

La «phase cachée» de la mesure de puissance

Avec l'augmentation de la pollution électrique et la maîtrise, au plus fin, du coût de l'énergie, se développe une nouvelle approche de la mesure de puissance. Répondant aux nouvelles données de l'environnement électrique, de nouveaux besoins de mesure émergent. Concrètement, ils se traduisent par l'apparition de boutons supplémentaires sur de nombreux d'instruments. Trop souvent difficiles à mettre en œuvre, mal appréhendées, voire méconnues, ces nouvelles possibilités de mesure sont sous-exploitées.

Pourtant, permettre l'accès simple aux fonctions évoluées n'est pas un vœu pieux. Un appareil actuel, intelligemment conçu, offre déjà cet atout ! Alors, aujourd'hui la question se pose : les utilisateurs peuvent-ils encore ignorer les moyens de résoudre leurs besoins naissants ?

Pour aborder le marché de la mesure de puissance et d'analyse d'énergie, il est avant tout nécessaire de connaître les utilisateurs de ces appareils de mesure. Une première approche pourrait nous permettre de distinguer quatre groupes d'intéressés :

- Les artisans et petits installateurs (entreprises de moins de 50 personnes).
- Les entreprises abonnées au tarif vert A (généralement, moins de 500 personnes).
- Les sociétés de contrôle, les moyens et gros installateurs, la SNCF, les CPAM, les hôpitaux, les services techniques municipaux,...
- L'EDF, les services «maintenance électrique» des sociétés de plus de 500 personnes (tarif vert B ou C) et les services «énergie» des sociétés de plus de 1000 personnes, ainsi que les sociétés consommatrices d'énergie ayant un processus continu (chimie, verre...).

Les produits

Indépendamment de cette demande, l'offre-produit actuelle en matière de mesure de puissance et d'analyse d'énergie, peut se décomposer en quatre rubriques différentes :

- Les appareils de diagnostic monphasé.
- Les appareils simplifiés de terrain, pour l'analyse de premier niveau, sur réseau monphasé ou triphasé équilibré.
- Les appareils de terrain complets, assurant l'enregistrement et l'analyse en triphasé, équilibré ou non.
- Les appareils complexes d'analyse de haut niveau.

Ainsi, en ce qui concerne notre société, les wattmètres C.A 404 et CDA 791 (photo 1) se situent dans le premier groupe, les wattmètres C.A 8210, C.A 405 et CDA 778N, ainsi que les pinces wattmétriques F23 et F27 (photo 2) sont regroupés dans le deuxième, tandis que l'analyseur d'énergie C.A 8310 (photo 3) s'insère dans le troisième groupe, celui des appareils complets «de terrain».



Photo 1 : Wattmètres «monophasé»

Service-lecteur n°4



Photo 2 : Wattmètres et pinces wattmétriques «mono-triphasé équilibré»

Service-lecteur n°5



Photo 3 : Analyseur de puissance «mono-triphasé 3-4 fils équilibré ou non»

Service-lecteur n°6

Pas de potion miracle

Aucun produit, si étudié soit-il, ne peut satisfaire tous les utilisateurs à la fois. Chaque type d'utilisateurs a ses propres critères d'achat. A titre d'exemple, les avantages attendus par un artisan sont, prioritairement, l'ergonomie, la simplicité d'utilisation et le prix. Tandis que pour un gros installateur, les critères principaux seraient plutôt le nombre de fonctions, la présence d'un affichage graphique, la capacité mémoire, les possibilités de sortie série ou parallèle et la disponibilité d'un logiciel d'analyse. Si la réponse technique apportée par le produit correspond bien aux critères spécifiques de l'utilisateur, il y a accord, le plus souvent matérialisé par un acte d'achat, à la satisfaction des deux parties.

