CAPAAB

MESURE D'EPAISSEUR SANS CONTACT PAR METHODE CAPACITIVE

A. Bruère VER 01d 10 / 09

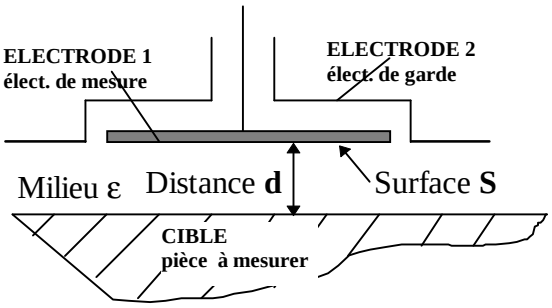
CAPAAB
22 / 32 Sentier des Torques BAT 8
92290 Chatenay Malabry Tel / Fax : 01 71 22 73 72 www.capaab.fr

SOMMAIRE

1. GENERALITES SUR LE CAPTEUR CAPACITIF ***3***
1.1 Principe général ***3***
1.2 Electronique associée ***5***
1.3 Courbe typique de réponse en fonction de la distance ***6***
2. MESURE D'EPAISSEUR SANS CONTACT PAR METHODE CAPACITIVE ***7***
2.1 Cas d'une cible métallique ***7***
2.1.1 Principe ***7***
2.1.2 Exemple de résultats ***9***
2.2 Cas d'une cible isolante ***10***
2.2.1 Principe ***10***
2.2.2 Exemple de résultats ***11***
3. REDUCTION DE L'EFFET DE NON LINEARITE DU CAPTEUR ***15***
3.1 Principe de la méthode ***15***
3.2 Exemple de résultats ***16***
4. PROCEDURES RESUMEES ***17***
4.1 Cas d'une cible métallique ***17***
4.2 Cas d'une cible isolante ***18***

1. GENERALITES SUR LE CAPTEUR CAPACITIF

1.1 Principe général



La capacité C formée entre deux électrodes métalliques (électrode 1 et la cible du schéma ci contre) est de la forme :

$$C = \varepsilon \times S / d.$$

La cible visée par le capteur peut être *conductrice*, depuis les métaux jusqu'aux composites carbones, en passant par les milieux aqueux, *sans que la valeur de la capacité formée, à dimensions comparables, diffère*. Cette cible peut être en matériaux isolants, *mais* la loi ci dessus n'est plus vérifiée.

Le milieu environnant est généralement constitué par l'air ambiant. Les propriétés diélectriques de ce dernier qui interviennent dans la valeur de la capacité formée (par le biais du coefficient $\varepsilon = \varepsilon o.\ \varepsilon r$ avec $\varepsilon o = 10^{-9} / 36\ \pi$ (F/m) et pour l'air standard $\varepsilon r = 1{,}00059$), se caractérisent par une très haute stabilité en fonction de la température, de l'humidité et de la pression (les variations relatives de εr sont respectivement de : $+ 2 . 10^{-6}$ / °C ; $-2\ 10^{-6}$ / % HR ; $5\ 10^{-7}$ / mB).

REMARQUE IMPORTANTE

Le domaine de validité de la loi sous sa forme simple ($C = \varepsilon \times S / d$) est *limité* à des valeurs faibles de d (comparées aux dimensions de la surface S). Cette loi n'étant plus applicable dès que cette condition n'est plus vérifiée, il est *impératif* d'introduire autour de l'électrode de mesure, ce qui est appelé un ***anneau de garde*** (électrode 2 du dessin ci dessus) de manière à étendre son domaine de validité.

Il faut également noter que cette loi est valide si le plan défini par l'électrode de mesure et celui défini par la cible sont ***parallèles*** entre eux. Tout écart de parallélisme va entraîner un défaut de linéarité de la réponse du capteur d'autant plus marqué que la distance **d** est faible.

En pratique, la largeur de l'anneau de garde a été fixée à une valeur égale à celle du diamètre de l'électrode de mesure. Ce choix conduit à un écart de linéarité pratique inférieur à 0,5 % de l'E. M pour toute la plage de fonctionnement. De plus cela conduit à avoir une E.M égale au diamètre de l'électrode de mesure du capteur.

Les dimensions des capteurs capacitifs standard **CAPAAB** sont données ci après :

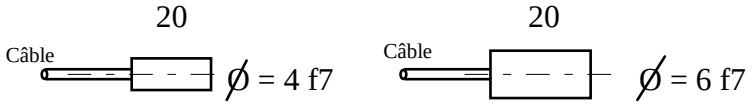
MODELE	**CC1**	**CC2**	**CC5**	**CC8**	**CC12**
ETENDUE DE MESURE(*) (mm)	1	2	5	8	12
DIAMETRE ELECT. MESURE (mm)	1	2	5	8	12
DIAMETRE EXTERNE (mm)	4	6	15	24	36
LONGUEUR (mm)	20	20	23,2	25,2	26,4

(*) pour écart de linéarité ≤ 0,5% de l'E.M

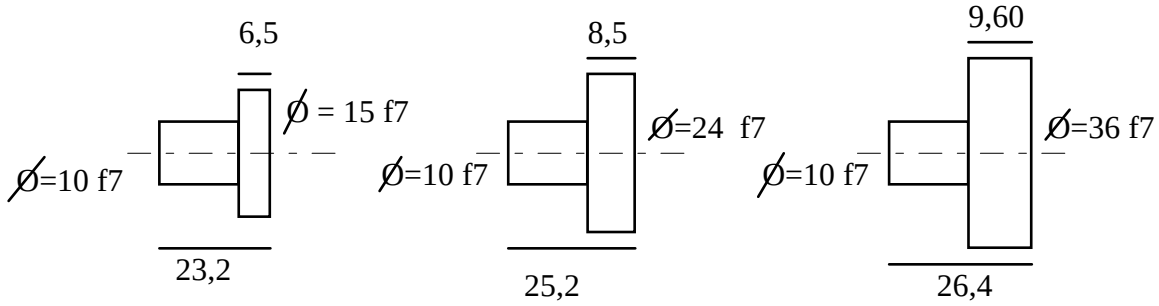
Gamme de Température : -55 °C à + 125 °C

