

**Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur**

***Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur***

Copyright © 2002 by

Bob Andriesse (Smartec) et  
Hervé Assier (Fondation E.P.F. Ecole d'ingénieurs).

*Diplômé en sciences physiques de l'Université de Delft (Pays-Bas), Bob Andriesse a créé en janvier 2001 la filiale française de la société hollandaise Smartec ([www.smartec.fr](http://www.smartec.fr)), spécialisée en capteurs et interfaces intelligents. Cet article a été écrit en collaboration avec Hervé Assier (Fondation E.P.F. Ecole d'ingénieurs).*

***Conçue pour une gamme complète de capteurs résistifs ou capacitifs, l'interface universelle UTI développée Smartec a pour vocation de simplifier l'électronique entre le capteur analogique et le microcontrôleur. La mise en oeuvre d'une méthode de mesure à trois signaux élimine virtuellement les erreurs de gain et de décalage ainsi que les dérives en température.***

## **1. Introduction**

Dans l'industrie, la migration des circuits analogiques vers le numérique s'effectue depuis plusieurs années mais est loin d'être achevée....

Il y a plus de dix ans, au début de ce phénomène, une société hollandaise dénommée SMARTEC BV à Breda, a anticipé le besoin en capteurs intelligents. Elle a développé un capteur de température extrêmement précis dont la sortie mixte analogique/numérique peut être échantillonnée par une entrée de microcontrôleur. De par la manière astucieuse dont le signal de sortie est généré, la résolution (0,005 °K) est uniquement limitée par la physique fondamentale (rapport signal sur bruit) et la fréquence d'échantillonnage.

Cette information est importante car elle est à l'origine de l'étape suivante. SMARTEC se rendit compte au fil des années que les concepteurs expérimentés en électronique étaient habitués à 'leurs' capteurs bien connus comme les Pt100, Pt1000, éléments capacitifs, ponts résistifs, etc. Par ailleurs, SMARTEC débuta le développement d'un circuit d'interface qui permettrait de *connecter* de tels capteurs analogiques à des entrées de microcontrôleurs. Un circuit de cette sorte combinerait l'expérience *accumulée* des concepteurs à l'avantage décisif de traiter numériquement le signal.

Les contraintes de conception étaient entre autres :

1. Un circuit unique pour la mesure de résistances, capacités, ponts résistifs.
2. Grandes précision et résolution (13 à 14 bits).
3. Mesure à distance (mesure à 3 et 4 fils).
4. Précision indépendante de la qualité de l'horloge du processeur et pas de quartz extérieur.
5. Autocalibration en continu du gain et de la tension de décalage.
6. Pas de dérive en température.
7. Pas de dérive à long terme (dans le temps).
8. Réjection des fréquences parasites 50/60 Hz
9. Multiplexage facile lors de multiples capteurs.
10. Faible consommation.

Le circuit d'interface a été développé en collaboration avec l'Université technologique de Delft et a abouti à l'UTI (Universal Transducer Interface = interface universelle pour transducteurs).

L'article ci-après explique en détail le fonctionnement de l'UTI. Nous montrerons comment mesurer la valeur d'une capacité de l'ordre de 2 pF à plusieurs mètres de distance avec une précision sur 13 bits et une résolution sur 14 bits, c'est à dire une résolution meilleure que 0,0002 pF! Lorsque le concepteur a compris comment faire, il peut aussi facilement utiliser l'UTI dans n'importe lequel des 15 autres modes opératoires, comme mesurer 3 capacités inconnues simultanément, des éléments Pt, des résistances, des

## Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur

ponts résistifs, etc. A la fin de cet article vous trouverez une liste des 16 modes d'opération possibles.

L'UTI a été conçue pour combiner deux principes :

1. Mesure sur quatre fils (pour s'affranchir des problèmes d'impédance comme les capacités parasites).
2. Technique à trois signaux, afin
  - A. De permettre l'autocalibration en continu et de s'affranchir des dérives,
  - B. D'être indépendant de la stabilité de l'horloge du processeur.

L'utilisation de l'UTI vous permet d'obtenir de très bons résultats de mesure avec peu de composants par la mise en oeuvre de ces deux principes. En implantant le principe 2 dans le logiciel du microcontrôleur, vous économisez sur le hard ce qui vous permet de réduire vos coûts de production.

