

Courant alternatif, puissances active et réactive, facteur de puissance, harmoniques...

01. Le « courant alternatif »

Pour des raisons historiques, principalement technologiques, l'électricité énergie est aujourd'hui très largement produite, transportée, distribuée et consommée en courant alternatif. En réalité, on devrait dire sous tension alternative, car c'est la tension (en volts) qui est imposée. En électricité, la tension est généralement notée v ou u . Alternative signifie qu'elle oscille autour d'une valeur moyenne nulle, en outre, sa forme d'onde $v(t)$ est de type sinusoïdal (voir figure 1). La fréquence, notée f , de ses alternances entre une valeur positive maximale V_M et une valeur négative minimale $-V_M$ est égale soit à 50 Hz (hertz), soit à 60 Hz selon les zones géographiques. 50 Hz signifie 50 périodes par seconde, donc une période, notée T , de $1/50 = 20$ ms (millisecondes).

L'amplitude (valeur maximale ou crête) est notée V_M (en volts), mais la grandeur généralement spécifiée est la valeur efficace notée simplement V (voire V_{eff} ou V_{rms} en anglais). Par exemple, le réseau domestique français délivre une tension nominale (efficace) de 230 V (et non plus 220 V comme on le dit souvent) avec une tolérance de $\pm 10\%$ (soit une fourchette de 207 V à 253 V) et une fréquence de 50 Hz qui dévie très peu de sa valeur nominale et que nous considérerons constante. Pour une forme d'onde sinusoïdale, la relation entre l'amplitude (valeur maximale) V_M et la valeur efficace V est : $V_M = \sqrt{2} \cdot V$ avec $\sqrt{2} \cong 1,414$, ce qui signifie que l'amplitude de la tension correspondant à 230 V vaut 325 V. **La tension distribuée est ainsi caractérisée principalement par deux grandeurs : sa valeur efficace et sa fréquence.** Pour être rigoureux, on devrait parler de tension alternative sinusoïdale, mais on parlera dans la suite de tension alternative, tout court.

La figure suivante montre l'oscillogramme de la tension du réseau nominal domestique 230 V – 50 Hz :

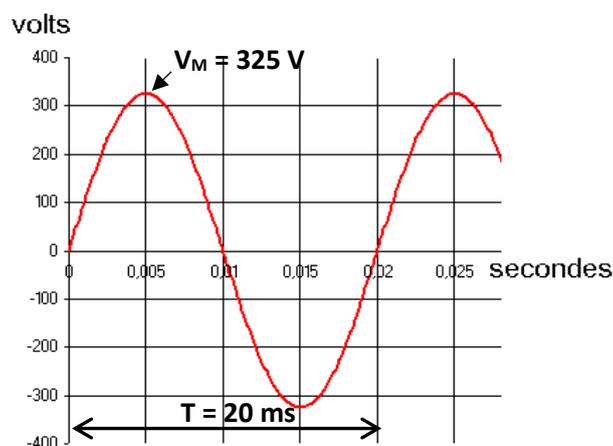


Figure 1- Forme d'onde de la tension du réseau domestique 230 V – 50 Hz : $v(t) = V_M \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ (amplitude $V_M = 325$ V, fréquence $f = 50$ Hz et période $T = 1/f = 20$ ms)

Lorsque l'on alimente une « charge » sous une tension alternative, un courant (flux d'électrons), noté i (comme intensité), s'exprimant en ampères (A), est appelé à la source d'énergie.

On appelle une charge linéaire une charge qui n'introduit pas de distorsion du courant qui reste sinusoïdal. Les charges linéaires peuvent être :

- purement résistives correspondant à une conversion d'énergie : ce qui sert à faire de la chaleur (résistance de lave-linge, de lave-vaisselle, de bouilloire électrique...), mais pas seulement, certaines charges électroniques équipées d'un redresseur actif à absorption sinusoïdale de courant (appelé PFC), comme certaines alimentations d'ordinateurs puissants ;
- purement réactives, soit purement inductives (comprenant des bobines créatrices de champs magnétiques : inductances) ou purement capacitives (condensateurs) ;
- réactives c'est-à-dire comprenant à la fois une composante résistive (correspondant à une conversion d'énergie, celle qui est facturée par le compteur) et une composante réactive : certaines sont inductives (moteurs, transformateurs, tubes fluorescents associés à un ballast magnétique, inductances d'une façon générale...) et d'autres capacitives (associées à des condensateurs), moins fréquentes.

Note sur les représentations angulaires : sachant qu'une période de la sinusoïde de tension représente un cycle complet et l'équivalent d'un tour dans un cercle, on exprime souvent les ondes (tension, courant et puissance instantanée) en fonction d'un angle, noté θ (thêta, compté en radians, une période complète correspond à un tour complet, soit 2π radians, environ 6,28, ou, en degrés, 360°) tel que : $\theta = \omega \cdot t$ où $\omega = 2\pi \cdot f$ est la pulsation exprimée en rad/s (radians par seconde). Si $f = 50$ Hz, $\omega = 314$ rad/s.

Ainsi un angle de 90° ou $\frac{\pi}{2}$, correspond à un quart de période (5 ms à 50 Hz, comme on peut le voir sur la figure 2, ci-dessous).