La naissance de nouveaux besoins

Associées à la veille technologique, les relations permanentes entretenues par un fabricant avec les utilisateurs, permettent d'affiner au quotidien les besoins de mesure et de faire émerger ceux de demain. Ainsi influent sur l'évolution des instruments de mesure, les diverses mutations actuelles de l'environnement électrique, que sont le coût réel de l'énergie, l'accroissements des perturbations, l'adoption obligatoire de nouvelles normes, l'apparition de nouvelles technologies, la disponibilité de nouveaux composants, etc. Sans oublier un élément fondamental : le prix.

Cette volonté de coller aux réalités de mesure «sur le terrain» permet d'établir, au plus juste, les cahiers des charges des futurs appareils. Ainsi, 1998 voit la naissance d'un nouvel analyseur d'énergie : le C.A 8310, toujours plus performant, encore mieux adapté aux campagnes de mesures sur site et privilégiant une approche intuitive des fonctions les plus complexes.

Exemple type de l'appareil pensé par l'utilisateur, l'analyseur d'énergie C.A 8310 assure, le plus simplement du monde, les fonctions de base, mais aussi et surtout les plus modernes :

Mesure de puissance sous tous les angles

- vérification de la charge des circuits d'alimentation
- déséquilibre des phases
- énergie réactive

Mesure et l'enregistrement de la qualité du réseau

- fluctuations
- harmoniques
- coupures

Comptage d'énergie

- répartition des coûts entre consommateurs
- étude du coût de l'électricité dans une fabrication
- rendement des génératrices (groupes ou cogénérations)

Compréhension des phénomènes

- visualisation des formes d'ondes sur PC
- calculs FFT 3U/3I temps réel sur PC
- affichage graphique

Dépannage

- coupures avec min/max
- THD en tension et courant
- déséquilibre

Conseil et sous-traitance

- impression des valeurs sur le site même
- gammes de mesure suffisamment larges
- boîtier robuste pour le transport et sacoche pour accessoires



Maîtriser la technique, certes ! Mais bien connaître ses clients : une expérience indispensable.

Service-lecteur n°6

Le coût d'un appareil

Un instrument de mesure intelligent est un produit qui ne coûte rien ! Entendez par là que l'appareil doit non seulement être pensé pour répondre à des besoins de mesure précis, mais aussi qu'il doit contribuer à faire réaliser des économies à son utilisateur. Et en matière de puissance, il suffit de se pencher sur le coût de l'énergie pour se rendre compte qu'il y a matière à de sérieuses réductions de dépenses. En fait, un instrument de mesure bien adapté s'auto-amortit par les économies qu'il engendre. Parce que, d'origine, il aura été pensé avec l'utilisateur, il sera réellement et efficacement exploité. Au final, il ne s'agit plus de retour sur investissement, mais d'une manne créant richesse.

L'énergie à la carte

Dans le prix d'un contrat passé avec l'EDF, on distingue deux composantes. D'une part, le coût fixe «abonnement», lié aux installations à mettre en œuvre pour produire et acheminer la puissance chez le client. D'autre part, le coût variable «consommation», directement lié à l'exploitation de l'énergie.

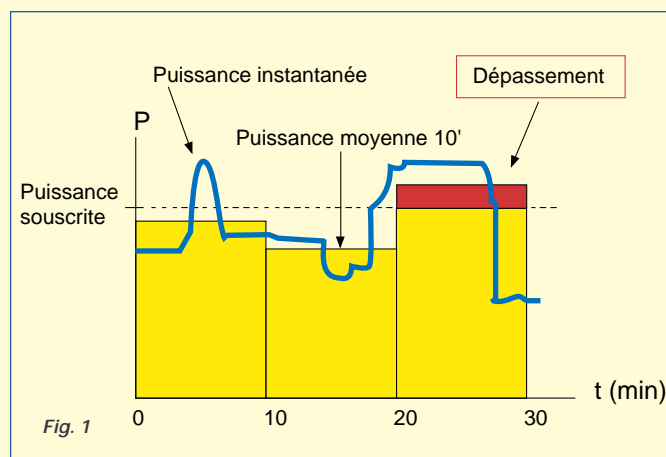
Avant de souscrire un contrat, le client doit connaître la puissance dont il aura besoin. On parle alors de puissance souscrite.

