



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT de GÉNIE ÉLECTRIQUE**



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Electrique

Option : Informatique industrielle

Présenté par :

**DJEBLI Rachid**

**SAFI Mohamed**

*Sujet du mémoire*

**Compensation de l'énergie réactive à base d'un**

**Pic 16f877**

*Soutenu publiquement devant le jury composé de :*

Mr, SBAA MORSLI

Président

Mr, NASRI.D

Encadreur

Mr, BELARBI MUSTAPHA

Examineur

PROMOTION : 2015

# Dédicaces

---

## Dédicaces

*Ce n'est que grâce à l'aide d'Allah que nous avons pu réaliser cet humble travail que je dédie :*

### ***A mes très chers parents***

*Ma tendre mère NADJIA et mon cher papa KADA, qui sans leur amour, leur abnégation, et dévouement et surtout leur stabilité conjugale aucune bonne initiative ne saurait aboutir. Que dieu me les gardent.*

### ***A mes frères***

*MEKKI, MOHAMED et mon adorable sœur MERIEM à qui je souhaite un franc succès dans leurs vies.*

### ***A mes proches amis***

*AMIN pour son soutien et ses encouragements incessants et à qui je souhaite toute la réussite dans la vie. Et tous les copains de notre département*

### ***A mon binôme***

*Mohamed à qui je souhaite tout le bonheur dans la vie.*

*A toutes les personnes que je connaisse et que je n'ai pas citées.*



***RACHID***

# Remerciements

---

## Remerciements

*Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné la clairvoyance pour l'aboutissement de ce modeste travail.*

*C'est un honneur incommensurable que nous adressons nos remerciements à notre respectable professeur Mr NASRI DJILALI qui a accepté d'encadrer notre travail en ne cessant de nous prodiguer ses bénéfiques conseils pour l'accomplissement de ce travail.*

*Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à Mr CHIBANI ABEDELILAH et Mr ABDI KHALED pour tout le temps et l'attention qu'elle nous a consacré. Nous avons eu l'avantage de bénéficier de sa parfaite maîtrise.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tout le cadre pédagogique et administratif du département de génie électrique qui nous ont formé et donné goût à l'informatique.*

*Et, pour toutes les raisons possibles et imaginables, nous ne remercierons jamais assez nos parents pour leur dévouement et leur soutien.*

*Nos remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail.*

*Merci infiniment.*

# Résumé

## Résumé

L'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électrique, comme nous avons pu le constater tout le long de ce mémoire. L'objectif de ce travail était de concevoir comment la compensation réactive peut être utilisée pour améliorer la stabilité d'un réseau électrique soumis à une perturbation. On a vu comment améliorer le facteur de puissance pour minimiser la consommation de l'énergie électrique et réduire les pertes dans les installations électrique a base d'un microcontrôleur.

### ملخص:

إن دراسة استقرار الشبكات الكهربائية يمثل أهمية كبيرة في تصميم واستغلال هذه الشبكات مثلما بينا ذلك من خلال هذا البحث.

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة كيف يُمكن أن يستعمل تعويض الطاقة الرديية لتطوير إستقرار الشبكة الكهربائية المعرضة لاضطراب ما.

تطرقنا الى كيفية تحسين معامل القدرة من أجل التقليل من استهلاك الطاقة الكهربائية و تقليص الطاقة المبددة في الأنظمة الكهربائية بالاعتماد على الميكروكنترولر.

# Table des matières

---

## Table des matières

<i>Dédicaces</i> .....	II
<i>Remerciements</i> .....	III
Résumé .....	IV
Introduction générale .....	1
Chapitre I : Généralités sur les puissances dans un régime alternatif.....	2
I.1. Les Circuit à courant alternatif .....	2
I.1.1. Tension alternative sinusoïdale .....	3
I.1.2. Tension efficace .....	4
I.1.3. La période et La fréquence d'une tension alternative .....	4
I.1.4. Valeur instantanée de la tension.....	5
I.1.5. Courant alternatif sinusoïdal .....	5
I.1.6. Déphasage tension-courant.....	6
I.1.7. Représentation de Fresnel.....	7
I.2. Les puissances déterminantes en alternatif.....	10
I.2.1. La puissance active P [W] [10] .....	11
I.2.2. Puissance réactive Q [var] .....	11
I.2.3. Puissance apparente S [VA] .....	11
I.2.4 Analyse des puissances sur les circuits alternatifs .....	12
I.3. Conclusion .....	19
Chapitre II: Etude de la compensation de la puissance réactive.....	21
II.1. Facteur de puissance .....	21
II.1.1. Caractérisation d'un récepteur en fonction de son facteur de puissance .....	22
II.1.2. Effets du facteur de puissance.....	23
II.1.3. Principaux consommateurs de puissance réactive [15] .....	25
II.2.3. Inconvénient d'un mauvais COS Phi .....	27
II.2. La compensation de l'énergie réactive.....	27
II.2.1. Pourquoi et comment compenser l'énergie réactive.....	28
II.3. Systèmes et types de compensation .....	29
II.3.2. batteries de condensateurs de type automatique .....	30
II.4. Différentes possibilités implantation des batteries de condensateurs.....	31
II.4.1 implantation avec une compensation globale .....	31
II.4.2 implantation avec une compensation partielle (par secteurs).....	32

# Table des matières

---

II.4.3 implantation avec une compensation individuelle .....	33
II.4.4. Calcul de la puissance des condensateurs de compensation.....	34
II.5. Présentation du moyen de compensation .....	37
II.6. Compensateur statique de puissance réactive SVC : (Static Var Compensator).....	37
II.6.1. Définition .....	37
II.6.2. Principe de fonctionnement .....	38
II.7. Conclusion.....	41
CHAPITRE III : Description sur le microcontrôleur pic16f877 .....	43
III.1. Les avantages du microcontrôleur .....	43
III.2. Différentes familles des PICs .....	44
III.3. Identifier un PIC.....	44
III.4. Le choix du microcontrôleur : Pourquoi le PIC 16f877 .....	44
III.5. Brochage du PIC 16F877 .....	45
III.6. Structure d'un microcontrôleur PIC 16F877.....	46
III.6.1. Mémoires du PIC 16F877.....	46
III.6.2. Ports d'Entrées/Sorties.....	47
III.6.3. Interruption RBO/INT .....	49
III.6.4. L'oscillateur.....	50
III.6.5. La broche MCLR.....	50
III.6.6. RESET .....	50
III.6.7. Convertisseur Analogique-Numérique .....	50
III.6.8. Le Timer .....	51
III.7. Architecture interne .....	51
III.8. Conclusion .....	52
CHAPITRE IV : Simulation Et Traitement Des Résultats .....	54
IV.1. Objectif.....	54
IV.2. DESCRIPTION .....	54
IV.3. mesure de facteur de puissance .....	55
IV.3.1. Schéma de connexion.....	55
IV.3.2. L'affichage des résultats .....	56
IV.3.3. Le circuit de détecteur de passage par zéro.....	58
IV.4. Le circuit de détecteur de passage par zéro.....	59
III.5. Le schéma globale de circuit de détecteur de passage par zéro .....	60
IV.6. Calcul du temps de la période .....	61

# *Table des matières*

---

IV.7. Calcul du temps de retard .....	62
IV.8. Résultat de Calcul du facteur de puissance ( $\cos \phi$ ).....	63
IV.9. Simulation.....	64
Conclusion générale.....	69

# Liste des figures

## Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'une tension alternative périodique sinusoïdale .....	3
Figure 2 : période d'une tension alternatif.....	5
Figure 3 : variation de $i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ en fonction du temps $t$ .....	6
Figure 4 : le déphasage entre le courant et la tension .....	7
Figure 5 ; Représentation vectorielle de la tension et du courant (diagramme de Fresnel) .....	8
Figure 6 : Représentation de Fresnel.....	8
Figure 7 : Cas où la tension prend la valeur $u_0$ au temps $t = 0$ .....	9
Figure 8 : Représentation de Déphasage entre deux tensions.....	9
Figure 9 : projection du puissance complexe .....	10
Figure 10 : Triangle des puissances .....	12
Figure 11 : Circuit résistif.....	12
Figure 12 : Oscillations du courant et de la tension aux bornes de R .....	13
Figure 13 : diagrammes U.I.P (Circuits résistifs) .....	13
Figure 14: Circuit capacitif .....	14
Figure 15 : oscillations de IC et de VC.....	14
Figure 16 : diagramme (Circuits capacitif).....	15
Figure 17: Circuit inductif .....	15
Figure 18 : oscillations de II et de VI .....	16
Figure 19 : diagramme (Circuits inductif) .....	16
Figure 20 : Circuit RLC.....	17
Figure 21: diagramme (Circuits RLC) .....	18
Figure 22 : l'évolution de la tension, du courant $I(t)$ et de la puissance en fonction du temps : facteur de puissance = 1 .....	23
Figure 23 : l'évolution de la tension, du courant $I(t)$ et de la puissance en fonction du temps : facteur de puissance = 0,7 .....	24
Figure 24: L'évolution de la tension, du courant $I(t)$ et de la puissance en fonction du temps : facteur de puissance = 0.2 .....	24
Figure 25 : Influence de la puissance réactive.....	26
Figure 26 : Bilan des Puissances. ....	26
Figure 27 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation. [22] .....	29
Figure 28: Compensation d'énergie réactive par des condensateurs fixes.....	30
Figure 29 : Compensation d'énergie réactive par batterie de condensateurs à régulation automatique.....	31
Figure 30 : Implantation globale.....	31
Figure 31 : Implantation partielle.....	32
Figure 32 : Implantation individuelle.....	34
Figure 33 : Modèle mathématique de SVC.....	38
Figure 34 : Fonctionnement du compensateur statique.....	39
Figure 36 : Compensation d'énergie réactive par la méthode SVC.....	39
Figure 37 : « schéma de circuit de Triac et compensateur statique ».....	40
Figure 38 : Brochage du 16F877 .....	45
Figure 39 : Architecture interne. ....	52
Figure 40 : Architecture interne du PIC16F877. ....	52
Figure 41 : schéma de principe du circuit de $\cos\phi$ meter conçu.....	55

# Liste des figures

---

Figure 42 : Schéma de connexion de PIC16F877.....	55
Figure 43 : Afficheur LCD2x16 .....	56
Figure 44: Schéma de connexion du LCD avec le pic 16f877.....	57
Figure 45: schéma de LM741 , Figure 46 : schéma de brochage de LM741.....	59
Figure 47 : détecteur de passage par zéro .....	59
Figure 48 : Le circuit global de détecteur de passage par zéro. ....	60
Figure 49 : Représentation des signaux obtenus avant l'entrée et dans la sortie de détecteur de passage par zéro .....	61
Figure 50 : la période.....	62
Figure 51 : le retard. ....	63
Figure 52 : Les signaux provenant de l'oscilloscope avec $\Delta T=3ms$ .....	64
Figure 53 : Les signaux provenant de LCD avec $\Delta T=3ms$ .....	65
Figure 54 : Les signaux provenant de l'oscilloscope avec $\Delta T=2ms$ .....	65
Figure 55 : Les signaux provenant de LCD avec $\Delta T=2ms$ .....	66
Figure 56 : L'image du courant et de tension provenant de l'oscilloscope et les résultats associés.....	66

# *Liste des tableaux*

---

## **Liste des Tableaux**

Tableau 1 : représentation de quelque valeur sur les consommateurs de puissance réactive .....	25
Tableau 2 : Résumé des registres associés avec le PORTA.....	47
Tableau 3 : Résumé des registres associés avec le PORTB.....	48
Tableau 4 : Résumé des registres associés avec le PORTC.....	48
Tableau 5 : Résumé des registres associés avec le PORTD.....	49
Tableau 6 : Résumé des registres associés avec le PORTE .....	49
Tableau 7 : tableau du Brochage de l'afficheur LCD.....	58

# *Introduction générale*

---

## **Introduction générale**

Depuis le début des années 1990, il Ya eu des changements importants dans la structure et la réglementation de l'industrie de l'électricité dans le cadre des réformes de la politique de la concurrence nationale. Il Ya eu un abandon des organisations verticalement intégrées de l'Etat sur la base, à une séparation claire entre la prestation de services de réseau et de détail réglementé et concurrentiel génération. Le choix du client dans le choix de leur détaillant a été facilité par l'introduction de lois pour réglementer l'accès aux réseaux de distribution et de transmission.

De nos jours, l'exigence d'énergie électrique augmente rapidement avec l'avancement de la technologie. Une des méthodes les plus efficaces de réaliser des économies dans les systèmes à commande électrique et d'augmenter son efficacité est la compensation de puissance réactive. Selon la réglementation actuellement appliquée, la compensation est obligatoire dans l'industrie et elle est faite à certains intervalles, cependant, il n'y a aucune disposition pour les résidences et les petites entreprises, et cette question est négligée. Il est possible de faire d'importantes quantités d'économies si la compensation de puissance réactive est mise en œuvre sur l'ensemble du pays. Dans cette étude, la mesure de la puissance réactive dans les systèmes monophasés a été développée, ainsi que le calcul pour diriger des économies d'énergie grâce à un microcontrôleur. Dans le système mis en œuvre, la différence de phase entre le courant et la tension est mesurée, et la direction de sauvegarde est mise en œuvre en fonction de la puissance réactive utilisée. Les résultats de la mise en œuvre démontre que le système conçu présente une structure simple et de faibles dimensions, il fait apparaître le coefficient de puissance du système à un niveau optimal, il réduit au minimum les défauts et réduit également le coût.

Avec ces caractéristiques, il est plus utile et plus économique que les appareils vendus sur le marché. [1]

# **Chapitre I**

## **« Généralités sur les puissances dans un régime alternatif »**

## **Chapitre I : Généralités sur les puissances dans un régime alternatif**

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension. L'énergie consommée est composée d'une partie "active", transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie "réactive" transformée par les actionneurs électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques.

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie « active » ; la partie « réactive » ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

Les économies d'énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d'énergie réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des activités humaines sur l'écosystème de notre planète. [9]

### **I.1. Les Circuit à courant alternatif**

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernant l'exploitation des réseaux électriques [2].

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- Fréquence.
- Amplitude.
- Forme d'onde.
- Symétrie. [2].

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de 50 Hz.

## I.1.1. Tension alternative sinusoïdale

### I.1.1.1. Tension maximale et tension minimale

Les tensions maximale et minimale sont respectivement notées  $U_{\max}$  et  $U_{\min}$ . Elles correspondent à la valeur de tension la plus élevée ( $U_{\max}$ ) et à la valeur de tension la plus faible au cours d'un motif élémentaire.

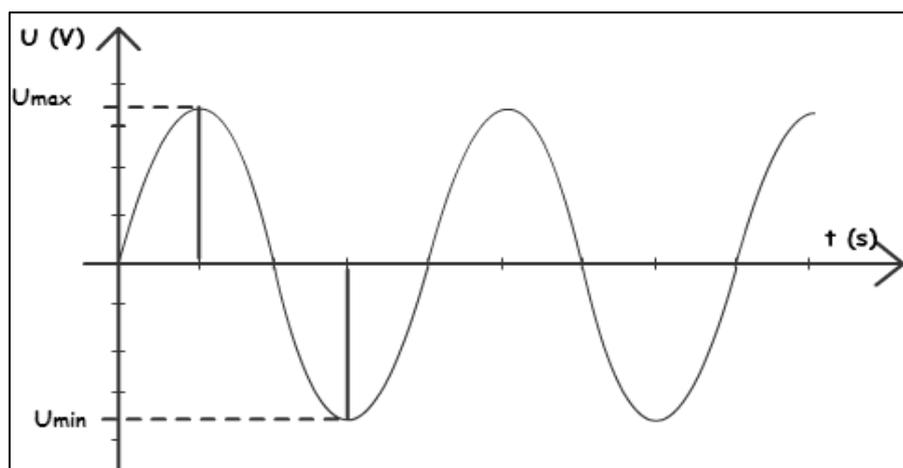


Figure 1 : Exemple d'une tension alternative périodique sinusoïdale

Pour une tension alternative périodique sinusoïdale, les tensions maximale et minimale correspondent aux tensions des sommets de la courbe et leurs valeurs sont opposées ( $U_{\min} = -U_{\max}$ ).

On appelle tension alternative une tension électrique dont le signe change plusieurs fois par seconde.

En règle générale, la tension alternative est de forme sinusoïdale :

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ où } t \text{ est la variable temps (en s)}$$

$U_m$  Est l'amplitude de  $u$  (en V)

$\omega$  Est la pulsation (en  $\text{rad.s}^{-1}$ )

$\varphi_0$  Est la phase à l'origine des temps (en rad)

$\theta = \omega t + \varphi_0$  Est la phase de  $u$  à l'instant  $t$  (en rad)

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

---

## I.1.1.2. pulsation et l'alternance

- **La pulsation :**

(En rad/s) On appelle pulsation la grandeur.  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

- **L'alternance :**

L'alternance est la durée d'une demi-période, par exemple : l'alternance positive ou négative.

[3] [4]

## I.1.2. Tension efficace

La valeur efficace d'une tension  $u(t)$  variable au cours du temps est égale à la valeur  $U$  de la tension continue qui générerait la même énergie thermique dans le même conducteur ohmique pendant le même temps que cette tension variable.

La tension efficace d'un courant alternatif est égale à la tension d'un courant continu qui produirait, pour le même temps, dans une même résistance pure, la même quantité de chaleur. Elle vaut

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Les valeurs indiquées par les appareils de mesure de type voltmètre ou ampèremètre sont toujours des valeurs efficaces.

## I.1.3. La période et La fréquence d'une tension alternative

- **La période :**

Toutes les tensions alternatives visualisées jusqu'à présent peuvent être découpées en parties identiques qui se répètent à intervalles de temps régulier : ces tensions sont dites périodiques et la plus petite partie d'une tension qui se répète est appelée motif élémentaire. La durée pendant laquelle le spot décrit un motif élémentaire est appelée période (exprimée en seconde).

On appelle période l'intervalle de temps noté  $T$  en secondes qui sépare deux instants consécutifs où le phénomène se reproduit identique à lui-même. Unité (en s)

- **La fréquence :**

Et On appelle une fréquence (en Hz) notée  $f$ , Plus la période est courte plus le phénomène se reproduit souvent. On définit la fréquence notée  $f$  d'une grandeur périodique le nombre de périodes par seconde.

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

La fréquence  $f$  est en hertz. Inverse de la période.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

$f$  : fréquence en hertz (Hz).

$T$  : période en secondes (s).

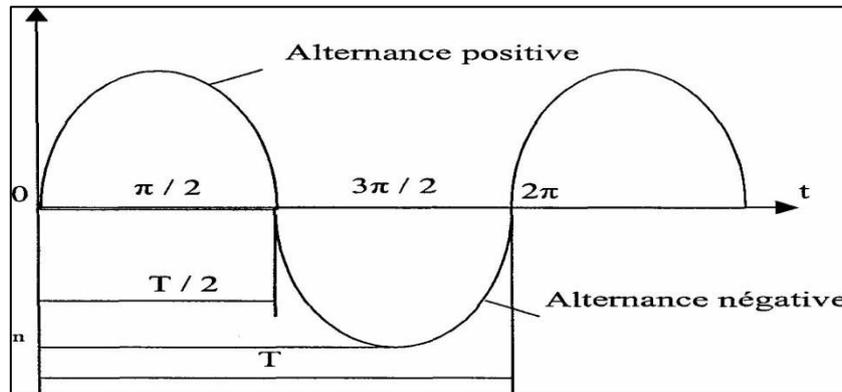


Figure 2 : période d'une tension alternatif

## I.1.4. Valeur instantanée de la tension

La valeur de la tension à un instant donné s'appelle la valeur instantanée et se note  $u$  en volt telle que :

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

## I.1.5. Courant alternatif sinusoïdal

Un courant qui varie périodiquement en se renversant est appelé courant alternatif. [6]

Un courant alternatif est dit sinusoïdal lorsque son intensité est une fonction sinusoïdale du temps :

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi) \text{ ou } i = I_m \cos(\omega t + \phi)$$

- $I_m$  : est l'amplitude de l'intensité ou intensité maximale du courant :
- $(\omega t + \phi)$  : est la phase à l'instant  $t$
- $\Phi$  : est la phase à  $t = 0$
- $\omega$  : est la pulsation
- $\sin(\omega t + \phi)$  et  $\cos(\omega t + \phi)$  : sont des fonctions périodiques de période

La figure ci-dessous décrit la variation de  $i = I_m \cos(\omega t + \phi)$  en fonction du temps  $t$  :

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

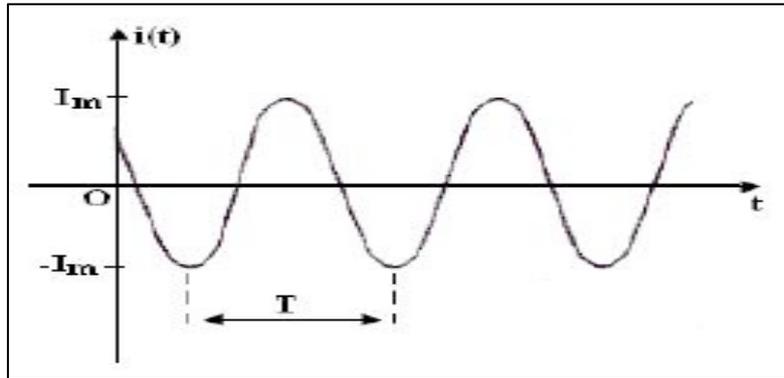


Figure 3 : variation de courant en fonction du temps t

## I.1.5.1 La valeur moyenne d'un courant [5]

$$\begin{aligned} I_{\text{moy}} &= \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\text{max}} \sin(\omega t - \varphi) dt \\ &= \frac{I_{\text{max}}}{T} [-\cos \omega t / \omega]_0^T \\ &= -\frac{I_{\text{max}}}{\omega T} [\cos \omega t - \cos 0] \\ &= -\frac{I_{\text{max}}}{2\pi} [1 - 1] = 0 \end{aligned}$$

## I.1.5.2 La valeur efficace d'un courant

$$\begin{aligned} i_{\text{eff}}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i^2(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{\text{max}}^2 \sin^2 \omega t dt \\ &= \frac{2I_{\text{max}}^2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt \\ &= \frac{2I_{\text{max}}^2}{2T} \left[ t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right]_0^{\frac{T}{2}} \\ &= -\frac{I_{\text{max}}^2}{T} \left[ \left( \frac{T}{2} - \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega \frac{T}{2} \right) - 0 \right] = I_{\text{max}} \left[ \frac{1}{2} \right] \\ I_{\text{eff}} &= \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

## I.1.6. Déphasage tension-courant

La plupart des récepteurs monophasés sont assimilables à des dipôles passifs. Ils sont traversés par un courant sinusoïdal lorsque la tension à leurs bornes est sinusoïdale, et ont même fréquence. Pour certains récepteurs, il existe un « décalage » entre courant et tension, appelé « déphasage ». [8]

Le déphasage entre deux ondes peut être exprimé, selon la mesure effectuée :

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

- comme un angle (en radians, degrés voire tours, en considérant un tour comme une période).
- comme un temps (en secondes, à comparer avec la période).
- comme une distance (en mètres, à comparer avec la longueur d'onde).

La notion de déphasage n'est pas limitée à des ondes sinusoïdales. On peut parler de déphasage pour tout type d'onde ou phénomène périodique. Pour les ondes ou les phénomènes qui n'ont pas la même période, la notion de déphasage peut ne présenter aucun intérêt.