La figure 2 montre les formes d'ondes de la tension et du courant dans 3 cas idéaux de charges linéaires (c'est-à-dire qui n'introduisent pas de distorsions du courant) :

- charge purement résistive, la sinusoïde de courant $i(t)$ est « en phase » avec celle de tension $v(t)$;
- charges purement inductive ou capacitive, la sinusoïde de courant est déphasée d'un quart de période (angle de déphasage à 90°) en retard ou en avance par rapport à la tension.

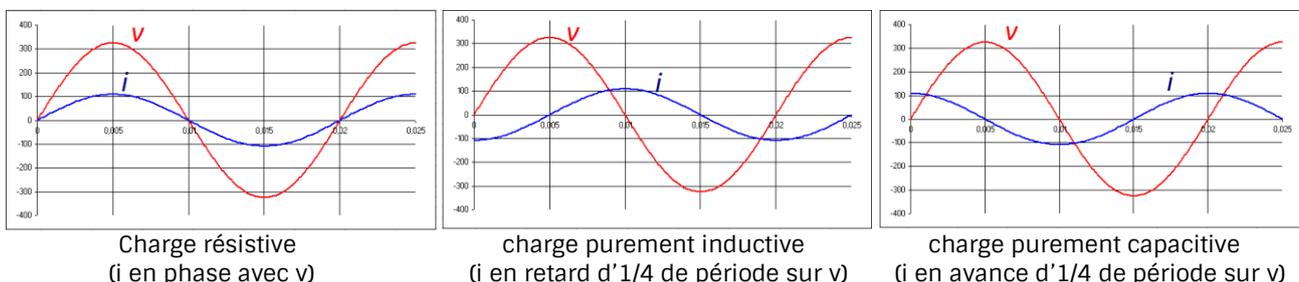


Figure 2 - Formes d'onde de la tension v et du courant i en alternatif, dans le cas de charges linéaires

On peut aussi représenter de façon vectorielle les ondes de tension et de courant via des « diagrammes de Fresnel » :

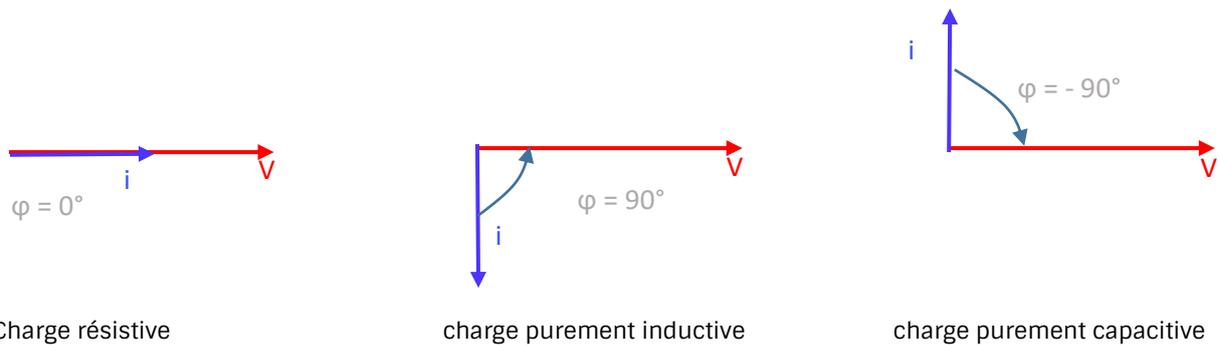


Figure 3 - Diagrammes de Fresnel correspondant aux oscillogrammes de la figure 2

Toutes les combinaisons possibles existent, on appelle déphasage l'angle entre $i(t)$ et $v(t)$ et on le note φ (phi). Sur la figure précédente, l'angle φ était respectivement égal à 0 , 90° et -90° . La figure ci-dessous montre un exemple d'une charge partiellement résistive et inductive où le courant est en retard sur la tension d'un angle égal à 30° :

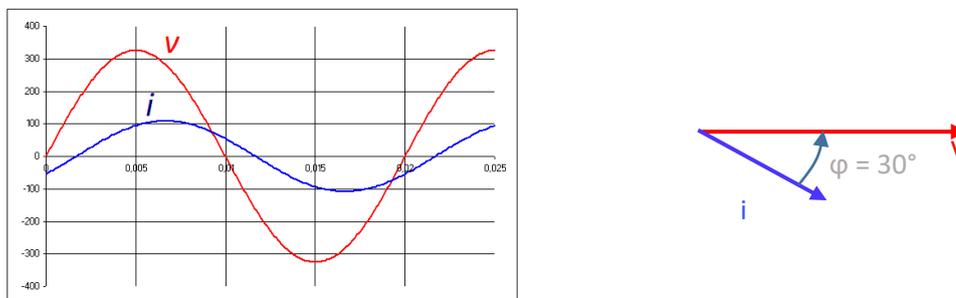


Figure 4 - Exemple d'une charge inductive avec un déphasage du courant de 30° (représentations temporelle à gauche et vectorielle à droite)

02. La puissance en alternatif sinusoïdal (raisonnements en régime monophasé)

En électricité, la puissance **p (en watts)** est égale au produit de la tension par le courant :

$$p(t) = v(t) \cdot i(t).$$

En courant alternatif, comme v et i varient en fonction du temps, la puissance (sauf cas particuliers) n'est pas constante, on appelle **p** ou **p(t)** la **puissance instantanée** et **P** la **puissance active** (en watts, symbole W), souvent appelée **puissance** tout court. La puissance active P est égale à la moyenne de la puissance instantanée et correspond à l'énergie effectivement transférée, ou convertie (l'énergie est égale à la puissance multipliée par le temps).

