par le filtre passif)

**Étude des  
phénomènes  
harmoniques**
**TP 2 : Étude des remèdes**

53/54

## Summary Information

		Voltage	Current	Record Information	Max	Average	Min
Frequency	50,0	RMS	226	0,61	V RMS		
Power		Peak	308	1,43	A RMS		
Watts	13	DC Offset	0	-0,02	V Peak		
VA	136	Crest	1,36	2,35	A Peak		
Vars	18	THD Rms	3,4	98,9	V THD-R%		
Peak W	432	THD Fund	3,4	658,5	A THD-R%		
Phase	63° lead	HRMS	8	0,60	Watts		
Total PF	0,09	KFactor		**OL**	Volt * Amps		
DPF	0,45				TPF		
					DPF		
					Frequency		

## Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V Ø°	I Mag	%I RMS	I Ø°	Power (W)
DC	0,0	0	0,1	0	0,02	2,9	0	0
1	50,0	226	100,0	0	0,09	15,4	63	9
2	100,1	0	0,1	-15	0,00	0,3	142	0
3	150,1	1	0,4	-101	0,02	4,2	0	0
4	200,2	0	0,1	14	0,01	1,2	-8	0
5	250,2	7	3,3	170	0,51	87,4	154	4
6	300,3	0	0,0	51	0,01	1,3	70	0
7	350,3	2	0,7	-3	0,13	22,6	139	0
8	400,4	0	0,1	138	0,01	1,3	161	0
9	450,4	0	0,1	-106	0,23	38,6	-53	0
10	500,5	0	0,0	99	0,00	0,6	-27	0
11	550,5	1	0,3	61	0,05	9,3	118	0
12	600,6	0	0,0	32	0,01	1,3	-15	0
13	650,6	1	0,3	-8	0,10	16,6	93	0
14	700,6	0	0,0	-110	0,00	0,8	167	0
15	750,7	0	0,1	-115	0,06	10,5	-101	0
16	800,7	0	0,0	-112	0,00	0,6	28	0
17	850,8	0	0,1	44	0,01	2,2	176	0
18	900,8	0	0,0	-15	0,01	1,0	-60	0
19	950,9	0	0,1	-60	0,05	7,7	30	0
20	1000,9	0	0,0	152	0,00	0,3	169	0
21	1051,0	0	0,1	-108	0,01	2,4	-122	0
22	1101,0	0	0,0	-108	0,01	1,0	-7	0
23	1151,1	0	0,1	26	0,02	3,0	152	0
24	1201,1	0	0,0	129	0,00	0,5	-85	0
25	1251,2	0	0,0	-92	0,02	3,0	-6	0
26	1301,2	0	0,0	-172	0,00	0,7	179	0
27	1351,2	0	0,0	-69	0,00	0,7	10	0
28	1401,3	0	0,0	-144	0,00	0,7	-56	0
29	1451,3	0	0,0	32	0,00	0,4	-5	0
30	1501,4	0	0,0	-100	0,00	0,4	-79	0
31	1551,4	0	0,0	-102	0,01	1,2	-82	0

## ■ Conclusion

Suite à cette étude des remèdes, il convient de faire une synthèse sur le bien fondé de leur application respective. Pour cela nous proposons un argumentaire technico-économique progressif en commençant par la solution de base.

Remèdes	Efficacité de filtrage	Incidence économique sur l'installation	Coût du remède (ordre d'idée varie avec la puissance) *
Inductance de ligne seule.	Affaiblissement de tout spectre car self non accordée, aucune suppression de rang harmonique.	En fonction de leur efficacité les incidences sur l'installation sont les réductions suivantes :	A
Filtre passif, shunt accordé, cellule avec protection.	Accord de la branche série self + condensateur sur un rang riche en harmonique, suppression totale du rang d'accord.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- réduction du IRMS dans les câbles et dans l'installation.</li> <li>- réduction des sections de câble ph + neutre,</li> <li>- réduction du calibre des protections et des contacteurs,</li> <li>- réduction du rayonnement magnétique des câbles,</li> <li>- réduction du TDHU</li> <li>- réduction du coût de l'installation.</li> </ul>	B
Compensateur actif dimensionné pour la puissance totale	Suppression de tout un spectre d'harmonique (2 à 23 environ).	- Donc amélioration globale du bon fonctionnement de l'installation (continuité des services).	D
Filtrage hybride, association filtre passif compensateur actif.	Solution très efficace, suppression de tout les spectres : <ul style="list-style-type: none"> <li>- rangs bas = filtrage passif,</li> <li>- rangs élevés = filtrage actif.</li> </ul> Le système permet d'optimiser la puissance du filtre actif	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Respect des normes (surtout le spectre).</li> <li>- Solution bien adaptée à un filtrage réseau.</li> <li>- Compensation d'énergie réactive.</li> </ul>	C