Câble capteur : triaxial, longueur standard 2 mètres ∅ = 3,2 mm

DIMENSIONS STANDARD



CC1 **CC2**

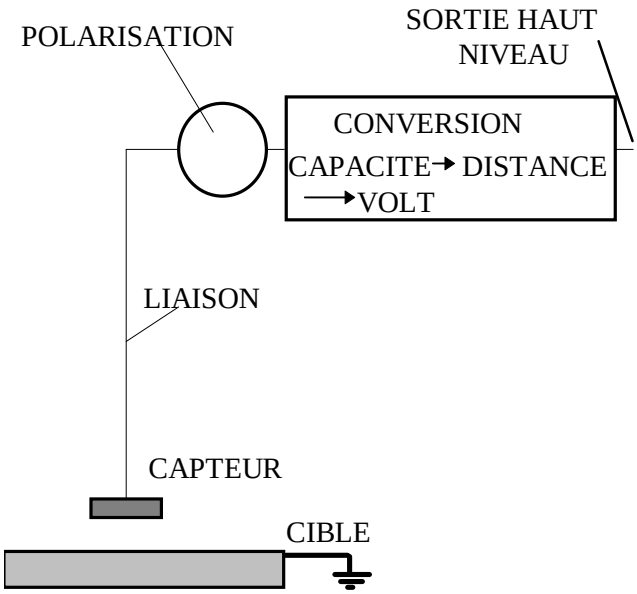


CC5 **CC8** **CC12**

Les dimensions sont en mm
Tol géné +/- 0,05
Face de mesure pour CC5, CC8, CC12 : côté grand diamètre

Des dimensions et formes spéciales de capteurs peuvent être réalisées pour des applications particulières.

1.2 Electronique associée



Le capteur capacitif étant un élément passif, il est donc nécessaire de le polariser afin de pouvoir accéder à sa valeur, valeur traduite sous forme de grandeur électrique.

La valeur de la capacité n'étant qu'un « intermédiaire de mesure », l'électronique permet de délivrer une tension Vm égale à l'inverse de cette dernière. **Vm** est donc **linéaire** avec la distance à mesurer.

Pour obtenir Vm, en sortie mesure, tel qu'il soit linéaire avec la distance à mesurer, différentes solutions sont possibles. Seules les plus efficaces permettent de concilier performances, souplesse de mise en œuvre, coût adapté.

Les solutions nouvelles (*) proposées par **CAPAAB** pour polariser le capteur et délivrer l'information utile, répondent à ces critères. Elles permettent, en particulier, d'éloigner le capteur de son électronique associée sans pertes sensibles de performances. Cela permet dans de nombreuses applications, où les conditions de fonctionnement sont difficiles : zones peu accessibles, très haute température, rayonnement électromagnétiques, etc..., d'éloigner l'électronique associée au capteur.

REMARQUE IMPORTANTE

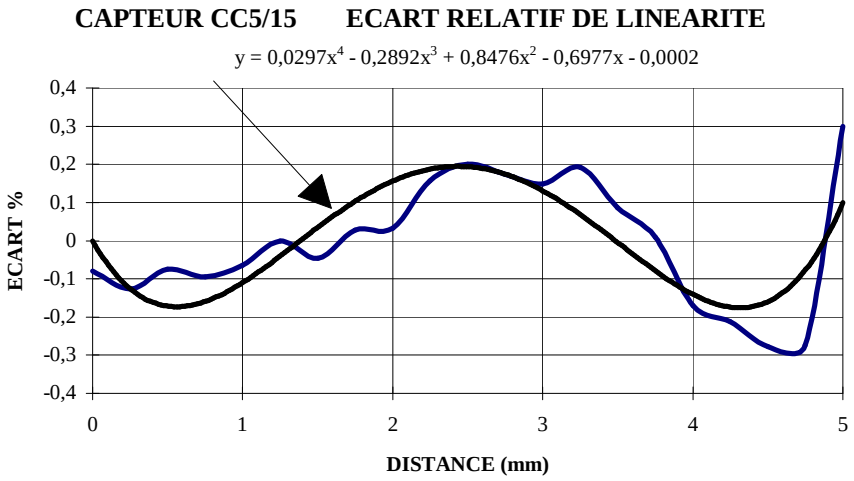
Comme cela apparaît sur la figure ci dessus, *la cible*, dont on cherche à connaître la distance par rapport au capteur, est ***réunie à la masse***. Ce cas de figure est celui le plus fréquemment rencontré industriellement. Le fait que la cible soit réunie à la masse oblige du point de vue électronique, d'une part, à créer une source de tension in situ (ou non référencée) pour polariser l'électrode de mesure du capteur et d'autre part, une source de tension parfaitement identique pour polariser son anneau de garde (non représenté sur la figure ci dessus). Les électroniques développées par **CAPAB** sont conçues selon ce principe. Bien entendu, il est possible d'utiliser ce même principe lorsque la cible est isolée de la masse.

(*) ***Principe Breveté***

1.3 Courbe typique de réponse en fonction de la distance

Le graphe ci dessous représente un exemple typique d'écart relatif de linéarité d'un capteur de 5 mm d'étendue de mesure (diamètre extérieur = 15 mm) visant une cible de 35 mm de diamètre. Cet écart est obtenu en calculant la différence entre la valeur mesurée et celle issue de la régression linéaire réalisée sur les points expérimentaux puis en la divisant par l'étendue de mesure.

De plus, cette courbe typique a été approximée par un polynôme du 4ème degré de manière à pouvoir introduire une correction externe visant à réduire cet écart (Cf. chapitre 3).