D'une façon générale, s'il y a un déphasage quelconque entre le courant et la tension (voir chapitre précédent) et à condition que le courant reste sinusoïdal, la puissance active s'exprime par :

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

où V et I sont les valeurs efficaces de la tension et du courant, $\cos(\varphi)$ est le cosinus de l'angle de déphasage φ .

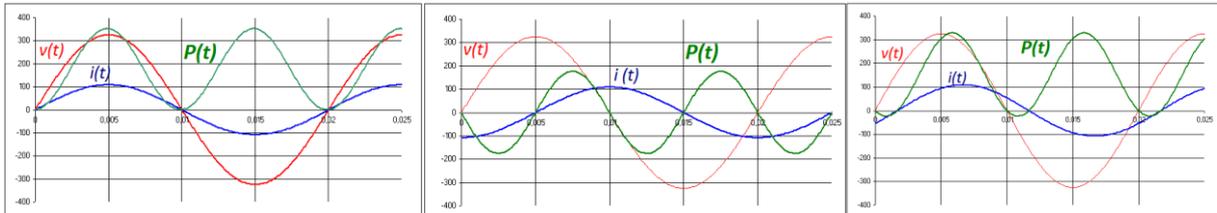
Lorsque v et i sont en phase (charge résistive, $\varphi = 0$ et $\cos(\varphi) = 1$) :

$$P = V \cdot I = \frac{1}{2} V_M \cdot I_M$$

Lorsque v et i déphasés de 90° (charge purement inductive ou purement capacitive, $\cos(\varphi) = 0$) :

$$P = 0$$

La figure suivante montre l'évolution de la puissance instantanée $p(t)$ pour une charge purement résistive (à gauche), une autre purement réactive (au milieu) et une charge résistive et inductive ($\varphi = 30^\circ$, correspondant à un douzième de période) :



a- Charge résistive b- Charge purement inductive c- Charge partiellement inductive ($\varphi = 30^\circ$)
Figure 5 - Puissance instantanée $p(t) = v(t).i(t)$ pour 3 types de charge.

La puissance instantanée $p(t)$ reste toujours positive (voir Fig. 5a) dans le cas d'une charge résistive, autrement dit, la charge est, en chaque instant, consommatrice d'énergie. Alors que dans le cas d'une charge purement inductive (Fig. 5b) ou purement capacitive (Fig. 5c), on peut remarquer que la puissance instantanée est purement alternative, ce qui explique qu'elle ait une valeur moyenne nulle, donc une puissance active égale à zéro. Avec les conventions choisies, lorsque la puissance instantanée est positive, la charge stocke de l'énergie, puis lorsqu'elle est négative, elle la déstocke. Autrement dit, ce type de charge, purement réactive, ne consomme pas d'énergie mais fait circuler du courant entre la source (réseau) et la charge. Ce courant, qui ne transporte pourtant pas d'énergie en moyenne (puissance active nulle), occasionne des pertes par effet Joule (chaleur dissipée) dans les lignes ainsi que dans les transformateurs et les générateurs. Comme c'est la valeur efficace du courant qui est dimensionnante pour les lignes et autres équipements situés en amont de l'abonné, ce courant « inutile » conduit à des surcoûts (investissement et pertes d'énergie) qu'il faut bien payer.

C'est pourquoi on quantifie la capacité de transport d'une ligne électrique, non pas en watts, mais en volts-ampères (VA, prononcer véa) et que l'on utilise pour cela la notion de **puissance apparente, notée S** :

$$S = V.I$$

Dans une installation domestique, la **puissance souscrite** (en volts-ampères ou VA) au distributeur qui correspond à l'abonnement et à la valeur maximale du courant efficace tolérée par le disjoncteur qui a été réglé de façon cohérente avec celle-ci. C'est pourquoi la puissance souscrite est une puissance apparente qui s'exprime en VA. Pour faire une analogie avec une distribution de fluide, le réglage du courant de disjonction est en quelque sorte le réglage du débit maximal.

Si le réglage du disjoncteur a été fait pour une valeur de 30 A efficaces, cela correspond à une puissance (apparente) souscrite de $30 \times 230 = 6900 \text{ VA} = 6,9 \text{ kVA}$ (prononcer kavéa), dans le langage courant, on approxime à 6 kVA (ce qui constitue d'ailleurs une ambiguïté, paye-t-on un abonnement 30 A ou 6 kVA ??).