(\*) A : - cher ... D : + cher

## 2.6 TP 3 : Étude «Harmoniques et compensation d'énergie réactive»

### Étude des phénomènes harmoniques

**Lieu  
d'activité**

Laboratoire d'essai de  
système

Transfert et  
complément de  
connaissance

**Conditions de  
réalisation**

#### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au maximum les risques d'origine électrique :

- ☐ Tous les points de mesure sont accessibles sur le coté de l'armoire par bornes de sécurité.
- ☐ Le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

#### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un analyseur d'harmoniques.

#### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique.
- ☐ Connaissance des normes et définitions liées à l'études des harmoniques.
- ☐ Connaissance de base de l'électrotechnique.

**Conditions de  
mesure**

#### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de la partie opérative.
  - le câble d'alimentation du variateur repéré (raccordé CEM).
- ☐ Utiliser des cordons de sécurité pour raccorder l'analyseur harmonique aux bornes U1, pour réaliser la mesure de la tension réseau,
- ☐ Remplacer les cavaliers IAR et I1 par un cordon de sécurité pour permettre la mise en place de la pince TI de l'analyseur harmonique et réaliser la mesure du courant réseau.
- ☐ Agir sur les boutons poussoirs correspondant aux différents filtres mis en oeuvre.
- ☐ Remplacer un des cavaliers  $I_M$  courant de sortie VV par un ampèremètre RMS pour réaliser la mesure du courant de charge réglé par le frein à poudre.
- ☐ Eviter de mettre hors tension le variateur entre les différentes manipulations pour éviter de surcharger la résistance de pré-charge du condensateur d'entrée du variateur. Pour cela utiliser le commutateur à 3 positions pour arrêter et démarrer le moteur.

**Objectif de  
l'activité**

■ Mise en évidence et calcul des phénomènes de résonance, mise en oeuvre d'un remède.

■ Mise en évidence de la compensation d'énergie réactive.

- ☐ H0 : Connaître les normes en vigueur BF et HF, le marquage CE, ainsi que leurs champs d'application ;
- ☐ H3 : Identifier sur une installation, les supports de propagation des perturbations (courants forts et faibles) ;
- ☐ H4 : Identifier les différents pollueurs et victimes de l'installation ;
- ☐ H5 : Proposer un protocole d'investigation et de mesures sur site ;
- ☐ H6 : Déterminer, en fonction de critères prédéfinis, la stratégie de protection utilisé sur l'installation et justifier cette dernière.



## 2.7 TP 4 : Influence de l'impédance de source sur le taux de distorsion en tension

### Étude des phénomènes harmoniques

Lieu d'activité

Laboratoire d'essai de système

Transfert et complément de connaissance

Conditions de réalisation

#### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au maximum les risques d'origine électrique :

- ☐ Tous les points de mesure sont accessibles sur le coté de l'armoire par bornes de sécurité.
- ☐ Le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

#### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un analyseur d'harmoniques.

#### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique.

Conditions de mesure

#### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de la partie opérative.
  - le câble d'alimentation du variateur repéré (raccordé CEM).
- ☐ Utiliser des cordons de sécurité pour raccorder l'analyseur harmonique aux bornes U1 et U3 pour réaliser la mesure de la tension réseau,
- ☐ Remplacer un des cavaliers I1 (phase ou neutre) par un cordon de sécurité pour permettre la mise en place de la pince TI de l'analyseur harmonique et réaliser la mesure du courant réseau.
- ☐ Agir sur les boutons poussoirs correspondant aux différents filtres mis en oeuvre.
- ☐ Remplacer un des cavaliers I<sub>M</sub> courant de sortie VV par un ampèremètre RMS pour réaliser la mesure du courant de charge réglé par le frein à poudre.
- ☐ Agir sur le bouton poussoir S1 pour connecter L1.
- ☐ Eviter de mettre hors tension le variateur entre les différentes manipulations pour éviter de surcharger la résistance de pré-charge du condensateur d'entrée du variateur. Pour cela utiliser le commutateur à 3 positions pour arrêter et démarrer le moteur.