Pour un phénomène non périodique on ne peut parler que de décalage. [7]

Dans un premier temps, nous allons définir la notion de déphasage entre deux grandeurs sinusoïdales de même fréquence, et dans un deuxième temps, nous définirons les déphasages entre courant et tension pour chaque dipôle passif élémentaire (résistor parfait, bobine parfaite et condensateur parfait). [8]

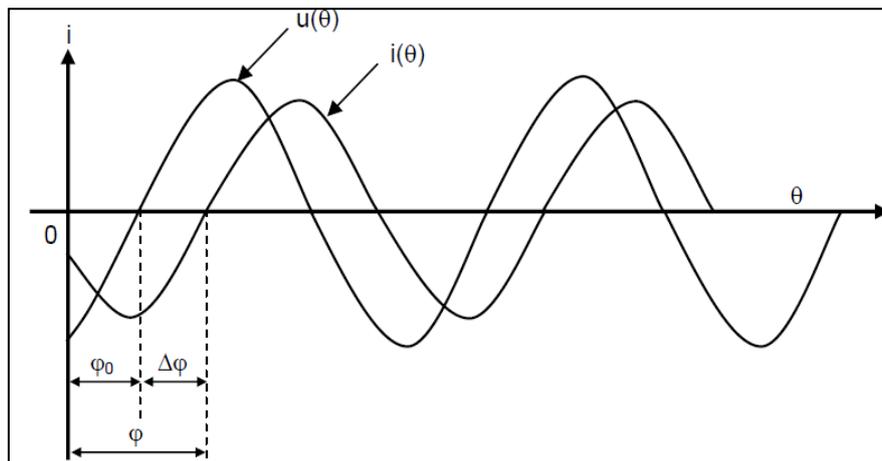


Figure 4 : le déphasage entre le courant et la tension

## I.1.7. Représentation de Fresnel

La représentation de Fresnel est un outil graphique permettant d'ajouter, de soustraire, de dériver et d'intégrer des fonctions sinusoïdales de même fréquence. [3]

En physique, de nombreuses grandeurs peuvent être des fonctions sinusoïdales du temps (ou de l'espace) : [7]

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

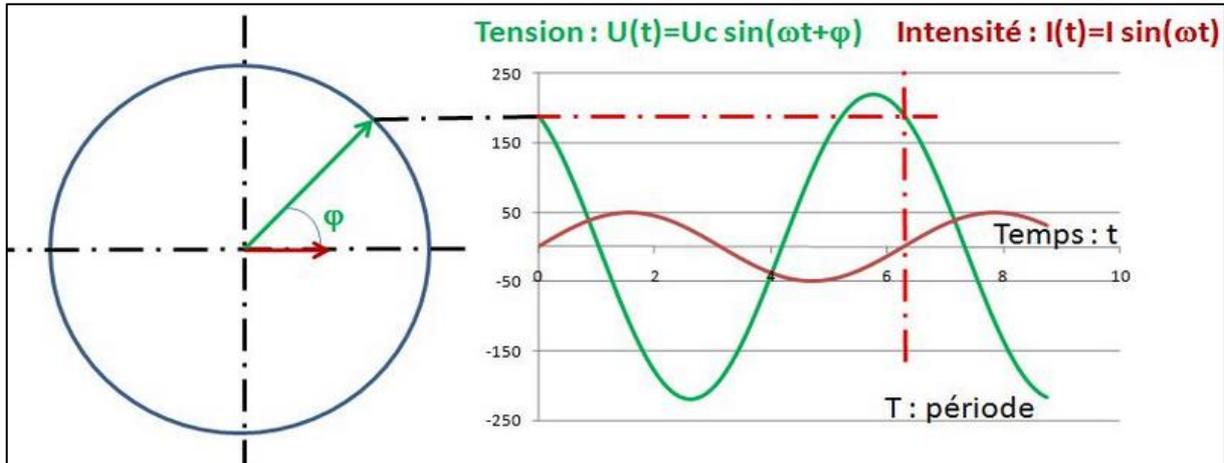


Figure 5 ; Représentation vectorielle de la tension et du courant (diagramme de Fresnel)

La sinusoïde représentant la tension alternative sinusoïdale  $u$ , est engendrée par le vecteur  $\vec{U}_m$  appelé vecteur de Fresnel. À l'origine des temps,  $\vec{U}_m$  est l'axe  $Ox$ , origine des phases.

Le vecteur tourne autour du point  $O$ .

La vitesse angulaire de rotation est égale à la pulsation  $\omega$  de la tension.

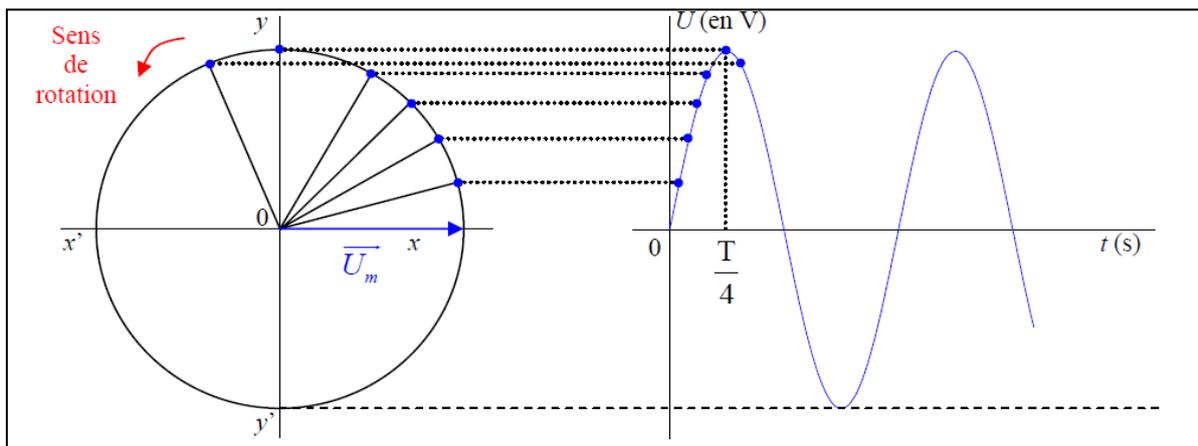


Figure 6 : Représentation de Fresnel

## a. Cas où la tension est nulle au temps $t = 0$

Dans ce cas  $U(0) = 0$ . La tension est donné par :  $u = U_m \sin(\omega t) = U_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t)$

$$U_m = u_{eff} \sqrt{2}$$

$U_m$  : tension maximale.

$U_{eff}$  : tension efficace.

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

## b. Cas où la tension prend la valeur $u_0$ au temps $t = 0$

Dans ce cas  $U(0) = u_0$ . La tension est donné par :

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi)$$

$\varphi$  : Phase à l'origine.

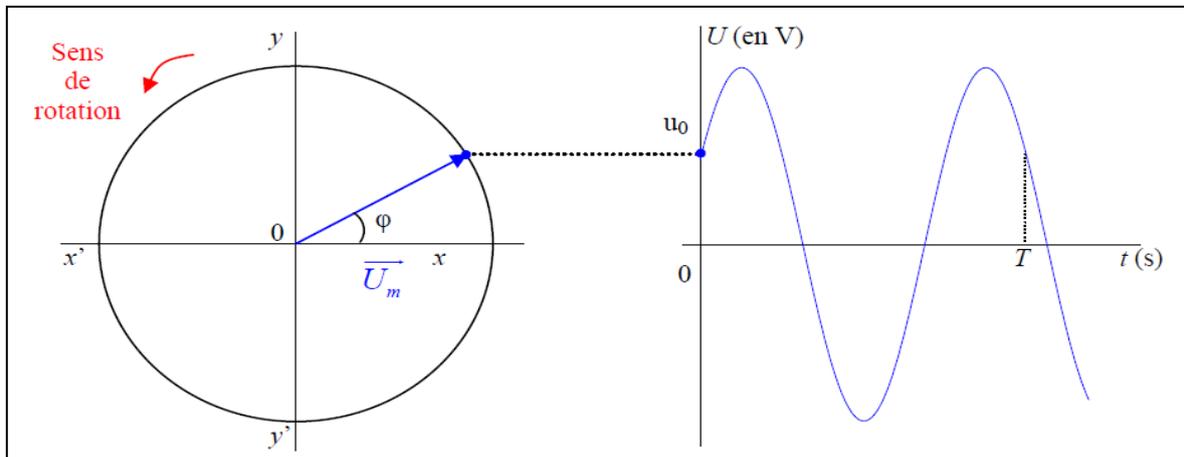


Figure 7 : Cas où la tension prend la valeur  $u_0$  au temps  $t = 0$

## - Déphasage entre deux tensions

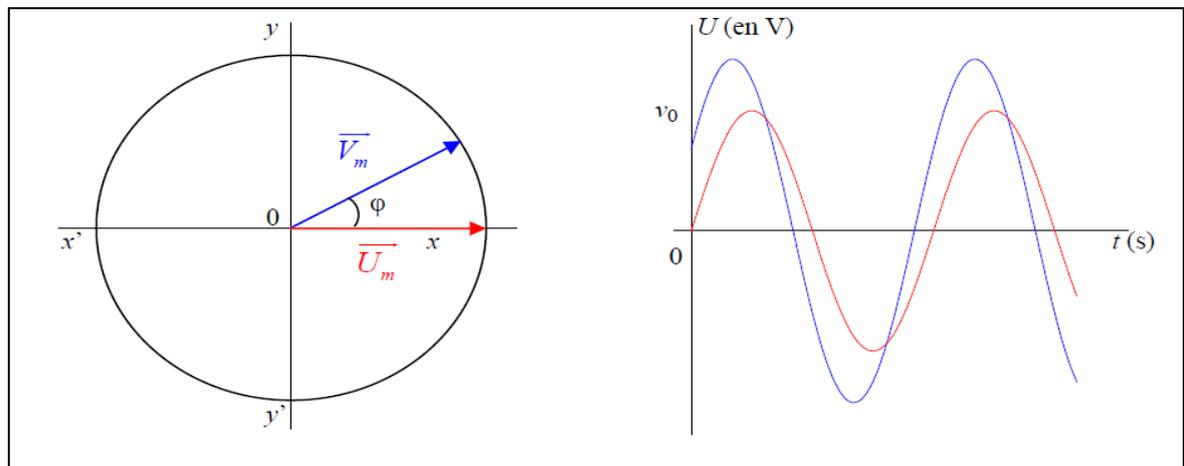


Figure 8 : Représentation de Déphasage entre deux tensions

Les vecteurs  $\vec{U}_m$ ,  $\vec{V}_m$  représentent respectivement les tensions  $u$  et  $v$ . L'angle  $\varphi$  tel que

$\varphi = (\vec{U}_m; \vec{V}_m)$  Est appelé déphasage.

$\vec{U}_m$  et  $\vec{V}_m$  ont la même vitesse angulaire. Le déphasage reste constant.

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

## I.2. Les puissances déterminantes en alternatif

D'une manière générale en physique, la puissance correspond à une quantité d'énergie par unité de temps. Elle s'exprime en Watt : 1W équivaut à 1 J·s<sup>-1</sup>, et 1 J équivaut à 1W·s. [3]

Dans le cas d'un dipôle électrique, la puissance s'écrit sous la forme suivante en régime continu :

$$P = U \cdot I$$

En régime variable, on l'écrira ainsi :  $p(t) = u(t) \cdot i(t)$

Avec p en Watt (W), u en Volt (V) et i en Ampère (A).

Dans le cas d'un régime alternatif, les grandeurs électriques (tension, intensité) présentent un caractère périodique. La puissance instantanée,  $p(t) = i(t) \cdot u(t)$ , est donc elle aussi variable.

On peut alors définir plusieurs grandeurs physiques, homogènes à une puissance, qu'il importe de bien différencier les unes des autres. Ce sont :

- La puissance complexe.
- La puissance active ou réelle.
- La puissance apparente.
- La puissance réactive.

La puissance complexe est définie comme le produit de la tension complexe par l'intensité complexe :

$$S = U \cdot I$$

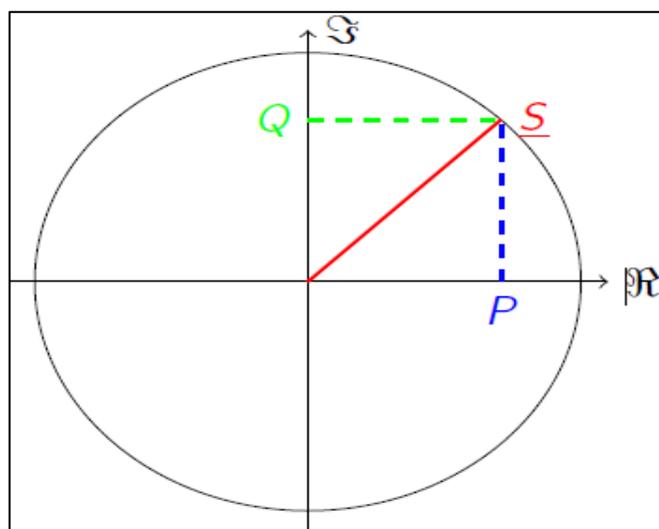


Figure 9 : projection de la puissance complexe

La projection de la puissance complexe sur l'axe réel est appelée puissance active ; la projection de la puissance complexe sur l'axe imaginaire est appelée puissance réactive.

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

---

## I.2.1. La puissance active P [W] [10]

Il s'agit de la puissance moyenne consommée par le système au cours d'un temps donné. Son énergie exprimée en kilowatt heure (kWh). Elle est utilisable, après transformation par le récepteur, sous forme de travail ou de chaleur. À cette énergie correspond la puissance active P (kW).

$$P = U I \cos\varphi$$

Avec :

U : en volts [V].

I : en ampères [A].

P : en Watts [W].

La puissance active absorbée par un récepteur est toujours positive.

## I.2.2. Puissance réactive Q [var]

Son énergie exprimée en kilovar heure (kvarh). Elle sert en particulier à créer dans les bobinages des moteurs, transformateurs, le champ magnétique sans lequel le fonctionnement serait impossible.

La puissance réactive Q (kvar) Contrairement à la précédente, cette puissance est dite «improductive » pour l'utilisateur

$$Q = U I \sin\varphi$$

Avec :

Q : En voltampères réactifs [VAR]

U : En volts [V]

I : En ampères [A]

L'unité de puissance réactive est le VOLTAMPÈRE RÉACTIF (VAR).

Le distributeur d'énergie doit diminuer au maximum cette puissance réactive Q, afin de ne transporter que la puissance active utile au récepteur.

## I.2.3. Puissance apparente S [VA]

La puissance apparente est une caractéristique de construction des machines électriques. Celles-ci sont prévues pour un fonctionnement sous une tension nominale  $U_n$  déterminé par l'isolation de la machine, et avec un courant nominal  $I_n$  déterminé par les possibilités de refroidissement.

La puissance apparente nominale est alors :

$$S_n = U_n I_n$$

Donc la puissance apparente S reçue par un dipôle est égale au produit :  $S = U.I$

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

L'unité est le VOLTAMPERE : [VA]

La relation simple entre P, Q et S est donnée par la formule :  $S^2 = P^2 + Q^2$  Les puissances calculées (kW, kvar et kVA) sont à multiplier par 3 pour avoir les puissances consommées.

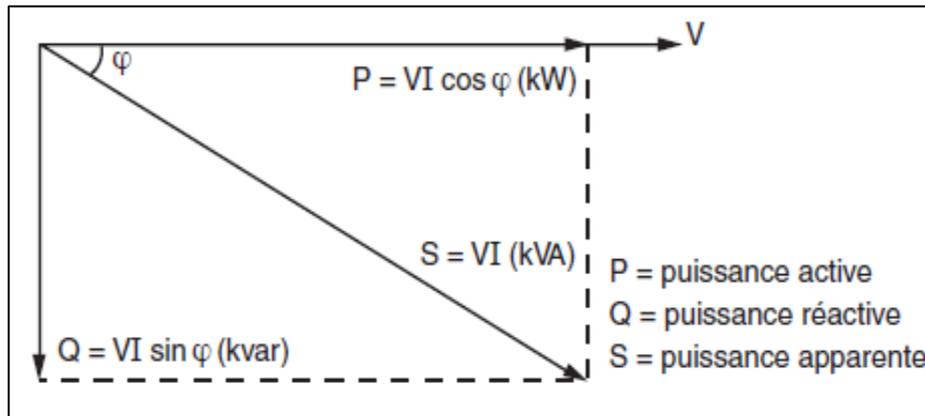


Figure 10 : Triangle des puissances

## I.2.4 Analyse des puissances sur les circuits alternatifs

Lors de la démonstration de la puissance que nous venons de réaliser, le récepteur était composé d'une charge purement résistive (ohmique) soit inductif, soit capacitif. Cela implique un déphasage entre le courant et la tension. Pour ces cas, il est nécessaire de tenir compte du déphasage.

### I.2.4.1. Circuit est purement résistive

Ces circuits sont principalement composés de récepteurs purement résistifs tels que : (Radiateurs, cuisinières, fer à souder, lampes à incandescence, lignes électriques) Dans ce genre de raccordement, les récepteurs ne provoquent pas de déphasage entre le courant et la tension.

Supposons que ce circuit est soumis à une tension alternative  $U = U_m \sin \omega t$  d'amplitude de tension  $U_m$ . Cherchons le courant  $I_R$  qui le parcourt. [6]

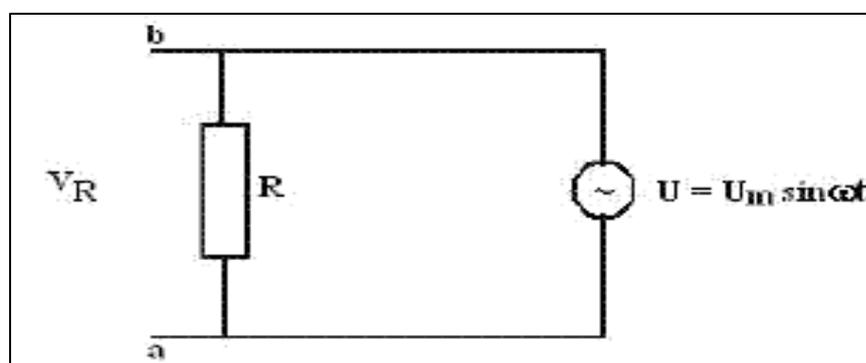


Figure 11 : Circuit résistif

$V_R$  est la tension aux bornes de la résistance. En appliquant la loi de Kirchhoff relative à une maille ( $V_R = U_m \sin \omega t$ ) et la loi d'Ohm ( $V_R = R \cdot I_R$ ) à la portion ab, nous obtenons :

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

$$I_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$$

Ou :  $i_R = I_{Rm} \sin \omega t$

Avec :  $I_{Rm} = \frac{U_m}{R}$

La figure ci-après montre les oscillations du courant  $i_R$  et de la tension  $v_R$ .

$v_R$  et  $i_R$  atteignent leur valeur maximale et s'annulent simultanément. Ils sont en phase. Ces deux grandeurs peuvent être représentées à l'aide de diagrammes vectoriels appelés diagrammes de Fresnel : dans cette représentation, elles sont décrites par deux vecteurs (vecteurs de Fresnel) qui tournent avec une fréquence angulaire dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et dont les longueurs sont respectivement proportionnelles à  $U_m$  et  $I_{Rm}$ . Les projections sur l'axe vertical donnent les valeurs instantanées  $v_R$  et  $i_R$ .

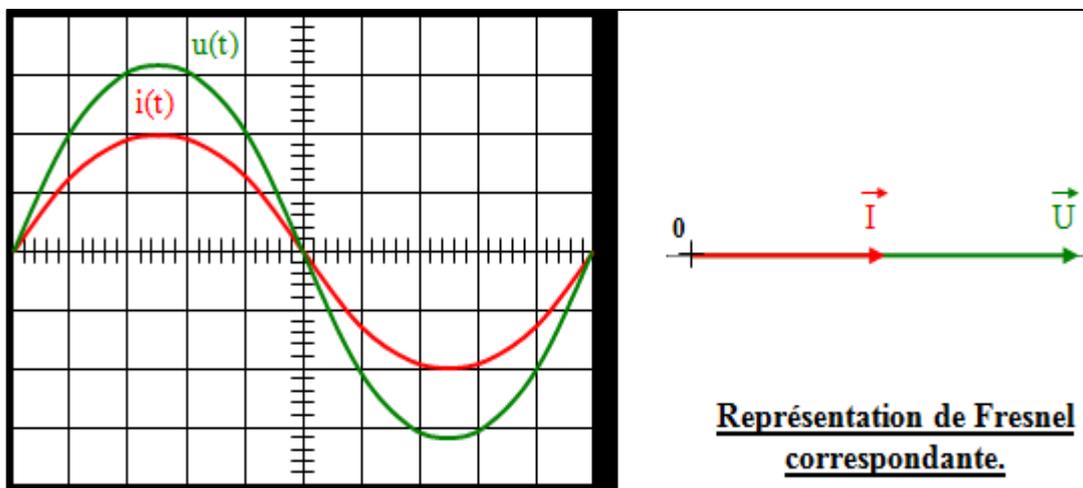


Figure 12 : Oscillations du courant et de la tension aux bornes de R

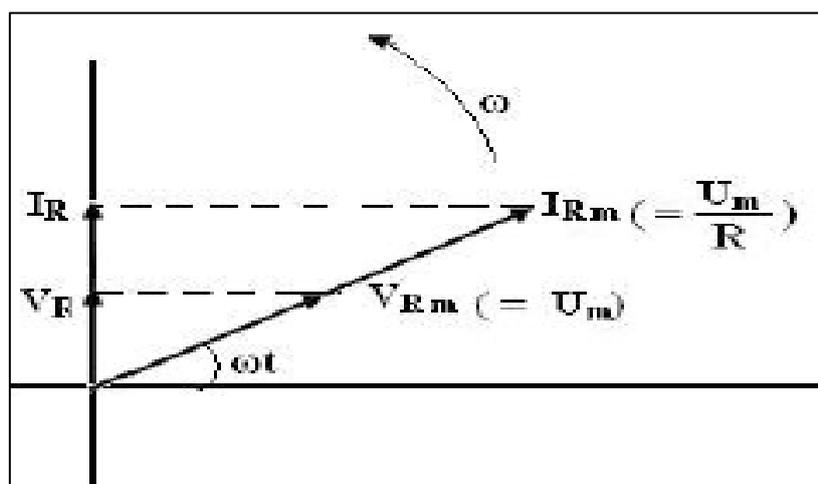


Figure 13 : diagrammes U.I.P (Circuits résistifs)

$v_R$  et  $i_R$  étant en phase, leurs vecteurs de Fresnel ont la même direction et le même sens.

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

## I.2.4.2 Circuit est purement capacité

On se propose de comparer les oscillations de courant  $I_C$  qui parcourt le circuit et de la tension  $V_C$  aux bornes du condensateur.

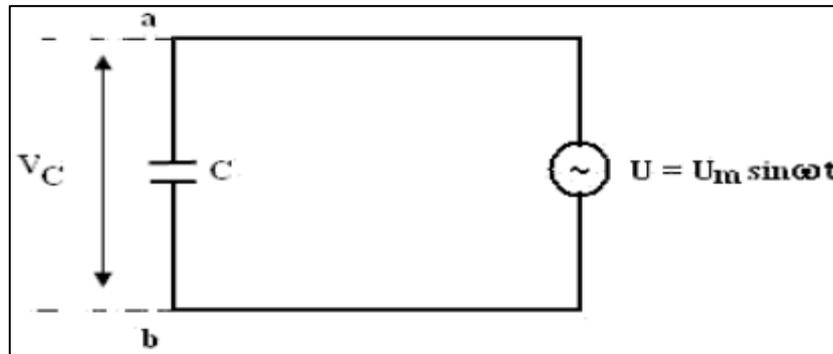


Figure 14: Circuit capacitif

Nous avons ici :  $V_C = \frac{q}{C}$  et  $V_C = U_m \sin \omega t$  (d'après la loi des mailles). Ces deux relations donnent :

$q = C U_m \sin \omega t$  ; Mais :  $I_C = \frac{dq}{dt}$  , on obtient alors :  $I_C = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$  On voit

que  $I_C$  est en avance de phase de  $\frac{\pi}{2}$  sur  $V_C$ .  $I_C$  atteint sa valeur maximale avant  $V_C$ .

Reprenons  $I_C = \omega C U_m \cos \omega t$ . On peut l'écrire :  $I_C = \frac{U_m}{\left( \frac{1}{\omega C} \right)} \cos \omega t = \frac{U_m}{X_c} \cos \omega t$

Avec :  $X_c = \frac{1}{\omega C}$  L'amplitude de courant est ici  $I_{Cm} = \frac{U_m}{X_c}$

Avec  $U_m = V_{Cm}$  la valeur maximale de  $V_C$ .

Les figures qui suivent décrivent les oscillations de  $I_C$  et de  $V_C$  et leurs présentations de Fresnel.

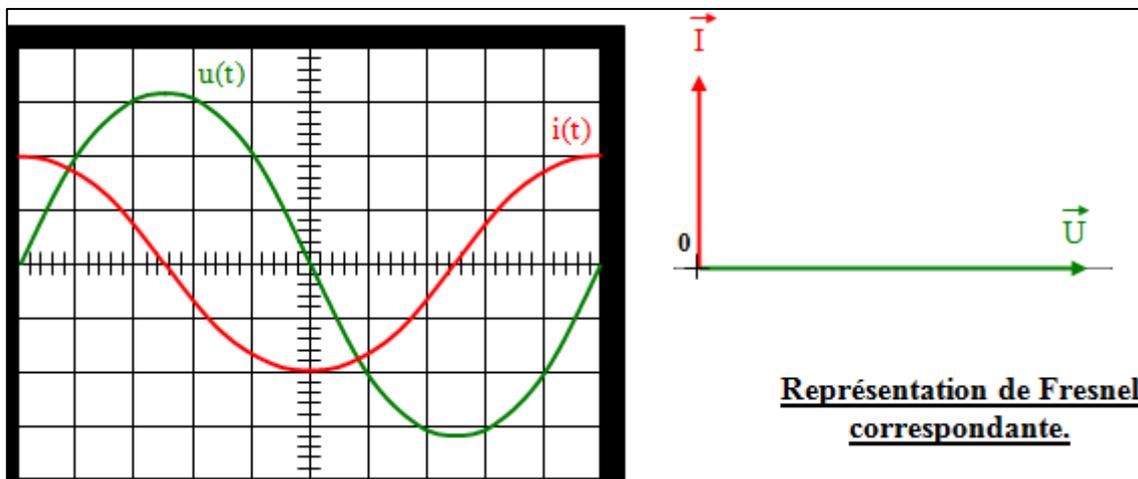


Figure 15 : oscillations de  $I_C$  et de  $V_C$ .

