

Suivi électrique temps réel en salle machine à la mode "open source"

Édouard Gaulué

Résumé

Cette présentation est avant tout un « proof of concept ». Elle montre qu'avec des pinces ampèremétriques, une carte d'acquisition et un peu de calcul, il est possible d'avoir un système souple et paramétrable permettant de suivre tension, intensité et puissance sur des départs électriques vers une salle machine, et ceci de façon suffisamment précise pour répondre à nombre d'applications.

Mots clefs

Salle-machine développement durable qualité énergie

1 Introduction

Suite à la mise en service d'un nouveau bâtiment (en 1997), le service informatique observait des instabilités dans l'alimentation électrique de sa salle machine qui pouvaient conduire jusqu'à la disjonction de certains départs. L'alimentation électrique dépendant du service "immobilier", il s'en suivait des discussions difficiles, les uns accusant les autres d'être à l'origine des problèmes. De là est venue l'idée de mettre en place un système de suivi quasi temps réel des départs électriques vers la salle machine afin de mieux identifier les causes des disjonctions. Les grands acteurs de l'électricité (Legrand, Siemens) proposent déjà des solutions techniques, mais elles sont fort onéreuses et peu souples (travaux lourds et pas d'interrogation à distance possible). Nous avons donc cherché une solution moins élégante, certainement moins précise, mais plus en ligne avec notre demande et notre budget.

2 Généralité et hypothèses théoriques

2.1 À propos des alimentations des équipements informatiques

La grande majorité des équipements informatiques fonctionne en courant continu. Le rôle de l'alimentation est donc de redresser le courant puis de le filtrer pour fournir des alimentations régulées. Les techniques pour y parvenir sont nombreuses, mais elles n'ont pas toutes la même incidence sur le réseau. Par exemple, les petits transformateurs que nous connaissons tous sont assez perturbateurs (et en plus assez peu efficace), pour autant ils ne peuvent débiter que quelques Watts et ont donc une incidence finalement faible sur le réseau (sauf à en brancher plusieurs sur un même départ). A contrario, la consommation d'un serveur est plutôt élevée, ce qui impose l'utilisation d'alimentation plus sophistiquée (alimentation à découpage, voire alimentation à topologie résonnante) sans quoi le réseau n'en tolérerait qu'un ou deux sur une même prise. Au plus l'alimentation est de qualité, au plus sa trace s'apparente à une résistance parfaite.

Malheureusement, encore aujourd'hui, les alimentations sont loin d'être idéales et qui plus est, nos salles machines sont pleines de matériel plutôt hétéroclite : vieilles machines à alimentation linéaire, machines plus récentes à découpage, petits switchs/modem/kvm, robot de bandes ou de DVD avec des moteurs mécaniques, écran LCD/CRT... Aussi, la mesure d'une prise reste très instructive sur la qualité des alimentations qui y sont raccordées. Enfin, quand plus de 20 % de votre énergie circule dans des courants harmoniques, il ne faut pas s'étonner si les différentiels des disjoncteurs classiques se déclenchent inopinément.

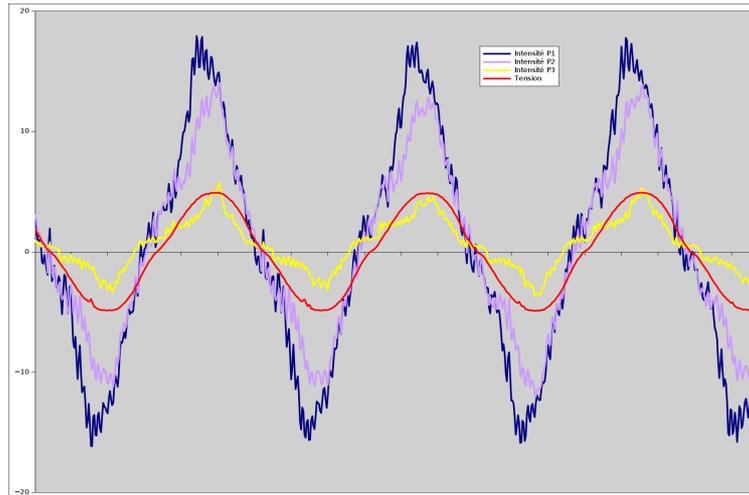


Figure 1 - Un exemple de charge réelle dans des prises par rapport à la tension (en rouge)

2.2 À propos des tensions, intensités et puissances

Dans notre cas, l'alimentation de notre salle blanche est raccordée à un onduleur dont l'objectif est de fournir une tension la plus proche possible de la tension idéale que l'on peut exprimer ainsi (pour du 220 V à 50 Hz):

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t)$$

Nous avons ensuite fait l'hypothèse que compte tenu de son prix et de celui des révisions annuelles, notre onduleur remplissait sa mission. Nous avons validé cette proposition en analysant son signal sur un oscilloscope.