On appelle **facteur de puissance, noté F_p** , le rapport entre la puissance active et la puissance apparente :

$$F_p = \frac{P}{S}, \text{ il est toujours inférieur ou égal à } 1$$

Dans le cas où la charge est linéaire, c'est-à-dire que le courant reste sinusoïdal, la puissance active s'exprime par :

$$P = V.I.\cos(\varphi),$$

alors : le facteur de puissance vaut :

$$F_p = \cos(\varphi)$$

Si la charge est purement résistive, la puissance apparente est égale à la puissance active et le facteur de puissance est maximal et égal à 1, c'est le cas idéal correspondant au minimum de courant appelé au réseau, pour une puissance active donnée et donc pour une consommation d'énergie donnée

Mais dès qu'il y a des charges réactives, souvent inductives (transformateurs, moteurs...), le courant se trouve partiellement déphasé par rapport à la tension et, pour la même puissance active (et la même énergie consommée), on consomme un courant efficace plus élevé, ce que traduit un facteur de puissance inférieur à 1 et, donc, à plus de courant efficace appelé au réseau à puissance active donnée

On appelle **puissance réactive (notée Q , en VAR ou volts-ampères-réactifs, prononcer var)** la composante de la puissance apparente représentant la composante réactive du courant :

$$Q = V.I.\sin(\varphi)$$

Dans ces conditions de charges linéaires, absorbant donc un courant sinusoïdal, la relation qui lie la puissance apparente S à la puissance active P et à la puissance réactive Q est la suivante : $S^2 = P^2 + Q^2$

Compensation de la puissance réactive

Notons que pour minimiser le courant efficace appelé au réseau, on peut ramener le facteur de puissance à sa valeur maximale égale à 1 grâce à ce que l'on appelle une compensation de la puissance réactive. La compensation consiste à ajouter une charge réactive complémentaire de celle qui a occasionné une dégradation du facteur de puissance. Par exemple, si la charge est de nature inductive (cas le plus fréquent), on peut utiliser des condensateurs de compensation, afin de réduire la puissance apparente (le minimum possible étant obtenu lorsque le facteur de puissance F_p est égal à 1, alors la puissance apparente est égale à la puissance active) et de profiter au mieux de la puissance disponible au compteur, souscrite par abonnement. Il s'agit d'un cas fréquemment rencontré par les gros abonnés (industriels ou tertiaires) qui sont équipés d'un compteur d'énergie réactive (comptée en VARh et facturée) en plus d'un compteur d'énergie active, ou d'énergie tout court.

Les puissances réactives s'ajoutent algébriquement. Si Q_{ch} est la puissance réactive de l'ensemble des charges connectées sous la tension V , on peut intégralement la compenser par des condensateurs dont la capacité C est telle que la puissance réactive dite fournie (négative selon les conventions) vaut : $Q_c = -V^2.C.\omega$ qui permet, si on le souhaite, d'annuler la puissance réactive totale (compensation totale) de telle façon que : $Q_c + Q_{ch} = 0$.

Mais, dans la vraie vie, nous utilisons de plus en plus de charges non linéaires, c'est-à-dire des charges qui, alimentées, sous une tension sinusoïdale, absorbent des courants non sinusoïdaux. **Dans les applications domestiques**, ce sont désormais elles qui sont les principales responsables de la dégradation du facteur de puissance, même si leur effet reste encore marginal quant au risque de dépassement de la puissance souscrite (disjonction), car

les charges dominantes sont généralement les charges résistives très puissantes, comme les appareils de cuisson, les chauffe-eau et autres bouilloires électriques.

Note

La valeur efficace du courant (ou courant efficace) est supérieure ou égale à la composante active du courant, celle qui correspond à la conversion d'énergie active, celle facturée *via* le compteur. C'est également la valeur efficace du courant (représentée par la puissance apparente égale à $230 \text{ V} \times I$) qui correspond à la limite de déclenchement du disjoncteur général d'une installation, réglé en fonction de la puissance (apparente) souscrite. Enfin, c'est elle qui occasionne les pertes par effet Joule et qui fait chauffer les fils électriques et tous les équipements situés en amont du compteur, qui doivent être de taille adéquate (section des câbles, pouvoir de coupure des organes de coupure, puissance nominale –apparente– des transformateurs, etc.). Ces pertes constituent de l'énergie perdue, en proportion toutefois relativement faible (moins de 10%), qu'il faut bien que quelqu'un paye ! Il en est de même pour le coût des surdimensionnements évoqués dans la phrase précédente. C'est pourquoi, il est important que la valeur efficace du courant soit la plus proche possible du courant actif, ce qui se traduit par un facteur de puissance le plus proche de 1.

Finalement, dans une installation domestique, on paye :

- un abonnement dont le prix dépend de la puissance (apparente en kVA) souscrite et qui doit être plus élevée que la puissance apparente, proportionnelle à la valeur efficace du courant total consommé par tous les appareils branchés à un instant donné (attention, la puissance apparente totale ne s'obtient hélas pas en effectuant la somme des puissances apparentes des charges prises séparément, d'autant plus qu'il y a des harmoniques) ;
- la consommation d'énergie (en kWh) correspondant à la seule puissance active des appareils consommateurs multipliée par leur temps de fonctionnement (ou, si la puissance varie dans le temps, à la somme des produits $P \cdot \Delta T$ durant des intervalles de temps ΔT à une puissance constante P).