Le fait de souscrire cette puissance engage le client à ne pas la dépasser. Dans le cas inverse, il devra payer un surcoût appelé pénalité de dépassement. Ainsi, pour facturer l'énergie, les compagnies d'électricité tiennent compte non seulement d'un coût d'abonnement, mais aussi du coût des consommations «extraordinaires» liées aux appels ponctuels de puissance.

Rappel. L'énergie (E) est égale au produit de la puissance (P) par le temps (t), d'où la formule $E = P \times t$.

Notez que l'unité d'énergie s'exprime bien en kWh et non en kW/h, comme on le voit trop souvent, par erreur.

La mesure de la puissance appelée par le client est moyennée sur une période de 5, 10 ou 15 minutes, selon le pays. En France, la puissance moyenne est calculée par le fournisseur national EDF sur une base de 10 minutes rondes. Un dépassement se produit lorsque la valeur moyenne de la puissance, sur la période donnée, est supérieure à la puissance souscrite. Par conséquent, il n'y a pas de dépassement quand il s'agit d'un simple pic de puissance, c'est-à-dire, si la puissance instantanée monte au-dessus de la puissance souscrite pour retomber immédiatement (voir figure 1).



Pour le client, il est intéressant de surveiller dans le temps sa capacité à respecter le contrat souscrit. Il lui suffit d'enregistrer sur une journée (par exemple) le profil de sa consommation, en synchronisation avec le système de comptage de son fournisseur d'énergie (top 10 minutes en France). En répétant les mesures et en analysant les résultats, se posera la question des possibilités de délestage de l'installation lors des éventuels dépassements (coupure temporaire

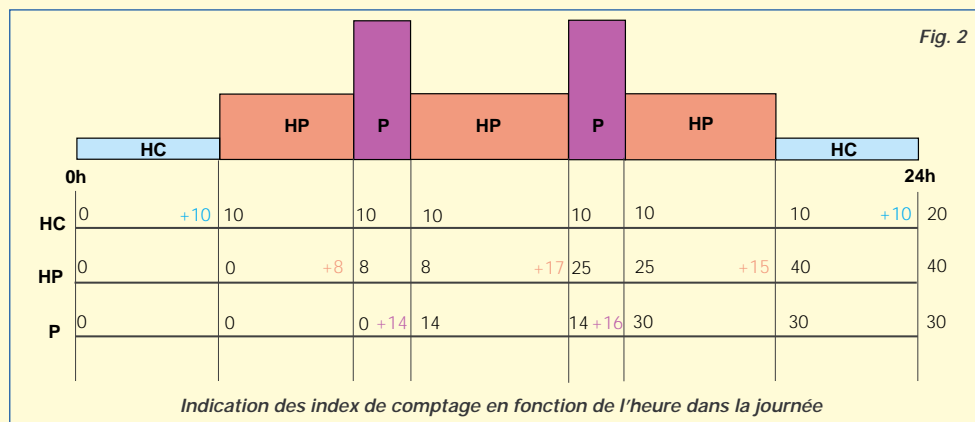
des radiateurs électriques par exemple). Au final, on choisira d'augmenter la valeur de son contrat ou d'accepter de se voir facturer quelques dépassements, sans doute moins onéreux qu'un contrat de puissance souscrite supérieure. Les besoins en énergie évoluant constamment (accroissement de la production, changement des machines, vieillissement des installations, etc.), cette surveillance s'exerce dans le temps, au fil des ans, des mois et même des semaines dans les cas les plus critiques. Il s'agit là d'une mesure d'économie qui nécessite vigilance.

L'énergie plus ou moins chère

EDF a mis au point divers contrats d'abonnement, offrant une tarification différente de l'électricité en fonction du moment : heure pleine/creuse, pointe fixe, jour de semaine/week-end, été/hiver, etc. Ceci permet au fournisseur d'énergie de mieux maîtriser ses capacités et d'optimiser ses équipements en régulant au mieux les flux de fourniture d'électricité.