### 1. Un peu de théorie

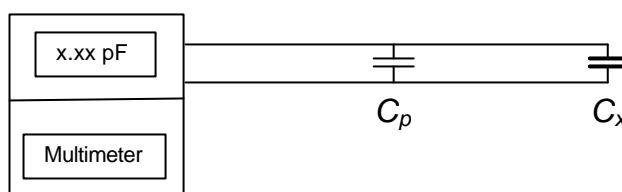
Sans électronique dédiée, la mesure précise de la valeur d'une capacité n'est pas simple.

Supposons que vous voulez mesurer la valeur d'une capacité  $C_x$  à l'aide d'un multimètre numérique avec une entrée dédiée. Si vous insérez la capacité directement dans le multimètre avec ses pattes les plus courtes possibles, vous obtiendrez une mesure raisonnablement précise, liée à la qualité de l'appareil.

La méthode à 2 pôles fonctionne correctement, à condition que :

1. Vous n'ayez pas besoin d'une précision élevée.
2. La distance entre le multimètre et la capacité soit petite.
3. Vous n'effectuez qu'une simple lecture.

La *figure 1* décrit la situation lorsque vous essayez de mesurer la valeur précise d'une capacité avec des fils de liaison et le même multimètre.



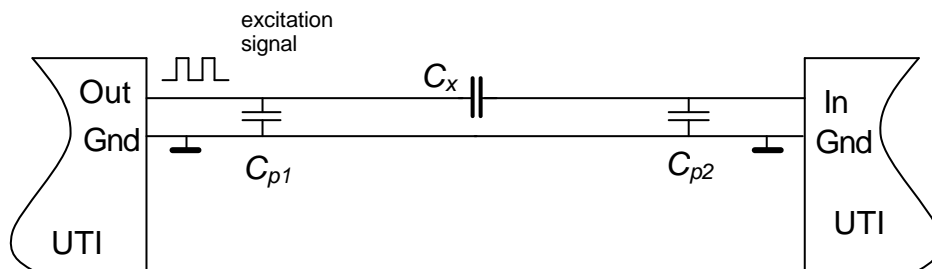
**Fig. 1 Mesure fautive à deux pôles  
(mesure  $C_x + C_p$ )**

Le multimètre vous indiquera seulement la mesure  $C_x + C_p$  où  $C_p$  est la capacité parasite des fils de liaison. L'effet d'antenne de fils non blindés rendra les choses pires. Comme vous pouvez le constater, la méthode à deux pôles échoue et il n'y a pas de remède. Une solution rapide à ce problème est la mesure en quadripôle avec l'UTI.

### 3. Mesure en quadripôle

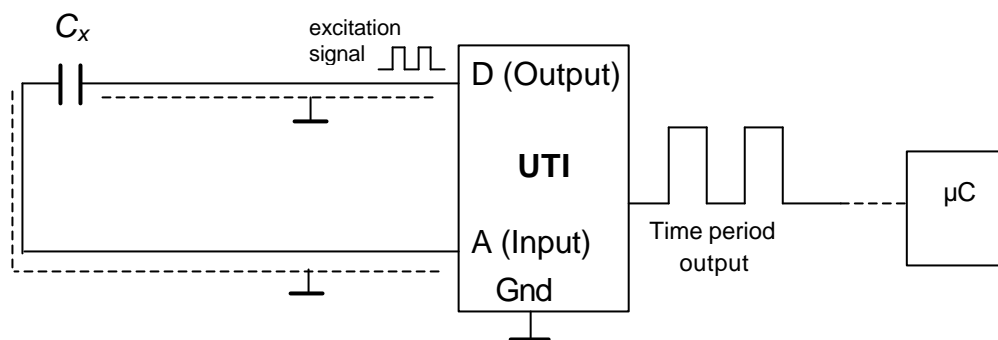
### Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur

La situation change complètement si l'on abandonne la méthode à deux pôles au profit de celle à quatre pôles comme le montre la figure 2. Pour simplifier, l'UTI a été éclatée en deux parties avec la sortie d'un côté et l'entrée de l'autre.