03. La puissance en alternatif en présence de courants non sinusoïdaux (harmoniques)

Tous nos appareils électroniques (TV, boxes internet, lampes fluocompactes et à LEDs, radio-réveil, adaptateurs chargeurs divers, et de plus en plus d'appareils conventionnels à efficacité énergétique améliorée : réfrigérateurs, fours à micro-ondes, plaques de cuisson à induction, pompes à chaleur...) se comportent comme des charges non linéaires, c'est-à-dire que lorsqu'on les alimente par la tension sinusoïdale du réseau, le courant absorbé n'est pas sinusoïdal. On dit qu'il contient des **harmoniques**, pour les mettre en évidence, on peut décomposer la forme d'onde du courant en série de Fourier, c'est-à-dire en effectuant une somme de composantes. La première, appelée **fondamental du courant**, a la même fréquence que la tension (50 Hz chez nous) et les autres sont appelées les harmoniques et ont des fréquences multiples de la fréquence du fondamental (s'il y a un harmonique à 100 Hz, on dit qu'il s'agit d'un harmonique pair de rang 2, 150 Hz correspond à un harmonique impair de rang 3).

La figure suivante montre un exemple simplifié purement théorique. Le courant contient ici seulement deux composantes : le fondamental (ou 1^{er} harmonique), noté i_1 , et une composante i_3 harmonique de rang 3 (dont l'amplitude est égale à 60 % de celle du fondamental). On peut ainsi observer le résultat sur le courant total i significativement déformé.

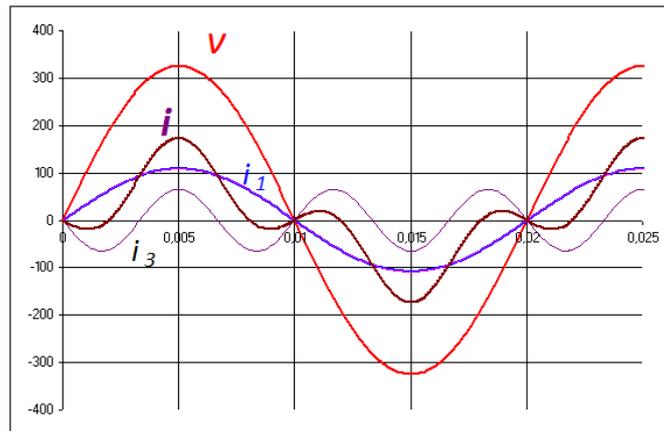


Figure 6 - Distorsion du courant, ici avec deux composantes : un fondamental i_1 en phase avec la tension et un harmonique 3 (amplitude égale à 60 % de celle du fondamental).

Dans cet exemple, il n'y a pas de composante réactive du courant puisque le fondamental est parfaitement en phase avec la tension, mais il y a bien une augmentation de la valeur efficace du courant, par rapport à la seule composante active (à cause de l'harmonique 3 qui a introduit une distorsion de la sinusoïde qu'une charge linéaire aurait absorbée) et donc un accroissement de la puissance apparente associé à une dégradation du facteur de puissance.

D'une façon générale, seule la composante active (en phase avec la tension) du fondamental transporte la puissance active et la consommation d'énergie. **Les harmoniques**, quant à eux, ne font qu'accroître la valeur efficace du courant (ce qui aggrave donc le risque de disjonction et augmente les pertes Joule dans le système électrique de distribution), au même titre que la puissance réactive (voir chapitre 2). Bien sûr, il peut également y avoir en plus de la puissance réactive qui serait matérialisée par une composante réactive (déphasée d'un quart de période par rapport à la tension) du fondamental du courant, mais elle reste généralement faible dans les appareils domestiques. Aujourd'hui, en milieu domestique, ce sont donc surtout les harmoniques qui sont les principaux contributeurs à l'accroissement de la valeur efficace du courant (et donc de la puissance apparente) et donc à la dégradation du facteur de puissance.

Le **facteur de puissance** s'exprime toujours par : $F_p = \frac{P}{S}$, il est toujours inférieur à 1 **mais il n'est plus égal à $\cos(\varphi)$** .

Note sur une confusion fréquente entre accroissement de la valeur efficace du courant due à la composante réactive du courant et celle dues aux harmoniques. Nécessité de distinguer ces deux causes :

Cette fois la puissance apparente est plus élevée que ce que laissait penser l'expression $S^2 = P^2 + Q^2$, désormais fautive, car il faut lui ajouter une **puissance dite déformante**, et notée **D** (comptée en VAD, volts-ampères déformants), telle que : $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ qui correspond à la part du courant efficace associée aux fameux harmoniques (voir éventuellement plus bas, les détails de calcul dans le formulaire supplémentaire).