Par contre, pour ce qui est du courant, on est bien loin d'un signal parfait, puisqu'il est perturbé par tous les équipements présents sur la ligne (cf. Figure 1). Les principaux effets des perturbations sont du déphasage entre U et I et une transmission de l'énergie aux autres harmoniques (100 Hz, 150 Hz, 200 Hz...) qui se caractérise par une déformation du signal.

Aussi, pour calculer l'intensité efficace, nous avons retenu cette définition :

$$i(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt}$$

De même, pour le calcul de la puissance active nous avons retenu cette formule :

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cdot u(t) dt$$

2.3 Choix pour le calcul intégral

Il existe diverses méthodes de calcul intégral à partir d'échantillons de valeurs. Celle utilisée pour les calculs de l'intensité et de la puissance est celle des trapèzes que l'on peut exprimer ainsi :

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{n} \left(\frac{f(a)+f(b)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} f\left(a+k \frac{b-a}{n}\right) \right) + R_n(f)$$

$$\text{où } R_n(f) = -\frac{(b-a)^3}{12n^2} f''(\xi) \text{ pour un } \xi \in [a, b]$$

$R_n(f)$ est l'erreur de quadrature. En considérant que f représente un courant continu idéal à 16 A soit $f(t) = 16\sin(100\pi t)$ et compte tenu des valeurs de $(b-a) = 0.52$ et de $n = 5000$, l'erreur de quadrature serait inférieure à 1 millième. Aussi, nous avons négligé l'effet de cette méthode sur nos résultats.

3 Présentation du dispositif

Grâce à des pinces ampèremétriques et une carte d'acquisition, on récupère chaque seconde un ensemble de données que l'on calcule pour obtenir l'intensité efficace et la puissance active. Les résultats sont formatés et transmis à RDDTool qui se charge des graphiques à réaliser.

3.1 Les pinces ampèremétriques

Il existe divers systèmes de mesure de l'intensité. Dans notre cas, nous souhaitons pouvoir ajouter un dispositif de mesure de bonne précision pour de petits courants sans avoir à débrancher nos alimentations. Notre choix s'est porté sur des pinces ampèremétriques qui mesurent l'intensité à travers le champ magnétique induit dans un circuit magnétique (principe du transformateur avec une seule spire à gauche). En contrepartie, ces pinces présentent forcément un déphasage avec la tension qu'il faudra mesurer afin de le corriger lors de nos calculs.

La pince ampèremétrique doit encercler la phase dans le sens de circulation du courant. Dans notre cas, les pinces ont été installées dans le tableau électrique après accord du service "immobilier".

Nous avons choisi les pinces Chauvain-Arnoult MINI 05, qui transforme un courant de 0 à 100 A en une tension de 0 à 100 mV et d'une dimension conforme à notre besoin.



Figure 2 - Une pince ampèremétrique



Figure 3 - Les pinces dans notre tableau électrique

Coût : 60 € HT la pince. Caractéristiques techniques précisées dans les documents cités en référence.

3.2 La carte d'acquisition

La carte d'acquisition est une carte enfichable dans un ordinateur qui va mesurer une tension sur un nombre fini d'entrée à une fréquence donnée. Nous avons ajouté comme contrainte la nécessité de disposer de drivers pour le système Linux.

Notre choix s'est porté sur la carte ADLINK DAQ-2206 qui dispose de 32 canaux différentiels et mesure à 250 kHz. Elle disposait alors de drivers pour quelques distributions Linux.

Compte tenu du format d'entrée de la carte SCSI 68-pin, il faut prévoir a minima l'usage d'un bornier de raccordement.