**Fig.2 Mesure en quadripôle avec l'UTI  
(mesure de  $C_x$  seule)**

La plaque gauche de  $C_x$  est excitée par un signal issu de l'oscillateur interne se présentant comme une source de tension d'impédance de sortie très faible. Il en résulte que  $C_{p1}$  n'exerce aucune influence. En collectant les charges induites sur la plaque droite au moyen d'une entrée de courant qui a aussi une impédance très faible, nous empêchons  $C_{p2}$  de collecter toute charge induite. En fait, les deux capacités  $C_{p1}$  et  $C_{p2}$  sont court-circuitées par l'UTI. Le résultat est que  $C_{p2}$  a perdu sa propriété parasite et n'influence pas non plus la mesure de  $C_x$ . Parce qu'il y a un signal de masse unique, la mesure s'effectue en vérité avec trois pattes de l'UTI comme le montre la figure 3.



**Fig. 3 câblage réel  
(mesure de  $C_x$  seule)**

Cependant, nous appelons toujours cette méthode 'en quadripôle'. L'entrée A de l'UTI étant très sensible, les fils de liaison devraient être de type blindé avec la tresse de blindage reliée au signal de masse de l'UTI.

Les charges induites qui sont collectées sur l'entrée A contrôlent la fréquence d'excitation. La période de l'oscillateur interne est proportionnelle à la valeur de la capacité. Cette fréquence est alors divisée par 128 (mode d'acquisition rapide) ou 1024 (mode d'acquisition lent). Une période complète du signal résultant devient alors la sortie de phase échantillonnée par le

### Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur

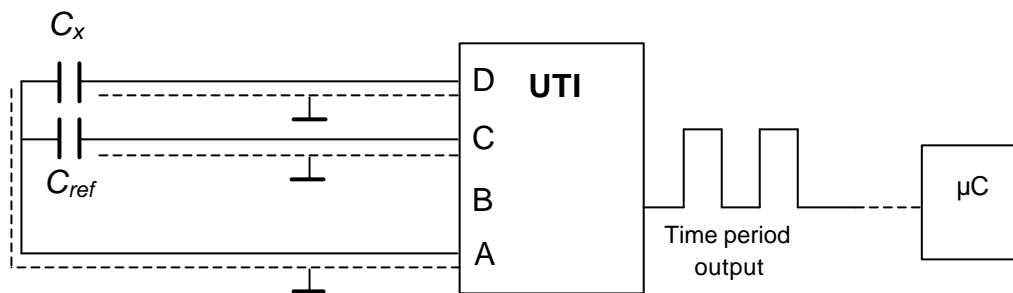
microcontrôleur. En mode rapide, vous avez plus de valeurs mesurées par seconde (8 fois plus) mais au prix d'une réduction de la précision. En mode lent, vous obtenez le maximum de précision. Les valeurs de  $a_0$  et  $a_1$  diffèrent entre les modes rapide et lent.

Avec le schéma de la figure 3, l'UTI donnera une bonne mesure de la valeur  $C_x$ , la capacité parasite des fils ayant été éliminée. La période du signal de sortie liée à  $C_x$  est proportionnelle à la valeur de  $C_x$  ( $T = a_0 + a_1 * C$ ).

Si l'on remplace un exemplaire de l'UTI par un autre, la valeur obtenue serait probablement légèrement différente (comme pour un autre multimètre !). Ceci résulte des différences de gain et de décalage de l'amplificateur interne entre différents UTIs. Ce problème reproductibilité de mesure peut être résolu de façon élégante, cela s'appelle la technique à trois signaux.

#### 4. Technique à trois signaux

Un second condensateur de valeur connue et faisant office de référence est connecté à la sortie C, soit par un second fil de liaison (figure 4), soit directement à côté de l'UTI. Parce que la capacité des fils de liaison est supprimée par l'UTI, il n'est pas nécessaire que les fils soient identiques.



**Fig. 4 Technique à trois signaux**

A la mise sous tension, la sortie de l'UTI nous fournit trois intervalles de temps, respectivement  $T_{off}$ ,  $T_{ref}$  et  $T_x$ , proportionnels à  $C_{off}$  (normalement zéro),  $C_{ref}$ ,  $C_x$ .