NB : la courbe y représente l'approximation polynomiale de la courbe d'écart relatif de linéarité donnée en exemple

Après correction des mesures brutes à l'aide du polynôme d'approximation (à l'aide d'une carte d'acquisition reliée à un PC disposant d'un programme spécifique)**,** il est possible d'obtenir une incertitude résiduelle à l'échelle du 10^{-3}.

2. MESURE D'EPAISSEUR SANS CONTACT PAR METHODE CAPACITIVE

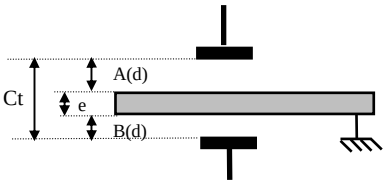
2.1 Cas d'une cible métallique

2.1.1 Principe

La mesure d'épaisseur repose sur l'emploi de deux capteurs capacitifs identiques placés sur un même axe et de part et d'autre de la cible à mesurer à une distance connue et constante, de valeur égale à Cte.

Lorsque la cible, d'épaisseur e, est en place *(et parallèle aux plans définis par les électrodes de mesure des 2 capteurs*), chacun des capteurs va délivrer une tension proportionnelle à la distance le séparant de la cible : A(d) pour le premier capteur et B(d) pour le second capteur.

L'épaisseur e est alors égale à : **e = Cte - A(d) - B(d)**



Dans cet expression, un changement de position de la cible entre les deux capteur va entraîner une diminution de l'une des valeurs, A(d) par exemple, et la même augmentation de B(d) dans l'hypothèse où les capteurs ont une réponse parfaitement linéaire. Comme, dans le réalité, chacun des capteurs présente un écart de linéarité (Cf. chapitre précédent), la valeur de e résultante va dépendre de la position de la cible. L'écart pratique auquel il faut s'attendre est de l'ordre de grandeur de l'écart de linéarité total des capteurs, soit < +/- 0,3 % de l'EM en pratique.

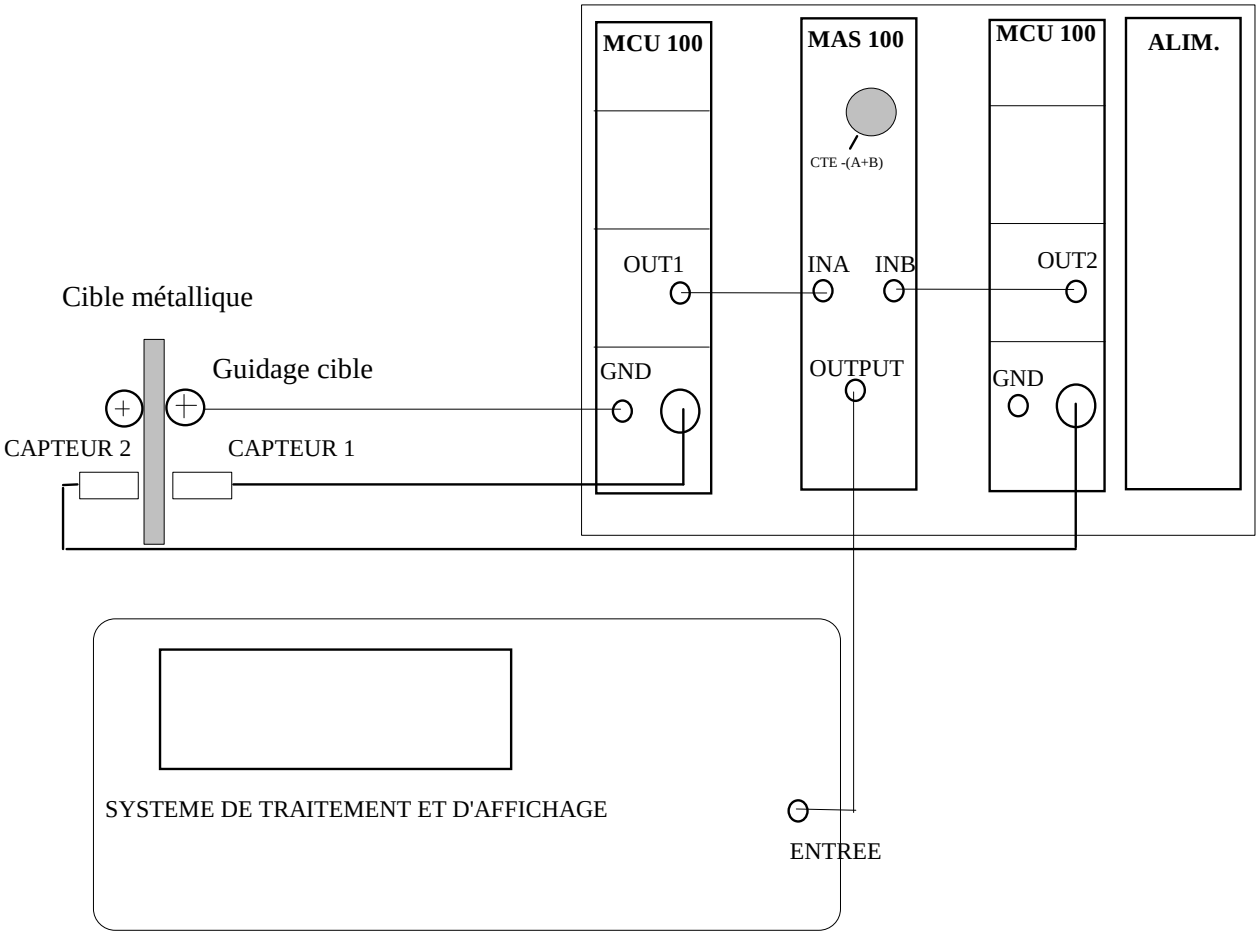
A titre d'exemples, l'incertitude maximale (hors post correction) qu'il est possible d'avoir sur la mesure d'objets de faible épaisseur avec un dispositif standard est donnée dans le tableau ci après :

MODELE	**CC1**	**CC2**	**CC5**	**CC8**	**CC12**
ETENDUE DE MESURE (mm)	1	2	5	8	12
DISTANCE MIN ENTRE CAPTEURS (mm)	1	2	5	8	12
INCERTITUDE MAX SUR e (en µm)	< +/- 3	< +/- 6	< +/- 15	< +/- 24	< +/- 36

REMARQUE : Compte tenu, vu sa taille réduite, de la faible étendue de mesure disponible avec le capteur CC1, celui ci ne tolérera que de faibles déplacements de la position de la cible dont l'épaisseur sera de plus limitée à quelques 0,1 mm.