Objectif de l'activité

#### ■ Influence de l'impédance de ligne ou source sur le TDHu.

- ☐ H0 : Connaître les normes en vigueur BF et HF, le marquage CE, ainsi que leurs champs d'application ;
- ☐ H2 : Choisir et appliquer une stratégie de protection en fonction des données du constructeur.
- ☐ H5 : Proposer un protocole d'investigation et de mesures sur site ;

# 3

## Chapitre

### Cours et TP «CEM»

Titre	page
3.1 Cours «CEM»	150
3.2 TP 1 : Mesure du rayonnement d'un câble en sortie variateur	191
3.3 TP 2 : Mesure du rayonnement d'un câble sur un écran cathodique	201
3.4 TP 3 : Mesure de l'efficacité d'une armoire CEM sur le champ rayonné	205
3.5 TP 4 : Mesure d'émission conduite HF réinjectée sur le réseau	207
3.6 TP 5 : Corrélation entre mesure sur site et en laboratoire	217

### 3.1 Cours «CEM»

#### 1. Généralités

☐ **Objectif :**

Donner les principales définitions.

Fixer les rappels théoriques

#### 2. Les normes, directives et marquages CE

☐ **Objectif :**

Présenter l'état de l'art concernant les principales normes, la directive CEM avec ses enjeux ainsi que le marquage CE.

#### 3. Les couplages

☐ **Objectif :**

définir les modes de transmission des perturbations.

#### 4. Règles de câblage

☐ **Objectif :**

- Connaître et savoir mettre en œuvre les règles pratiques d'installation et de câblage.
- Connaître les schémas de liaison à la Terre sur une installation en milieu perturbé.

### 3.2 TP 1 : Mesure du rayonnement d'un câble en sortie variateur

#### CEM - Compatibilité électromagnétique

Lieu d'activité

Laboratoire d'essai de système

Transfert et complément de connaissance

Conditions de réalisation

##### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au minimum les risques d'origine électrique : le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

##### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un analyseur de spectre HF ou un oscilloscope + adaptateur 50  $\Omega$
- ☐ Une boucle de Moebius, une paire informatique torsadée, 3 câbles VV.

##### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique
- ☐ Cours CEM.

Conditions de mesure

##### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de l'armoire PO,
  - les trois types de câble VV en fonction des questions.
- ☐ Utiliser la pince HF pour mesurer le rayonnement du câble.
- ☐ Connecter le filtre FVV d'entrée.
- ☐ Variateur à  $I_n$ , aucune solution de filtrage harmoniques connectée.

Objectif de l'activité

Mis en évidence de l'efficacité d'un câble blindé.

- ☐ H1 : **Connaître** et savoir **mettre en œuvre** les règles de câblage et d'installation pour assurer la coexistence des différents courants (forts et faibles)
- ☐ H2 : **Choisir et appliquer** une stratégie de protection en fonction des données constructeur (montage et remèdes)
- ☐ H4 : **Identifier** les différents pollueurs et victimes de l'installation.
- ☐ H5 : **Proposer** un protocole d'investigation et de mesures sur site, face à un problème de dysfonctionnement de l'installation

### 3.3 TP 2 : Mesure du rayonnement d'un câble sur un écran cathodique

#### CEM - Compatibilité électromagnétique

Lieu  
d'activité

Laboratoire d'essai de système

Transfert et complément de connaissance

Conditions de  
réalisation

##### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au minimum les risques d'origine électrique : le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

##### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un écran cathodique,
- ☐ Une rallonge d'alimentation (Ph + N + PE) dénudée.

##### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique
- ☐ Cours CEM.

Conditions de  
mesure

##### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de l'armoire PO,
  - le câble VV raccordé «CEM».
- ☐ Mettre en série avec le cordon d'alimentation du banc la rallonge dénudée.
- ☐ Plaquer le câble de phase contre l'écran cathodique.
- ☐ Variateur à  $I_n$ , aucune solution de filtrage harmoniques connectée.

Objectif de  
l'activité

Mis en évidence de l'efficacité d'un câble blindé.

- ☐ H1 : **Connaître** et savoir **mettre en œuvre** les règles de câblage et d'installation pour assurer la coexistence des différents courants (forts et faibles)
- ☐ H2 : **Choisir et appliquer** une stratégie de protection en fonction des données constructeur (montage et remèdes)
- ☐ H5 : **Proposer** un protocole d'investigation et de mesures sur site, face à un problème de dysfonctionnement de l'installation

### 3.4 TP 3 : Mesure de l'efficacité d'une armoire CEM sur le champ rayonné

#### CEM - Compatibilité électromagnétique

Lieu  
d'activité

Laboratoire d'essai de système

Transfert et complément de connaissance

Conditions de  
réalisation

##### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au minimum les risques d'origine électrique : le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

##### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Un analyseur de spectre HF,
- ☐ Une boucle de Moebius.

##### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique
- ☐ Cours CEM.

Conditions de  
mesure

##### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de l'armoire PO,
  - le câble VV raccordé «CEM».
- ☐ Régler le courant variateur à  $I_n$
- ☐ Placer la boucle de Moebius devant l'armoire
- ☐ Manœuvrer la porte suivant les consignes du professeur, et utiliser le bouton SA0 pour travailler porte ouverte.

Objectif de  
l'activité

Mis en évidence de l'efficacité d'une armoire CEM.

- ☐ H2 : **Choisir** et **appliquer** une stratégie de protection en fonction des données constructeur (montage et remèdes)
- ☐ H5 : **Proposer** un protocole d'investigation et de mesures sur site, face à un problème de dysfonctionnement de l'installation

### 3.5 TP 4 : Mesure d'émission conduite HF réinjectée sur le réseau

#### CEM - Compatibilité électromagnétique

Lieu d'activité

Laboratoire d'essai de système

Transfert et complément de connaissance

Conditions de réalisation

##### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au minimum les risques d'origine électrique : le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

##### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système,
- ☐ Une pince HF,
- ☐ Un analyseur de spectre HF ou un oscilloscope + adaptateur 50  $\Omega$

##### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique
- ☐ Cours CEM.

Conditions de mesure

##### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de l'armoire PO,
  - le câble VV raccordé «CEM».
- ☐ Remplacer les cavaliers I1 (phase et neutre) par 2 cordons de sécurité pour permettre la mesure des courants conduits.
- ☐ Agir sur le bouton poussoir S5 pour mettre en œuvre ou enlever le filtre FVV (intégré dans le variateur).
- ☐ Variateur à vide, sans aucune solution de filtrage harmoniques connectée.

Objectif de l'activité

Mis en évidence de l'intérêt d'un filtre CEM.

- ☐ H0 : **Connaître** les normes en vigueur BF et HF, le marquage CE, ainsi que leurs champs d'application.
- ☐ H1 : **Connaître** et savoir **mettre en œuvre** les règles de câblage et d'installation pour assurer la coexistence des différents courants (forts et faibles)
- ☐ H4 : **Identifier** les différents pollueurs et victimes de l'installation.
- ☐ H5 : **Proposer** un protocole d'investigation et de mesures sur site, face à un problème de dysfonctionnement de l'installation.

## A - Configuration

Mesure de l'émission conduite HF réinjectée sur le réseau en entrée du banc.

☐ Outil de mesure : pince HF.

☐ Lieu de mesure : sur les deux cavalier I1

## B - Descriptif

**1** - Mesure du courant HF à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre, en connectant et déconnectant le filtra (FV) intégré au variateur par action sur le poussoir S5.

**2** - Calcul du courant mesuré à la pince HF.

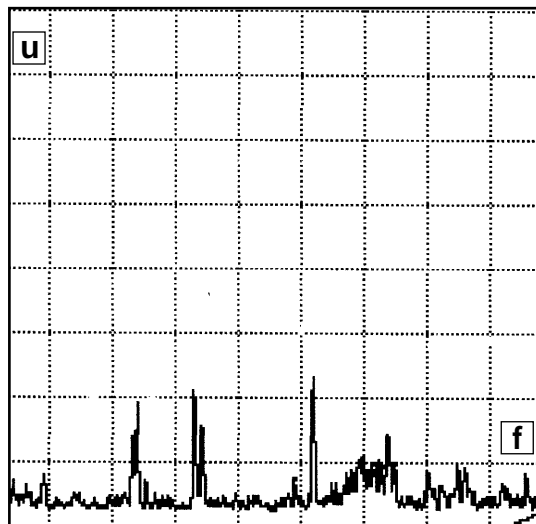
**3** - Corrélation (à des fins pédagogiques) entre le courant mesuré à la pince et la mesure normative (tension) effectuée en laboratoire.

**Notes :** ☐ les mesures effectuées à l'oscilloscope se feront avec l'adaptateur 50  $\Omega$ ,

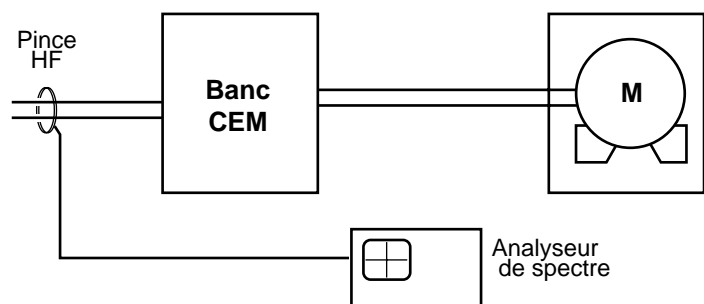
☐ Entrée directe (sans adaptateur) sur l'analyseur).