Une source importante de confusion est liée au fait que les wattmètres électroniques du commerce (y compris professionnels) affichent la puissance réactive Q (en VAR, voir chapitre 2) calculée à partir de l'expression $S^2 = P^2 + Q^2$ qu'il y ait des harmoniques ou pas. Au-delà de la surestimation de la puissance réactive en présence d'harmoniques, cela est très gênant en ce qui concerne les mécanismes de compensation à mettre en oeuvre, car la (vraie) puissance réactive Q ne se compense pas du tout comme la puissance déformante. En effet, la première peut se compenser avec des condensateurs (lorsque la charge est réactive) et la seconde avec des filtres de suppression des harmoniques. Ces filtres peuvent être passifs ou actifs.

La figure ci-dessous montre une allure typique de courant absorbé par une charge électronique équipée en entrée d'un pont de diodes monophasé associé à un « filtre à capacité en tête » (condensateur branché directement en sortie du pont de diodes). Ici le facteur de puissance est typiquement inférieur à 0,6 et peut descendre, avec des charges de très petite puissance (par exemple en mode veille) à des valeurs de l'ordre de 0,1, voire encore moins, soit (avec $F_p = 0,1$) un courant efficace 10 fois plus grand que la valeur du courant sinusoïdal qui transporterait la même puissance active. Heureusement, cela ne concerne qu'une faible part de la puissance apparente totale actuelle.

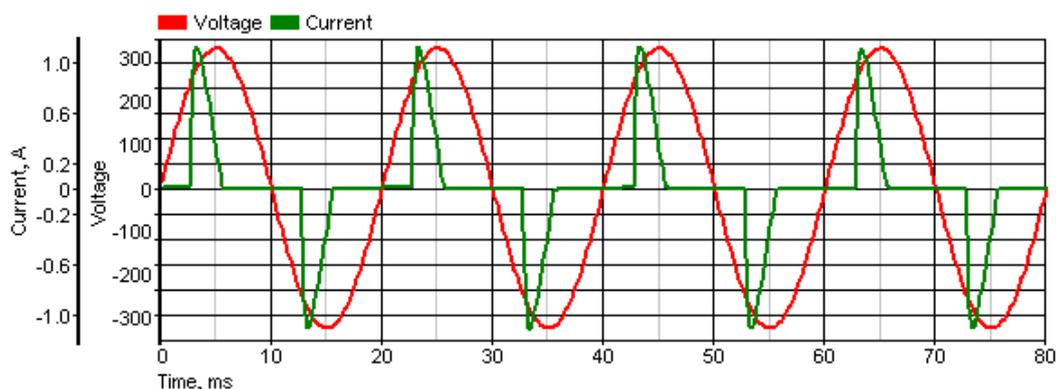


Figure 7 - Formes d'ondes typiques (en rouge la tension, en vert le courant) associées à une charge électronique (source image : <http://sound.whsites.net/lamps/dimmers2.html>)

Par exemple, imaginons un appareil en veille qui consomme 1 W avec un facteur de puissance de 0,1 (valeur plutôt rencontrée pour des puissances plus faibles) sous une tension de 230 V efficaces. D'après les expressions du facteur de puissance et de la puissance apparente, la valeur du courant efficace associé vaudrait : $I_{eff} = \frac{P}{F_p \cdot U} = \frac{1}{0,1 \times 230} = 43$ mA (milliampères).

Avec un abonnement 6 kVA (26 A sous 230 V), il faudrait 600 appareils de ce type (sans aucune autre charge branchée) pour atteindre la limite de la puissance souscrite (une « simple » bouilloire électrique seule consomme entre 1 et 2 kW avec un facteur de puissance de 1, soit 4,3 à 8,6 A).

Une norme (EN 61000-3-2) encadre les rejets d'harmoniques selon les types de charges. Par exemple, les lampes pour l'éclairage sont, en pratique, dispensées de contraintes si elles consomment moins de 25 W, ce qui explique qu'en dehors du domaine professionnel, on ne trouve pas de lampes fluocompactes ou LEDs au-delà de 23 W (pour garder un peu de marge).

La solution technique mise en œuvre pour passer la norme consiste à utiliser un étage correcteur de facteur de puissance (PFC en anglais). Le système typique est constitué d'un convertisseur électronique de puissance à découpage qui asservit le courant à une forme sinusoïdale en phase avec la tension, et tout se passe alors, à peu près, comme si l'appareil était une résistance. Mais un tel dispositif coûte de l'argent, des matières premières et de l'énergie grise qui, d'un point de vue purement environnemental, devraient être amortis par le gain sur les pertes dans les réseaux. Mais il existe également des solutions passives, avec des filtres (à base d'inductances et de condensateurs) un peu moins coûteuses et un peu moins performantes.

Sans jamais avoir mené une telle étude (pas facile à faire d'ailleurs), nous avons quelques doutes sur la rentabilité environnementale de la correction de facteur de puissance (active ou passive) pour les très faibles consommations, notamment dans les modes veille très performants. Cela reste donc à étudier.

**Formulaire et définitions pour aller plus loin (pas indispensable)
en présence de courants non sinusoïdaux**

D'une façon générale, le courant absorbé par la charge peut être représenté de la façon suivante (permettant d'exprimer la consommation de puissance active et réactive et d'harmoniques) :

$$i(t) = I_{1M} \cos(\omega t - \varphi_1) + \sum_{h>1} I_{hM} \cos(h\omega t - \varphi_h)$$

où I_{1M} est l'amplitude de la composante fondamentale du courant (1^{er} harmonique), φ_1 est le déphasage du fondamental par rapport à la tension (s'il est positif, la nature de la charge est inductive et s'il est négatif elle est capacitive) et I_{hM} est l'amplitude des harmoniques de rang h au-delà du fondamental.