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

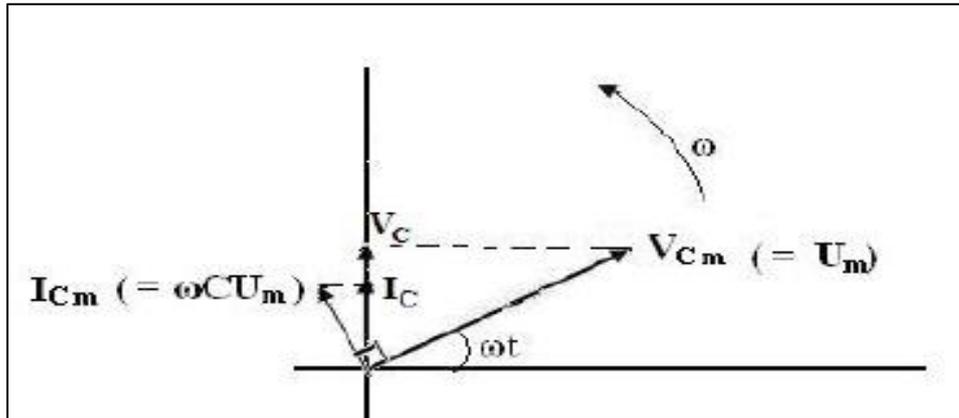


Figure 16 : diagramme (Circuits capacitif)

En comparant la relation  $I_{Cm} = U_m / X_C$  à la loi d'Ohm en courant continu ( $U = RI$ ), on déduit que  $X_C$  joue le rôle d'une résistance.  $X_C$  est appelé réactance de capacité et dépend de la pulsation, si  $C$  est exprimé en Farad et  $\omega$  en  $s^{-1}$  alors  $X_C$  sera en Ohm

## I.2.4.3 Circuit est purement inductif

Comparons les oscillations de courant  $I_L$  qui parcourt le circuit et de la tension  $V_L$  aux bornes ab.

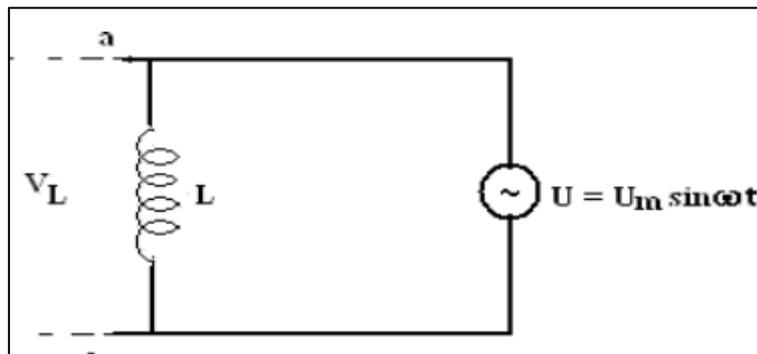


Figure 17: Circuit inductif

La tension  $V_L$  aux bornes de l'élément inductif  $L$  est :  $V_L = L \frac{dI_L}{dt} = U_m \sin \omega t$  (d'après la loi de Kirchhoff relative à une maille). On a donc :

$$dI_L = \left( \frac{U_m}{L} \sin \omega t \right) dt$$

Après intégration on obtient :

$$I_L = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$I_L$  est en retard de phase  $\frac{\pi}{2}$  sur  $V_L$ .

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

Le courant atteint sa valeur maximale après la tension VL. L'amplitude de courant est :

$$I_{Lm} = \frac{U_m}{\omega L} = \frac{U_m}{X_L}$$

Avec  $U_m = V_L$  ; m la valeur maximale de VL et  $X_L = \omega L$ .

$X_L$  est appelé réactance d'induction et son unité est aussi l'Ohm dans le système d'unité internationale.

$X_L$  dépend aussi de la pulsation  $\omega$

Les oscillations de  $I_L$  et  $V_L$  et leurs vecteurs de Fresnel sont illustrés ci-dessous :

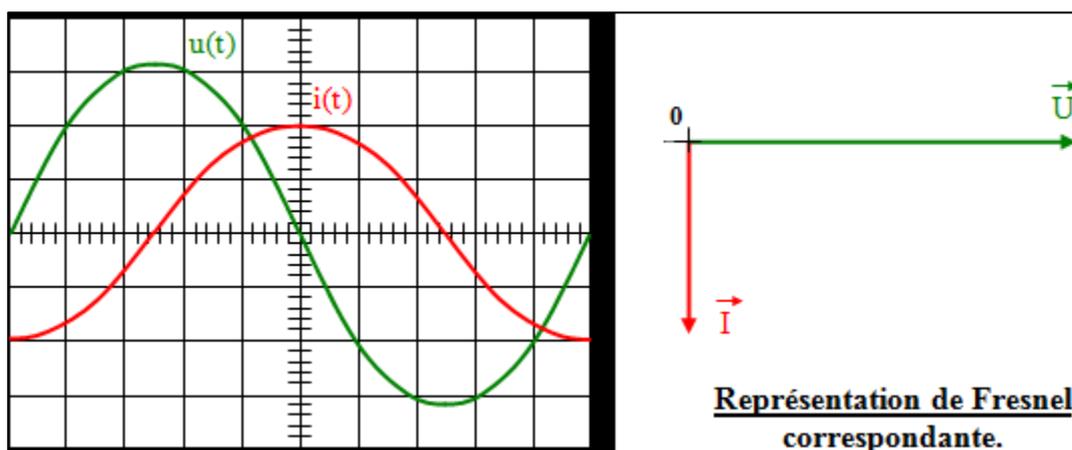


Figure 18 : oscillations de  $I_L$  et de  $V_L$ .

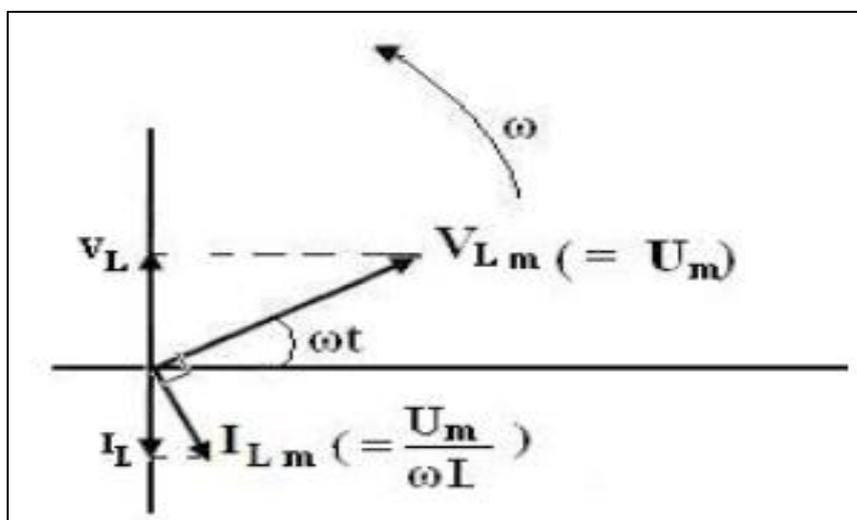


Figure 19 : diagramme (Circuits inductif)

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

## I.2.4.4. Circuit RLC

Considérons un circuit RLC alimenté par une f.é.m.  $U = U_m \sin \omega t$ . Cherchons le déphasage entre le courant  $I$  qui traverse le circuit et la tension d'alimentation.

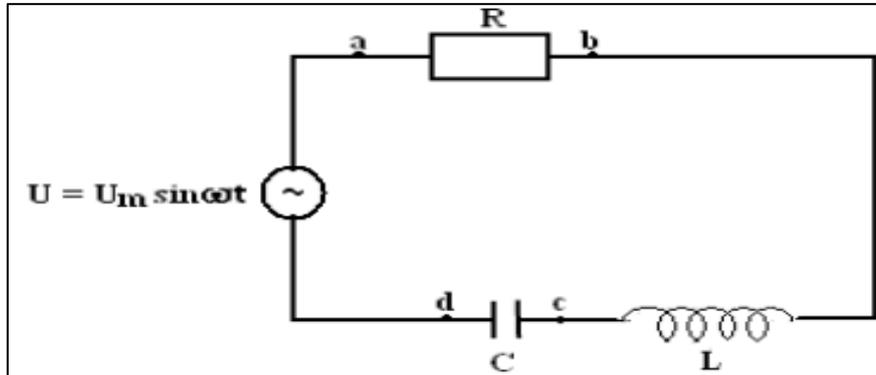


Figure 20 : Circuit RLC

Rappelons nos notations :

- $V_R$  = tension instantanée aux bornes R et de valeur maximale  $V_{Rm}$
- $V_C$  = tension instantanée aux bornes de condensateur et de valeur maximale  $V_{Cm}$
- $V_L$  = tension instantanée aux bornes de la bobine et de valeur maximale  $V_{Lm}$

La valeur instantanée de la source est  $U$  et sa valeur maximale  $U_m$ . Désignons par  $I_m$  l'amplitude du courant  $I$ . On a :

- $V_{Rm} = I_m R$
- $V_{Cm} = I_m X_C$
- $V_{Lm} = I_m X_L$

Rappelons aussi les résultats des sections précédentes à savoir :

- $V_R$  est en phase avec le courant.
- $V_C$  est en retard de phase de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport au courant.
- $V_L$  est en avance de phase de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport au courant.

L'application de la loi des mailles donne :  $U = V_R + V_C + V_L$ .

On voit que la tension instantanée  $U$  aux bornes ad est égale à la somme des tensions instantanées  $V_R$ ,  $V_C$  et  $V_L$ . La représentation de Fresnel qui correspond à ce circuit est donnée ci-dessous.

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

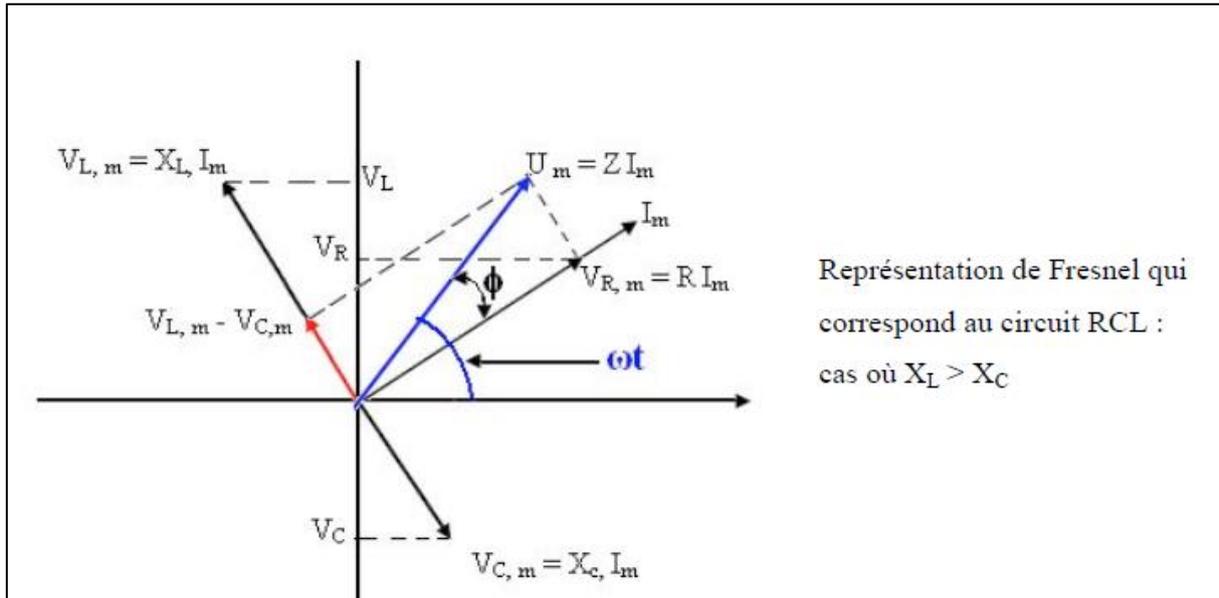


Figure 21: diagramme (Circuits RLC)

Les tensions instantanées  $V_R$ ,  $V_C$ , et  $V_L$  sont les projections sur l'axe vertical des vecteurs de Fresnel d'amplitude  $V_{Rm}$ ,  $V_{Cm}$  et  $V_{Lm}$ . La somme vectorielle de ces vecteurs de Fresnel donne le vecteur de Fresnel d'amplitude  $U_m$  et dont la projection sur l'axe vertical est précisément la tension instantanée d'alimentation  $U$ .

On déduit de la figure que :

$$u_m = \sqrt{v_{Rm}^2 + (v_{Lm} - v_{Cm})^2} = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Posons :  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$  alors on a :

$$U_m = Z I_m \rightarrow I_m = \frac{U_m}{Z}$$

$Z$  est l'impédance de ce circuit. Il est exprimé en Ohm.

L'angle  $\phi$  est le déphasage entre la source  $U$  et le courant  $I$  et est tel que :

$$\tan \phi = \frac{V_{Lm} - V_{Cm}}{V_{Rm}} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Dans le cas où  $X_L > X_C$ ,  $\tan \phi$  est positif et le courant est en retard de phase  $\phi$  sur la tension :

$$U = U_m \sin \omega t$$

$I = I_m \sin (\omega t - \phi)$  (on a ici un circuit plus inductif que capacitif)

Dans le cas où  $X_L < X_C$ ,  $\tan \phi$  est négatif et le courant est en avance de  $\phi$  par rapport à la tension :

$$U = U_m \sin \omega t$$

# Généralités sur les puissances dans un régime alternatif

$I = I_m \sin(\omega t + \phi)$  (le circuit est plus capacitif qu'inductif)

Remarquons aussi que l'angle  $\phi$  est tel que  $\cos \phi = R/Z$ .

Puissances consommées par les dipôles passifs élémentaires (en convention récepteur).

- résistance  $R$  (en  $W$ ) déphasage nul :  $j = 0$

$$P = UI \cos j = UI$$

$$\text{Loi d'Ohm : } U = RI$$

$$P = RI^2 \text{ (loi de Joule)}$$

$$Q = UI \sin j = 0 \text{ var}$$

Une résistance ne consomme pas de puissance réactive.

- Bobine parfaite d'inductance  $L$  (en henry)

$$j = +90^\circ$$

$$P = 0 \text{ W}$$

La bobine ne consomme pas de puissance active.

$$Q = UI \sin j = UI$$

$$\text{Loi d'Ohm : } U = ZI \text{ avec : } Z = L\omega$$

$$Q = +L\omega I^2 > 0$$

La bobine consomme de la puissance réactive.

- Condensateur parfait de capacité  $C$  (en farad)

$$j = -90^\circ$$

$$P = 0 \text{ W}$$

Le condensateur ne consomme pas de puissance active.

$$Q = -UI$$

$$\text{Impédance : } Z = 1/(C\omega)$$

$$Q = -I^2/(C\omega) < 0$$

Le condensateur est un générateur de puissance réactive.

## I.3. Conclusion

Nous remarquons que le distributeur doit sur dimensionner ses installations, en particulier ses transformateurs, en fonction de la puissance apparente  $S$  exprimée en [VA], car c'est elle qui est la plus importante.

Pour un distributeur, il est donc important d'avoir une puissance apparente  $S$  aussi proche que possible de la puissance active  $P$  afin d'améliorer le rendement de son transport d'énergie.

En conclusion, le distributeur d'énergie a intérêt à ce que le consommateur conserve un angle de déphasage le plus proche de  $0^\circ$ .

# **Chapitre II: Etude de la compensation de la puissance réactive**

## **Chapitre II: Etude de la compensation de la puissance réactive**

L'énergie électrique est toujours en grande demande pour l'utilisation industrielle. Il est en augmentation pour le développement d'applications industrielles. Une des méthodes les plus économiques pour répondre à la demande d'énergie électrique est d'améliorer l'efficacité du système en corrigeant le facteur de puissance. L'efficacité du système est définie comme le rapport entre la puissance réelle et la puissance apparente, appelé aussi facteur de puissance. Les charges dans les systèmes électriques sont généralement alimentées par un courant alternatif et ils sont pour la plupart des moteurs ou les charges avec caractéristique inductive. Ils tirent la puissance active et réactive des lignes. La puissance active est convertie différents types d'énergie, tels que la chaleur, de l'énergie mécanique. Mais, la puissance réactive n'est pas convertie en n'importe quel type d'énergie. La taille des transformateurs et des lignes de transmission peut être supérieure à leurs valeurs nominales lorsque la puissance réactive n'est pas indemnisée. La puissance réactive est due à champ tournant dans les machines à courant alternatif et le champ magnétique dans les transformateurs. Par conséquent, le réactif qui est nécessaire pour transmettre de la puissance active.

Dans les applications pratiques, des compensations de puissance réactive ont généralement été réalisés en utilisant des groupes de condensateurs constants contrôlés via des relais et contacteurs. Il est nécessaire de connaître le facteur de puissance afin d'atteindre les corrections de puissance réactive. La distorsion harmonique du système d'alimentation actuelle est devenue une grande préoccupation en raison du nombre d'équipements électroniques et électriques des appareils électroniques sont rapidement accrus. Un mauvais facteur de puissance peut entraîner dans de tels systèmes. Afin de réduire la contamination harmonique dans les lignes électriques et améliorer la transmission efficacité de la ligne, les recherches de correction du facteur de puissance deviennent un sujet brûlant. [11]

### **II.1. Facteur de puissance**

Le facteur de puissance est une caractéristique d'un récepteur électrique.

Pour un dipôle électrique alimenté en régime de courant variable au cours du temps (sinusoïdal ou non), il est égal à la puissance active consommée par ce dipôle, divisée par le produit des valeurs efficaces du courant et de la tension (puissance apparente). Il est toujours compris entre 1 et 0. [12]

Si les courants et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux sur le courant et la tension, le facteur de puissance est égal à  $\cos \varphi$ .

$$\cos \varphi = \frac{P(KW)}{S(KVA)}$$

# Etude de la compensation de la puissance réactive

Une comparaison mécanique possible serait le facteur d'embrayage d'une boîte de vitesses :

- Lorsque la pédale d'embrayage est enfoncée, le moteur tourne (le courant circule) mais ne transmet aucune puissance au véhicule ; le facteur de puissance est nul.
- Lorsque la pédale d'embrayage est relevée, le moteur tourne et toute sa quantité de mouvement est transmise au véhicule pour produire de la puissance motrice ; le facteur de puissance est unitaire lorsque l'on fait *patiner* l'embrayage, on est dans une situation intermédiaire, cela correspond au cas où le facteur de puissance est compris entre 0 et 1.

Les appareils de comptage d'énergie enregistrent les consommations d'énergie active et réactive. Les fournisseurs d'électricité font généralement apparaître le terme  $\text{tg } \varphi$  au niveau de leur facture.

$$\tan \varphi = \frac{E_r(\text{KVARh})}{E_a(\text{KWh})}$$

Le  $\tan \varphi$  est le quotient entre l'énergie réactive  $E_r(\text{KVARh})$  et l'énergie active  $E_a(\text{KWh})$  consommées pendant la même période.

À l'inverse du  $\cos \varphi$  on s'aperçoit facilement que la valeur du  $\tan \varphi$  doit être la plus petite possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive.

$\cos \varphi$  et  $\tan \varphi$  sont liés par la relation suivante :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \varphi)^2}}$$

Les récepteurs consommant le plus d'énergie réactive sont :

- les moteurs à faible charge,
- les machines à souder,
- les fours à arc et induction,
- les redresseurs de puissance.

## II.1.1. Caractérisation d'un récepteur en fonction de son facteur de puissance

- ✓ Lorsque le facteur de puissance est égal à 1 on dit que le récepteur est purement résistif, ce qui ne veut pas dire que c'est un conducteur ohmique idéal (ou résistance pure) et donc que le courant à la même allure que la tension mais que ce récepteur n'a aucun caractère inductif ou capacitif et qu'il n'y a aucun déphasage entre le fondamental du courant qu'il appelle et la phase de la tension qui lui est appliquée.
- ✓ Lorsque le facteur de puissance est égal à 0 on dit que le récepteur est purement réactif, il n'absorbe aucune puissance au réseau et ne dissipe aucune énergie sous forme de chaleur.

# Etude de la compensation de la puissance réactive

- ✓ Ces deux cas extrêmes ne correspondent qu'à des modèles, les récepteurs réels n'étant jamais idéaux. Mais ces modèles peuvent bien convenir dans les conditions d'utilisation du récepteur considéré. [12]

## II.1.2. Effets du facteur de puissance

les Figures 22, 23, 24 ci-dessous représentent les courbes de l'évolution dans le temps de la tension  $V(t)$  et du courant  $I(t)$  et de la puissance  $P(t)$  en fonction du temps ainsi que la valeur moyenne de la puissance consommée par un dipôle soumis à une tension de 230 V et traversé par un courant de 18 A dans trois cas . Courbe a): facteur de puissance = 1 ; courbe b) : facteur de puissance=0,7 ; courbe c) : facteur de puissance=0,2.

- Le facteur de puissance est égal à 1 (valeur maximale) : la tension et le courant sont en phase (ils sont nuls aux mêmes instants et varient dans le même sens);

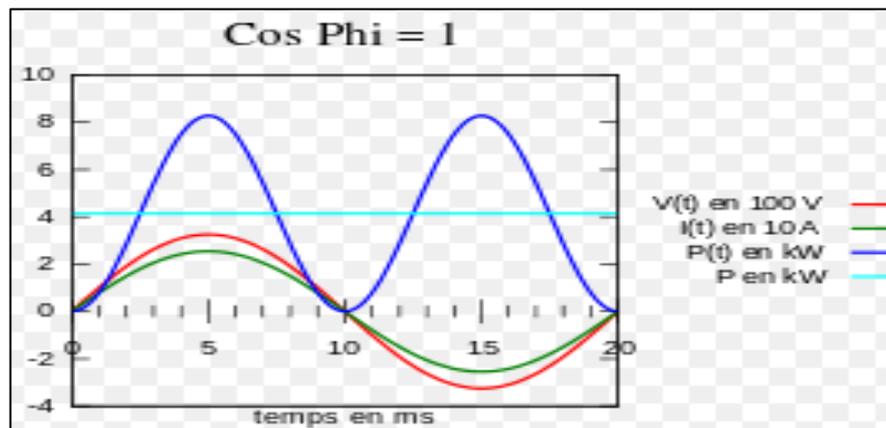


Figure 22 : l'évolution de la tension, du courant  $I(t)$  et de la puissance en fonction du temps : facteur de puissance = 1

- Le facteur de puissance est égal à 0,7 (valeur intermédiaire) : le courant suit toujours une courbe périodique, mais elle est « en retard » comparativement à la courbe de la tension. La puissance prend par moment des valeurs négatives, le dipôle refoule périodiquement de l'énergie sur le réseau ;

# Etude de la compensation de la puissance réactive

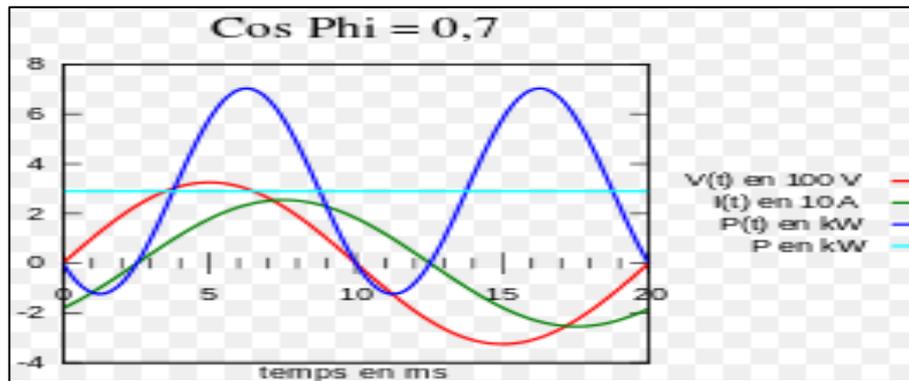


Figure 23 : l'évolution de la tension, du courant  $I(t)$  et de la puissance en fonction du temps : facteur de puissance = 0,7

- Le facteur de puissance est égal à 0,2 (valeur faible) : le courant est le même, la puissance instantanée fluctue avec la même amplitude, mais elle est fortement décalée vers le bas par rapport aux courbes précédentes. La puissance moyenne est faible : 20 % de la puissance mise en jeu lorsque le facteur de puissance est unitaire.

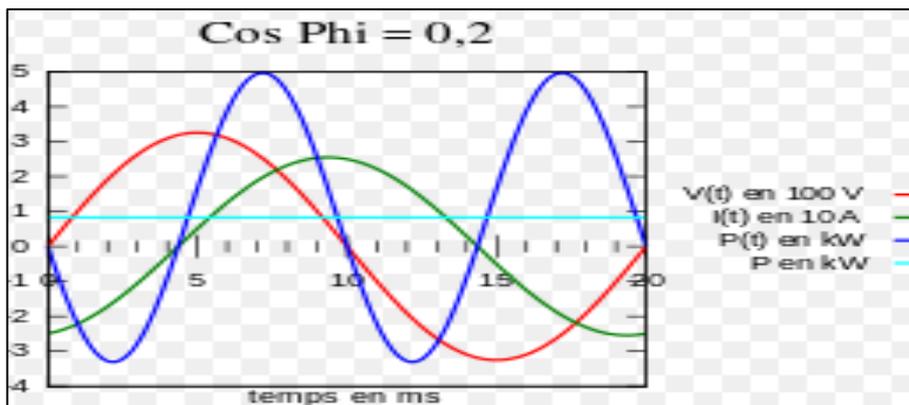


Figure 24: L'évolution de la tension, du courant  $I(t)$  et de la puissance en fonction du temps : facteur de puissance = 0.2

Les figures visualisent :

- La situation d'un dipôle inductif tel une bobine : le courant est en *retard* sur la tension. La puissance périodiquement restituée provient de l'énergie magnétique stockée.
- Une situation « symétrique » se produit avec un dipôle capacitif : dans ce cas, le courant est en *avance* sur la tension. La puissance périodiquement restituée provient de l'énergie de la charge électrique stockée.