Mesures d'émission HF en entrée  
du bruit de fond  
à l'analyseur de spectre



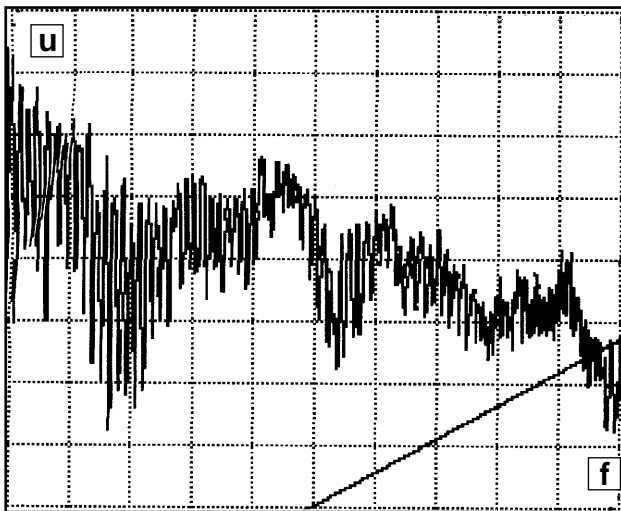
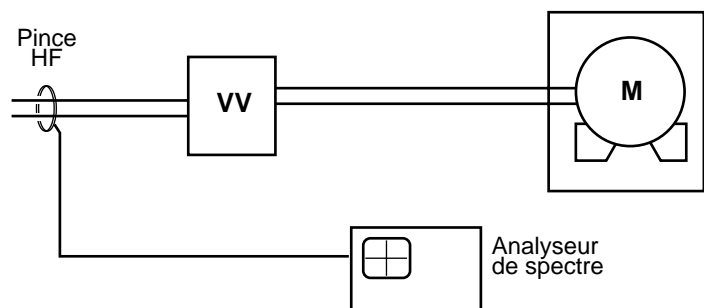
*Banc hors tension*



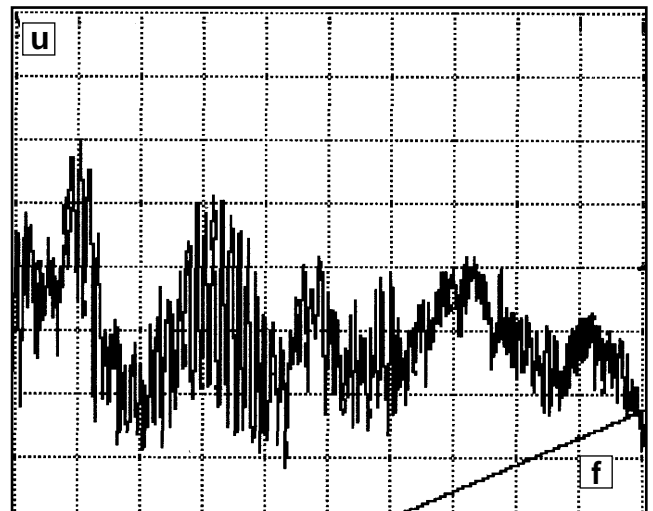
Le niveau de bruit de fond se situe en moyenne à 10 dB $\mu$ V