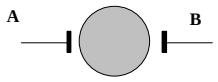
Pour la mesure d'objets de « forte épaisseur », c'est à dire de valeur comparable à l'étendue de mesure du capteur utilisé, la distance maximale pouvant séparer les capteurs est égale à : EM + épaisseur de l'objet.

Le croquis du montage de mesure d'épaisseur sans contact de produits conducteurs est donné sur la figure ci dessous :

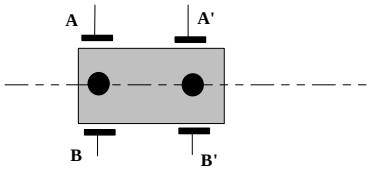


2.1.2 Exemple de résultats

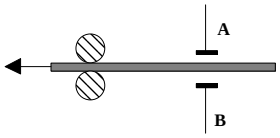
Cas d'application :



MESURE DE
DIAMETRE
CSTE - (A+B)



MESURE DE CIRCULARITE / CYLINDRICITE
CONICITE CSTE - (A+B)



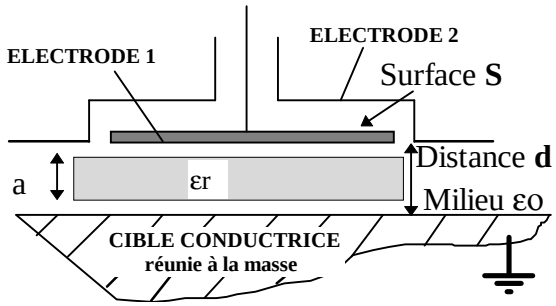
MESURE D'EPAISSEUR
CSTE - (A+B)

Dans le cas de la mesure d'épaisseur de plaques de différentes épaisseurs et de métaux différents, les mesures réalisées avec 2 capteurs CC8 (8 mm d'étendue de mesure) placés à 4 mm (Cte = 5V) l'un de l'autre, ont donnés les résultats suivants :

	TOLE INOX	**TOLE AU4G**	**TOLE LAITON**
MESURE AU PALMER (+/- 5 µm)	1,2 mm	2,5 mm	0,9
MESURE CAPACITIVE	1,195 mm	2,48 mm	0,895 mm

2.2 Cas d'une cible isolante

2.2.1 Principe



Dans ce cas, un seul capteur est nécessaire, l'autre étant remplacé par une cible conductrice réunie à la masse. L'entrefer entre l'électrode de mesure et la cible est donc constitué du corps diélectrique de constante εr et d 'épaisseur a et d'une lame d'air d'épaisseur (d-a) et de constante prise égale à εo.

La valeur de la distance d est fixée.

La capacité mesurée C est alors égale à :

$$C = \frac{S\,\varepsilon o}{(d-a) + a/\varepsilon r} = Co\,\frac{1}{(1-a/d) + (a/d)/\,\varepsilon r}$$

où Co représente la capacité mesurée en l'absence de diélectrique dans l'entrefer.

Connaissant cette capacité ainsi que les valeurs de d et de la constante diélectrique εr, il est possible de déterminer a.

Pour que *l'incertitude de cette mesure demeure réduite*, il est impératif que les valeurs de *d et surtout d'εr soient constantes pendant les mesures*.

En ce qui concerne εr, notamment sur site de production, il est important de connaître les éventuelles dispersions selon les fabrications ainsi que le coefficient de température (et éventuellement d'hygrométrie) de manière à les prendre en compte pour correction.

2.2.2 Exemple de résultats

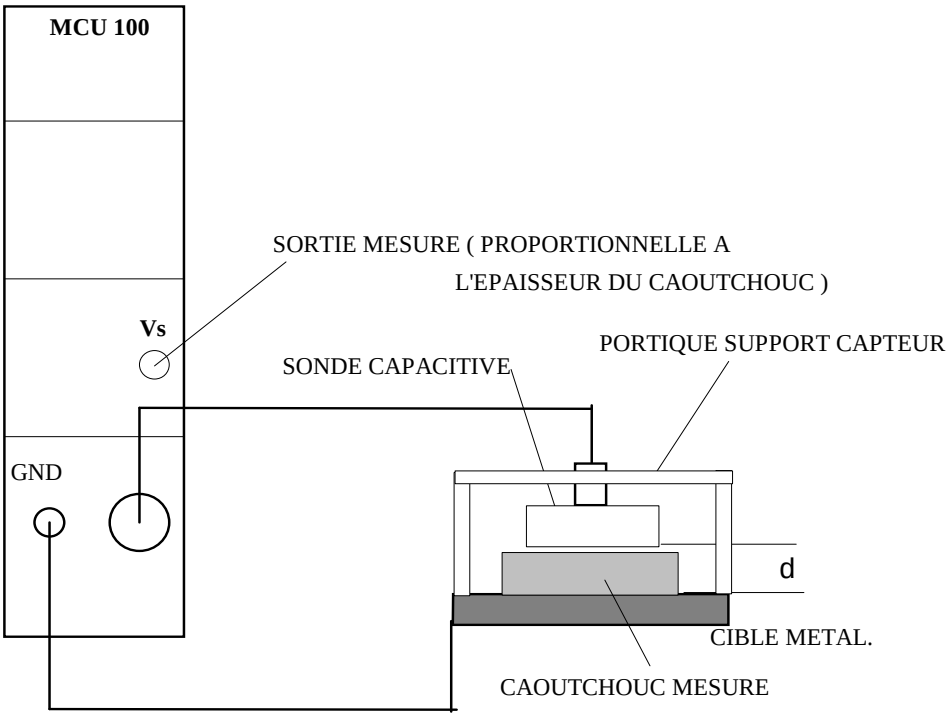
Deux cas sont considérés :

a) cas où la constante diélectrique est connue et stable : (cas le plus typique)