Alors un bon facteur de puissance a une importance fondamentale pour obtenir le meilleur rendement d'une installation. Donc il faut savoir améliorer ce facteur.

## II.1.3. Principaux consommateurs de puissance réactive [15]

Les récepteurs consommant le plus d'énergie réactive sont :

- Les moteurs à faible charge
- Les machines à souder
- Les fours à arc et induction
- Les redresseurs de puissance

RÉCEPTEUR		COS $\varphi$	TG $\varphi$
Moteurs asynchrones ordinaires chargés à	0 %	0,17	5,80
	25 %	0,55	1,52
	50 %	0,73	0,94
	75 %	0,80	0,75
	100 %	0,85	0,62
Lampes à incandescence		env. 1	env. 0
Lampes fluorescentes		env. 0,5	env. 1,73
Lampes à décharge		0,4 à 0,6	env. 2,29 à 1,33
Fours à résistances		env. 1	env. 0
Fours à induction compensée		env. 0,85	env. 0,62
Fours à chauffage diélectrique		env. 0,85	env. 0,62
Machines à souder à résistance		0,8 à 0,9	0,75 à 0,48
Postes statiques monophasés de soudage à l'arc		env. 0,5	env. 1,73
Transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc		0,7 à 0,9	1,02 à 0,48
		0,7 à 0,8	1,02 à 0,75
Fours à arc		0,8	0,75
Redresseurs de puissance à thyristors		0,4 à 0,8	2,25 à 0,75

Tableau 1 : représentation de quelque valeur sur les consommateurs de puissance réactive

## II.1.4. méthode d'amélioration de $\cos\omega$ [16]

L'objectif c'est de savoir pourquoi on va améliorer le facteur de puissance en améliorant le  $\cos \omega$  ; L'amélioration de  $\cos \omega$  signifie en fait, qu'on va améliorer l'angle de déphasage.

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active P, il faut fournir autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante. Ceci veut dire qu'un élément qui déplace le courant avec une certaine phase doit être compensé avec un autre élément avec une contre-phase. Le courant court devant la tension avec un condensateur et avec une bobine c'est la situation inverse. Donc ces deux éléments peuvent se compenser l'un l'autre.

# Etude de la compensation de la puissance réactive

Le condensateur va compenser une bobine en phase et vice-versa. Le condensateur va prendre du courant quand la bobine va arrêter ce courant. Pendant la phase suivante le condensateur va décharger et la bobine a besoin de ce courant pour construire son champ magnétique.

Un consommateur a besoin d'une puissance active mais dans ce circuit il y a trop de puissance réactive. Qu'est ce qu'il faut faire pour compenser cette puissance réactive. On va brancher un élément dans ce circuit qui va compenser cette puissance réactive.[13] [14]

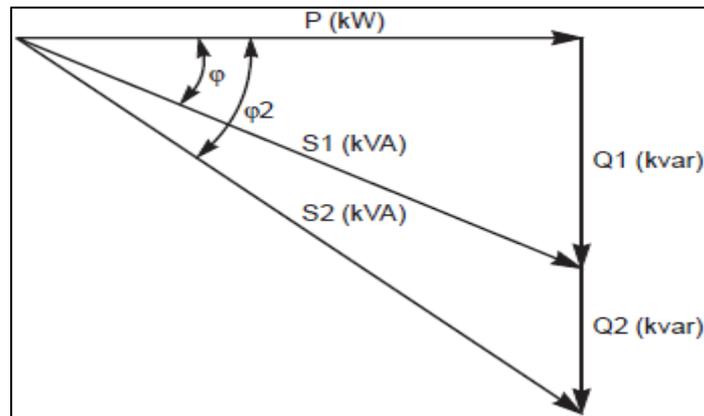


Figure 25 : Influence de la puissance réactive

Ainsi, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne, du fait d'un courant appelé plus important

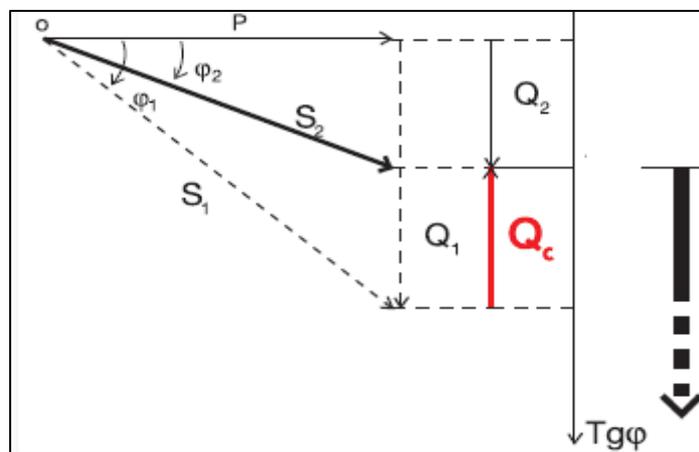


Figure 26 : Bilan des Puissances.

- $P$  = Puissance active
- $Q$  = Puissance réactive sans compensation d'énergie réactive
- $S_1$  = Puissance apparente avant compensation d'énergie réactive
- $\varphi_1$  = Déphasage sans compensation
- $Q_2$  = Puissance réactive avec compensation d'énergie réactive
- $S_2$  = Puissance apparente après compensation d'énergie réactive
- $\varphi_2$  = Déphasage avec compensation

## **II.2.3. Inconvénient d'un mauvais COS Phi**

### **- Pour le producteur :**

- nécessité d'avoir des alternateurs et des transformateurs plus importants,
- posséder une tension plus élevée au départ de la ligne,
- besoin d'avoir des lignes de plus forte section,
- pertes Joules plus élevées,
- appareils de contrôle, de protection et de coupure plus importants.

### **- Pour le consommateur :**

- entraîne une surfacturation par une surconsommation ou une pénalité tension d'utilisation plus faible,
- intensité plus grande,
- pertes Joules plus élevées,
- rendement des appareils mauvais.[17]

Pour ces raisons, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive".

Pour inciter à cela et éviter de sur calibrer son réseau, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive au-delà d'un certain seuil.

On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs.

## **II.2. La compensation de l'énergie réactive**

Beaucoup de machines industrielles fonctionnent grâce à la présence d'un champ magnétique interne. La création et l'entretien de ce champ magnétique réclame de l'énergie réactive.

On rappelle que seule la puissance active est utilisable. L'énergie réactive est indispensable au fonctionnement des machines mais n'apporte aucune valeur ajoutée à l'entreprise.

Les réseaux électriques à pour but de véhiculer de la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente  $S$  à deux composantes : la puissance  $P$  et la puissance  $Q$  liées par le déphasage.

En général, l'écart de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge. Pour obtenir une tension identique (ou proche) aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive.

## **II.2.1. Pourquoi et comment compenser l'énergie réactive**

De nombreux récepteurs consomment de l'énergie réactive pour créer les champs électromagnétiques (moteurs, transformateurs, ballasts de tubes fluorescents, etc.).

Compenser l'énergie réactive, c'est fournir cette énergie à la place du réseau de distribution par l'installation d'une batterie de condensateurs, source d'énergie réactive de puissance  $Q_c$ .

Les avantages sont multiples :

- économie sur le dimensionnement des équipements électriques car la puissance appelée diminue
- augmentation de la puissance active disponible au secondaire des transformateurs
- diminution des chutes de tension et des pertes en lignes
- économie sur la facture d'électricité, en supprimant la consommation excessive d'énergie réactive

Pour ces raisons, il est nécessaire de produire de l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. Nous utilisons des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs et pour relever le facteur de déplacement ( $\cos\varphi$ ). [18]

Améliorer le facteur de puissance d'une installation électrique, c'est la doter des moyens de produire elle-même une part plus ou moins importante de l'énergie réactive qu'elle consomme.

Il existe différents systèmes pour produire de l'énergie réactive en particulier les compensateurs asynchrones et les condensateurs shunt (ou série pour les grands réseaux de transport).

Le condensateur est le plus utilisé compte-tenu :

- de sa non-consommation en énergie active,
- de son coût d'achat,
- de sa facilité de mise en œuvre,
- de sa durée de vie (10 ans environ),
- de son très faible entretien (appareil statique).

Le condensateur est un récepteur constitué de deux parties conductrices (électrodes) séparées par un isolant. Ce récepteur a la propriété lorsqu'il est soumis à une tension sinusoïdale de déphaser son intensité, donc sa puissance (réactive capacitive), de  $90^\circ$  en avant sur la tension.

A l'inverse, tous les autres récepteurs (moteur, transformateur, ...) déphasent leur composante réactive (intensité ou puissance réactive inductive) de  $90^\circ$  en avant sur la tension.

La composition vectorielle de ces intensités ou puissances réactives (inductive et capacitive) conduit à une intensité ou puissance résultante réactive inférieure à celle existant avant l'installation de condensateurs.

# Etude de la compensation de la puissance réactive

Pour simplifier, on dit que les récepteurs inductifs (moteur, transformateur, ...) consomment de l'énergie réactive alors que les condensateurs (récepteurs capacitifs) produisent de l'énergie réactive. [19]

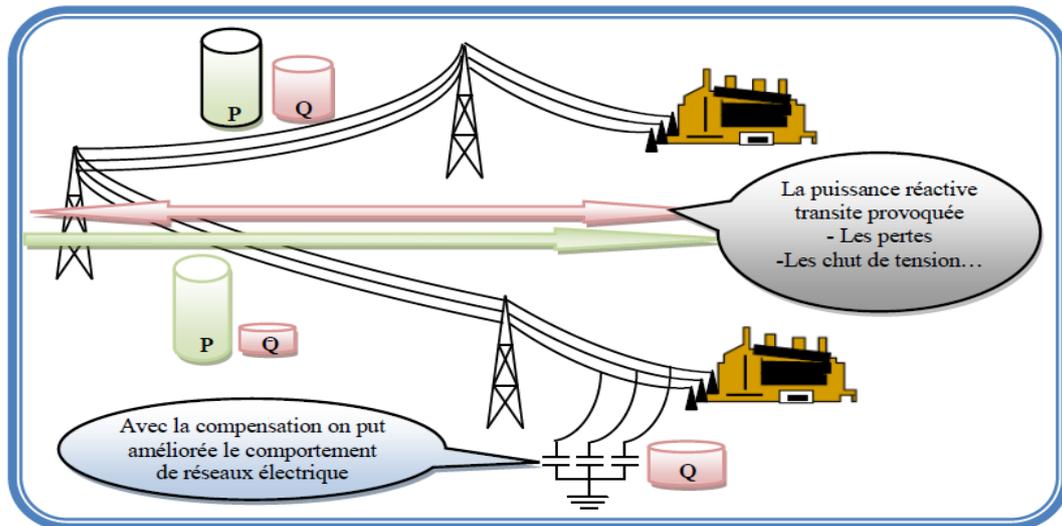


Figure 27 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation. [22]

## II.3. Systèmes et types de compensation

La compensation est réalisée par :

- des condensateurs fixes,
- des équipements de régulation automatique, ou des batteries de condensateurs qui permettent un ajustement continu aux besoins de l'installation.

**Note** : quand la puissance réactive de compensation installée dépasse 800 kvar, et si la charge est continue et stable, il est souvent plus économique d'installer des batteries de condensateurs en moyenne tension.[20]

### II.3.1. Batteries de condensateurs fixes

La compensation d'énergie réactive peut se faire avec des condensateurs fixes.

# Etude de la compensation de la puissance réactive

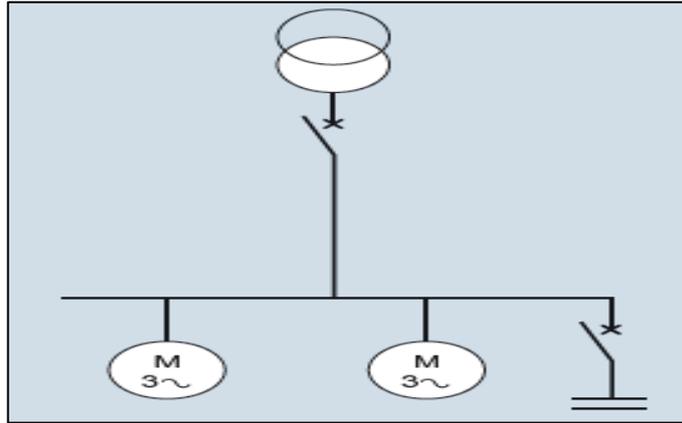


Figure 28: Compensation d'énergie réactive par des condensateurs fixes

- La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation.
- La mise sous tension de ces batteries est :
  - Soit manuelle par disjoncteur ou interrupteur,
  - Soit semi-automatique par contacteur commandé à distance.
- Ce type de batteries est généralement utilisé dans les cas :
  - D'installation électrique à charge constante fonctionnant 24h/24,
  - De compensation réactive interne des transformateurs,
  - De compensation individuelle de moteurs.

D'installation d'une batterie dont la puissance est inférieure ou égale à 15 % de la puissance du transformateur. [21][23]

## II.3.2. batteries de condensateurs de type automatique

La compensation d'énergie réactive se fait le plus souvent par batterie de condensateurs à régulation automatique.

- Récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation.
- Ces batteries sont composées d'une association en parallèle de gradins condensateurs

(Gradin = condensateur + contacteur). La mise en ou hors service de tout ou partie de la batterie étant asservie à un régulateur var métrique intégré.

- Ces batteries sont également utilisées dans le cas :
  - D'installation électrique à charge variable,

# Etude de la compensation de la puissance réactive

- De compensation de tableaux généraux ou gros départ,
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15% de la puissance du transformateur.

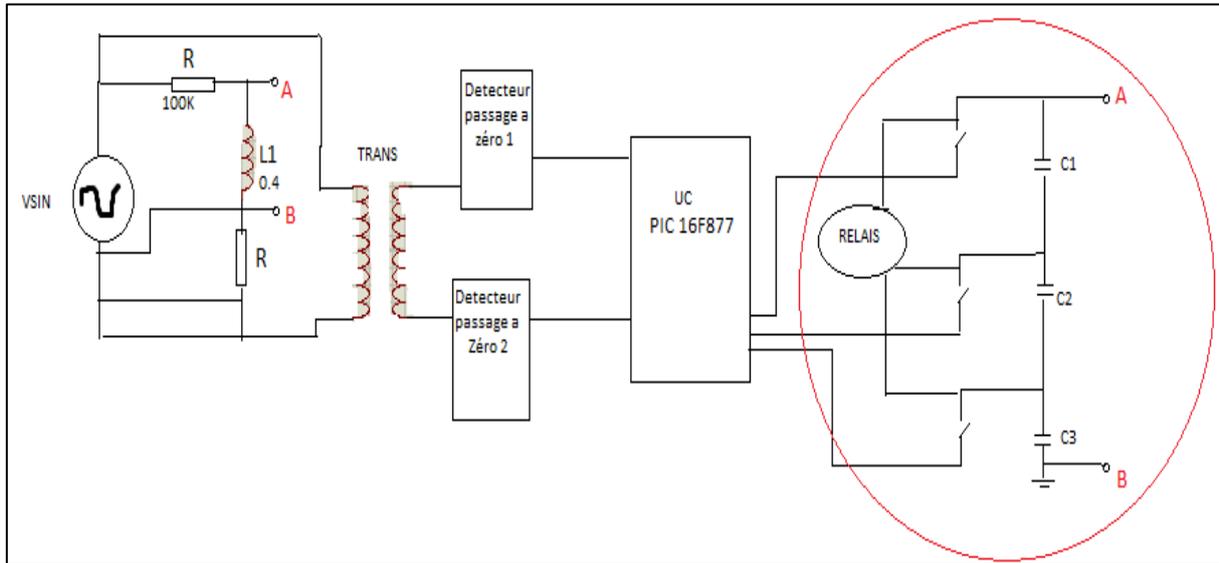


Figure 29 : Compensation d'énergie réactive par batterie de condensateurs à régulation automatique.

## II.4. Différentes possibilités implantation des batteries de condensateurs

Dans une installation électrique B.T., les batteries de condensateurs peuvent être implantées à 3 niveaux différents :

### II.4.1 implantation avec une compensation globale

Lorsque la charge est stable et continue, une compensation globale convient.

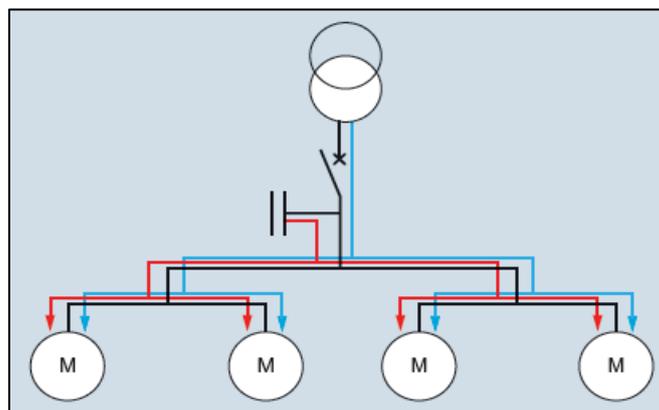


Figure 30 : Implantation globale

# Etude de la compensation de la puissance réactive

## II.4.1.1 Principe

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal de l'installation.

## II.4.1.2 Intérêt

Le foisonnement naturel de l'installation entraîne un dimensionnement faible de la batterie et un nombre élevé d'heures de fonctionnement. Elles sont donc amorties encore plus rapidement.

De plus, ce type de compensation :

- Supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert),
- Diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation (exemple : tarif jaune),
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).

## Remarques

- Le courant réactif est présent dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet Joule (kWh) dans les câbles situés en aval et leur dimensionnement ne sont de ce fait pas diminuées.

## II.4.2 implantation avec une compensation partielle (par secteurs)

Une compensation partielle est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge

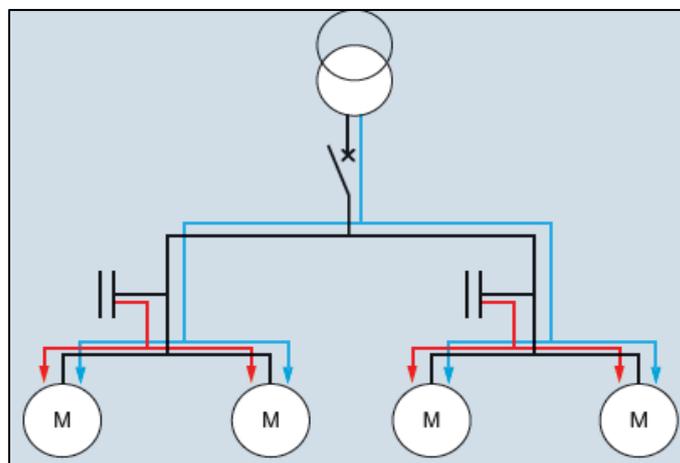


Figure 31 : Implantation partielle

## **II.4.2.1 Principe**

La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée

Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée du ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

## **II.4.2.2 Avantages**

La compensation partielle de l'installation :

- Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive,
- Réduit la puissance apparente d'utilisation (en kVA), calculée habituellement à partir des charges installées,
- Soulage le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire,
- Permet
  - de réduire la section des câbles d'arrivée du tableau de distribution intermédiaire,
  - ou d'ajouter des charges supplémentaires,
- Réduit les pertes en ligne dans ces mêmes câbles.

## **II.4.2.3 Commentaires**

- Les courants réactifs circulent toujours dans les départs du tableau jusqu'aux charges.
- Pour les raisons citées ci avant, la compensation partielle n'améliore ni le dimensionnement, ni les pertes en ligne de ces départs.
- Si de larges variations de charges se produisent, un risque de surcompensation et, par conséquent, de surtension est toujours à considérer.

## **II.4.3 implantation avec une compensation individuelle**

Une compensation individuelle est à envisager dès que la puissance du récepteur (en particulier d'un moteur) est significative par rapport à la puissance de l'installation.

# Etude de la compensation de la puissance réactive

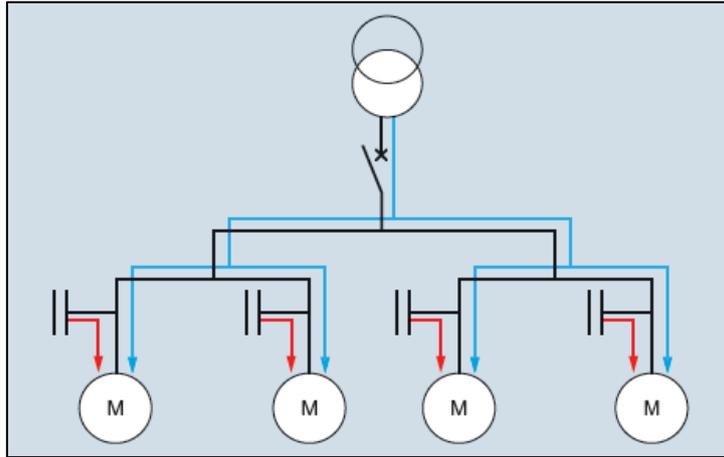


Figure 32 : Implantation individuelle

## II.4.3.1 Principe

La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur). La compensation individuelle est à considérer quand la puissance du moteur est significative par rapport à la puissance souscrite de l'installation.

Le dimensionnement en kvar de la batterie de condensateurs est de l'ordre de 25 % de la puissance nominale (kW) du moteur. Une compensation complémentaire en tête de l'installation (transformateur) peut être aussi économiquement intéressante.

## II.4.3.2 Avantages

La compensation individuelle réduit :

- Les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive,
- La puissance apparente consommée (en kVA),
- La section des câbles et les pertes en ligne.

## II.4.3.3 Commentaires

- Les courants réactifs de l'installation sont significativement réduits ou éliminés. [8]

## II.4.4. Calcul de la puissance des condensateurs de compensation

La puissance réactive  $Q_c$  requise pour la compensation est calculée à partir de la puissance active  $P$  (kW) et de la  $\text{tg}$  mesurée sur l'installation. Ces mesures sont effectuées en aval du secondaire du transformateur.

# Etude de la compensation de la puissance réactive

## II.4.4.1 Exemple

La puissance active  $P$  d'un moteur est de 1 [kW]. La puissance apparente  $S$  du même moteur s'élève à 2.2 [kVA]. On désire ramener le facteur de puissance à 1.

Calculer la capacité nécessaire afin de ramener le facteur de puissance à 1 si le réseau est alimenté sous 230 [V] 50 [Hz].

**Données :**

$$\begin{array}{lll} P = 1 \text{ [kW]} & S = 2.2 \text{ [kVA]} & \text{récepteur inductif} \\ U = 230 \text{ [V]} & f = 50 \text{ [Hz]} & \cos \varphi_{dis} = 1 \end{array}$$

**Inconnue :**  $C = ?$

**Relations :**

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad S = U \cdot I \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}$$

**Méthode**

Cherchons le facteur de puissance du moteur

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

**Application numérique**

$$\cos \varphi = \frac{1000}{2200} = 0.45 \quad \text{angle } \varphi = 62.96^\circ$$

• Pour obtenir un cos de 1, il faut que le condensateur compense la totalité du vecteur vertical qui représente la puissance réactive  $Q_L$  ou par analogie la tension  $U_L$  ou la réactance inductive  $X_L$

Nous pouvons déduire que dans notre cas :

$X_C = X_L$  en valeur absolue ou en module

Cherchons  $Z$  afin de connaître  $X_L$  puis  $X_C$

$$S = U I \quad \text{formule 1}$$

$$U = Z I \quad \text{plaçons la formule 1 cette relation}$$

$$S = \frac{U^2}{Z}$$

# Etude de la compensation de la puissance réactive

---

Isolons  $Z$  en multipliant de chaque côté du signe " = " par  $Z$  et en divisant par  $S$

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad \text{formule 2}$$

Cherchons  $X_L$  à l'aide du  $\sin \varphi$

$$X_L = \sin \varphi \cdot Z \quad \text{en remplaçant } Z \text{ par la relation 2}$$

$$X_L = \sin \varphi \cdot \frac{U^2}{S}$$

Mais comme la valeur absolue de réactance capacitive  $X_C$  est la même que la réactance inductive  $X_L$ , nous pouvons dire :

$$X_C = \sin \varphi \cdot \frac{U^2}{S} \quad \text{formule 3}$$

Cherchons  $C$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Isolons  $C$  en multipliant par  $C$  et en divisant par  $X_C$  de chaque côté du signe " = "

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}$$

Remplaçons  $X_C$  par la formule 3

$$C = \frac{1 \cdot S}{\omega \cdot \sin \varphi \cdot U^2}$$

## Application numérique

$$C = \frac{2200}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,89 \cdot 230^2} = 1,4874 \cdot 10^{-4} [F] = 148,74 \cdot 10^{-6} [F]$$

La capacité doit être de **148.62 [μF]**.