Analyseur  
10 dB $\mu$ V/div  
2 MHz/div

**Mesures d'émission HF en entrée  
à l'analyseur de spectre  
en mode commun**



*Variateur seul sans filtre*

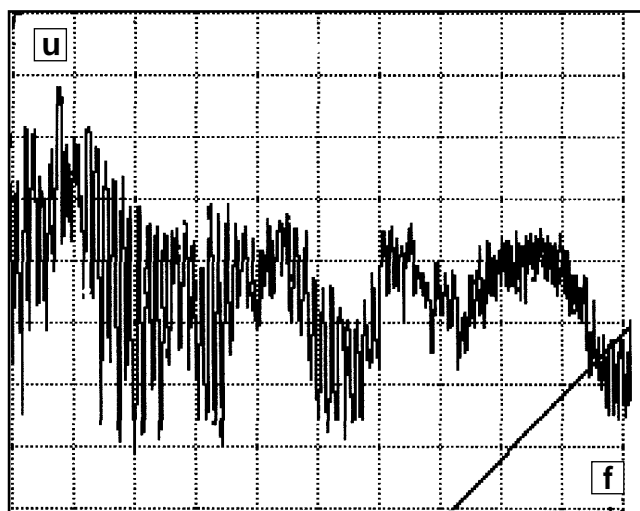
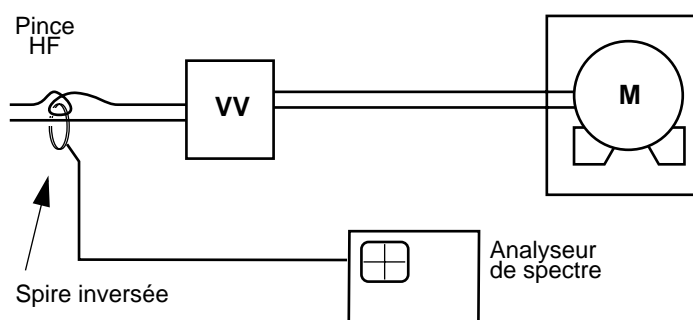


*Variateur seul avec filtre*

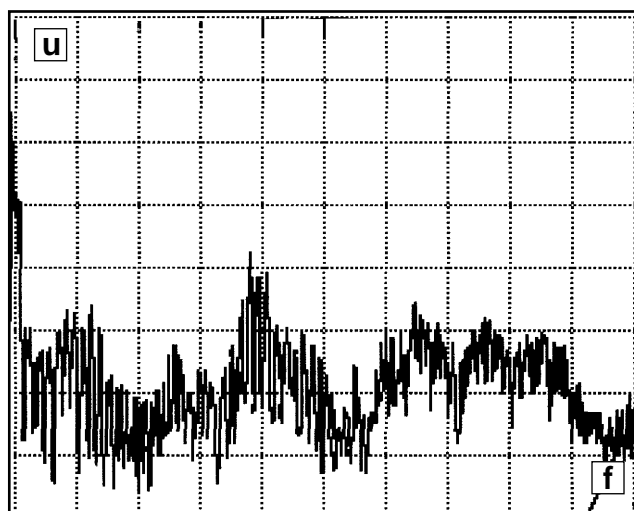
Analyseur  
10 dB $\mu$ V/div  
2 MHz/div

Rappel : – 10 dB correspondent à une atténuation d'un facteur 3

Mesures d'émission HF en entrée  
à l'analyseur de spectre  
en mode différentiel



Variateur seul sans filtre



Variateur seul avec filtre

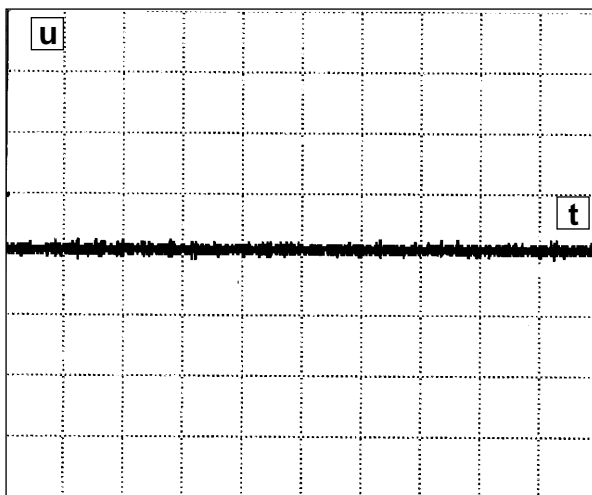
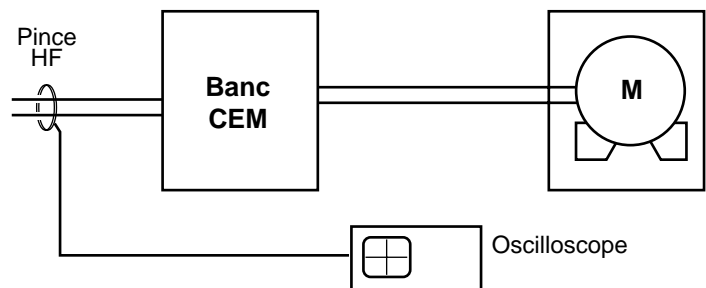
Analyseur  
10 dB $\mu$ V/div  
2 MHz/div

Compatibilité  
électro-  
magnétique

## TP 4 : Mesure d'émission conduite HF réinjectée sur le réseau

5/8

Mesures d'émission HF en entrée  
du bruit de fond à l'oscilloscope  
en mode commun