A l'aide d'un instrument adapté, le consommateur cherchera à savoir s'il n'a pas intérêt à organiser sa production en évitant, par exemple, de faire fonctionner telle machine très consommatrice pendant les heures «les plus chères», ou encore, à préchauffer un four la nuit du dimanche au lundi pendant les heures «les moins chères», pour éviter son allumage aux heures de pointe du lundi matin (ce qui pourra du même coup éviter le fatigant dépassement de consommation du lundi matin).

Ainsi, pour une étude de coût, il est particulièrement intéressant de pouvoir



analyser sa consommation d'énergie en fonction des différentes périodes tarifaires. Pour cela, il faut pouvoir programmer des plages horaires commandant l'utilisation de registres de comptage particuliers. Bref, de reproduire le système de comptage pour obtenir le détail de la consommation, par exemple, sur une journée découpée en 7 bandes horaires et comportant trois modes de tarifications différents : heures creuses, pleines et pointes (fig. 2).

Un mauvais cos φ : ça coûte !

Le déphasage (φ) entre la tension (U) et le courant (I) est un problème commun à tout le monde industriel. Chacun sait que pour fonctionner, un moteur a besoin d'énergie active (avec $P = U \times I \times \cos \varphi$) et d'énergie réactive (avec $Q = U \times I \times \sin \varphi$). L'énergie active (Wh) est transformée en énergie mécanique (rotation du moteur), tandis que l'énergie réactive (varh) est utilisée pour sa magnétisation. Selon les caractéristiques des appareils électriques et la manière dont ils sont utilisés, le $\cos \varphi$ d'une installation, encore appelé facteur de puissance, peut être très variable.

Appareil		cos φ	tan φ	Observations
• 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 • Lampes à fluorescence • Lampes à décharge		≈ 1	≈ 0	Ces lampes sont généralement compensées dès l'origine. Le cos φ est alors satisfaisant.
		≈ 0,5	≈ 1,73	
		0,4 à 0,6	≈ 2,29 à 1,33	
• Fours à résistances		≈ 1	≈ 0	Sauf si le réglage est assuré par gradateur à thyristors.
• Four à induction • Four à chauffage diélectrique		≈ 0,85	≈ 0,62	Cette valeur suppose une compensation par condensateurs prévus par le constructeur.
		≈ 0,85	≈ 0,62	
• Machines à souder à résistance • Postes statiques monophasés de soudage à l'arc • Groupes rotatifs de soudage à l'arc • Transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc		0,8 à 0,9	0,75 à 0,48	Sauf si la compensation a été prévue par le constructeur.
		≈ 0,5	≈ 1,73	
		0,7 à 0,9	1,20 à 0,48	
		0,7 à 0,8	1,02 à 0,75	
• Fours à arc		0,8	0,75	Sauf pour les fours UPH (cos φ = 0,7).
• Chaudières à thermoplongeurs, fils nus résistants et à haut flux • Chaudière à induction GTI • Autre type de chaudière à induction (N.R.I.) • Chaudières à électrodes plongeantes, immergées et à jets multiples		≈ 1	≈ 0	Sauf si la régulation est assurée par des thyristors fonctionnant à angle de phase ; les thyristors à trains d'onde ne modifiant pas le facteur de puissance. Compte tenu de la régulation assurée par thyristors à trains d'onde. Cette valeur suppose une compensation par condensateurs prévue par le constructeur.
		≈ 1	≈ 0	
		0,93	0,40	
		≈ 1	≈ 0	

Exemple de facteurs de puissance d'appareils courants (source EDF)

Seule certitude : quel que soit le tarif souscrit, vert, jaune ou bleu (selon la taille de l'exploitation), un mauvais $\cos \varphi$ se paie toujours !