## Remarques :

- Le condensateur n'a pas parfaitement compensé la valeur demandée dans le réseau car les valeurs capacitives des condensateurs sont fixées, donc il les prend approximativement et ne compense pas exactement le besoin, et risque d'avoir une surcompensation sur le réseau

# *Etude de la compensation de la puissance réactive*

---

- Pour éviter ces inconvénients, on a choisi de travailler avec des nouveaux systèmes adaptatifs dans la compensation d'énergie réactive, appelés FACTS (Flexible AC Transmission System), une technologie éprouvée pour la stabilité de la tension et de la correction du facteur de puissance associant des condensateurs, des bobines et des composants d'électronique de puissance.
- Parmi ces compensateurs on a choisi de travailler et simuler avec la méthode SVC (Static Var Compensator), afin de nous assurer le contrôle comme le font les structures classiques, leur temps de réponse étant très court, leur permet d'améliorer les régimes dynamiques qui surviennent suite à des défauts sur les réseaux

## **II.5. Présentation du moyen de compensation**

On trouve de nouveaux systèmes adaptatifs dans la compensation d'énergie réactive, appelés FACTS (Flexible AC Transmission System), une technologie éprouvée pour la stabilité de la tension et de la correction du facteur de puissance associant des condensateurs, des bobines et des composants d'électronique de puissance. [24] [25] [26] [27] [28]

Parmi ces compensateurs on a choisi de travailler et simuler avec la méthode SVC (Static Var Compensator), le raison est nous assurer le contrôle comme le font les structures classiques, leur temps de réponse très court leur permet d'améliorer les régimes dynamiques qui surviennent suite à des défauts sur les réseaux.

## **II.6. Compensateur statique de puissance réactive SVC : (Static Var Compensator)**

### **II.6.1. Définition**

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension [3, 8].

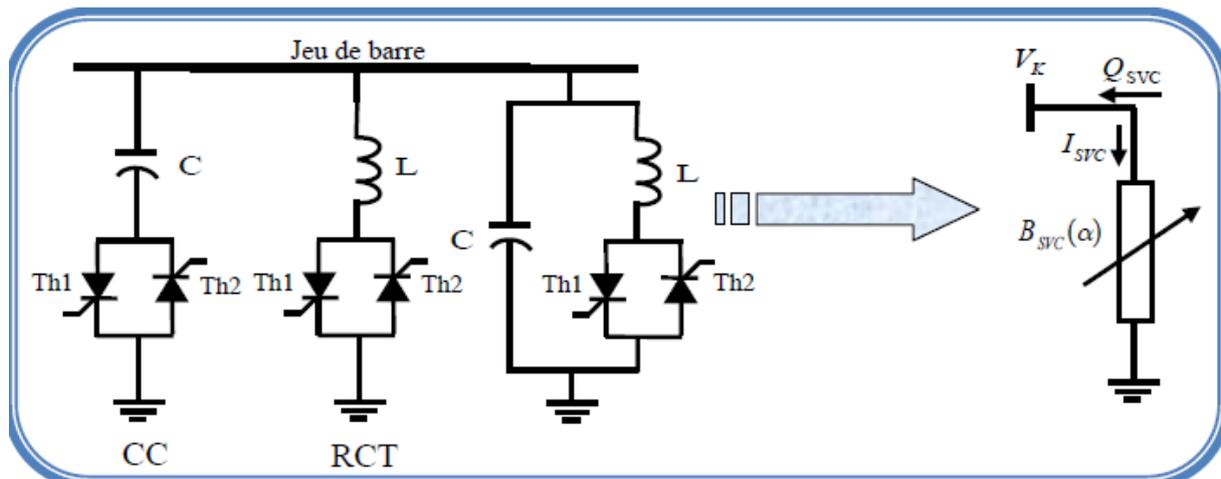


Figure 33 : Modèle mathématique de SVC

## II.6.2. Principe de fonctionnement

La figure. 33 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive  $X_C$  et d'une bobine d'inductance avec la réactance  $X_L$ .

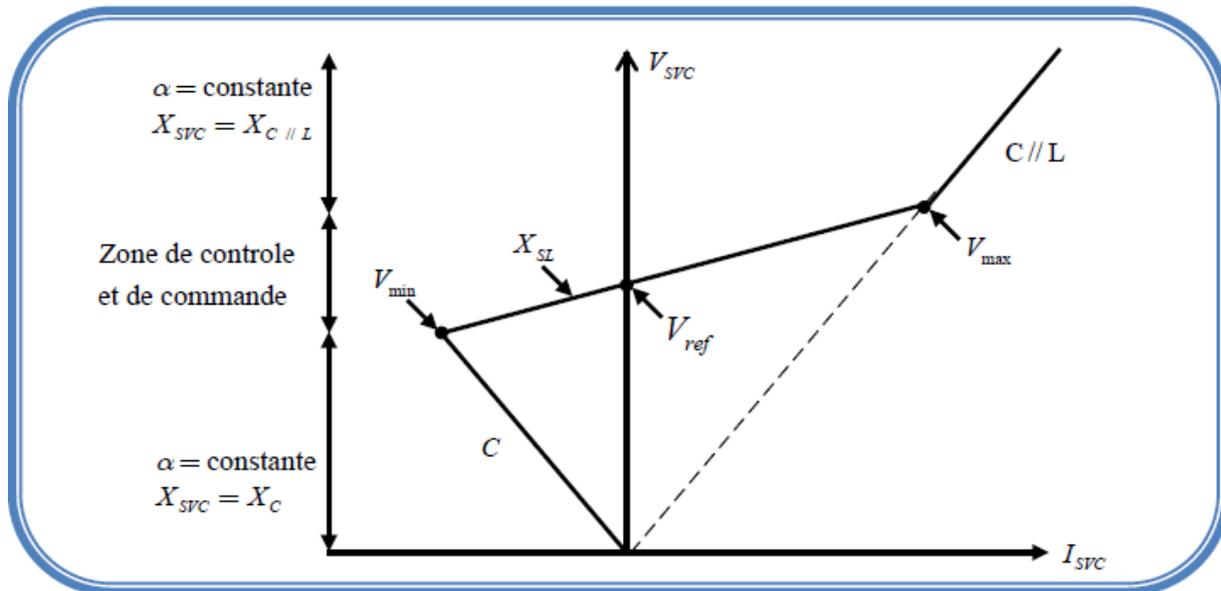
Les thyristors sont montés en tête-bêche pour assurer des inversions très rapides du courant [5]. Ce système utilise l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continue. Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'éléments inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau).

Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies.

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif a été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par trois zones distinctes :

- Pour  $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$  : est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour  $V > V_{\max}$  : est une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour  $V < V_{\min}$  : est une zone où les seules capacités sont connectées au réseau. [31]

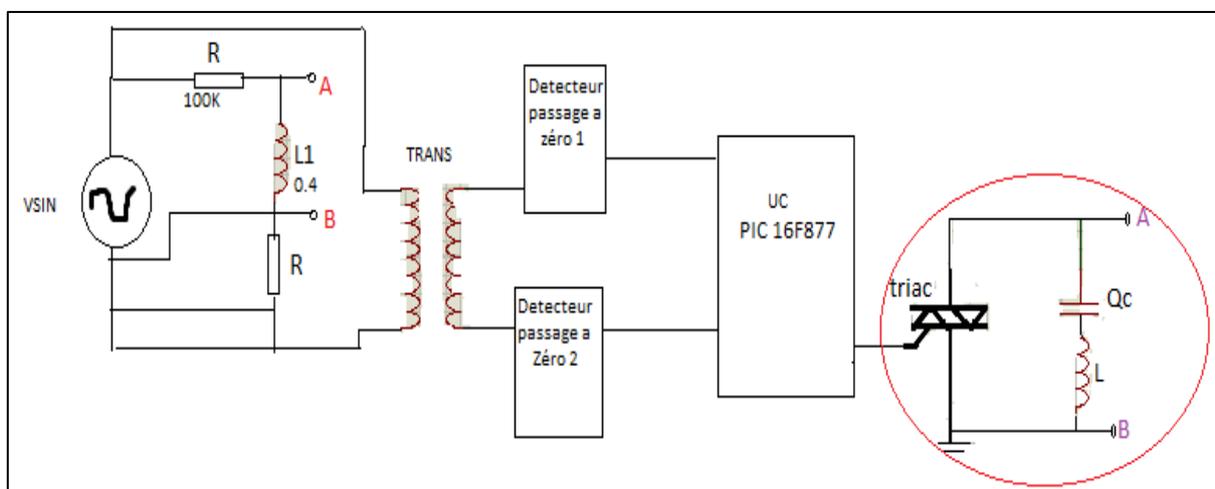
# Etude de la compensation de la puissance réactive



## Le SVC présente plusieurs avantages :

- ✓ Stabiliser la tension dans les systèmes faibles.
- ✓ Réduire les pertes de transmission.
- ✓ Augmenter la capacité de transmission.
- ✓ Augmenter la limite de stabilité.
- ✓ Améliorer la commande et la stabilité de tension.
- ✓ Atténuer les oscillations de puissance.

Le compensateur VAR statique (SVC) est caractérisé par un contrôle continu, de faibles pertes, la redondance et la flexibilité.



# Etude de la compensation de la puissance réactive

Donc les condensateurs sont utilisés pour compenser en produisant actuelle de leader à la charge pour réduire le courant en retard, ce qui réduire la distance d'angle de phase entre la puissance réelle et la puissance apparente. La fonction du condensateur de puissance (capacitives kVAr) à un système électrique quand et où nécessaire. Le condensateur en farads réelle d'un condensateur peut être calculée en utilisant l'équation suivante: [30]

$$C = \frac{Q}{2\pi f * V^2}$$

Tel que : C exprimé en farad Q est la puissance réactive ; f la fréquence et V la tension du réseau.

Le réacteur contrôlé TRIAC dire inductance variable succursale; le concept principal derrière TCR contrôle consiste à contrôler l'instant d'allumage du triac pour commander le courant dans le réacteur, de manière à contrôler la puissance réactive absorbée par le TCR. Le courant circulant à travers le réacteur peut être contrôlé en faisant varier l'angle d'amorçage du triac et est donnée par [2] :

$$I_L = \frac{V}{\omega L} * \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}$$

Où,  $\alpha$  = angle d'amorçage de Triac L'inductance peut être modifiée et sa valeur en fonction de l'angle d'amorçage ainsi est donné par :

$$X_L(\alpha) = 2\pi fL \frac{\pi}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}$$

Avec :  $X_L(\alpha)$  est l'inductance de TCR

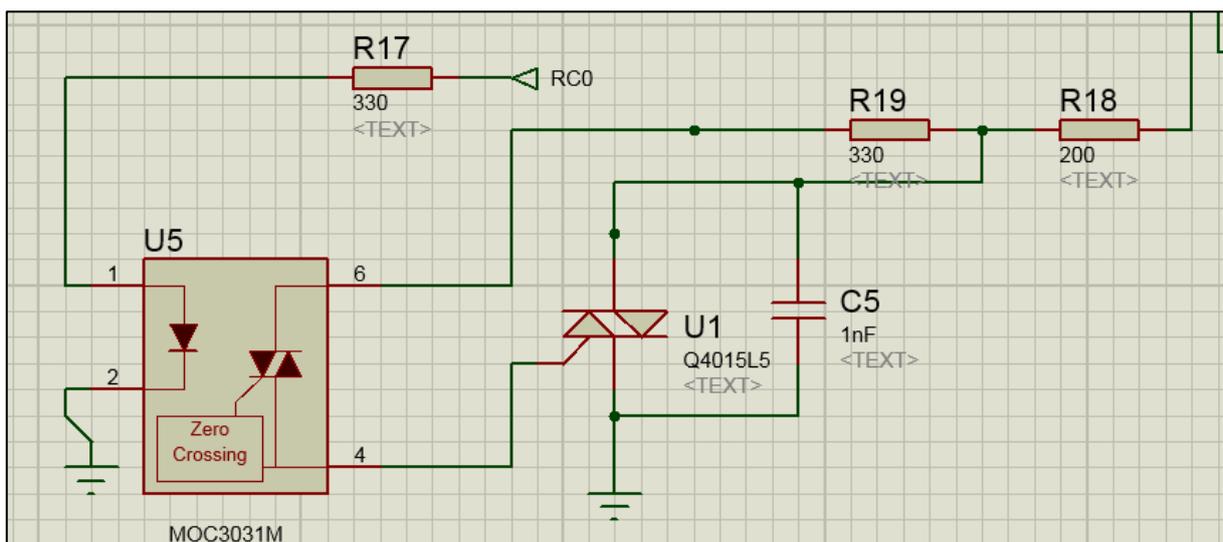


Figure 36 : « schéma de circuit de Triac et compensateur statique »

# *Etude de la compensation de la puissance réactive*

---

La figure montre le schéma de circuit de Triac et compensateur statique. Les impulsions de sortie obtenue à partir du microcontrôleur sont appliquées au pas de MOC3042 c'est un chauffeur de triac photo coupleur IC. Le signal d'impulsion obtenue à partir de la MOC 3042 entraîne la grille du triac de façon à commander le courant de réacteur. Le facteur de déplacement à-dire le déphasage entre tension et courant détermine en fait le nombre qui est chargé dans le compteur d'intervalles programmable pour changer l'angle d'amorçage du triac dans le circuit de compensateur statique.

## **II.7. Conclusion**

Grâce à la maturité de l'électronique de puissance, de nouvelles structures de compensateurs apparaissent et rendent la gestion de l'énergie beaucoup plus souple. Avec la décentralisation de la production de l'énergie, les réseaux intelligents, Smart Grid, font leur apparition. Ils ont pour rôle de gérer au mieux les flux de puissance.

# **CHAPITRE III : Description sur le microcontrôleur pic16f877**

## **CHAPITRE III : Description sur le microcontrôleur pic16f877**

Le développement des applications à base des microcontrôleurs PIC est devenu de plus en plus courant, ceci est dû à plusieurs causes : beaucoup de ressources internes (périphériques intégrés), mémoires embarquées de plus en plus grande, vitesse de calcul accrue...

En effet, un microcontrôleur est un composant parfaitement adapté à des applications embarquées, il permet, en le programmant, d'effectuer et de contrôler une tâche tout en comparant son état à des conditions préfixées par l'utilisateur.

L'utilisation des microcontrôleurs fait appel tout d'abord à leur programmation. Il existe plusieurs méthodes de programmation selon le langage utilisé, par exemple en assembleur on peut écrire un programme où on va tirer le maximum des performances du microcontrôleur mais ce programme nécessite beaucoup de travail et surtout beaucoup de temps. Heureusement, avec la montée en puissance des microcontrôleurs, on voit apparaître des compilateurs en langage C qui permettent de gagner un temps considérable pour le développement des programmes.

### **III.1. Les avantages du microcontrôleur**

L'utilisation des microcontrôleurs pour les circuits programmables à plusieurs points forts et bien réels. Il suffit pour s'en persuader, d'examiner la spectaculaire évolution de l'offre des fabricants de circuits intégrés en ce domaine depuis quelques années.

Nous allons voir que nombre d'entre eux découle du simple sens.

- Tout d'abord, un microcontrôleur intégré dans un seul et même boîtier ce qui, avant nécessitait une dizaine d'éléments séparés. Il résulte donc une diminution évidente de l'encombrement en matériel et du circuit imprimé.
- Cette intégration a aussi comme conséquence immédiate de simplifier le tracé du circuit imprimé puisqu'il n'est plus nécessaire de véhiculer des bus d'adresses et de donnée d'un composant à un autre.
- L'augmentation de la fiabilité du système puisque, le nombre des composants diminuant, le nombre des connexions composants/supports ou composants/circuits imprimés diminue.
- Réalisation des applications non réalisables avec d'autres composants.

## III.2. Différentes familles des PICs

La famille des PICs est subdivisée en trois grandes familles :

- Base line c'est la famille où l'unité centrale travaille sur 12-bits, exemple: 12CXXX
- Mid-Range: c'est la famille où l'unité centrale travaille sur 14-bits, exemple : 16F877.
- High Performance: c'est la famille où l'unité centrale travaille sur 16-bits, exemple : 18FXXX.

[35]

## III.3. Identifier un PIC

La référence d'un microcontrôleur PIC est de la forme NN LLL XXX où:

- NN désigne la famille à laquelle appartient le circuit.
- LLL est un ensemble d'une, deux ou trois lettres qui indique le type de mémoire de programme contenue dans le circuit et si la plage de tension d'alimentation est normale ou étendue.
- XXX est un ensemble de deux ou trois chiffres constituant la référence du circuit. Exemple du 16F877-20 :
- 16 : indique la famille Mid-Range.
- F : indique le type de mémoire programme utilisée : F pour Flash.
- 877 : identité.
- 20: indique la fréquence d'horloge. [36]

## III.4. Le choix du microcontrôleur : Pourquoi le PIC 16f877

Le choix d'un microcontrôleur est primordial car c'est de lui que dépendront en grande partie les performances, la taille et la facilité d'utilisation de l'application envisagée. La société Microchip offre une vaste gamme de microcontrôleur. Afin de choisir un PIC adéquat.

À notre projet, nous avons pensée à l'utilisation du PIC 16f877, qui a un nombre de ports entrée/sortie suffisant. Il possède 40 broches et une mémoire de programme de type flash de 8 Ko, une fréquence de 20 MHz, ce qui dans notre cas est largement suffisant.

De plus le PIC 16f877 possède un jeu instructions puissant, et permet donc le développement de programme simple et réduit. Les PIC 16f873 et PIC 16f874 présentent que peu d'intérêt par rapport au 16f877, en effet ils possèdent moins de mémoires de programme et sont commercialisé à peu près au même prix.

Un microcontrôleur se présente comme étant une unité de traitement de l'information de type microprocesseur contenant tous les composants d'un système informatique, à savoir microprocesseur, des mémoires et des périphériques (ports, timers, convertisseurs). Chaque fabricant a sa ou ses familles de

# Description sur le microcontrôleur Pic16F877

microcontrôleur. Une famille se caractérise par un noyau commun (le microprocesseur, le jeu d'instruction) Ainsi les fabricants peuvent présenter un grand nombre de pins qui s'adaptent plus au moins à certaines tâches. Mais un programmeur connaissant une famille n'a pas besoin d'apprendre à utiliser chaque membre, il lui faut connaître juste ces différences par rapport père de la famille.

Ces différences sont souvent, la taille des mémoires, la présence ou l'absence des périphériques et leurs nombres.

## III.5. Brochage du PIC 16F877

Le boitier ci-contre décrit l'architecture externe du 16F877 qui comprend 40 pins dont :

- ❖ 33 pins d'entrées/sorties multiplexées avec d'autres fonctions.
- ❖ 4 pins pour l'alimentation:
  - VDD
  - VSS
- ❖ 2 pins pour l'oscillateur :OSC0 et OSC1.
- ❖ 1 pin pour le RESET : MCLR. [37]

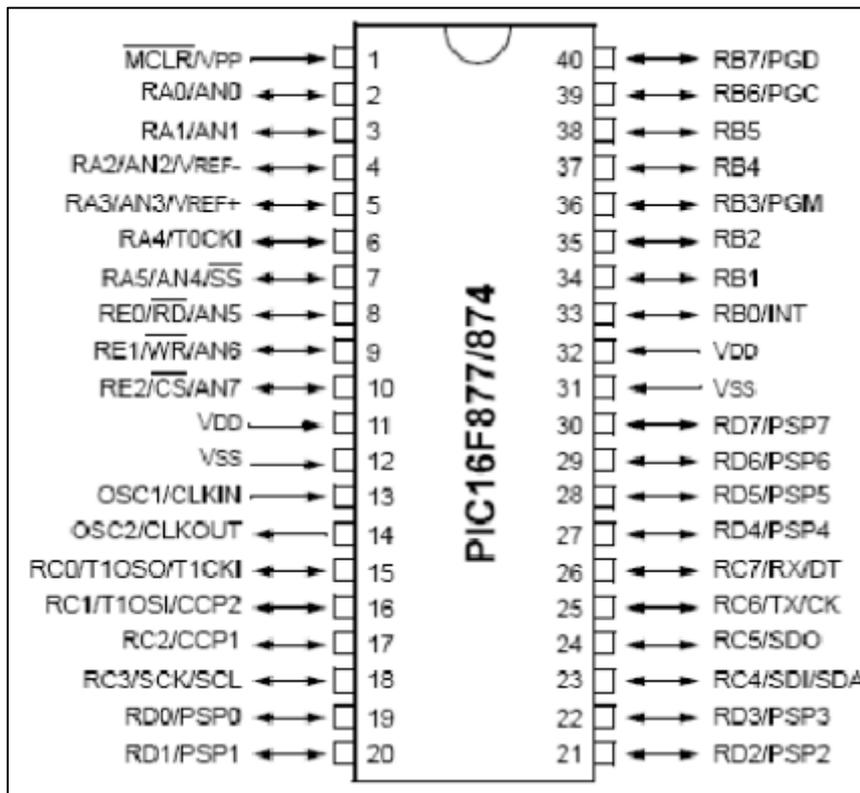


Figure 37 : Brochage du 16F877

## III.6. Structure d'un microcontrôleur PIC 16F877

Les microcontrôleurs PIC, au même titre que les microprocesseurs, sont composés essentiellement de registres ayant chacun une fonction bien définie. Les PIC possèdent également des périphériques intégrés, tels qu'une mémoire EEPROM, un Timer, des ports d'entrées/ sorties ou bien encore un convertisseur analogique/numérique [9].

Selon le type de PIC utilisé, on retrouvera en interne un certain nombre de registres et périphériques possédant des caractéristiques différentes. Les différences de caractéristiques selon le PIC utilisé sont :

- La taille de la RAM interne ;
- La mémoire EEPROM intégrée ;
- Le type de mémoire programme : FLASH ou EPROM et la taille de celle-ci ;
- Le timer intégré ;
- Les convertisseurs analogique/numérique intégrés.

### III.6.1. Mémoires du PIC 16F877

Le PIC 16F877 dispose de trois types de mémoires :

#### ✓ *Mémoire vive RAM*

C'est de la mémoire d'accès rapide, mais labile (c'est-à-dire qu'elle s'efface lorsqu'elle n'est plus sous tension); cette mémoire contient les registres de configuration du PIC ainsi que les différents registres de données. Elle comporte également les variables utilisées par le programme.

#### ✓ *Mémoire morte FLASH*

C'est la mémoire programme proprement dite. Chaque case mémoire unitaire fait 14 bits. La mémoire FLASH est un type de mémoire stable, réinscriptible à volonté. Cette mémoire qui a fait le succès de microprocesseur PIC. Dans le cas du 16F877, cette mémoire FLASH fait 8 Kmots. Lorsque l'on programme en assembleur, on écrit le programme directement dans cette mémoire.

#### ✓ *Mémoire EEPROM*

Elle est de 256 octets, électriquement effaçable, réinscriptible et stable. Ce type de mémoire est d'accès plus lent, elle est utilisée pour sauver des paramètres. L'adresse relative de l'accès EEPROM est comprise entre 0000 et 00ff, ce qui nous permet d'utiliser qu'un registre de huit bits pour définir cette adresse.

Les courants véhiculés dans le PIC sont loin d'être négligeables du fait des nombreuses entrées/sorties disponibles.

## III.6.2. Ports d'Entrées/Sorties

Les Pics 16F877 contiennent les 5 ports suivants :

- ✓ Port A : 6 pins I/O numérotées de RA0 à RA5.
- ✓ Port B : 8 pins I/O numérotées de RB0 à RB7.
- ✓ Port C : 8 pins I/O numérotées de RC0 à RC7.
- ✓ Port D : 8 pins I/O numérotées de RD0 à RD7.
- ✓ Port E : 3 pins I/O numérotées de RE0 à RE2. [37]

On dispose de 33 broches d'entrées/sorties, chacune configurable soit en entrée soit en sortie (PORTA, PORTB, PORTC, PORTD, PORTE).

Un registre interne au PIC, nommé TRIS, permet de définir le sens de chaque broche d'un port d'entrées/sorties. En règle générale, un bit positionné à « 0 » dans le registre TRIS donnera une configuration en sortie pour la broche concernée ; si ce bit est positionné à « 1 », ce sera une broche d'entrée.

### III.6.2.1. PORT A

Le PORTA est un port bidirectionnel de 6-bits (6 entrées/sorties) : de RA0 jusqu'à RA5; le registre correspondant qui définit la direction des données est le TRISA, la mise à '1' d'un bit du TRISA configura la broche correspondante à ce bit comme entrée, et la mise à '0' de ce bit mettra la broche correspondante comme sortie. La broche RA4 est multiplexée avec une autre fonction qui est l'entrée pour l'horloge du TIMER0, cette broche deviendra donc RA4/T0CKI.

Les autres pins sont multiplexées avec les entrées analogiques du CAN et l'entrée VREF, pour cela, le registre ADCON1 permet de déterminer la fonction de chaque pin.

Adresse	Nom	Bit-7	Bit-6	Bit-5	Bit-4	Bit-3	Bit-2	Bit-1	Bit-0	Valeur sur POR, BOR	Valeur sur autres RESET
05h	PORTA	-	-	RA5	RA4	RA3	RA2	RA1	RA0	--0x 0000	--0u 0000
85h	TRISA	-	-	Registre de direction des données PORTA						--11 1111	--11 1111
9Fh	ADCON1	ADFM	-	-	-	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	--0- 0000	--0- 0000

Tableau 2 : Résumé des registres associés avec le PORTA

x : inconnu, u : inchangé, - : emplacements non implémentés ('0'), les cellules ombragées ne sont pas utilisées par le PORTA.

Au démarrage (Power-On Reset 'POR'), les pins de ce port sont configurés comme des entrées analogiques et lus comme '0'.