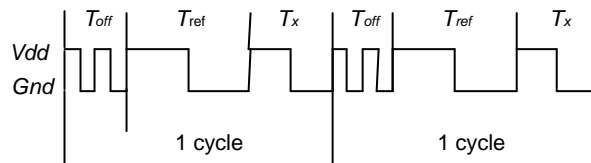
On aurait pu connecter une troisième capacité  $C_{off, ext}$  entre les pattes A et B mais pour l'instant, il est préférable qu'elle soit de valeur nulle. De fait, il existe une capacité interne entre pattes ( $C_{off, int}$ ).

Au prochain paragraphe, nous vous montrerons que les erreurs de gain et de décalage peuvent être éliminées ainsi que la dérive en température en traitant l'information de temps par rapport à la valeur connue de  $C_{ref}$ . (Voir ci dessous).

**Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur**

### **5. En pratique et un peu de mathématique**

Si vous connectez l'UTI à deux capacités, comme indiqué sur la figure 4 et la faites opérer en mode 1 (mode de mesure de capacité), le signal de sortie est semblable à la figure 5.



**Fig. 5 Sortie de l'UTI**

Le signal est composé de trois phases de durée respective  $T_{off}$ ,  $T_{ref}$  et  $T_x$ . La durée de la première phase  $T_{off}$  correspond à la valeur de la sortie ouverte B et est toujours la plus courte des trois. Elle fournit une information sur le décalage et est reconnaissable à sa double période (deux niveaux hauts et deux niveaux bas).

Soyons plus précis. Toutes les valeurs de capacité sont transcrites par l'UTI au travers de la durée de période leur correspondant. La formule générale étant :

$T = a_0 + a_1 * C_{ext}$ , où  $a_0$  représente le décalage interne à l'UTI et  $a_1$  le gain.

Avec deux capacités, nous avons les trois équations suivantes :

$$T_x = a_0 + a_1 * C_x \quad (I)$$

$$T_{ref} = a_0 + a_1 * C_{ref} \quad (II)$$

$$T_{off} = a_0 + a_1 * C_{off} \quad (III)$$

En mesurant la durée de chacune des trois périodes  $T_{off}$ ,  $T_{ref}$  et  $T_x$ , on peut déterminer la valeur de  $C_x$ ,  $a_0$  et  $a_1$  comme nous le montrerons. Une seule entrée libre de microcontrôleur suffit pour les mesurer. La résolution obtenue dépend du taux d'échantillonnage et du mode opératoire de l'UTI. On peut améliorer la résolution en échantillonnant sur plusieurs cycles et/ou en échantillonnant à un taux supérieur.

Comme aucune capacité n'est connectée sur l'entrée B,  $C_{off}$  est nulle ce qui nous donne :

$$T_{off} = a_0 \quad (IV)$$

Maintenant, nous avons trois équations (I),(II) et (III) et trois inconnues ( $C_x$ ,  $a_0$  et  $a_1$ ), que nous pouvons résoudre.

$$M = (T_x - T_{off}) \div (T_{ref} - T_{off}) \quad (V)$$

$$T_x - T_{off} = (a_0 + a_1 * C_x) - (a_0) = a_1 * C_x$$

$$T_{ref} - T_{off} = (a_0 + a_1 * C_{ref}) - (a_0) = a_1 * C_{ref}$$

Ainsi  $M = C_x / C_{ref}$ , et

**Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur**

$$C_x = M * C_{ref} \quad (VI)$$

La valeur de  $C_x$  peut être trouvée en calculant la valeur de  $M$  comme indiqué par (V) et en multipliant le résultat par la valeur de  $C_{ref}$  de notre capacité de référence.

Lorsque l'UTI est utilisée en mode 1, les valeurs typiques de  $a_0$  et  $a_1$  sont

$$\begin{aligned} a_0 &= 2 \text{ [ms]} && \text{(décalage)} \\ a_1 &= 1 \text{ [ms/pF]} && \text{(gain)} \end{aligned}$$

En mode lent, ces valeurs sont huit fois plus élevées.