- mesure sans contact de l'épaisseur de films de caoutchouc, de 10 mm d'épaisseur, en défilement
- précision recherchée +/- 0,2 mm (*)
- constante diélectrique du caoutchouc supposée connue(**) et stable pendant les mesures
- 1 point de contrôle au centre de la feuille
- largeur de la feuille = 40 mm
- fonctionnement à température ambiante +/- 10 °C

(*) pour une même valeur de la constante diélectrique du caoutchouc
(**) dans l'hypothèse où des échantillons de caoutchouc d'épaisseur connue sont disponibles, la connaissance de ε_r n'est plus indispensable.

DESCRIPTION TECHNIQUE



Le système proposé met en oeuvre 1 sonde capacitive (Ref CC12), une électronique associée standard (Ref MCU 100Ac) (le rack de montage avec son alimentation a été volontairement omis sur le dessin).

Le capteur (diamètre de la face mesure = 36 mm ; diamètre de fixation = 10mm) est placé face à la cible métallique plane et parallèle à la face mesure du capteur et à distance d. La distance capteur / cible d est choisie de manière à éviter tout contact compte tenu des déplacements selon l'axe capteur que le film caoutchouc peut éventuellement avoir (d de l'ordre de 12 mm). La surface de la cible est au minimum égale à celle du diamètre externe du capteur mais il est préférable qu'elle soit supérieure.

Les capteurs sont positionnés à l'aide d'un support (à définir selon l'application) permettant d'obtenir une qualité de positionnement qui assure la précision finale sur la mesure d'épaisseur requise (soit d connu à environ +/- 0,02 mm).

Principe de la mesure :

En admettant que la constante diélectrique du film caoutchouc (de valeur εr) ***est invariable pendant les mesures et que la distance entre le capteur et la cible est également invariable*** *(à l'echelle de la précision recherchée)*, à partir d'une simple mesure (tension Vs_1), il est possible de connaître l'épaisseur du film caoutchouc mesuré e_{mes} :

On a : $Vs_1 = Vo\ [\ 1 - e_{mes}\ (\varepsilon r - 1) / (\ \varepsilon r * d\ )\ ]$

d'où l'on tire : $e_{mes} = \varepsilon r * d * (\ 1 - Vs_1 / Vo) * (\varepsilon r - 1)^{-1}$

où Vo représente la tension mesurée en l'absence de caoutchouc (valeur constante) et correspond à la valeur d séparant les électrodes.

De manière à encore plus simplifier l'exploitation, il est possible d'introduire le préréglage suivant :

Lors de la première mise en service, on introduit un décalage électrique de la tension de sortie égal à -Vo définit précédemment (à l'aide du potentiomètre « DECALAGE » en face avant des tiroirs MCU).

Lorsque on introduit une feuille de caoutchouc, la sortie mesure devient Vs' tel que :

$$Vs' = Vo\ e_{mes} * (\varepsilon r - 1) / (\varepsilon r * d)$$

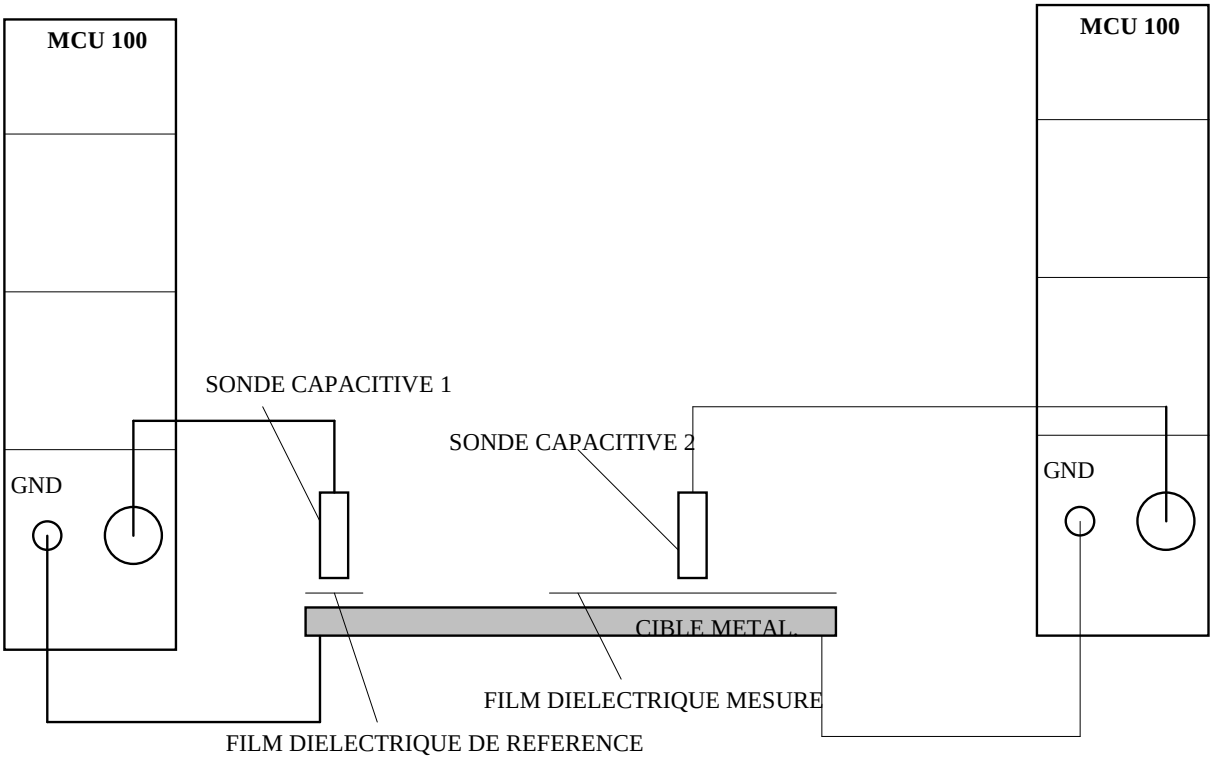
$$\text{d'où } e_{mes} = -\ \varepsilon r * d * Vs' / Vo * (\varepsilon r - 1)^{-1}$$