# Description sur le microcontrôleur Pic16F877

## III.6.2.2. PORT B

Le PORTB est un port bidirectionnel de 8-bits (8 entrées/sorties) : de RB0 jusqu'à RB7 ; le registre correspondant qui définit la direction des données est le TRISB, la mise à '1' d'un bit du TRISB Configura la broche correspondante à ce bit comme entrée, et la mise à '0' de ce bit mettra la broche correspondante comme sortie. En mode entrée, chaque broche du PORTB doit être maintenue à un niveau haut à l'aide des résistances de pull-up, ceci en mettant à '0' le bit RBPU (du registre OPTION). En mode sortie ou lors d'un POR (Power-On Reset), ces pull-ups sont désactivés. Un changement d'état sur l'une des broches RB4, RB5, RB6 et RB7 déclenche une interruption, ceci n'est possible que pour celles qui sont configurées comme entrées.

Adresse	Nom	Bit-7	Bit-6	Bit-5	Bit-4	Bit-3	Bit-2	Bit-1	Bit-0	Valeur sur POR, BOR	Valeur sur autres RESET
06h, 106h	PORTB	RB7	RB6	RB5	RB4	RB3	RB2	RB1	RB0	xxxx xxxx	uuuu uuuu
86h, 186h	TRISB	Registre de direction des données PORTB								1111 1111	1111 1111
81h, 181h	OPTION_REG	RBPU	INTEDC	TOCS	TOSE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111

Tableau 3 : Résumé des registres associés avec le PORTB

x : inconnu, u : inchangé, les cellules ombragées ne sont pas utilisées par le PORTB.

## III.6.2.3. PORT C

Le PORTC est un port bidirectionnel de 8-bits (8 entrées/sorties) : de RC0 jusqu'à RC7; le registre correspondant qui définit la direction des données est le TRISC, la mise à « 1 » d'un bit du TRISC configura la broche correspondante à ce bit comme entrée, et la mise à '0' de ce bit mettra la broche correspondante comme sortie.

Adresse	Nom	Bit-7	Bit-6	Bit-5	Bit-4	Bit-3	Bit-2	Bit-1	Bit-0	Valeur sur POR, BOR	Valeur sur autres RESET
07h	PORTC	RC7	RC6	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0	xxxx xxxx	uuuu uuuu
87h	TRISC	Registre de direction de données PORTC								1111 1111	1111 1111

x : inconnu, u : inchangé.

Tableau 4 : Résumé des registres associés avec le PORTC

## III.6.2.4. PORT D

Le PORTD est un port bidirectionnel de 8-bits (8 entrées/sorties) : de RD0 jusqu'à RD7; le registre correspondant qui définit la direction des données est Le TRISD, la mise à '1' d'un bit du TRISD configura la broche correspondante à ce bit comme entrée, et la mise à '0' de ce bit mettra la broche correspondante comme

# Description sur le microcontrôleur Pic16F877

sortie. Le PORTD peut être configuré comme port parallèle esclave : PSP (Parallel Slave Port) en mettant à '1' le bit PSPMODE du registre TRIS.

Adresse	Nom	Bit-7	Bit-6	Bit-5	Bit-4	Bit-3	Bit-2	Bit-1	Bit-0	Valeur sur POR, BOR	Valeur sur autres RESET
08h	PORTD	RD7	RD6	RD5	RD4	RD3	RD2	RD1	RD0	xxxx xxxx	uuuu uuuu
88h	TRISD	Registre de direction de données PORTD								1111 1111	1111 1111
89h	TRISE	IBF	OBF	IBOV	PSPMODE	-	Registre de direction de données PORTE			0000 -111	0000 -111

Tableau 5 : Résumé des registres associés avec le PORTD

x : inconnu, u : inchangé, - : emplacements non implémentés ('0'), les cellules ombragées ne sont pas utilisées par le PORTD.

## III.6.2.5. PORT E

Le PORTE à 3 broches : RE0, RE1 et RE2, configurables en entrées ou en sorties à partir des trois premiers bits du registre TRISE. Ces broches sont multiplexées avec les entrées du CAN (Convertisseur Analogique Numérique). Au démarrage (Power-On Reset 'POR'), les pins de ce port sont configurés comme des entrées analogiques et lus comme '0'.

Adresse	Nom	Bit-7	Bit-6	Bit-5	Bit-4	Bit-3	Bit-2	Bit-1	Bit-0	Valeur sur POR, BOR	Valeur sur autres RESET
09h	PORTE	-	-	-	-	-	RE2	RE1	RE0	--- -xxx	--- -uuu
89h	TRISE	IBF	OBF	IBOV	PSPMODE	-	Registre de direction de données PORTE			0000 -111	0000 -111
9Fh	ADCON1	ADFM	-	-	-	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	--0- 0000	--0- 0000

Tableau 6 : Résumé des registres associés avec le PORTE

x : inconnu, u : inchangé, - : emplacements non implémentés ('0'), les cellules ombragées ne sont pas utilisées par le PORTE.

## III.6.3. Interruption RB0/INT

Cette broche a une double fonction. En fait, elle peut être utilisée comme une broche standard RB0 ou comme une entrée d'interruption INT.

Si cette broche est utilisée comme une entrée d'interruption externe, elle doit être maintenue à un niveau haut par l'intermédiaire de résistances de 10 kΩ pour ne pas déclencher d'interruptions imprévues, cela permet aussi de relier plusieurs sources d'interruptions sur une même ligne.

## III.6.4. L'oscillateur

L'horloge système peut être réalisée soit avec un quartz (a), soit avec une horloge extérieure (b), soit avec un circuit RC(c). Dans ce dernier cas, la stabilité du montage est limitée.

La fréquence maximale d'utilisation va dépendre du microcon-trôleur utilisé. Le suffixe indiqué sur le boîtier donne la nature de l'horloge à utiliser et sa fréquence maximale.

## III.6.5. La broche MCLR

La broche MCLR permet de réaliser un Reset du circuit quand elle est placée à 0 Volt.

## III.6.6. RESET

Cette broche sert à initialisé le microcontrôleur. Ce dernier dispose en interne d'un circuit de détection de niveau quand la tension Vdd est comprise entre 11,2 V et 1,7V il démarre une procédure d'initialisation.

Cette broche peut être seulement reliée à Vdd si on n'a pas besoin de reset externe. Par contre si on souhaite implanter un bouton de remise à zéro on pourra câbler un simple réseau RC sur la broche MCLR.

## III.6.7. Convertisseur Analogique-Numérique

Ce module de conversion convertit un signal analogique présent sur l'une de ces 8 entrées à son équivalent numérique sur 10-bits. Le CAN a deux tensions de référence : haute et basse, qui sont choisis par programmation parmi VDD, VSS, RA2 ou RA3. De plus, il y a 4 registres qui lui sont associés :

- ADCON0 : qui est un registre de contrôle des opérations du CAN, il est disponible à l'adresse 1Fh.
- ADCON1 : qui est un registre de configuration du CAN, il est disponible à l'adresse 9Fh.
- ADRESL : registre de résultat de la conversion, il contient les bits du poids faible, disponible à l'adresse 9Eh.
- ADRESH : registre de résultat de la conversion, il contient les bits du poids fort, disponible à l'adresse 1Eh. [4]

Pour effectuer une conversion A/N, voici les étapes à suivre :

- ✓ Configuration du module CAN :
- ✓ Configuration du port entrée pour le CAN et les tensions de référence (par le registre ADCON1 bits 3 :0).

# Description sur le microcontrôleur Pic16F877

---

- ✓ Sélection du canal d'entrée analogique (par le registre ADCON0 bits 5 :3).
- ✓ Sélection de l'horloge de conversion (par le registre ADCON0 bits 7 :6).
- ✓ Mise en route du module CAN (par le registre ADCON0 bit 0).
- ✓ Configuration de l'interruption (cette étape n'est pas obligatoire)
  - Mise à '0' du bit ADIF (registre PIR1).
  - Mise à '1' du bit ADIE (registre PIE1).
  - Mise à '1' du bit PEIE (registre INTCON).
  - Mise à '1' du bit GIE (registre INTCON).
- ✓ Attendre à ce que l'acquisition soit faite (temps d'acquisition).
- ✓ Démarrer la conversion :
  - Mettre à '1' le bit GO/DONE (registre ADCON0).
- ✓ Attendre à ce que la conversion soit terminée :
  - Signalée par la mise à '0' du bit GO/DONE, ou par une interruption.
- ✓ Lire le résultat de la conversion. Le résultat est stocké dans les registres ADRESH : ADRESL, et mettre à '0' le bit ADIF si c'est nécessaire.
- ✓ Pour effectuer une deuxième conversion, il faut attendre au moins 2 fois le temps de conversion par bit.

## III.6.8. Le Timer

Un Timer est un registre interne au micro contrôleur, celui-ci s'incrémente au grès d'une horloge, ce registre peut servir par exemple pour réaliser des temporisations, ou bien encore pour faire du comptage (par l'intermédiaire d'une broche spécifique : RA4/TOKI). Le PIC 16F877 possède trois Timers sur 8 bits (il compte jusqu'à 256) configurable par logiciel.

## III.7. Architecture interne

Une fois le programme est stocké dans la mémoire (Program Memory) et le  $\mu$ C est initialisé, l'instruction à exécuter est désignée par le PC (Program Counter) et sera chargée dans le registre d'instruction (Instruction reg) au moyen d'un bus de programme sur 14 bits, puis elle sera décodée dans le décodeur et le contrôleur d'instruction (Instruction Decode & Control) et ensuite dirigée vers l'UAL (ALU) avec les données chargées à partir des pins configurées comme entrées, l'UAL fera l'opération nécessaire et sauvegardera le résultat temporairement dans le registre de travail (Wreg) sur 8-bits, ce résultat sera aussi mis dans la RAM à l'aide d'un bus de données sur 8-bits. [4]

# Description sur le microcontrôleur Pic16F877

Device	Program FLASH	Data Memory	Data EEPROM
PIC16F877	8K	368 Bytes	256 Bytes

Figure 38 : Architecture interne.

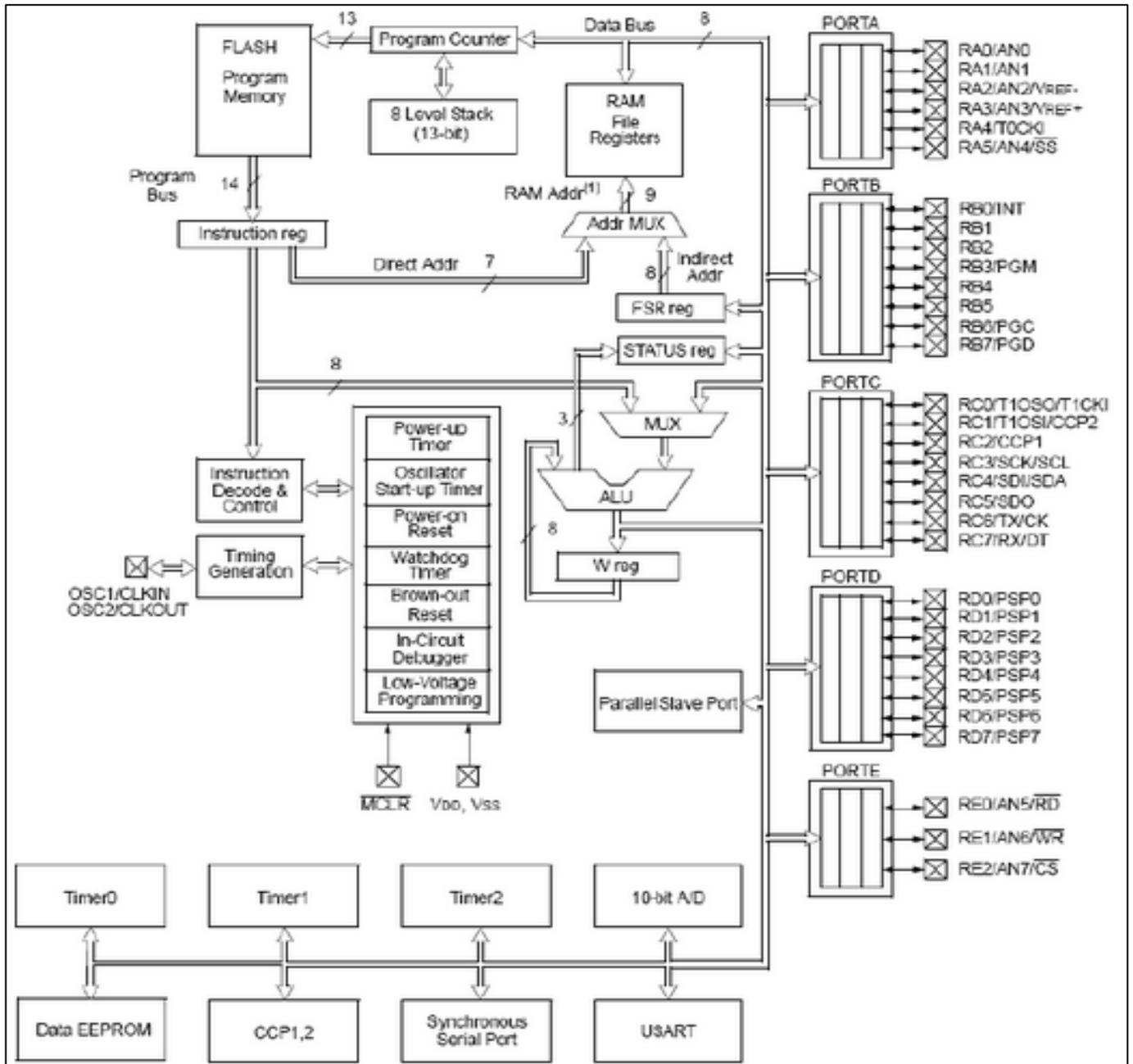


Figure 39 : Architecture interne du PIC16F877.

## III.8. Conclusion

Cette étude théorique nous a permis de traiter et de comprendre le fonctionnement des différentes ressources interne du PIC 16F877, d'envisager des applications pour ce  $\mu$ C.

# **CHAPITRE IV : Simulation Et Traitement Des Résultats**

## **CHAPITRE IV : Simulation Et Traitement Des Résultats**

Dans ce chapitre, nous verrons et nous nous appliquerons sur le compilateur et le simulateur avec le pic16f877 et l'afficheur LM016L qui nous permettront le développement de la compensation d'énergie réactive

### **IV.1. Objectif**

Le but de notre projet est de mesurer le facteur de puissance puis ajouter des condensateurs pour la compensation de l'énergie réactive en utilisant une source de tension qui est livré aux capteurs de tension et de courant et qui nous donne deux signaux avec un décalage de temps précisé pour avoir le déphasage.

### **IV.2. DESCRIPTION**

Le diagramme se compose principalement d'un microcontrôleur PIC (PIC16F877) pour le calcul du facteur de puissance, un condensateur, la tension et l'unité de mesure de courant, et la charge inductive.

- 50 Hz Ac alimentation par deux sources de tension.
- Le détecteur de passage par zéro est un dispositif destiné à détecter le moment où la tension passe par zéro dans les deux sens.
- La tension mesurée et le signal courant sont donnés à RC0, RC1 broches de microcontrôleur PIC.
- Pic microcontrôleur convertit la sortie analogique du détecteur de passage par zéro en un signal numérique.
- Pic microcontrôleur calculer le facteur de puissance des valeurs mesurées, dépend erreur, il va envoyer un signal à relayer.
- L'écran LCD est utilisé pour afficher la valeur du facteur de puissance de la ligne continue.

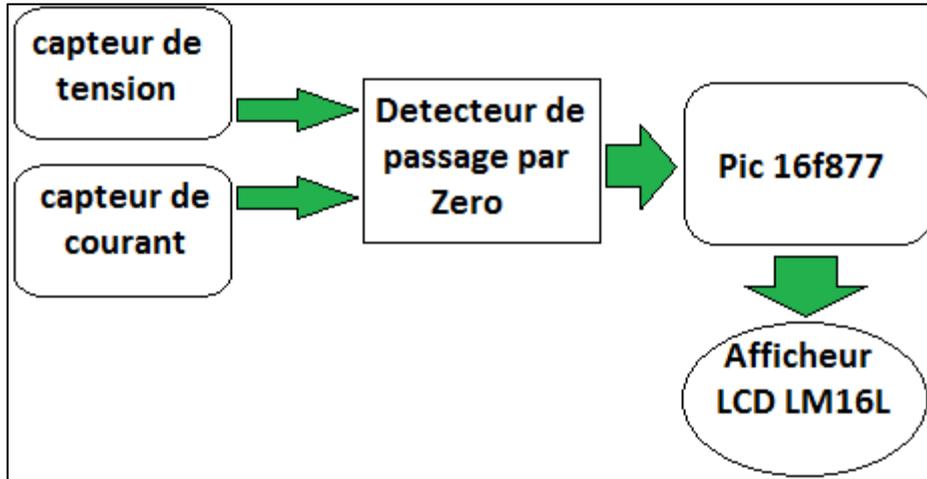


Figure 40 : schéma de principe du circuit de cosφ meter conçu.

## IV.3. mesure de facteur de puissance

### IV.3.1. Schéma de connexion

- Une alimentation de 5V
- Un quartz de 20Mhz avec deux condensateurs non polarisés 1nF.

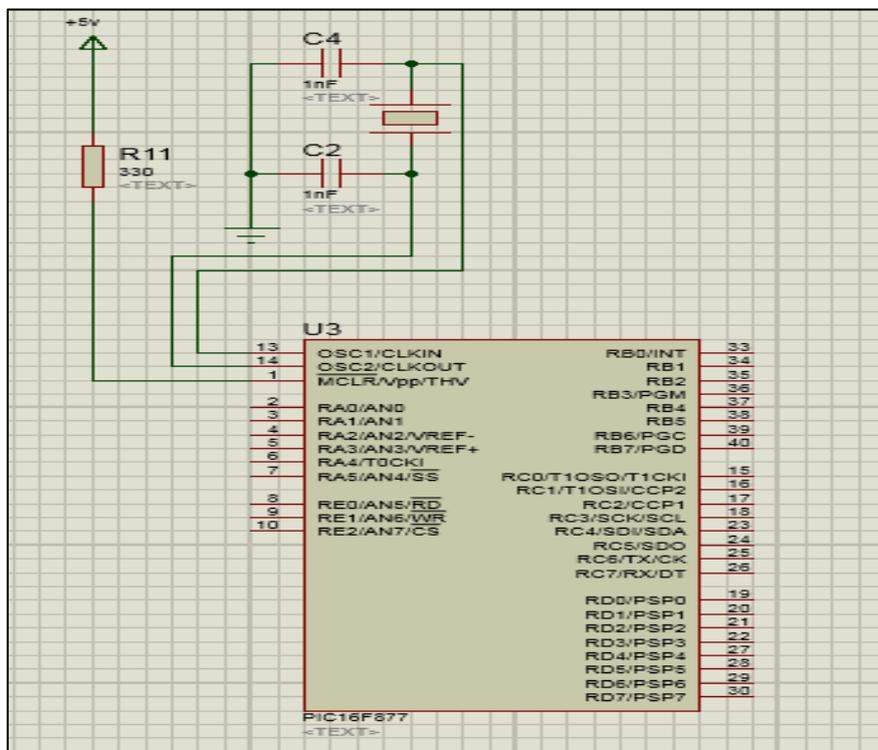


Figure 41 : Schéma de connexion de PIC16F877.

## IV.3.2. L'affichage des résultats

Notre résultat sera afficher sur Écran LCD (Liquid Crystal Display) est un module d'affichage électronique et de trouver un large éventail d'applications. Un affichage 16x2 LCD est module très basique et est très couramment utilisé dans divers dispositifs et circuits. Ces modules sont préférés aux sept segments et d'autres LED multi-segments. Les raisons étant: les écrans LCD sont économiques; facilement programmable; avoir aucune limitation de l'affichage des caractères spéciaux et même personnalisés (contrairement à sept segments), animations, Ils consomment relativement peu (de 1 à 5 mA).

Plusieurs afficheurs sont disponibles sur le marché et diffèrent les uns des autres, non seulement par leurs dimensions, (de 1 à 4 lignes de 6 à 80 caractères), mais aussi par leurs caractéristiques techniques et leur tension de service. Certains sont dotés d'un rétro éclairage de l'affichage. Cette fonction fait appel à des LED montées derrière l'écran du module, cependant, cet éclairage est gourmand en intensité (de 80 à 250 mA). Un afficheur LCD contient :

- ✓ Une entrée de contrôle RS (Register Select)
- ✓ Une entrée de validation E (Enable)
- ✓ 8 entrées de données D0 à D7

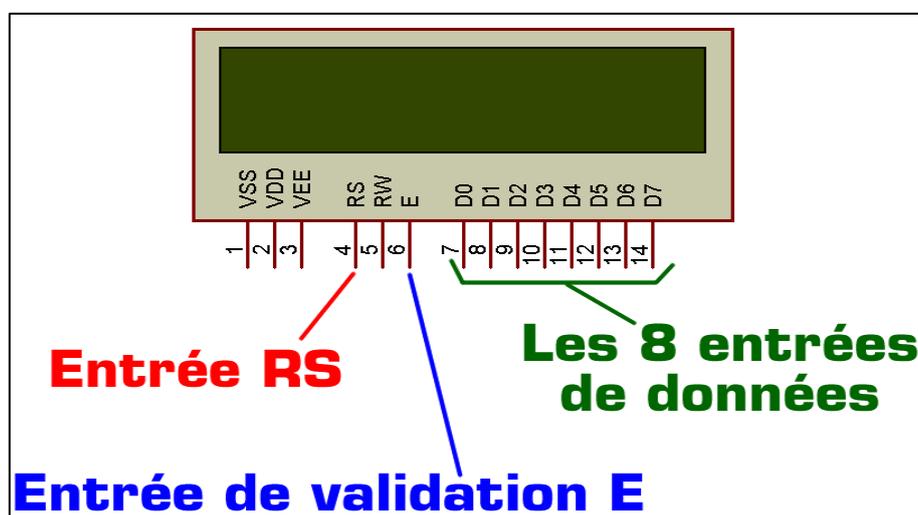


Figure 42 : Afficheur LCD2x16

RS permet de préciser si la commande présente sur les entrées D0 à D7 est une instruction ou une donnée, et E permet de valider cette commande. Une commande est une valeur numérique présente sur les entrées D0 à D7 et validée par une impulsion sur E. Le protocole d'envoi des commandes précise la liste des instructions à envoyer pour configurer l'afficheur (RS=0) suivie des données à envoyer (RS=1).

# Simulation et traitement des résultats

L'entrée RW sera mise à zéro (connectée à la masse) et sera inutilisée ici. Les 3 entrées d'alimentation VSS VDD et VEE n'ayant pas besoin d'être obligatoirement alimentées dans ISIS Proteus.

## IV.3.2.1. afficheur LCD (LM016L)

L'afficheur LM016L est constitué de deux lames de verre, distantes de 20  $\mu\text{m}$  environ, sur lesquelles sont dessinées les mantisses formant les caractères. L'espace entre elles est rempli de cristal liquide normalement réfléchissant (pour les modèles réfléchitifs). L'application entre les deux faces d'une tension alternative basse fréquence de quelques volts (3 à 5 V) le rend absorbant. Les caractères apparaissent sombres sur fond clair. N'émettant pas de lumière, l'afficheur LM016L réfléchitif ne peut être utilisé qu'avec un bon éclairage ambiant. Sa lisibilité augmente avec l'éclairage. Les modèles transmissifs fonctionnent différemment: normalement opaque au repos, le cristal liquide devient transparent lorsqu'il est excité, il est nécessaire de l'éclairer par l'arrière, comme c'est le cas pour les modèles rétro éclairés.

## IV.3.2.2. Connexion du LCD LM016L avec le pic 16f877

Nous précisons que le bus de données de l'écran est connecté sur le port D et le R/W est à la masse. Les bits E et RS sont connectés sur le port A.0 et A.1.