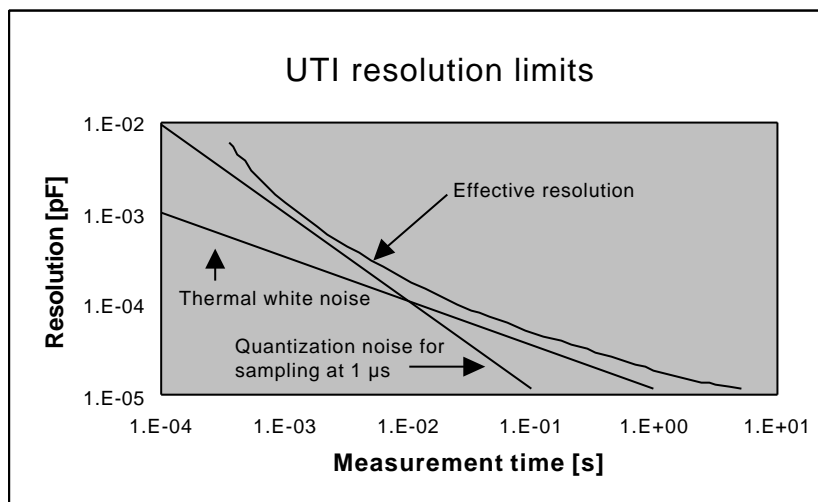
Normalement, l'utilisateur est seulement intéressé par une mesure aussi précise possible de  $C_x$ . Si l'on est intéressé par les valeurs du décalage et du gain, elles peuvent être calculées de la façon suivante :

$$\begin{aligned} a_0 &= T_{off} \text{ et} \\ a_1 &= (T_x - T_{off}) / C_x \text{ ou} \\ a_1 &= (T_{ref} - T_{off}) / C_{ref} \end{aligned}$$

## 6. considérations sur la résolution

La résolution maximale que l'on peut obtenir avec l'UTI n'est pas la même entre les différents mode opératoires (C, R, pont, ...) et la vitesse d'acquisition. En mode rapide, l'UTI effectue un cycle de mesure toutes les 10 à 20 ms environ et cela prend 100 à 200 ms en mode lent. En mode lent, la résolution maximale obtenue est meilleure qu'en mode rapide (à peu près 3 bits). Comme vous pouvez le voir, la mesure d'éléments résistifs, capacitifs ou de ponts résistifs avec une grande résolution peut être réalisée avec peu de puissance de traitement.

De façon général, la résolution dépend principalement de deux sources de bruit. L'une est le bruit thermique interne à l'UTI et l'autre est le bruit de quantification qui dépend du taux d'échantillonnage. Le bruit thermique a un spectre en 1/f et son comportement est reporté à la figure 6.



**Fig.6 résolution de l'UTI**

L'écart type du bruit de quantification lors d'une phase de mesure s'exprime comme :

$$s_q = \frac{t_s}{T_{off} \cdot \sqrt{6}} \quad (I)$$

Où  $t_s$  est le temps d'échantillonnage et  $T_{off}$  la durée de la phase de décalage. Nous prenons  $T_{off}$  car elle est la phase la plus courte et résulte par ailleurs d'une estimation pessimiste de la résolution.

Le bruit de quantification de la figure 6 correspond à un taux d'échantillonnage de 1 MHz, une pleine échelle de mesure de 2 pF et le fonctionnement de l'UTI en mode lent. Dans ce mode, 1024 cycles de la période d'excitation (oscillations libres à 50 KHz) sont utilisées par l'UTI pour créer une phase du signal de sortie. Donc  $T_{off}$  vaut  $1024 \times 20 \mu s$  soit approximativement 20 ms. D'après la Formule (I)  $s_q = 0.02E-3$ . Par ailleurs, dans ce cas le meilleur écart-type correspond à une résolution maximale de 15,5 bits.



## Mesurer précisément des petits signaux issus de capteurs distants avec un microcontrôleur

Comme vous pouvez le voir sur la figure 6, il n'est pas nécessaire d'augmenter le taux d'échantillonnage car le bruit thermique est le facteur de bruit prépondérant. De fait, la résolution maximale pour mesurer de faibles capacités est 14 (et non 15,5) bits.