■ Tarif vert

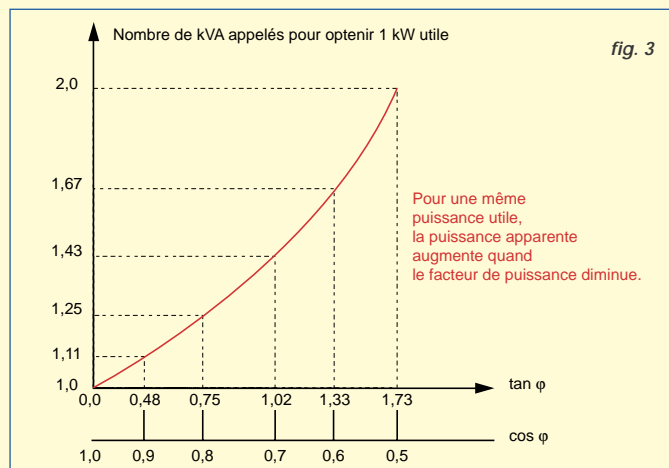
Le producteur d'électricité fournit gracieusement l'énergie réactive au point de livraison. Toutefois, si la consommation devient trop élevée, ses réseaux deviennent surchargés. Cet accroissement peut mettre en péril la stabilité du réseau par un travail à la limite de la puissance transmissible. Ce risque se traduit par des phénomènes dits d'écroulement de la tension. C'est pourquoi, pendant l'hiver tarifaire et à certaines heures (en fait, durant les périodes de plus forte sollicitation), quand la consommation d'énergie réactive dépasse une limite fixée, depuis le 1^{er} novembre 1987, à 40% de l'énergie active (soit $\tan \varphi = 0,4$), celle-ci est facturée au consommateur.

Nota : en puissance électrique, on parle volontiers de $\cos \varphi$ alors qu'en énergie on utilise plus couramment $\tan \varphi$. Cela tient essentiellement au fait que le quotient de l'énergie réactive sur l'énergie active (correspondant à $\tan \varphi$) est celui qui se calcule le plus facilement à partir des indications relevées sur les compteurs d'énergie. De fait, pour l'EDF, $\tan \varphi$ est l'indicateur de consommation d'énergie réactive.

Pour passer de $\cos \varphi$ à $\tan \varphi$ et vice versa, on applique la formule mathématique $\cos^2 \varphi = 1 / (1 + \tan^2 \varphi)$.

■ Tarif jaune / bleu

Si la facturation de l'énergie réactive n'est pas explicitement mise en évidence en tarification jaune ou bleue, elle est néanmoins prise en compte dans le contrat. En effet, la prime fixe de la souscription, qui s'exprime en kVA et non en kW, sera d'autant plus forte que le $\cos \varphi$ sera mauvais. La courbe ci-dessous (fig. 3) montre que pour aboutir au même travail utile, il faudra appeler sur le réseau une puissance d'autant plus importante que le facteur de puissance est faible.



Un bon $\cos \varphi$: ça rapporte !

Prenons l'exemple d'un atelier de PME (tarif jaune) utilisant de gros moteurs, des postes de soudure à l'arc et de surcroît, éclairé par des dispositifs à tubes fluorescents (tous ces équipements sont connus pour être particulièrement gourmands en énergie réactive).

Supposons que la puissance souscrite pour subvenir aux besoins de cette entreprise, soit de 102 kVA. Sans précaution particulière au niveau de l'installation, il se pourrait que l'on relève un $\cos \varphi$ déplorable de 0,54 par exemple. Dans un tel cas, la puissance active effectivement disponible serait de fait réduite à $102 \times 0,54 = 55$ kW.