Cette expression de e_{mes} est de la forme : $e_{mes} = -\ Vs' *$ constante. La mesure d'épaisseur est donc bien linéaire avec la tension Vs. Cette tension peut être directement utilisée par un enregistreur.

L'étalonnage de l'enregistreur ou du système d'acquisition peut être réalisé en plaçant sous le capteur une première feuille correspondant à l'épaisseur la plus importante admise puis en plaçant une autre feuille correspondant à l'épaisseur la plus faible admise. Les deux tensions correspondront aux limites de fabrication.

b) Cas où l'on cherche à s'affranchir de la connaissance de la constante diélectrique ainsi que de ses évolutions :

DESCRIPTION TECHNIQUE RESUMEE



Le système proposé met en œuvre 2 sondes capacitives identiques et deux électroniques associées standard (MCU 100).

Les deux capteurs sont placés face à la même cible métallique et à la même distance. Sous le capteur 1, on dispose le film plastique de référence (même constante diélectrique que le film à mesurer, épaisseur connue = e_{ref}), et sous le capteur 2, on place le film à mesurer. Ce film est sans contact ni avec le capteur ni avec la cible. Il peut donc circuler librement entre les deux. La distance capteur / cible est choisie de manière à éviter tout contact compte tenu des déplacements éventuels selon l'axe capteur que le film peut avoir.

En admettant que la constante diélectrique des deux films est identique pendant les mesures et que la distance entre chacun des capteurs et la cible est la même, à partir d'une simple combinaison de 4 mesures, il est possible de connaître l'épaisseur du film mesuré e_{mes} :

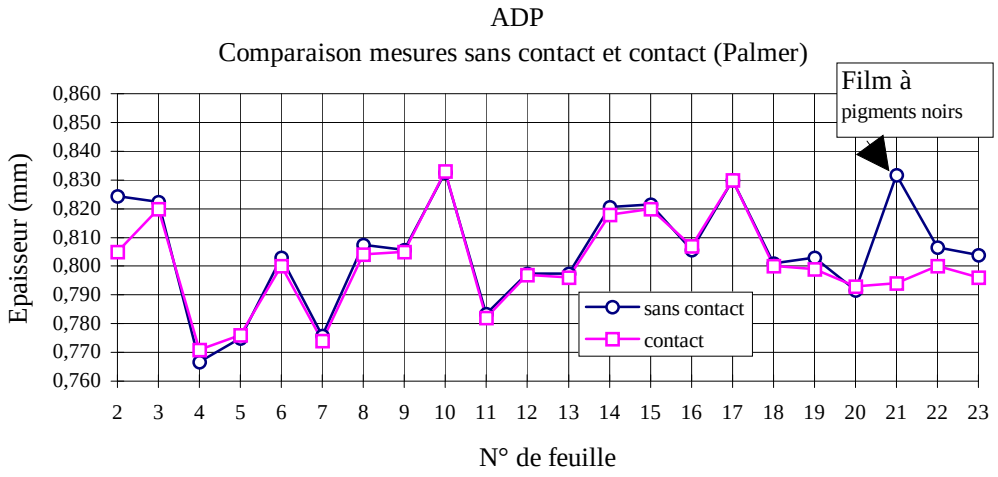
$$e_{mes} = \frac{1 - (Vc2 / Va2)}{1 - (Vc1 / Va1)} * e_{ref}$$

Les 4 mesures effectuées sont :

Mesure du capteur 1 sans film → Va1 en sortie mesure
Mesure du capteur 2 sans film → Va2 en sortie mesure
Mesure du capteur 1 avec film à mesurer entre les électrodes → Vc1 en sortie mesure
Mesure du capteur 2 avec film de référence entre les électrodes→ Vc2 en sortie mesure

Il est possible d'accéder aux petites différences que présentent ces 4 mesures à la condition d'avoir une mesure capacitive stable et à haute réjection de mode commun. Les chaînes capacitives MCU100 ont été spécialement conçues pour obtenir ces qualités en environnement industriel.

c) exemple de résultats obtenu sur films plastique (à base de polypropylène) avec différents pigments de coloration



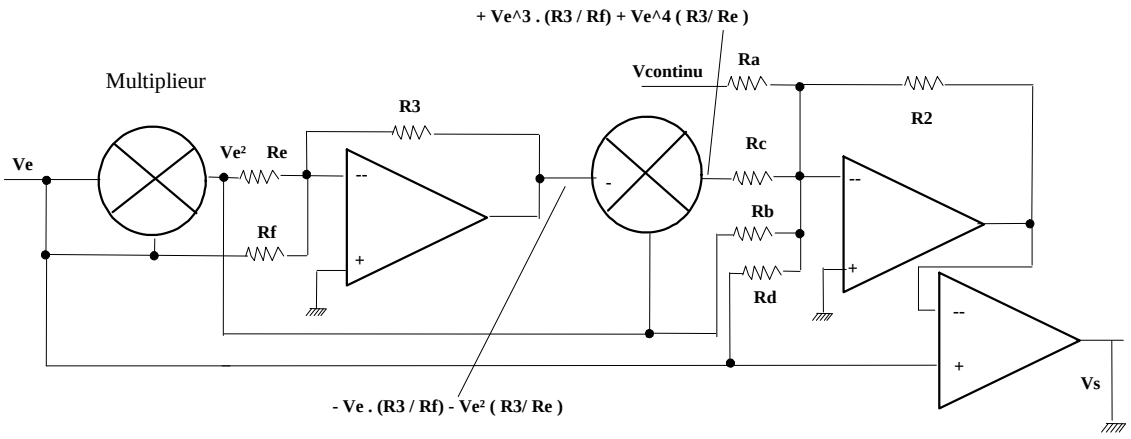
En prenant la même valeur de constante diélectrique, quels que soient leurs couleurs, pour toutes les feuilles mesurées, on constate que l'écart entre les mesures réalisées au contact à l'aide d'un palmer et celles sans contact, est de l'ordre de 10 µm, excepté pour le film noir où il atteint 25 µm (effet éventuel des pertes diélectriques liées au type de pigment à base de carbone).