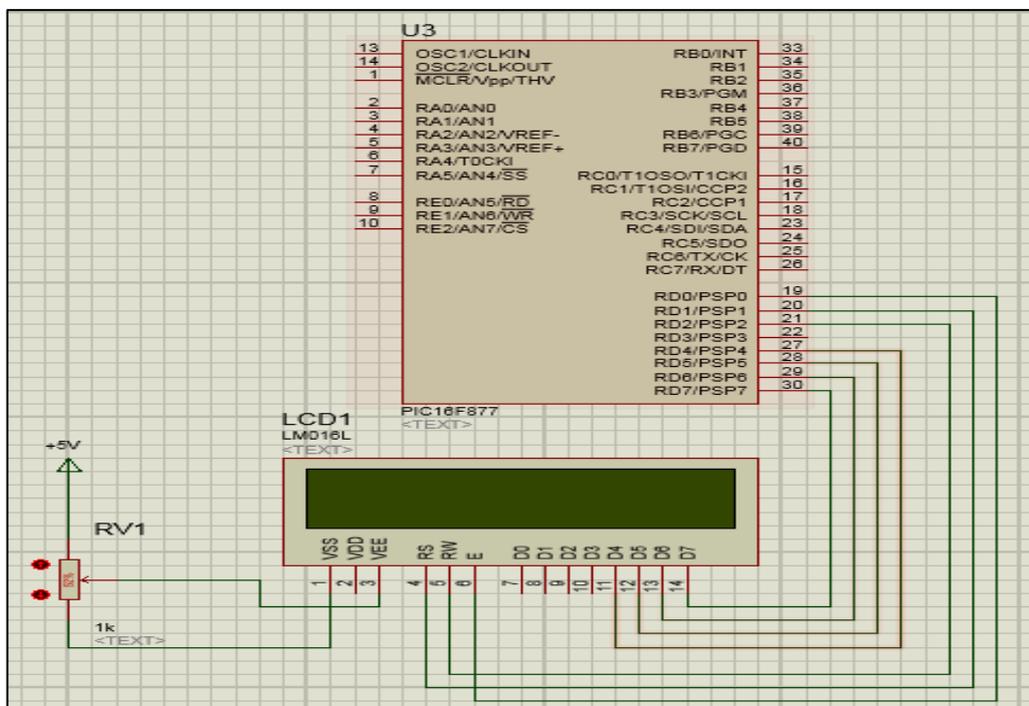


Figure 43: Schéma de connexion du LCD avec le pic 16f877

Broche	Nom	Fonction
1	VSS	Masse
2	VDD	Alimentation positive +5V
3	VEE	Cette tension permet, en la faisant varier entre 0 et +5V, le réglage du contraste de l'afficheur.
4	RS	Selection du registre (Register Select) Grâce à cette broche, l'afficheur est capable de faire la différence entre une commande et une donnée. Un niveau bas indique une commande et un niveau haut indique une donnée.
5	RW	Lecture ou écriture (Read/Write) L : Écriture H : Lecture
6	E	Entrée de validation (Enable) active sur front descendant. Le niveau haut doit être maintenue pendant au moins 450 ns à l'état haut.
7	D0	-
8	D1	-
9	D2	-
10	D3	-
11	D4	-
12	D5	-
13	D6	-
14	D7	-
15	A	Anode rétro éclairage (+5V)
16	K	Cathode rétro éclairage (masse)

Tableau 7 : tableau du Brochage de l'afficheur LCD

Les broches 15 et 16 ne sont présentes que sur les afficheurs LCD avec retro-éclairage. Les connexions à réaliser sont simples puisque l'afficheur LCD dispose de peu de broches. Il faut évidemment, l'alimenter, le connecter à un bus de donnée (4 ou 8 bits), et connecter les broches **E**, **RW** et **RS**.

### IV.3.3. Le circuit de détecteur de passage par zéro

Les signaux obtenus à partir des capteurs de courant et de tension ont été appliqués à des entrées du circuit intégré LM358 dans le détecteur de passage par zéro. Le but du détecteur de passage par zéro consiste à déterminer les moments où les signaux franchissent le niveau zéro. Le détecteur délivre un signal logique 1, lorsque les signaux passent par zéro. Données actuelle a été appliquée au numéro d'entrée 2 de la Op- Amp et les données de tension a été appliquée au numéro d'entrée 6. L'angle entre les signaux carrés obtenus à partir des sorties n° 1 et 7 représentent la différence de phase entre le courant et la tension. Cette différence de phase est utilisée dans le calcul de la puissance réactive.

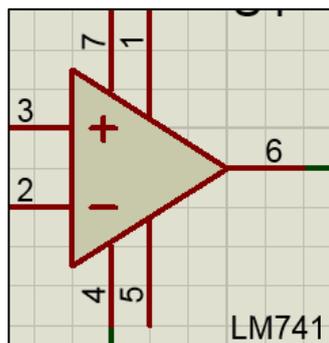


Figure 44: schéma de LM741

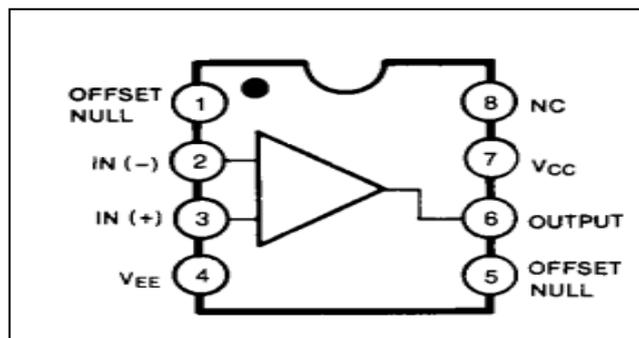


Figure 45 : schéma de brochage de LM741

## IV.4. Le circuit de détecteur de passage par zéro

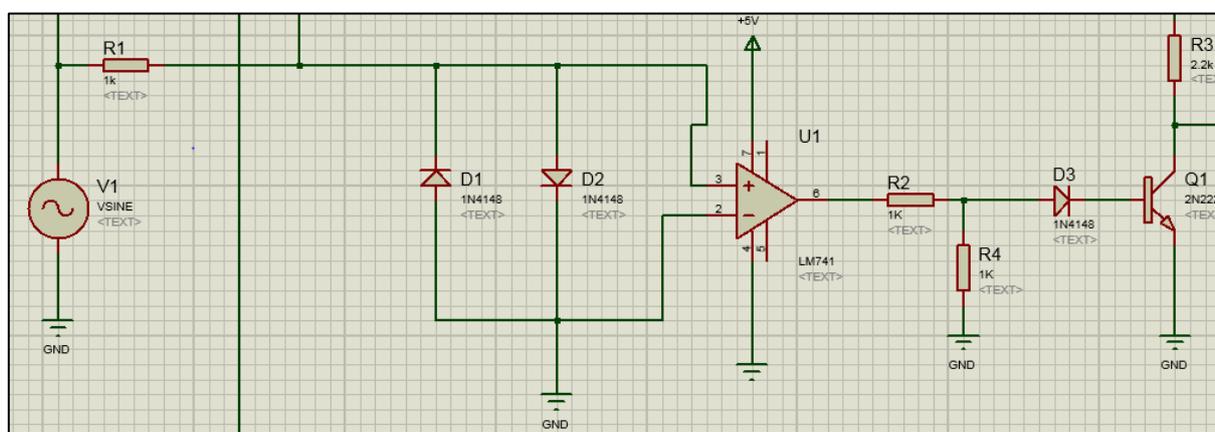


Figure 46 : détecteur de passage par zéro

Le but du détecteur de passage par zéro consiste à déterminer les instants où les signaux croise le niveau zéro. Le détecteur délivre un signal logique 1, lorsque les signaux passent par zéro.

Quand le signal sinusoïdal est appliqué aux bornes de LM741, la sortie de ce dernier donne 1 logique (un signal carré d'amplitude de 5 volts) lorsque le signal traverse ou passe par le point zéro. Si le signal est différent de zéro, la sortie soit 0 (0 volt).

- ❑ LM741 permet de convertir le signal sinusoïdal entrant en un signal carré à sa sortie avec une amplitude de 5v.
- ❑ Les diodes utilisées pour éliminer la partie négative du signal carré obtenu à la sortie d'Ampli-op
- ❑ A la sortie de la diode nous utilisons un transistor de type 2N2222 qui fonctionner en commutation avec les diodes.
- ❑ La résistance R1 limite le courant traversant les deux diodes.
- ❑ Les diodes D1 et D2 écrête Le signal sinusoïdal appliquée aux bornes de l'Ampli-OP.

# Simulation et traitement des résultats

- ▣ Le détecteur de passage est utilisé pour comparer deux signaux dépassant une certaine valeur de seuil.

## III.5. Le schéma globale de circuit de détecteur de passage par zéro

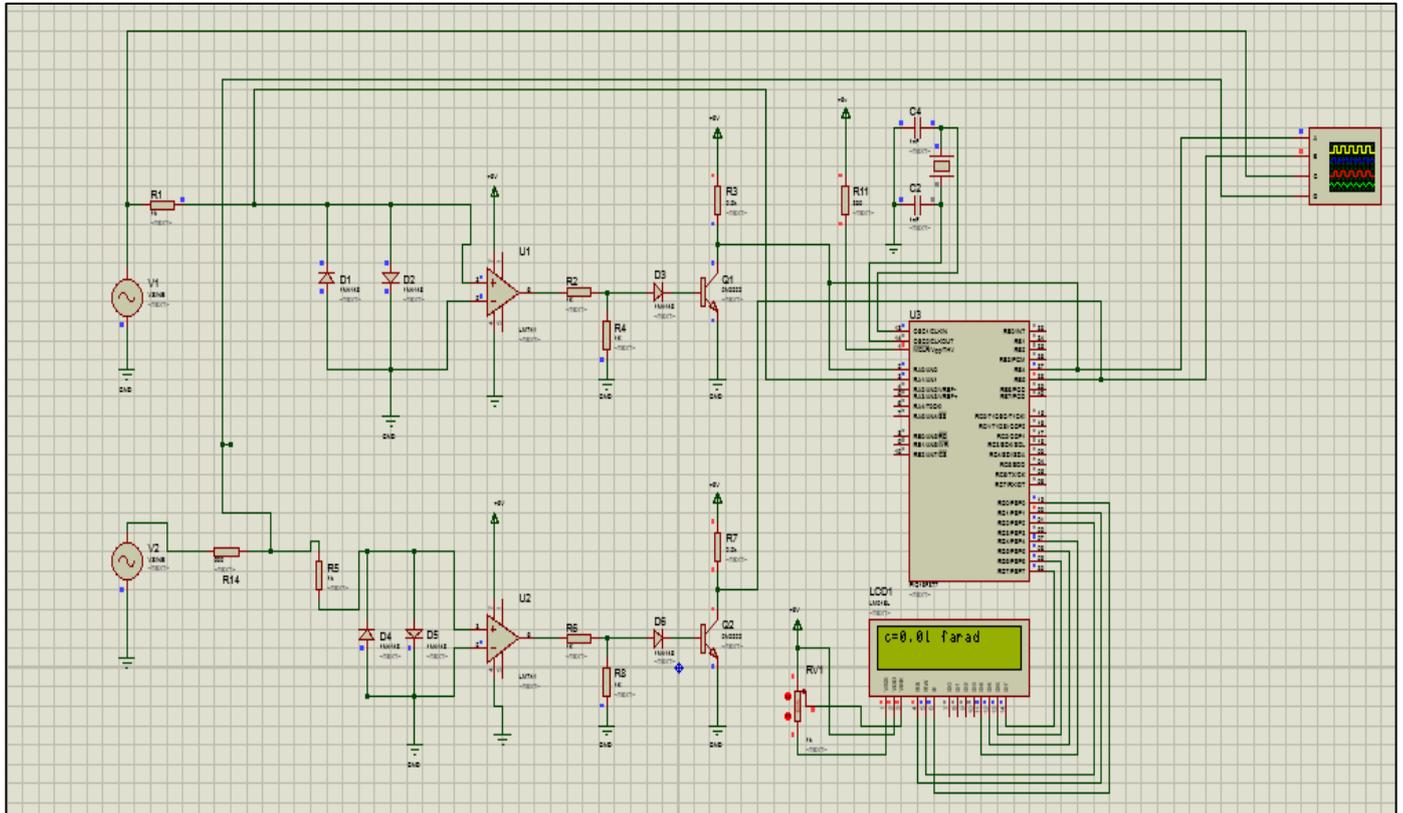


Figure 47 : Le circuit global de détecteur de passage par zéro.

La sortie du circuit détecteur de passage par zéro et l'image des deux signaux sinusoïdaux est représentée ci-dessous par l'oscilloscope sur la Figure III.5

## Simulation et traitement des résultats

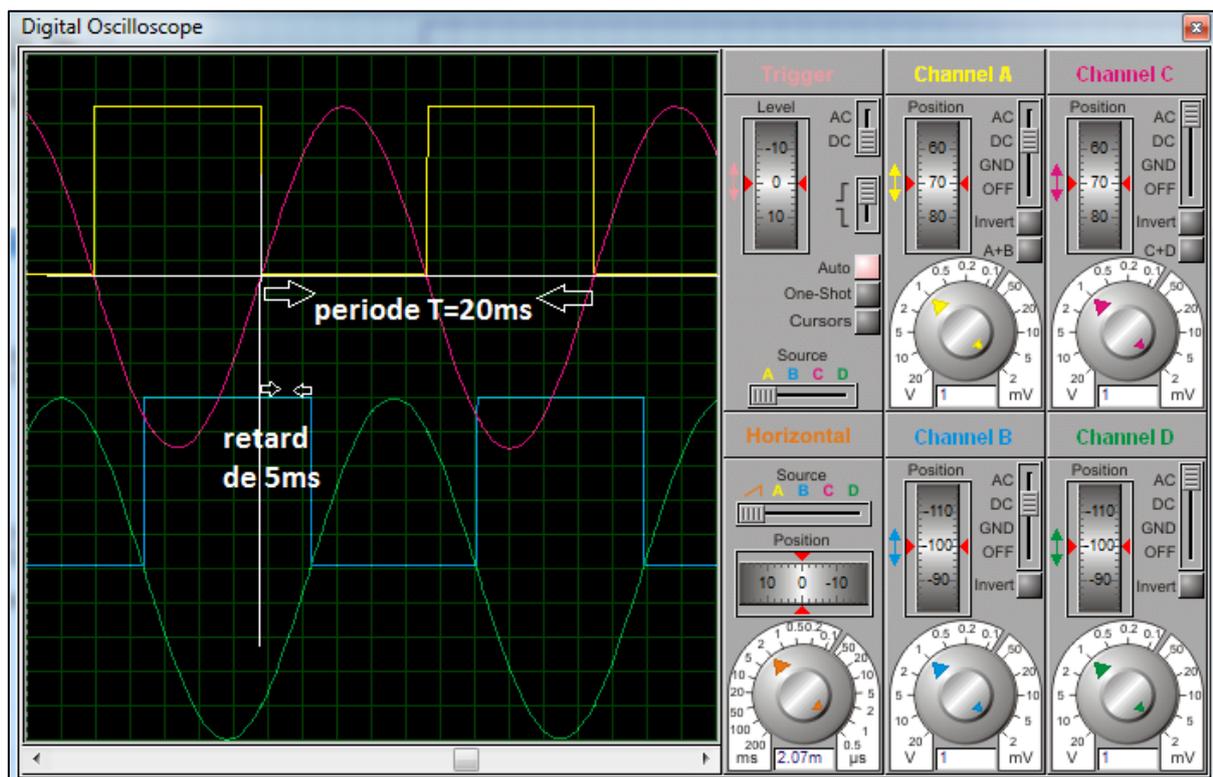


Figure 48 : Représentation des signaux obtenus avant l'entrée et dans la sortie de détecteur de passage par zéro

La figure 48 représente l'arrivée des deux tensions sinusoïdaux (en rouge et en vert) avant l'entrée du détecteur du passage à zéro après qu'il transforme ces signaux sinusoïdaux a signaux carrés (en bleu et en jaune) et élimine la partie négative.

Si les deux signaux de tension passent par le point de zéro, le détecteur produit 1 logique. Les signaux carré obtenus à partir des deux détecteurs sont insérés dans les entrées RB4 et RB5 ce qu'exige un changement d'état sur ces pins.

Par la suite ces changements déclenchent des interruptions et ceci n'est possible que pour les pins de RB4 jusqu'à RB7 qui sont configurées comme entrées.

### IV.6. Calcul du temps de la période

Lorsque on détecte un passage par le point zéro au de niveau d'un des deux signaux du négatif au positif le Timer1 démarre l'incréméntation en utilisant SET\_TIMER1 () et compte jusqu'a ce que le deuxième passage par zéro du même signal du négatif au positif est détecté, le Timer1 s'arrête et capture cette valeur en utilisant GET\_TIMER1 ().

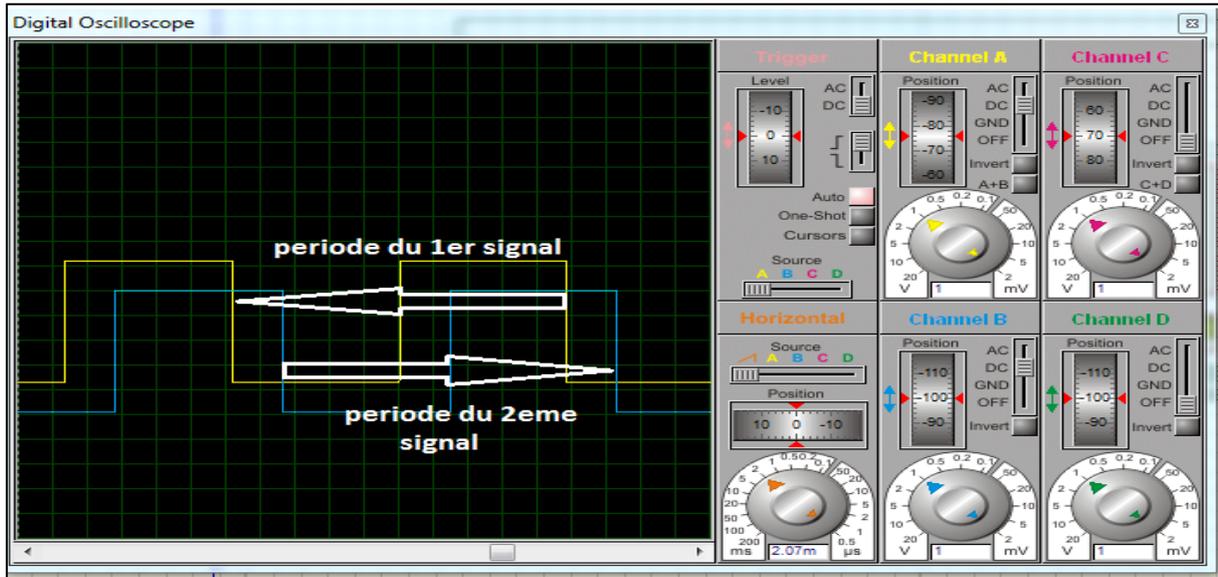


Figure 49 : la période

## IV.7. Calcul du temps de retard

Le premier front montant de 1ers signaux carrés qui provient de 1er détecteur effectue le premier changement d'état au niveau de RB4 qui génère l'interruption et cette dernière démarre le Timer1.

Le Timer1 continu l'incrémentation jusqu'à ce que le front montant de deuxième signal de 2eme détecteur arrive et produit un changement d'état au niveau de RB5 qui déclenche une nouvelle interruption qui stop le Timer1.

« Le Timer1 peut générer une interruption sur un débordement (over flow) s'il continu l'incrémentation il sera réinitialisé et retournera à zéro ».

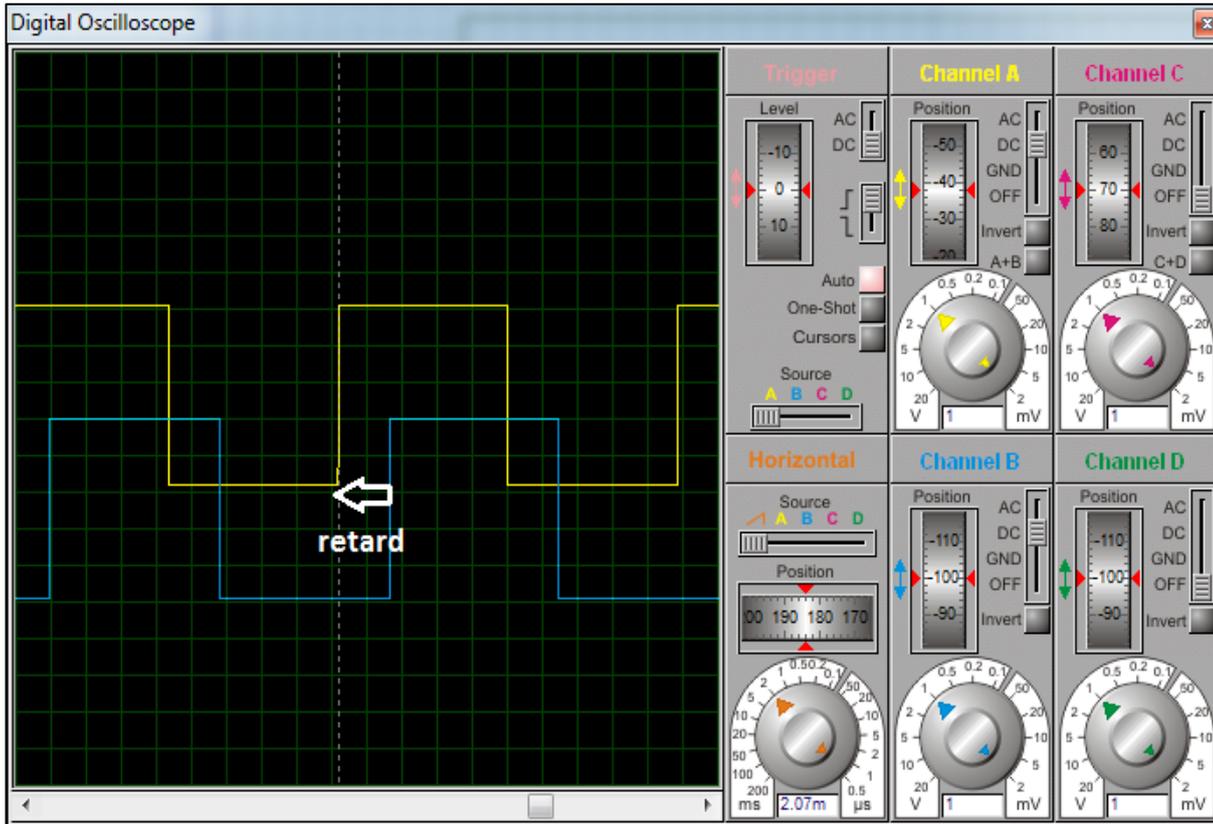


Figure 50 : le retard.

## IV.8. Résultat de Calcul du facteur de puissance ( $\cos \varphi$ )

Le détecteur de passage par zéro en sortie un signal logique 1 lorsque les signaux de courant et de tension passe par zéro Ces signaux sont appliqués à des entrées du microcontrôleur. Permis ces signaux logiques, le signal de courant a été appliqué à la broche de RB4 et le signal de tension à la broche de la RB5 du microcontrôleur

Le microcontrôleur traite les signaux pour avoir la période (T) et le déphasage (retard) de ces deux signaux et calcule l'angle  $\varphi$ , facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ), la tension efficace ( $V_{ef}$ ) et le courant efficace ( $I_{ef}$ ) les puissances : active (P), réactive (Q), apparente (S) et la capacité de condensateur (C) suivant les lois de calcul :

- L'Angle  $\varphi = (\text{temps de retard} / \text{temps de la période}) * 360$  (eq1)
- L'Angle  $\varphi$  en RAD = (l'Angle  $\varphi * \pi$ ) / 180 (eq2)
- Facteur de puissance = COS (l'Angle  $\varphi$  en RAD) (eq3)
- Capacité de condensateur :  $C = Q / (V^2 * \omega)$  ;  $t_q : \omega = 2\pi f$  (eq4)

## IV.9. Simulation

On va prendre les résultats pratique qui s'affichent sur notre LCD et on compare avec les calculs théoriques et les résultats obtenus avec les deux sources de tension sinusoïdales avec une période de  $T=20\text{ms}$  et on décale sur le  $\Delta T$  de ces deux signaux pour avoir le retard (déphasage). On fait ça pour deux exemples :

### 1. $\Delta T=3\text{ms}$

#### Calculs théoriques :

L'Angle  $\varphi = (\text{Temps de retard } \Delta T \text{ (RET)} / \text{La période (T)}) * 360$  ;

A partir de l'oscilloscope on détermine le retard : on lit 1.5 unités horizontale \* l'échelle (chaque unité \*2 ms) alors on obtient  $\text{RET} = 1.5 * 2 = 3\text{ms}$

La période = lecture (10 unités) \* L'échelle (2ms) ;  $T=20\text{ms}$

Alors L'Angle  $\varphi = (3/20) * 360 = 54$  ;  $\cos \varphi = 0.58$

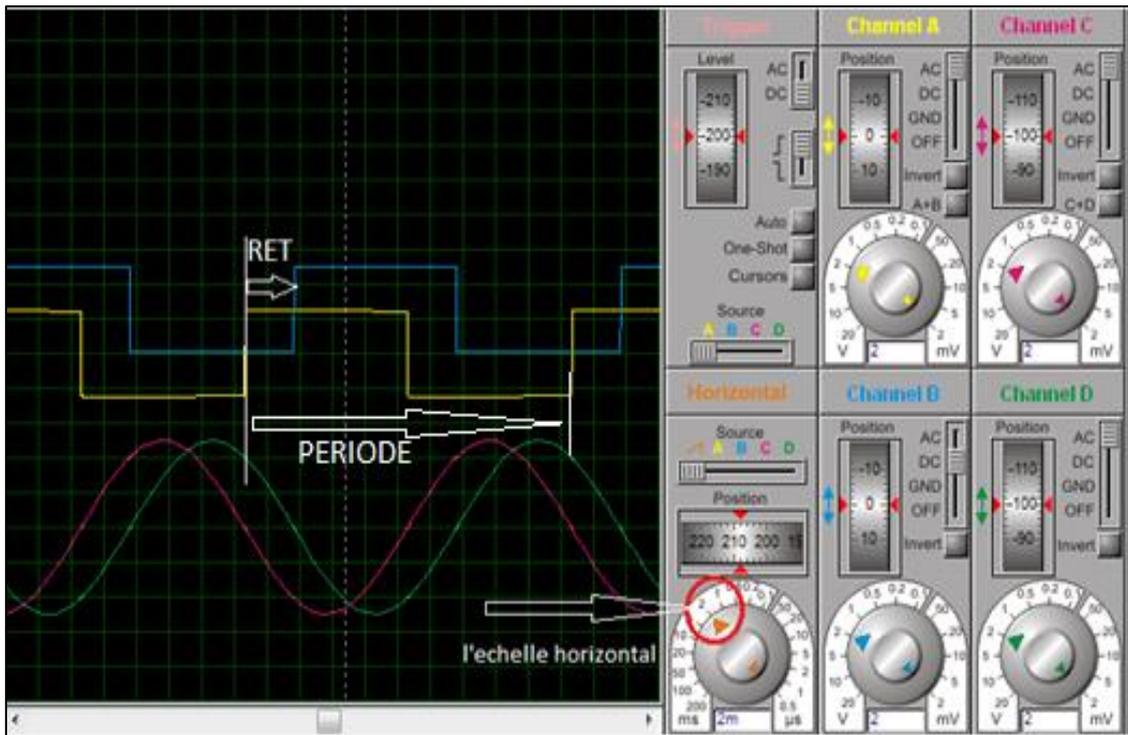


Figure 51 : Les signaux provenant de l'oscilloscope avec  $\Delta T=3\text{ms}$ .