Si le client décidait d'intervenir sur son installation pour ramener son $\cos \varphi$ à une valeur beaucoup plus raisonnable de 0,93 (correspondant à $\tan \varphi = 0,4$), la puis-

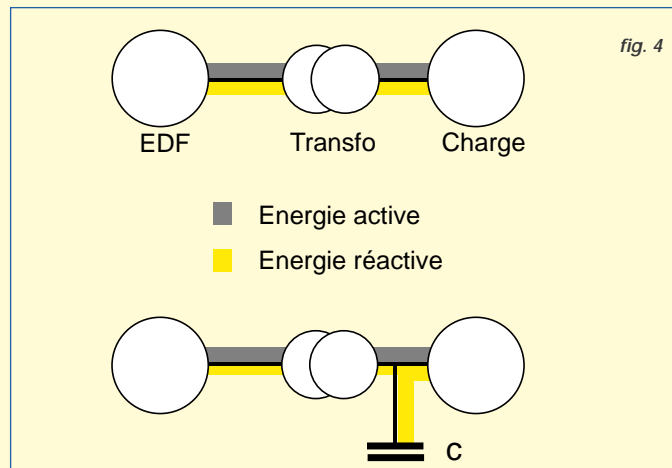
sance souscrite pourrait alors être abaissée à $55 / 0,93 = 60$ kVA. Soit un gain de 42 kVA, offrant un intérêt économique certain sur la partie fixe de l'abonnement passé avec la compagnie d'électricité, qui se traduira par une nette diminution du prix du contrat.

Et à supposer que le facteur de puissance ait été corrigé avant d'atteindre tel niveau, il n'y aurait pas eu surcharge de l'installation, ni nécessité aussi impérieuse qu'onéreuse de surdimensionner les conducteurs électriques (jeux de barres, etc.), les systèmes de protection (disjoncteur) et bien sûr le transformateur lui-même.

Concrètement, le retour sur investissement s'effectue au delà de 200 kVA. D'où l'intérêt de disposer d'un bon appareil pour contrôler et « chouchouter » son $\cos \varphi$.

Comment améliorer son $\cos \varphi$?

Comme on l'a vu précédemment, un bon $\cos \varphi$ contribue à réduire la facture, tant au niveau de la consommation et du contrat que du dimensionnement de ses équipements. Il est donc important de surveiller et de réguler son $\cos \varphi$. Dans la mesure du possible, on agira sur l'origine du problème. Optimiser, par exemple, le fonctionnement des moteurs (pas de marche à vide ou à faible charge, responsable d'une consommation importante d'énergie réactive). Comment ? En adoptant des équipements de commande automatisés propres à chaque machine et en privilégiant le couplage étoile. Toutefois, aussi intéressantes que soient ces mesures, elles sont rarement suffisantes, quand elles ne sont pas tout simplement impossibles. L'amélioration du $\cos \varphi$ doit alors passer par l'installation d'un dispositif de compensation de l'énergie réactive selfique. De façon autonome et localement (au plus près possible de la charge), de l'énergie réactive capacitive peut être générée en suffisance, grâce à une ou plusieurs batteries de condensateurs (fig. 4). Ce moyen constitue la solution la plus efficace et la plus répandue. Si l'installation comporte des générateurs d'harmoniques, une attention toute particulière devra être portée sur le risque de perturbation lié à la puissance et à l'emplacement de ces condensateurs.



Nota : visant l'objectif d'une réduction du montant de la facture, nombre d'entreprises se sont aussi équipées de groupes électrogènes venant suppléer à la fourniture d'électricité de façon ponctuelle. Cette relève évite les inévitables dépassements en période de coupure EJP (Effacement Jour de Pointe).

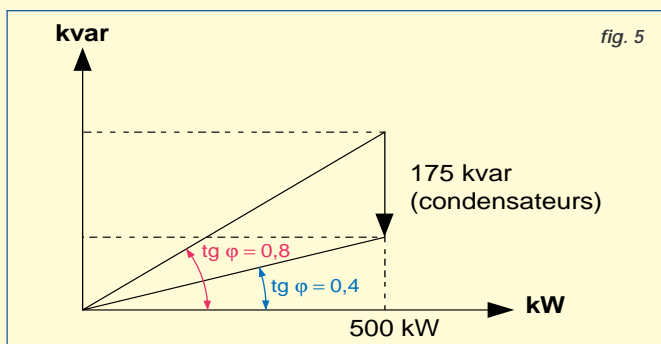
Calcul des condensateurs

Pour le calcul des condensateurs de rephasage à installer (on parle aussi de calcul du PFC, en anglais Power Factor Correction, ou encore compensation du déphasage), il est nécessaire de connaître la puissance active (P) et le $\cos \varphi$ de l'appareil ou du groupe d'appareils.