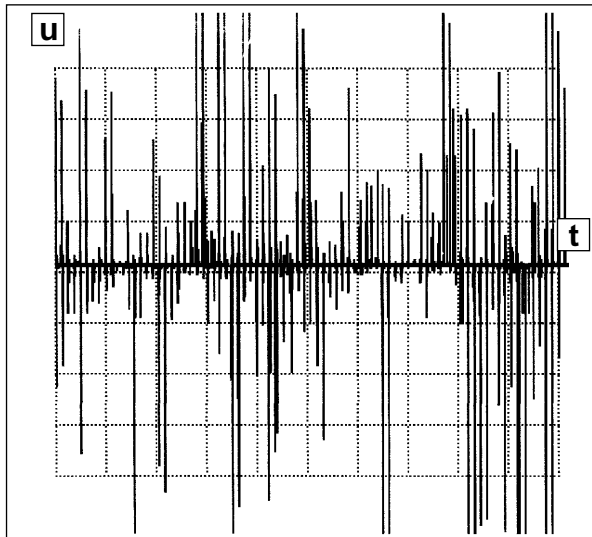
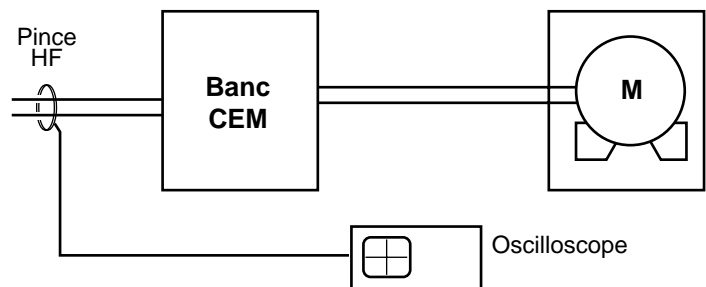


Oscilloscope  
5 mV/div  
2 ms

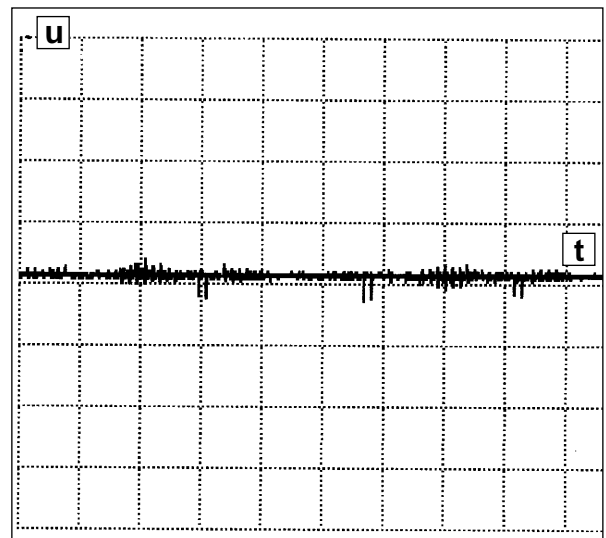
*Banc hors tension*

Oscilloscope adapté à 50  $\Omega$

Mesures d'émission HF en entrée  
à l'oscilloscope  
en mode commun



Variateur sans filtre

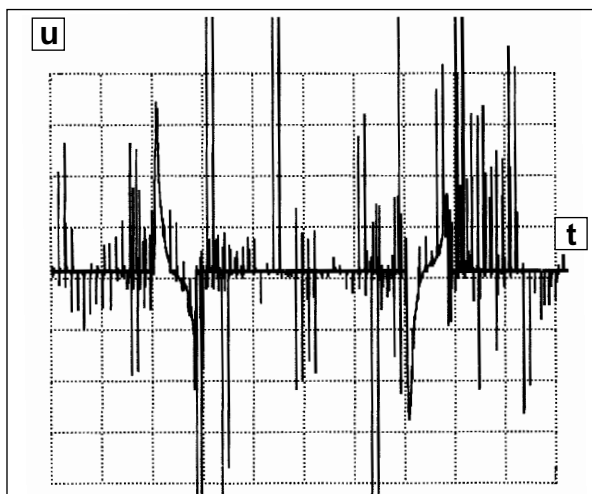
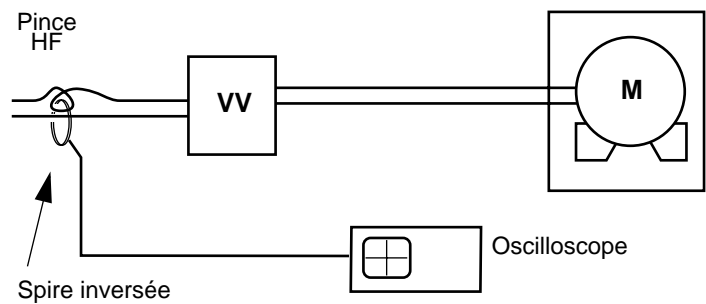