3. REDUCTION DE L'EFFET DE NON-LINEARITE DU CAPTEUR

3.1 Principe de la méthode analogique

Schéma de principe de la chaîne de linéarisation :

. MODULE MLIN DE LINEARISATION PAR APPROXIMATION POLYNOMIALE

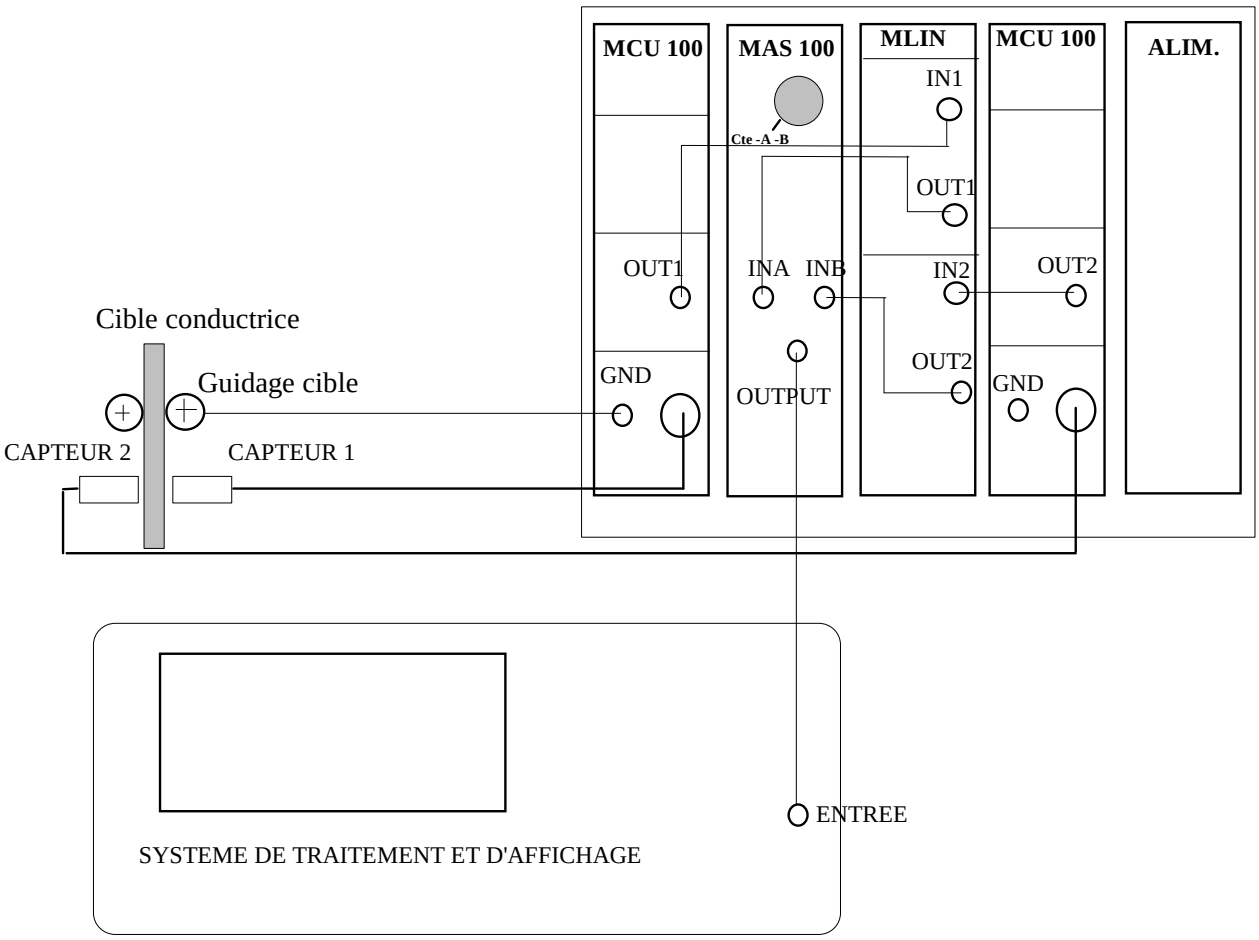


Vs = Vcont . (R2 / R a) + Ve . (1+R2 / Rd) + Ve² (R2/ Rb) + Ve^3 (R3R2/RfRc) + Ve^4 (R3R2/ReRc)