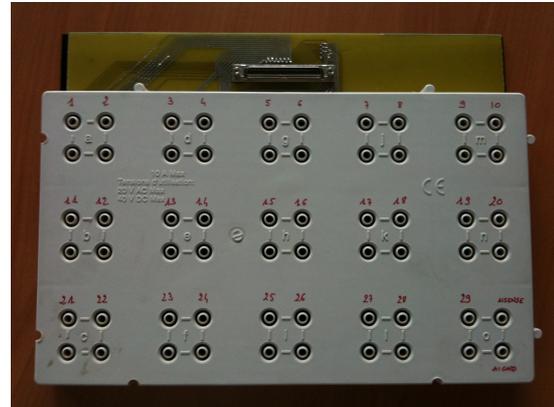
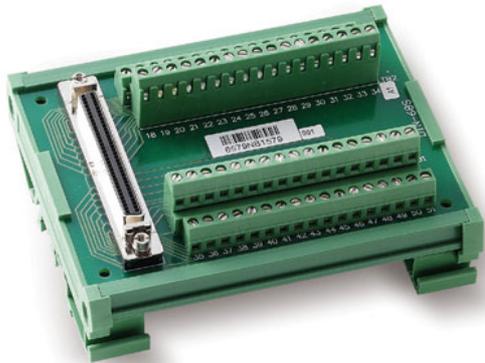
Coût : 700 € HT Caractéristiques techniques précisées dans les documents cités en référence.



Figure 4: La carte d'acquisition

3.3 Le tableau de raccordement

Compte tenu du nombre de prises (25) dans nos tableaux électriques, le bornier s'est vite révélé difficile d'usage. Qui plus est afin de garder un local technique ordonné, nous nous sommes rapprochés d'une société pour réaliser un tableau de raccordement simplifiant le branchement de nos pinces ampèremétriques (en particulier compatible avec leurs fiches).



Coût : 100 € HT

3.4 Transformateur pour carillon

Afin de mesurer la puissance efficace, nous avons besoin de connaître la tension au cours du temps. Notre carte d'acquisition ne tolérant pas de tension supérieure à 15V, nous avons mis en place dans l'armoire un petit transformateur pour carillon qui nous permet de suivre la phase. Ce dernier nous sert essentiellement à détecter le changement de signe de la tension dont nous avons fait l'hypothèse qu'elle était sinusoïdale parfaite (onduleur de qualité). Ensuite, c'est une fonction modélisée de la tension que nous utiliserons.

Coût : 30 €



Figure 7: Le transformateur pour carillon

3.5 La machine

Toute machine disposant d'un port PCI peut faire l'affaire. À noter toutefois que cette machine doit pouvoir se situer à proximité de votre tableau de raccordement fonction de la longueur de votre câble SCSI. Dans notre cas, nous avons utilisé un vieux DELL GX 260 largement suffisant pour les calculs à réaliser. Nous l'avons connecté au courant non ondulé afin justement d'enregistrer les informations qui précèdent les disjonctions du courant ondulé. Dans notre établissement, nous n'avons pas encore observé de coupure simultanée du courant ondulé et non ondulé.

Coût : 60 € de consommation électrique à l'année.

4 Le calcul

4.1 L'identification d'une durée d'échantillonnage

La carte impose une fréquence d'échantillonnage. Celle-ci, pour un départ électrique donné, dépend du nombre de canaux analysés. Dans notre cas 26 : nos 25 départs plus la phase.

Le nombre d'enregistrements dans une période est donné par $T_{Signal} / (T_{\text{échant}} \cdot Nb_{\text{canaux}})$, soit 192,307... pour un signal à 50 Hz, une fréquence d'échantillonnage à 250 kHz et 26 mesures. D'une part, le fait de ne pas tomber sur un nombre entier va imposer

des approximations lors du calcul intégral et d'autre part, l'expérience nous a montré qu'on avait des mesures plus stables en intégrant sur quelques périodes.