Prenons l'exemple d'une installation consommant 500 kW, avec un $\cos \varphi$ de 0,8 (correspondant à $\tan \varphi = 0,75$). Si l'on se fixe pour objectif d'obtenir

un nouveau déphasage correspondant à $\tan \varphi' = 0,4$ (voir plus haut, l'intérêt de choisir cette valeur), il sera nécessaire d'installer des batteries de condensateurs d'une puissance (Q_c) égale à :

$$Q_c = P \times (\tan \varphi - \tan \varphi') = 500 \times (0,75 - 0,4) = 175 \text{ kvar.}$$



A noter qu'en comptage Basse Tension, en aval d'un transformateur, EDF tient compte des pertes fer du transformateur. Cela se fait par l'ajout d'une marge 0,09 à $\tan \varphi$. Ainsi, dans le cas précédent, nous aurions dû nous fixer pour objectif de tenir, non pas $\tan \varphi' = 0,4$ mais $\tan \varphi' = 0,31$.

Dans la pratique, on détermine dans un premier temps la valeur globale de la puissance réactive à générer, pour aboutir à une bonne compensation des appels de réactif de l'ensemble de l'installation. Pour cela, on effectue des relevés de mesures sur plusieurs mois consécutifs de l'hiver tarifaire, en veillant à s'affranchir des résultats non représentatifs (liés, par exemple, à une exploitation inhabituelle de l'exploitation ou correspondant à une période de congé). Puis on cherche la meilleure répartition possible des condensateurs en fonction des facteurs de puissance des divers appareils et toujours au plus près de l'utilisation finale. L'utilisation de gradins à déclenchement automatisé en fonction des appels de réactif (systèmes à relais varométriques, etc.) est bien sûr largement recommandée. Se pose alors la question du rapport du coût de la compensation sur le gain attendu.

Devinette : Si Pierre annonce «c'est le DPF qui ...», alors que Paul pense plutôt au $\cos \varphi$, tandis que Jacques soutient qu'il s'agit du Facteur de puissance et qu'au contraire monsieur Dupont est certain que la faute en revient au PF, qu'en pense monsieur Durand ?

Solution : Monsieur Durand, fidèle lecteur de Contact Actualités Mesures, sait que ses collègues pensent sans doute à la même chose, pour peu que les signaux soient purs. Mais qu'en présence d'harmoniques, seul le DPF (Displacement Power Factor) reflétera au plus juste la réalité.

Harmoniques et Facteur de Puissance

En présence d'harmoniques (onduleurs, fours à arc, appareils à vitesse variable, ...), il faut être très prudent sur la valeur du facteur de puissance. Celui-ci, dit Power Factor en anglais, est défini comme suit :