La capacité parasite  $C_p$  doit aussi être prise en compte. Il a été dit que l'effet de cette capacité est totalement masqué par l'impédance de la sortie excitatrice et l'entrée de collecte des charges. Cependant, cela est vrai uniquement si la valeur de  $C_p$  est 'raisonnable' et en accord avec l'échelle de mesure choisie. Pour une échelle de mesure de 2 pF, cela signifie qu'elle ne saurait dépasser 100 pF. Lorsque la valeur de  $C_p$  augmente, c'est la résolution totale qui diminue. Cette propriété de l'UTI est bien documentée mais dépasse le cadre de cet article.

### 7. Information additionnelle

Liste des modes opératoires

| Mode opératoire                               | Phases | Dénomination | No Mode. |
|---|--------|--------------|----------|
| 5 Capacités, 0-2pF                            | 5      | C25          | 0        |
| 3 Capacités, 0-2pF                            | 3      | C23          | 1        |
| 5 Capacités, 0-12pF                           | 5      | C12          | 2        |
| Capacités, 0-2pF, MUX externe CML=0           | -      | CMUX         | 3        |
| Capacités, 0-12pF, MUX externe CML=1          | -      | CMUX         | 3        |
| 3 Capacités, plage variable jusqu'à 300pF     | 3      | C300         | 4        |
| Fil de Platine Pt100-Pt1000, 4-fils           | 4      | Pt           | 5        |
| Thermistance 1kOhm-25kOhm, 4-fils             | 4      | Ther         | 6        |
| 2 or 3 fils de Platine Pt100-Pt1000           | 5      | Pt2          | 7        |
| 2 or 3 thermistances, 1kOhm-25kOhm,           | 5      | Ther2        | 8        |
| Pont résistif, ref. est VPont, +/- 200mV      | 3      | Ub2          | 9        |
| Pont résistif, ref. est VPont, +/- 12.5mV     | 3      | Ub1          | 10       |
| Pont résistif, ref. est IPont, +/- 200mV      | 3      | Ib2          | 11       |
| Pont résistif, ref. est IPont, +/- 12.5mV     | 3      | Ib1          | 12       |
| Pont résistif et deux résistances, +/- 200mV  | 5      | Brg2         | 13       |
| Pont résistif et deux résistances, +/- 12.5mV | 5      | Brg1         | 14       |
| 3 Potentiomètres 1kOhm-50kOhm                 | 5      | Potm         | 15       |

#### *Notes d'application*

Sur le site web [www.smartec.www.fr](http://www.smartec.www.fr) (**supportshop**) les notes d'application relatives à l'UTI sont disponibles incluant schémas, listings de programmes et diagrammes de flux.

## **8. Résumé**

L'UTI est une interface universelle à calibrage automatique pour connecter directement une gamme complète de capteurs analogiques tels que les capacités de faible valeur, les éléments à fils de platine Pt100(0), les ponts résistifs, etc. L'UTI s'occupe de mesurer les valeurs issues des capteurs et les présente au microcontrôleur sur un seul fil. Le microcontrôleur échantillonne ce signal et réalise quelques calculs simples pour extraire ces valeurs, c'est la technique à trois variables. De cette manière, on élimine les erreurs de gain et de décalage ainsi que les dérives en température. Les applications nécessitant une électronique analogique spécifique et des convertisseurs A/N sont maintenant simplifiées par l'utilisation d'un UTI et d'un microcontrôleur. « Le HARD est remplacé par le SOFT ! ».

Le microcontrôleur peut être un simple PIC dès lors que la vitesse d'échantillonnage est suffisante. Pour obtenir une résolution optimale, environ 100.000 échantillons par période sont nécessaires (soit 5 MHz durant 20 ms).

## **9. Addendum**

Depuis Janvier 2001, La filiale SMARTEC S.A.R.L. a été créée pour distribuer l'ensemble des produits sur le marché français.

informations  
Smartec s.a.r.l.  
La Nysh  
04230 La Colle de Montloux

tel 049275 8189  
fax 049275 8335

w: [www.smartec.fr](http://www.smartec.fr)  
e: [info@smartec.fr](mailto:info@smartec.fr)