Aussi, pour garder un calcul court (nous le souhaitons inférieur à une seconde), nous avons cherché le plus petit nombre entier m de périodes à étudier qui permet d'obtenir un nombre d'enregistrements lui aussi entier sur ces m périodes. Il est donné par

$$\frac{Nb_{\text{Canaux}}}{\text{pgcd}(T_{\text{Signal}}/T_{\text{Échant}}, Nb_{\text{Canaux}})} = \frac{26}{\text{pgcd}(5000; 26)}, \text{ soit } 13 \text{ dans notre cas.}$$

Enfin pour prendre en compte l'étalement du déphasage entre nos pinces et notre phase, il nous faut ajouter quelques enregistrements de part et d'autre de nos m périodes. Attendu que le déphasage de la phase ne sera jamais supérieur à une demi-période, pour un canal donné il faut laisser passer au moins 96,15 échantillons. Nous avons arbitrairement choisi 100.

Ce qui est vrai pour m l'étant aussi pour un multiple de m , nous étudions 135200 mesures, pour une durée d'échantillonnage de 0,5408 seconde, les 0,52 centrale correspondant à l'étude de 26 périodes de notre signal.

4.2 La modélisation de $U(t)$

Afin de calculer la puissance active nous avons besoin de connaître u et i au même instant t . Cette mesure n'est pas possible pour 2 raisons : notre carte d'acquisition échantillonne sur les différents canaux de façon séquentielle et il ne lui serait de toute façon pas possible de mesurer une tension de 325 V. C'est pourquoi nous avons utilisé un transformateur pour carillon. Les mesures à ses bornes nous permettent de modéliser notre tension. L'utilisation d'un simple coefficient multiplicatif n'a pas été retenue puisque les résultats observés en sortie du carillon montrent des artéfacts que nous n'avons pas observés en analysant notre tension ondulée directement avec un oscilloscope.

Pour ce faire, nous cherchons le signal sinusoïdal qui respecte le mieux les zéros mesurés sur notre intervalle d'étude de 0,52 sec.

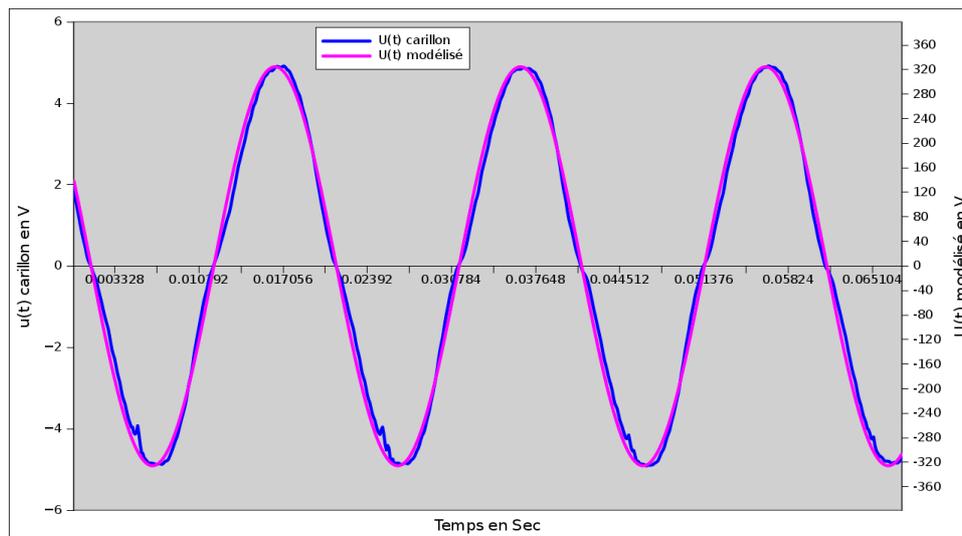


Figure 8: La modélisation de $U(t)$

4.3 L'étalement des pinces ampèremétriques

Comme nous l'avons vu, nos pinces ampèremétriques d'un côté et notre transformateur pour carillon de l'autre vont induire du déphasage.

Pour le corriger, nous avons étalonné chaque pince vis-à-vis de la tension observée en sortie de notre transformateur. En effet, l'étude de $u(t)$ et de $i(t)$ pour une résistance (nous l'avons considérée comme parfaite) ne devrait pas présenter de déphasage, or nous en observons. Aussi, pour chaque prise nous avons mesuré ce déphasage en nombre d'enregistrements et stocké les valeurs dans un tableau.