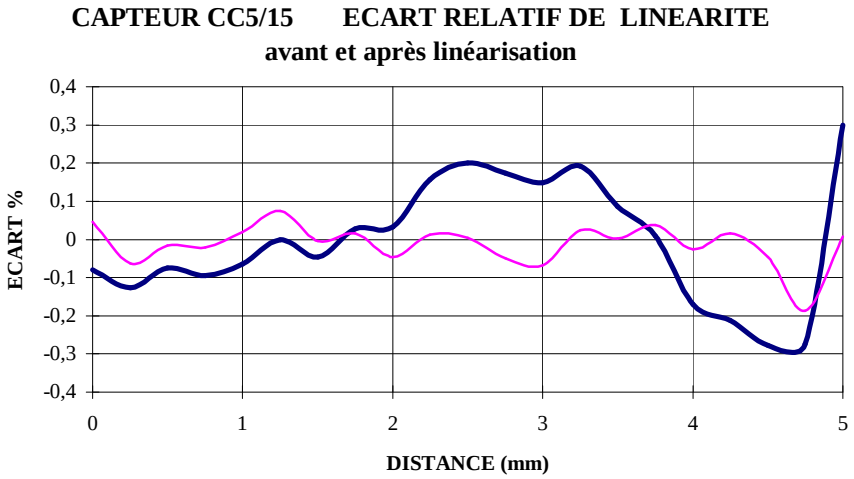
Le signal à linéariser ve est appliqué à l'entrée qui est réunie aux amplificateurs et multiplieurs. En sortie du premier amplificateur, on dispose des tensions ve et ve² affectés de coefficients ajustés par Re et Rf. Le second amplificateur réalise l'addition avec une tension constante dont on peut ajuster l'amplitude et choisir le signe, avec les signaux ve, ve², ve3 et ve4.

L'amplificateur de sortie réalise l'addition entre le signal Ve brut et le terme de correction. Le signal linéarisé Vs est celui issu du troisième amplificateur.

Exemple de mesure d'épaisseur de matériau conducteur avec module de linéarisation des capteurs



3.2 Exemple de résultats



La linéarisation de la réponse du capteur permet de réduire l'écart de linéarité et d'obtenir mieux que +/- 0,08 % de l'E.M sur pratiquement 90 % de cette E.M.

4. PROCEDURES RESUMEES

4.1 Cas d'une cible métallique

NOTA : cette procédure suppose que les deux de voies de mesure utilisées ont été préalablement vérifiées et que leur courbes de calibration sont les plus semblables possible, notamment sur les ¾ de l'étendue de mesure.

a) placer les capteurs (obligatoirement de même type) à une distance entre les faces mesures telle que l'objet mesuré puisse se déplacer sans contact compte tenu de ses éventuels mouvements parasites, et mesurer cette distance à l'aide de cales,

b) s'assurer que cette distance n'excède pas les possibilités en étendue de mesure des capteurs retenus (quand la cible est au plus loin, cette distance est au maximum égale à l'étendue de mesure)

c) choisir le calibre approprié sur les 2 voies de mesure MCU100 (par exemple C pour un capteur CC5, B pour un capteur CC8),

d) mettre sous tension et déconnecter de la voie MAS les câbles venant des 2 voies MCU100 puis positionner le commutateur de la voie MAS sur « CTE - A -B »

e) ajuster à l'aide des 2 potentiomètres à fente tournevis la valeur de la constante « CTE » à la valeur en volt correspondant à la distance séparant les capteurs (qui a été mesurée en a), soit par exemple :

CAPTEUR	**CC2**	**CC5**	**CC8**	**CC12**
ETENDUE DE MESURE	2 mm	5 mm	8 mm	12 mm
DISTANCE	1,5 mm	4 mm	5 mm	8 mm
CTE	7,500 V	+ 8,000V	6,250 V	6,666 V

Cette valeur se calcule de la manière suivante :

CTE = DISTANCE * 10 V / ETENDUE DE MESURE DU CAPTEUR UTILISE

f) connecter les sorties mesures aux entrées « VOIE A » et « VOIE B » du MAS,

g) mettre une cible d'épaisseur connue et reliée à la masse entre les deux capteurs,

h) vérifier que la tension de sortie de la voie MAS correspond à l'épaisseur connue en utilisant la sensibilité correspondant au capteur utilisé,

i) corriger si nécessaire cette valeur en tournant légèrement le potentiomètre « fin » (symbole **.**) de la voie MAS de manière à retrouver cette valeur

4.2 Cas d'une cible isolante

NOTA : cette procédure suppose que la voie de mesure et le capteur utilisés ont été préalablement vérifiés et que la courbe de calibration est la plus proche possible, notamment sur les ¾ de l'étendue de mesure, de la courbe théorique.

a) choisir le calibre approprié sur la voie de mesure MCU100 (par exemple C pour un capteur CC5, B pour un capteur CC8),

b) mesurer la valeur εr de la cible isolante en la plaçant **au contact** entre le capteur et la cible réunie à la masse et noter la valeur de la tension de sortie, soit Vsεr, puis oter la cible d'entre les électrodes,

c) connaissant l'épaisseur de cette cible, placer le capteur à la distance de la cible correspondant à cette épaisseur, puis mesurer Vsc,

d) calculer εr en faisant le quotient :

$$\varepsilon r = Vsc / Vs\varepsilon r$$

e) placer le capteur à une distance **d** de la cible métallique réunie à la masse telle que l'objet mesuré puisse se déplacer sans contact compte tenu de ses éventuels mouvements parasites, et mesurer cette distance **d** à l'aide de cales,

f) s'assurer que cette distance **d** n'excède pas les possibilités en étendue de mesure du capteur retenu,

g) mettre sous tension et **sans placer d'objet** entre le capteur et la cible, mesurer la tension de sortie « à vide » **Vo**,

e) ajuster à l'aide des 2 potentiomètres « DEC » à fente tournevis, la valeur de la tension de sortie telle que cette dernière soit nulle,

f) placer entre les électrodes l'échantillon isolant du b), et relever la tension de sortie **V'** :

La valeur de l'épaisseur se calcule de la manière suivante :

$$\mathbf{e_{mes} = - \varepsilon r * d * Vs'/ Vo * (\varepsilon r -1)^{-1}}$$

h) vérifier que l'épaisseur mesurée ci dessus correspond à l'épaisseur connue en ajustant si nécessaire la valeur de εr utilisée (les mesures faites au contact en b sont en effet sujettes à incertitude, le contact n'étant que rarement « parfait ») .