On peut également écrire cette expression sous la forme :

$$i(t) = (I_{1M} \cos \varphi_1) \cdot \cos(\omega t) + (I_{1M} \sin \varphi_1) \cdot \sin(\omega t) + \sum_{h>1} I_{hM} \cos(h\omega t - \varphi_h)$$

où :

- $I_{1M} \cos \varphi_1$ est la composante active du fondamental du courant, celle qui correspond à la puissance active (et donc à l'énergie réellement convertie)

- $I_{1M} \sin \varphi_1$ est la composante réactive du fondamental du courant, celle qui correspond à la puissance réactive (et donc à des échanges d'énergie entre la charge et le réseau, dont la valeur moyenne est nulle: pas de consommation d'énergie) et qui peut se compenser par un condensateur (cas d'une charge inductive) ou une inductance (cas d'une charge capacitive).

Les valeurs efficaces correspondantes sont : $I_{1rms} = \frac{I_{1M}}{\sqrt{2}}$ et $I_{hrms} = \frac{I_{hM}}{\sqrt{2}}$ (rms signifie « root mean square », valeur efficace en anglais).

La valeur efficace du courant total vaut : $I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + \sum_{h>1} I_{hrms}^2}$.

La valeur efficace de la tension est toujours notée V , en supposant qu'elle est toujours sinusoïdale (pas trop de déformations dues aux harmoniques de courant et à l'impédance de la source), son expression est inchangée : $V = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$

La **puissance apparente** s'exprime par :

$$S = V \cdot I = V \cdot \sqrt{I_{1rms}^2 + \sum_{h>1} I_{hrms}^2}$$

où I_{1rms} est la valeur efficace du fondamental du courant.

La **puissance active** vaut (moyenne de la puissance instantanée sur une période de la sinusoïde de tension, voir chapitre 2) :

$$P = \frac{1}{T} \oint v \cdot i \cdot dt = V \cdot I_{1rms} \cdot \cos \varphi_1$$

(seule la composante active du fondamental du courant "travaille"), où T est la période du réseau (20 ms à 50 Hz), autrement dit ce que l'on appelle la puissance active est la moyenne de la puissance (fluctuante en alternatif) sur une période.

L'énergie convertie (en joules) durant l'intervalle $[t_1, t_2]$ vaut : $E = \int_{t_1}^{t_2} P \cdot dt$

(L'énergie électrique est généralement comptée en kWh : 1 kWh = 3,6 MJ, 1 MJ = 1 million de joules)

La **puissance réactive** (compensable par une charge réactive de nature opposée) vaut :

$$Q = V \cdot I_{\text{rms}} \cdot \sin \varphi_1$$

Et, dans le cas où le courant est déformé et comprend donc des harmoniques, on ne peut plus écrire la puissance apparente avec l'équation : $S^2 = P^2 + Q^2$ mais désormais :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Où D est la **puissance déformante** calculée par :

$$D = V \cdot \sqrt{\sum_{h>1} I_{\text{heff}}^2}$$

Le facteur de puissance reste égale au rapport P sur S, qu'il y ait des harmoniques ou pas (dans le cas où le courant n'est pas déformé, le facteur de puissance est égal au $\cos \varphi$) :

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

Le **facteur de puissance** peut également s'exprimer de la façon suivante :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V \cdot I_{\text{rms}} \cdot \cos \varphi_1}{V \cdot I_{\text{rms}}} = \frac{I_{\text{rms}} \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{I_{\text{rms}}^2 + \sum_{h>1} I_{\text{hrms}}^2}}$$

Ce que mesurent les wattmètres électroniques :

La puissance active correspond bien à $P = \frac{1}{T} \oint v \cdot i \cdot dt = V \cdot I_{\text{rms}} \cdot \cos \varphi_1$

Mais la puissance réactive est calculée comme s'il n'y avait pas d'harmoniques en effectuant le calcul suivant : $Q_{\text{mesurée}} = \sqrt{S^2 - P^2}$ alors que Q vaut en réalité : $Q = \sqrt{S^2 - P^2 - D^2}$

Cette mesure surévalue donc la puissance réactive mais surtout elle fait complètement oublier le rôle des harmoniques, prépondérants dans la plupart de nos alimentations électroniques et le fait qu'on ne peut pas du tout les compenser comme la puissance réactive (avec des condensateurs si la charge est inductive).