# Simulation et traitement des résultats

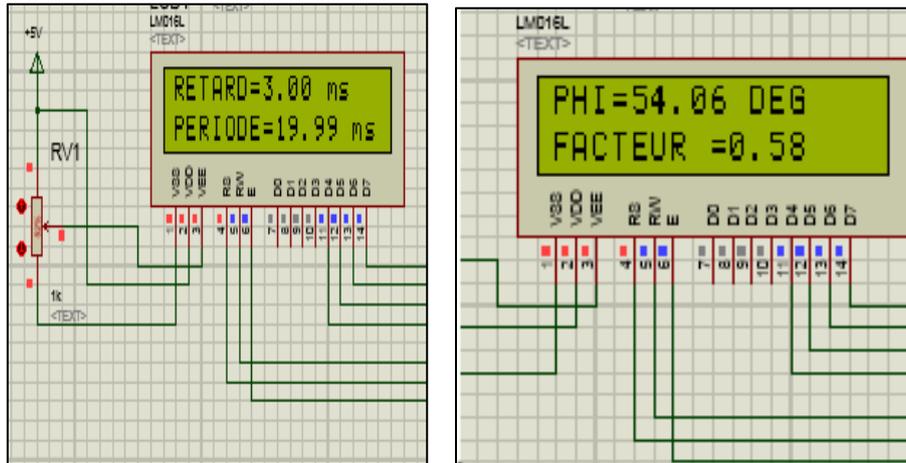


Figure 52 : Les signaux provenant de LCD avec  $\Delta T=3\text{ms}$ .

## 2. $\Delta T=2\text{ms}$

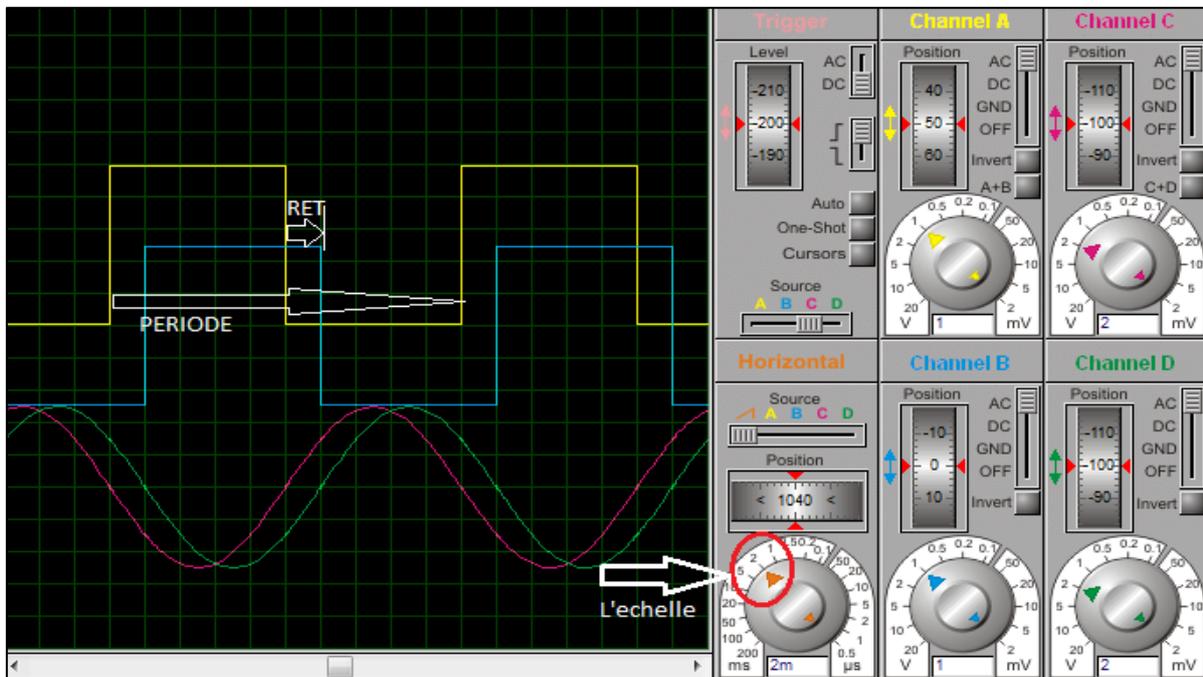


Figure 53 : Les signaux provenant de l'oscilloscope avec  $\Delta T=2\text{ms}$ .

A partir de l'oscilloscope on détermine le retard : on lit 1 unité horizontale \* l'échelle (chaque unité \* 2 ms) alors on obtient  $RET= 1*2= 2\text{ms}$

La période = lecture (10 unités) \* L'échelle (2ms) ;  $T=20\text{ms}$

Alors L'Angle  $\varphi = (2/20)*360= 36$  ;  $\cos \varphi= 0.81$

# Simulation et traitement des résultats

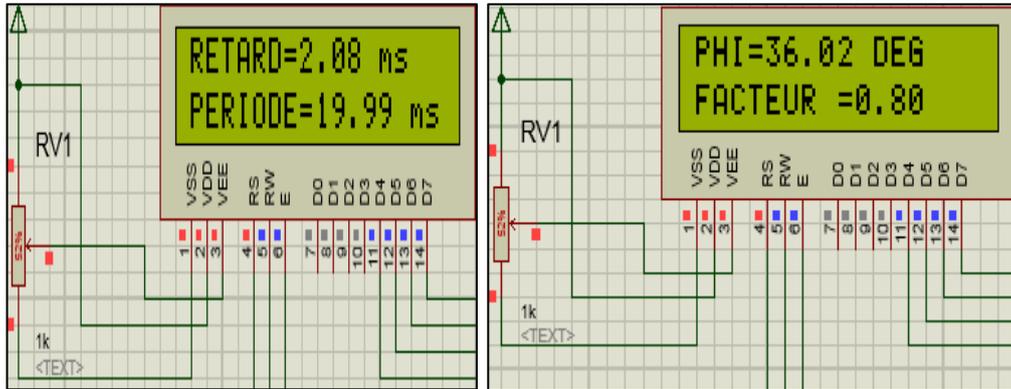


Figure 54 : Les signaux provenant de LCD avec  $\Delta T=2ms$ .

## Calcul de $V_{max}$ , $I_{max}$ et les valeurs de capacité du condensateur

On fait les calculs théoriquement et l'on compare par les résultats expérimentaux

Pour savoir les valeurs de  $I_{max}$  et  $V_{max}$  on prend l'image du tension et de courant sur l'oscilloscope on lit ces valeurs multiplié par l'échelle verticale

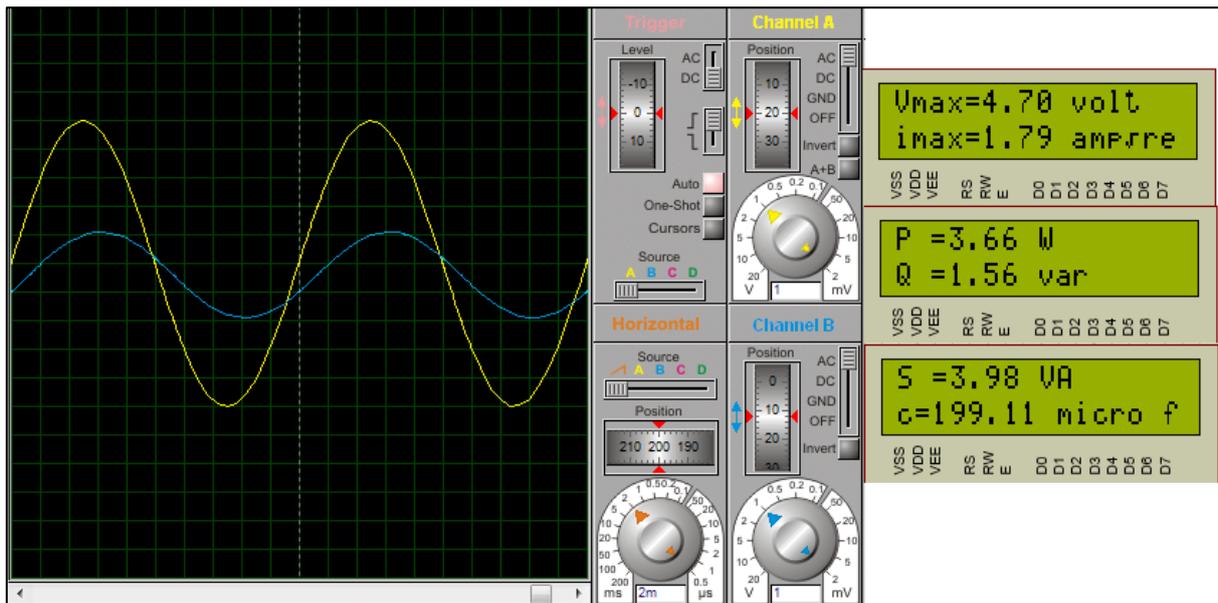


Figure 55 : L'image du courant et de tension provenant de l'oscilloscope et les résultats associés.

Le signal jaune représente l'image du tension et le signal bleu représente l'image du courant si on calcule la valeur max du tension sur l'oscilloscope on trouve :  $10v * \text{l'échelle}(1) / 2$  ;  $V_{max} = 5V$

Le courant :  $3A * \text{l'échelle}(1) / 2$  ;  $I_{max} = 1.5A$

## Calcul de capacité du condensateur

On a  $C = Q / (V_{max}^2 * \omega)$  ;  $C = 1.56 / (2 * 3 * 14 * 25 * 50) = 198.72 \mu F$

On remarque que les valeurs théoriques sont approximatives aux valeurs pratiques.

# Simulation et traitement des résultats

## Correction du facteur de puissance

Grace à l'impulsion de l'angle d'amorçage qui a été généré par le triac et qui laisse le condensateur compense le déphasage, nous avons le courant et la tension en même phase.

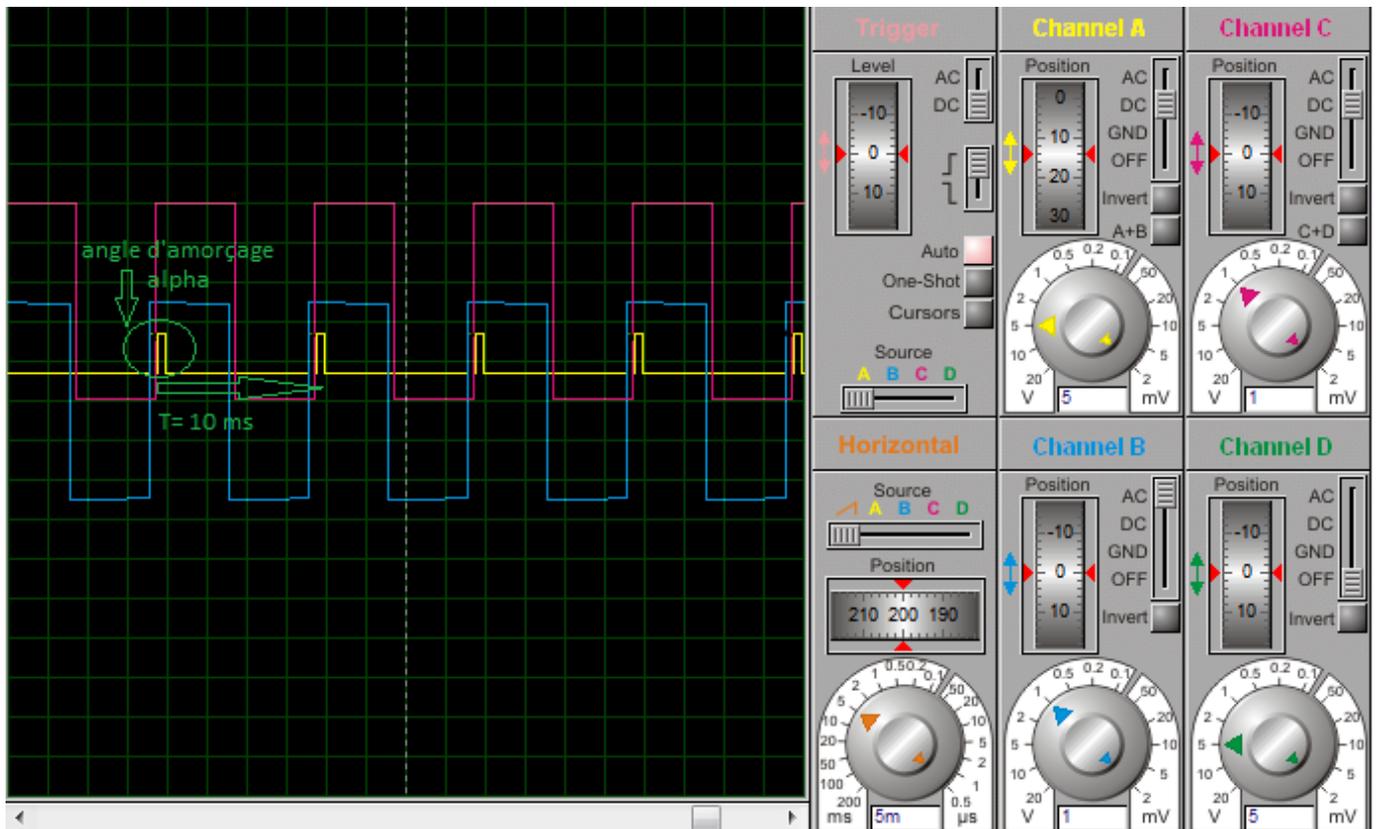


Figure 56 : l'image de la compensation du facteur de puissance provenus de l'oscilloscope

### III.5.5 Le schéma globale de circuit de la compensation d'énergie réactive

# Simulation et traitement des résultats

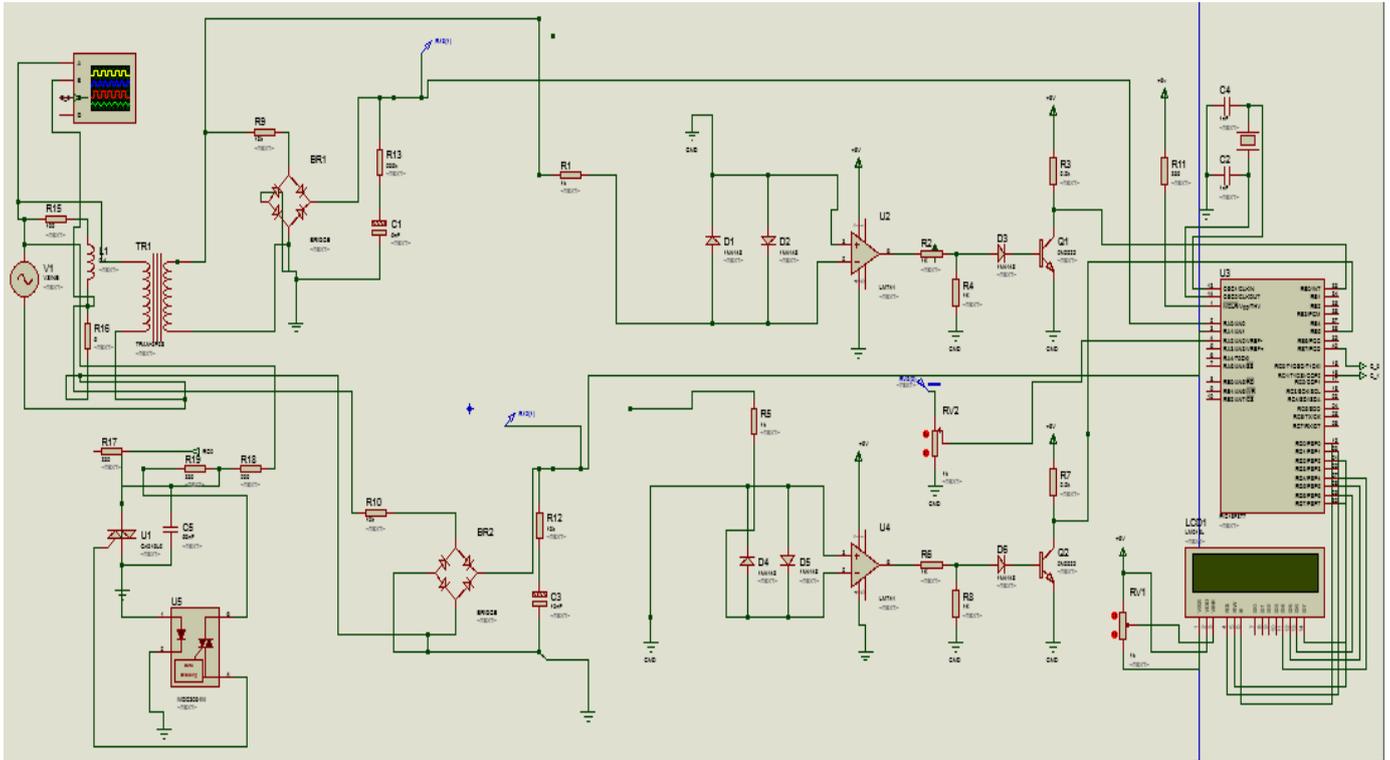


Figure 57 : le circuit d'amélioration du facteur de puissance

## Conclusion générale

La compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électrique constitue un sujet important pour les exploitants, comme nous avons pu le constater tout le long de ce travail.

Notre travail a été consacré à la compensation de l'énergie réactive par convertisseur à base du pic 16F877 afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et d'assurer une stabilité d'un réseau électrique.

L'amélioration du facteur de puissance constitue sans doute un paramètre très important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie du point de vue technique et économique.

Le facteur de puissance est l'un des plus importants indices de la qualité d'énergie électriques dans les réseaux électriques. Un mauvais facteur de puissance a des influences pour tous les acteurs : producteur, fournisseur et exploitant de l'énergie.

L'amélioration de ce facteur demeure le souci majeur surtout pour le fournisseur (réseau de transport), la compensation d'énergie réactive est l'unique solution pour l'améliorer.

Pour ce faire plusieurs méthodes sont à distinguer :

- Compensation par batteries de condensateurs.
- Compensation par condensateur fixe.
- Convertisseurs Statiques (SVC).

Les deux premières méthodes ont démontrées leurs limites, par leurs modes de contrôles classiques, elles ne répondent pas en temps réel face aux perturbations dont fait l'objet le réseau électrique.

La troisième méthode est l'une des plus performantes, par son mode de control et réponse en temps réel. Mais tous simplement son domaine d'utilisation est limité par le courant et la tension qu'ils supportent les thyristors, ce qui rend la compensation en haute tension pratiquement impossible.

# Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

- [2] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série Génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [1] Scientific Research and Essays Vol. 5(16), pp. 2312-2317, 18 August, 2010 ; Available online at <http://www.academicjournals.org/SRE> Fatih Ba\_çiftçi and Ömer Faruk Hatay
- [3] Cours d'électricité Étude des régimes alternatifs ,Mathieu Bardoux IUT Saint-Omer / Dunkerque Département Génie Thermique et Énergie [mathieu.bardoux@univ-littoral.fr](mailto:mathieu.bardoux@univ-littoral.fr)
- [4] <http://www.assistancescolaire.com/eleve/3e/physique-chimie/reviser-une-notion/les-proprietes-d-une-tension-alternative-3pne06>
- [5] Laurent Henry ; Institut universitaire de chartres-université d'oléans, Londres-paris-NEWYORK(c) Lavoisier, 2008,
- [6] RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Circuits à courant alternatif. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.
- [8] [ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/doc/dephasage\\_1](http://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/doc/dephasage_1)
- [9] Schneider Electric Industries SA, Guides experts basse tension N° 6 « Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques DBTP155GUI/FR - © 2001
- [10] Legrand « Guide Technique & Catalogue |Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques » 87045 Limoges Cedex - France 2009
- [11] Sabir RUSTEMLI, Muhammet ATES University of Yuzuncu Yil, Measurement and Simulation of Power Factor using PIC16F877
- [12] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur\\_de\\_puissance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_puissance)
- [13] [optiloadingsvn.hzs.be/raf/cursuselektricitpdf/electfr2/chap7.pdf](http://optiloadingsvn.hzs.be/raf/cursuselektricitpdf/electfr2/chap7.pdf)
- [14] [GIE\\_chap\\_L-2010\\_haute\\_def.pdf](#)
- [15] Le grand, guide technique et catalogue, compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques.
- [16] [4\\_compensation\\_nrij\\_reactive.pdf](#)
- [17] Article étude de cosinus phi ou facteur de puissance Le 25.02.2014. Site 5: [www.positron\\_libre.com](http://www.positron_libre.com)

## Références bibliographiques

---

- [18] Laurent Henry ; Institut universitaire de chartres-université d'oléans, Londres-paris-NEWYORK(c) Lavoisier, 2008,
- [19] BEISER, A. (1979). Physique appliquée, cours et problèmes, série schaum. Traduction français par LOBENBERGE. M. MC Graw – Hill, paris ,18 .02.2014.
- [20] Article intitulé adaptation d'impédances Site 4 :  
<http://www.electropedia.org/iev/iev.hsf/display?openform&ievrfsf:131-12-44> [Archive]
- [21] GIE\_chap\_L-2010\_haute\_def.pdf
- [21] ARNAUD 1996 "Admittance acoustique « le journal de physique et le Radium 1928, P. 627. »
- [22] Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en : Electrotechnique Option : Réseaux Electriques Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) Présenté par : Nabil MANCER ; Soutenu publiquement le 28 / 01 / 2012
- [23] ALPES Brochure 09\_FRlight.pdf SVC
- [3] Roohollah Fadaeinedjad and Gerry Moschopoulos, 'Using STATCOM to Mitigate Voltage Fluctuations Due to Aerodynamic Aspects of Wind Turbines', IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008, pp. 3648 -3654, 15-19 June 2008.
- [24] Manœuvre et protection des batteries de condensateurs MT. Cahier Technique Schneider n° 189.  
<http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/produits-services/cahiers-techniques/cahiers-techniques.page>
- [25] FACTS : les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie. Revue ABB Mai 1999.  
<http://www.abb.fr/cawp/abbzh254/699bd5d4cb7e7706c1256dab003085da.aspx>
- [26] Discover the world of FACTS technology. SIEMENS.  
[http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/FACTS/FACTS\\_Technology.pdf](http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/FACTS/FACTS_Technology.pdf)
- [27] Alternateurs hydrauliques et compensateurs. Techniques de l'ingénieur [D 3 540].
- [28] Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive. Publication RESELEC 2002.  
<http://electrotechnique-couffignal.site2.ac-strasbourg.fr/site-php/cours2007/realisation-compensateur.pdf>
- [30] Volume 3, Issue 9, September 2013 ISSN: 2277 128X International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering Available online at: [www.ijarcsse.com](http://www.ijarcsse.com) PIC

## *Références bibliographiques*

---

Microcontroller Based SVC for Reactive Power Compensation and Power Factor Correction ; Abhinav Sharma<sup>1</sup>, Vishal Nayyar<sup>2</sup>, S. Chatterji<sup>3</sup>, Ritula Thakur<sup>3</sup>, P.K. Lehana\*<sup>1</sup>M.Tech Student, Arni University, India <sup>2</sup>Government Polytechnic for Women, Jammu-180001, India <sup>3</sup>NITTTR, Panjab University, Chandigarh-160019, India \*University of Jammu, Jammu- 180001, India;

[31] Y.A. Mobarak, 'SVC, STATCOM, and Transmission Line Rating Enhancements on Induction Generator Driven by Wind Turbine', International Journal of Electrical Engineering & Technology, 'IJEET', Vol. 3, N°1, pp. 326 – 343, 2012.

[32] C.A. Canizares, 'Power Flow and Transient Stability Models of FACTS controllers for Voltage and Angle Stability Studies', IEEE/PES WM Panel on Modeling, Simulation and Applications of Flexible AC Transmission Systems 'FACTS' Controllers in Angle and Voltage Stability Studies, Singapore, 2000.

[33] J. Dixon and J. Rodriguez, 'Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review', Proceedings of the IEEE, Vol. 93, N°12, pp. 2144 - 2164, 2005.

[34] : Les Microcontrôleurs PIC 16F87X, Philippe LETENNEUR - GRANVILLE– 2003.

[35] : Programmation En C Sur Carte "EASYPIC 2" du Microcontrôleur PIC16F877, Karim SAAD, Mémoire de fin d'étude -Licence LMD- , Université d'ORAN. Promotion 2007/2008.

[36] : Les Microcontrôleurs PIC: Description et mise en œuvre, Christian TAVERNIER, Nouvelle présentation de la 2ème édition, DUNOD, 2002.

[37]: PIC16F87X DATA SHEET, Microchip Technology Inc., 2001.