Variateur avec filtre

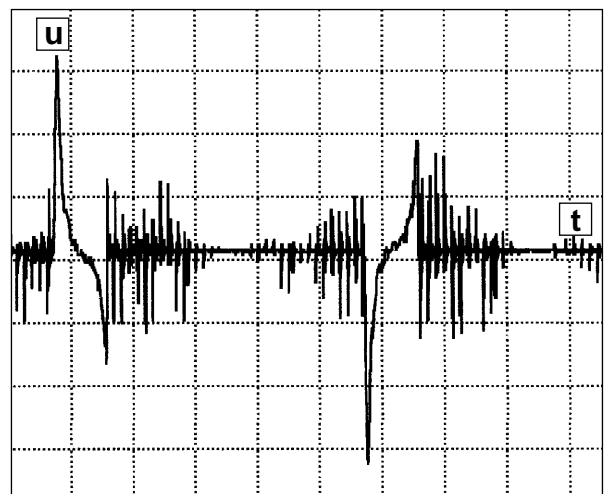
Oscilloscope  
0,5 V/div  
2 ms

Oscilloscope adapté à 50  $\Omega$

**Mesures d'émission HF en entrée  
à l'oscilloscope  
en mode différentiel**

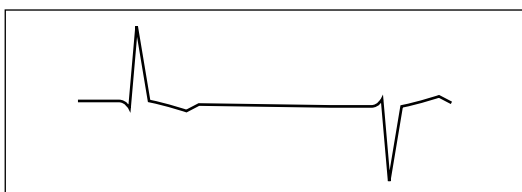


*Variateur seul sans filtre*



*Variateur seul avec filtre*

Oscilloscope  
0,5 V/div  
2 ms



**■ Remarque :**

La visualisation du courant à 50 Hz reste inchangée avec et sans filtre.

On constate que le filtre RFI atténue la HF et non la BF.

Compatibilité  
électro-  
magnétique

## TP 4 : Mesure d'émission conduite HF réinjectée sur le réseau

8/8

### C - Conclusion

On a pu mettre en évidence l'efficacité du filtre en fonction des différentes méthodes de mesure, à oscilloscope et à l'analyseur de spectre.

Le filtre Haute Fréquence atténue fortement les perturbations électromagnétiques, sous réserve d'un câblage correct, et ceci quel que soit le niveau de charge (BF) du variateur.

#### Notes concernant le filtre haute fréquence (FEN)

Dans le banc, le filtrage des perturbations HF est assuré par le filtre (FVV) intégré dans le variateur.

Le filtre FEN n'a donc qu'un rôle pédagogique :  
il permet de mettre en évidence les règles de câblage d'un filtre HF.

(voir cours sur les règles de câblage)

### 3.6 TP 5 : Corrélation entre mesure sur site et en laboratoire

#### CEM - Compatibilité électromagnétique

Lieu  
d'activité

Laboratoire d'essai de  
système

Transfert et  
complément de  
connaissance

Conditions de  
réalisation

##### ■ Sécurité

L'enseignant doit énoncer de manière explicite les consignes de sécurités.

Pour réduire au minimum les risques d'origine électrique :  
le raccordement des appareils de mesure doit être réalisé exclusivement par des cordons de sécurité.

##### ■ Matériels et documents utilisés

- ☐ Le système «Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques»,
- ☐ Le dossier technique du système
- ☐ Une pince HF
- ☐ Un analyseur de spectre HF

##### ■ Pré-requis

- ☐ Sensibilisation du risque électrique
- ☐ Cours CEM.

Conditions de  
mesure

##### ■ Configuration du système

- ☐ Raccorder les deux armoires par :
  - le câble d'alimentation de l'armoire PO,
  - le câble VV raccordé «CEM».
- ☐ Remplacer les cavaliers  $I_1$  (phase et neutre) par 2 cordons de sécurité pour permettre la mesure des courants conduits.
- ☐ Agir sur le bouton poussoir S5 pour mettre en œuvre ou enlever le filtre FVV.

Objectif de  
l'activité

- ☐ H0 : **Connaître** les normes en vigueur BF et HF, le marquage CE, ainsi que leurs champs d'application
- ☐ H5 : **Proposer** un protocole d'investigation et de mesures sur site, face à un problème de dysfonctionnement de l'installation