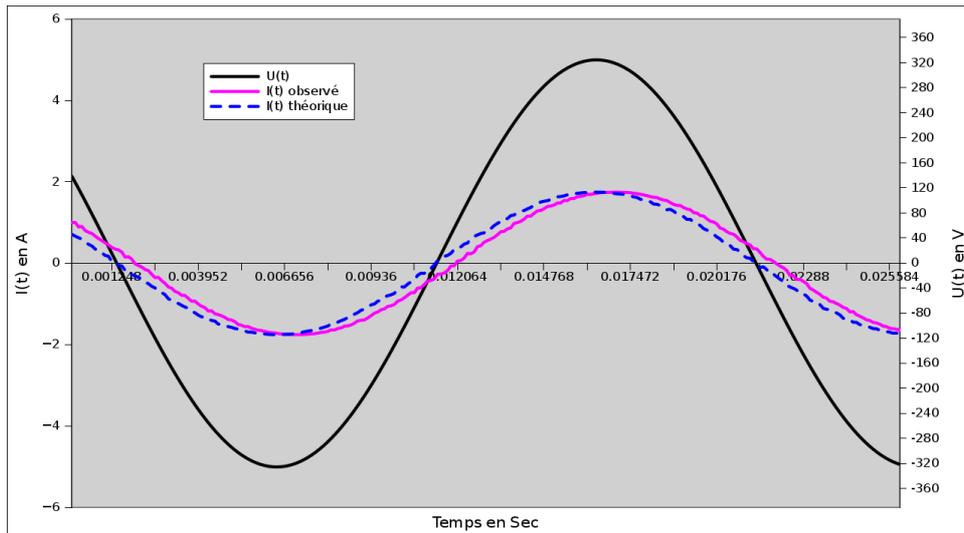


Figure 9: Le déphasage entre $i(t)$ observé et théorique pour une pince

4.4 Calcul de l'intensité et de la puissance et affichage avec RRDtool

Ce calcul correspond à la simple application des formules retenues à nos mesures corrigées et nos données modélisées, à la différence près que nous n'intégrons pas sur une période, mais sur 26 (équivalent à un filtre moyenneur).

Les résultats sont transmis à RRDtool. "RRDtool is the OpenSource industry standard, high performance data logging and graphing system for time series data." peut-on lire sur la page d'accueil de cet outil. Cela correspondait exactement à notre besoin et nous ne souhaitons pas ré-implémenter un grapheur de série temporel. Nous avons juste créé notre fichier pinces.rrd contenant nos piles d'enregistrements et nos règles de calcul de moyenne. Ensuite, chaque seconde, nous interrogeons notre carte d'acquisition, réalisons les calculs d'intensité et de puissance et demandons à rrdtool de prendre en charge les résultats. Avec le temps restant, nous lui demandons de générer 2 à 3 graphes. L'ensemble de nos 55 graphiques est ainsi régénéré en moins d'une minute.

L'affichage se fait à travers de simples pages HTML.