----- Fin des compléments non indispensables à la compréhension du document -----

04. Quelques remarques en relation avec la prolifération des charges électroniques et de leur très faible facteur de puissance en mode veille

Les appareils électroniques (qualifiés précédemment de charges électroniques) sont connectés au secteur à travers **une alimentation électronique** qui permet de convertir la tension alternative sinusoïdale du réseau en une tension souvent continue et généralement basse (pour les petites puissances). Cette « alimentation électronique » est constituée de dispositifs électroniques de puissance. Dans la plupart des cas, cette alimentation comprend un étage d'entrée à redresseur à diodes (pour transformer économiquement la tension alternative en une tension redressée, toujours du même signe) et un filtre à capacité en tête (un condensateur de filtrage pour que la tension soit plus proche du continu et qu'elle soit exploitable pour l'étage de conversion suivant, généralement une alimentation à découpage avec un transformateur haute fréquence, beaucoup plus petit et plus léger que ce que le transformateur électromagnétique 50 Hz que l'on avait autrefois).

Avec ce type d'alimentation, plus on réduit la consommation des étages situés en aval par rapport à la puissance en fonctionnement normal, c'est notamment le cas en mode veille, plus le facteur de puissance (côté réseau) se dégrade. Mais il est important de noter que, si l'on diminue la puissance active consommée en mode veille, la valeur efficace du courant diminue malgré tout. Mais cette diminution est juste moins rapide que celle de la puissance active. Ainsi, la diminution des consommations de veille s'accompagne également d'un effet vertueux sur la valeur du courant efficace qui diminue bien, même si sa forme est plus distordue (plus mauvais facteur de puissance).

Pour illustrer ce propos considérons un exemple, totalement théorique, d'un abonné au réseau avec un contrat 6 kVA (26 A efficaces) et qui utiliserait simultanément déjà 5 kW de charges purement résistives (par exemple, une bouilloire de 1 kW, un four électrique de 2 kW, et un lave-linge, en phase de chauffe, appelant également 2 kW), soit une puissance active totale de 5 kW, laissant d'ailleurs 1 kW de marge, avec d'autres charges purement résistives avant disjonction.

La question posée est : combien de petits appareils électroniques consommant 1 W avec un facteur de puissance F_p de 0,1 (avec les mêmes formes d'onde, c'est-à-dire les mêmes harmoniques, ce qui permet d'avoir le même facteur de puissance global pour l'ensemble de ces petits appareils) conduiraient à atteindre la limite de l'abonnement $S_{ab} = 6$ kVA dans un contexte où le client consommerait déjà 5 kW de puissance active bien « propre », donc avec un facteur de puissance égal à 1 (sans réactif et sans harmoniques) ?

Notons N le nombre d'appareils, P_e leur puissance active totale (égale à $N \times 1$ W), S_e leur puissance apparente totale (comme $F_p = 0,1$: $S_e = 10 \cdot P_e$). Leur puissance déformante totale D_e est égale à : $\sqrt{S_e^2 - P_e^2} = \sqrt{100 \cdot P_e^2 - P_e^2} = \sqrt{99} \cdot P_e \cong 10 \cdot P_e$.

Cela conduit à : $\sqrt{P_e^2 + D_e^2} \leq S_{ab}$ (Puissance abonnement) soit : $\sqrt{5000^2 + 99 \cdot P_e^2} \leq 6000$ VA, d'où $\sqrt{99} \cdot P_e \leq \sqrt{6000^2 - 5000^2} \cong 3316$ donc : $P_e \leq 333$ W, c'est-à-dire 333 appareils identiques consommant 1 W chacun avec un facteur de puissance de 0,1. Si ce facteur de puissance avait été égal à 1, ce sont 1000 appareils consommant 1 W qui auraient permis d'atteindre la limite de disjonction.

Actuellement, il nous semble peu probable que le mauvais facteur de puissance des petits appareils électroniques (dont les lampes fluocompactes et à LEDs) soit responsable du déclenchement des disjoncteurs par dépassement de la puissance souscrite, d'autant que les appareils électroniques puissants (plaques à induction par exemple) sont contraints par des normes plus sévères en matières d'harmoniques. Mais si la prolifération des charges électroniques à basse consommation devenait telle que la puissance déformante D venait à prendre des proportions importantes devant la puissance active totale (toutes charges

confondues) et à peser significativement sur la puissance apparente limite (puissance souscrite par abonnement) et/ou sur les pertes par effet Joule dans les lignes et le système électrique, il serait toujours possible de les compenser de façon centralisée par une technologie déjà disponible. Cette technologie est appelée **filtre actif** et permet de rendre le courant total sinusoïdal et en phase avec la tension en compensant les harmoniques et/ou la puissance réactive et en permettant au facteur de puissance résultant d'atteindre sa valeur minimale et idéal de 1.

Intérêt de l'interrupteur physique :

Toutefois, d'un point de vue environnemental et économique, la meilleure des solutions pour lutter contre les effets néfastes des veilles consiste à utiliser un véritable interrupteur (coupe-veille) pour déconnecter totalement la charge du réseau, du moins pour les appareils n'ayant pas besoin de rester alimentés.

A noter également que l'interrupteur coupe-veille (souvent centralisé pour plusieurs appareils) permet de prolonger la durée de vie des appareils concernés et de réduire les risques d'incendie. En effet, les appareils électroniques, continûment sous tension, subissent des contraintes importantes et leur vieillissement (notamment celui des condensateurs) se trouve accéléré, ce qui conduit parfois à des défaillances entraînant des incendies (phénomène bien connu des assureurs).