$$PF = \text{puissance active} / \text{puissance apparente,}$$

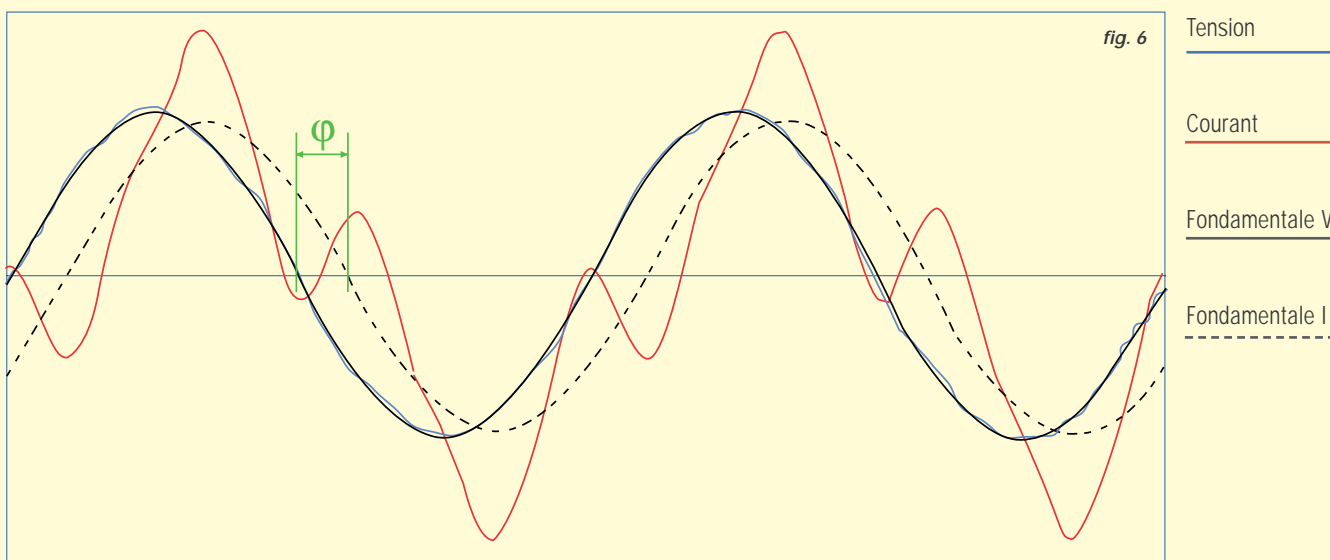
et équivaut donc au $\cos \varphi$ dans le cas de signaux sinusoïdaux. En effet, les harmoniques sont réputées influencer négativement la valeur du facteur de puissance. C'est pourquoi les bons instruments mesurent le DPF, en anglais le Displacement Power Factor (facteur de déplacement de puissance).

Le DPF est égal au facteur de puissance PF uniquement pour les signaux non déformés. En d'autres termes, le DPF représente le cosinus du déphasage entre les fondamentales de la tension et du courant. C'est donc la véritable représentation du déphasage entre U et I (fig. 6).

En comptage d'énergie réactive, le calcul n'étant pas réalisé sur les harmoniques, le DPF est la seule valeur à prendre en compte pour le calcul des condensateurs de compensation. L'exemple ci-dessous illustre cette règle. Prenons le cas concret d'une installation dont on relève les valeurs suivantes :
 U = 400 V avec de très faibles harmoniques (de l'ordre du pour-cent)
 I = 150 A avec de faibles harmoniques (de quelques pour-cent) et deux rangs harmoniques plus élevés (H3 = 50% et H5 = 15%).

Avec un déphasage du courant sur la tension de $\varphi = 35^\circ$, il en ressort que le facteur de puissance vaut 0,72 alors que le DPF vaut 0,82.

Cet écart de 0,1 entre le DPF et le facteur de puissance aura des conséquences non négligeables sur le calcul des condensateurs.



Comme toute entité vivante, l'entreprise a besoin d'énergie. Au fil de son développement et de son évolution, ses consommations électriques vont fluctuer. Les équipements vieillissant devront aussi être remplacés dans les meilleures conditions. Des mesures de puissance répétées seront donc nécessaires pour toujours s'adapter aux nouvelles conditions. Le choix de l'appareil de mesure doit être un acte mûrement réfléchi. Pour assurer la meilleure rentabilité de cet investissement, Chauvin Arnoux calque ses produits sur les tarifs de l'électricité. Et parce qu'il n'y a rien de pire qu'un instrument de mesure qui reste enfermé dans un placard, Chauvin Arnoux cultive l'approche «astuce» en privilégiant le concept de l'intuitif. Ainsi, même les fonctions évoluées, ou d'apparences compliquées, deviennent facilement accessibles et sont efficacement utilisées. Tout l'intérêt de l'intégration de technologies sophistiquées et de cette constante approche «terrain» est d'offrir à l'utilisateur un appareil simple d'utilisation, collant à son besoin.