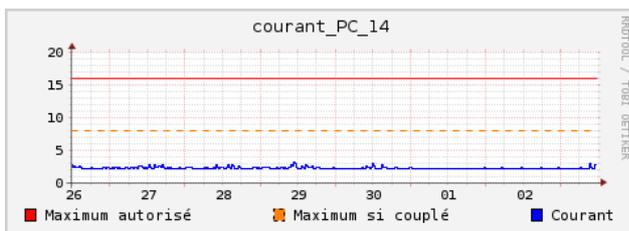


Figure 10: Exemple de courant montrant des pics de consommation quotidiens

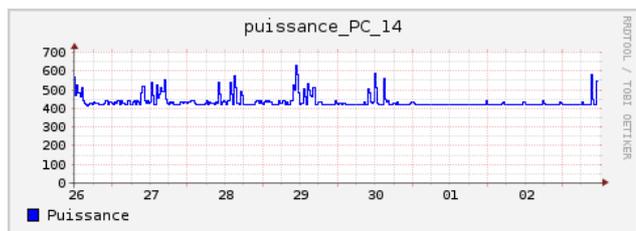


Figure 11: Exemple de puissance montrant des pics de consommation quotidiens

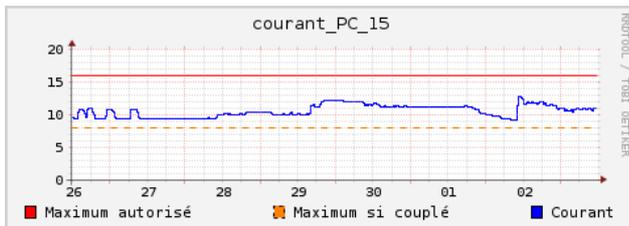


Figure 12: Exemple de courant avec forte variation

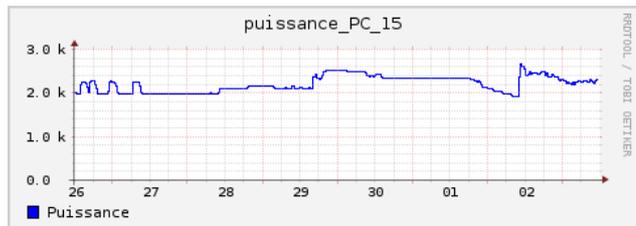


Figure 13: Exemple de puissance avec forte variation

5 Résultats

5.1 Proof of concept

Notre objectif n'était pas de mettre en place un système qualifiant et de haute précision, mais plus de montrer qu'il était possible d'obtenir des résultats honnêtes sans travaux dans notre armoire électrique (devis obtenus autour de 15 k€ et sans possibilité de consultation à distance). Ce procédé peut encore être amélioré : on doit pouvoir trouver (ou faire réaliser) des pinces plus adaptées ; de même, le code peut encore être largement optimisé. Pour autant, les résultats observés étaient dans la précision du wattmètre bon marché que nous avons à disposition (précision de 5%).

5.2 Applications

5.2.1 Équilibrage des charges

L'application principale pour nous est d'avoir une connaissance de la charge sur chaque prise et sur chaque phase en quasi temps réel et surtout sans avoir à solliciter le service "immobilier". Ceci nous permet ainsi d'optimiser la répartition de charge en ayant en tête qu'une partie de la consommation de nos machines à double alimentation peut basculer d'une prise à l'autre en cas de disjonction.

5.2.2 Développement durable

Nous n'avons pas d'agenda 21, mais des collègues d'autres organismes m'ont fait part de leur intérêt pour ce dispositif dans ce cadre. On peut en effet décider, dans un souci écologique, de plafonner la consommation en salle machine. Si une nouvelle machine achetée est huit fois plus puissante, mais ne consomme que 2 fois plus que les anciennes : on pourrait couper les 2 anciennes. De façon moins radicale, on peut également utiliser ce dispositif pour refactoriser les consommations aux usagers, ou calculer des compensations carbone.

6 Évolutions possibles

6.1 Portage du dispositif sur un client léger

Compte tenu de l'objectif du dispositif, nous sommes contraints de faire fonctionner une unité centrale 24/24. Dans un souci écologique, il doit être possible de porter ce dispositif dans un client léger consommant moins de 20 W.

6.2 Analyse plus approfondie du courant pour la qualification de l'énergie

Comme nous l'avons vu, les alimentations à découpages qui équipent une bonne part des matériels informatiques perturbent le courant occasionnant des pertes d'énergie sur les harmoniques. Pour cela, il suffit de décomposer nos séries temporelles comme des sommes de sinusoïde avec des pulsations multiples de 50 Hz (on peut aller jusqu'à la 9e harmonique avec un échantillonnage à 250 kHz et 26 canaux). Les coefficients devant chacune permettent de qualifier le courant et indirectement la qualité de l'installation.

7 Références

- [1] Kholer A. *Pinces ampèremétriques et capteurs de courant*. Chauvin Arnoux. http://www.testoon.com/fichiers_guide/FR/CAR_Pinces_et_capteurs_courant_original_fr.pdf
- [2] Klaiber B. et Turpin P. *Comment bien choisir ses capteurs de courant*. Mesures n° 825, Juin 2010. <http://www.mesures.com/archives/825-choix-capteur-courant-LEM.pdf>
- [3] Derosiaux D. *Fonctionnement d'une alimentation*. Cooling-Master.com, Décembre 2005. <http://www.cooling-masters.com/articles-36-0.html>
- [4] Current clamps for AC current - MINI series. Chauvin Arnoux. <http://www.chauvin-arnoux.com/display.asp?10231>
- [5] PXI/DAQ/DAQe-2200 Series. Adlink Technology Inc. http://www.adlinktech.com/PD/marketing/Datasheet/DAQ-2200Series/DAQ-2200Series_Datasheet_1.pdf