

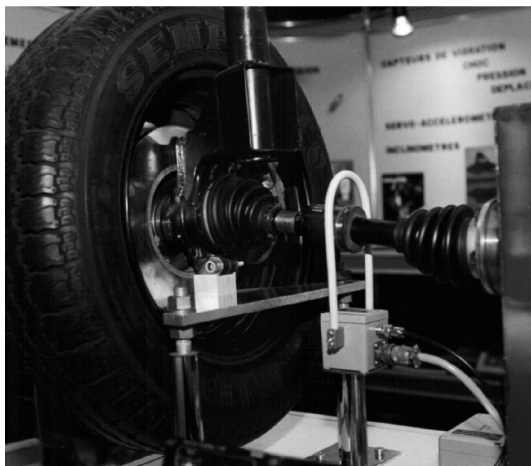
# Couplemètre ‘ Télémètre ‘

De Jean Louis Rouvet

## Préambule

En utilisant un système de télémètre, il est possible de réaliser, avec d'excellents rapports qualité / prix, un dispositif de mesure de couple de torsion fiable et précis. Ce qui suit constitue un aperçu des possibilités offertes par la télémètre pour la réalisation de couplemètres.

Cette présentation suppose que le lecteur soit un peu familier des différents dispositifs habituellement utilisés pour les mesures de couple de torsion. Ceci implique une compréhension générale du fonctionnement des jauges de déformation et quelques notions de base en matière de radio-transmission. Sur demande, pour une étude plus approfondie, il vous sera communiqué les références en matière d'étude de capteurs à jauges de déformation et en matière de dispositif de télémètre industrielle.



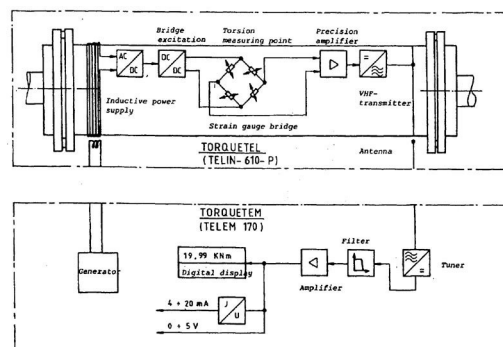
**Fig 1 :** couple sur une transmission de véhicule ( modèle d'exposition )

## Introduction

Le principe des différents types de capteurs doit être bien compris. S'il existe différentes possibilités pour traduire une énergie mécanique en un signal électrique équivalent, le plus pratique et le plus précis est sans conteste celui utilisant les jauges de déformation. Nombre de couplemètres sont construits à partir de cette technologie.

Pour réaliser un couplemètre ‘ tournant ‘ il est possible d'utiliser différents moyens de transmission de l'information entre rotor et stator. Le moyen industriel, précis, efficace, fiable et élégant demeure la radio transmission et parmi les différents concepts, celui reposant sur une double modulation FM.

La figure 2 ci dessous décrit sommairement l'ensemble.



**Fig 2 :** description d'un couplemètre télémètre utilisé dans une raffinerie sur une unité de vapocraquage. Raffinerie se trouvant à l'étranger.

Extrait du manuel d'utilisation.

Les jauges de déformation montées en pont complet sont implantées sur un corps d'épreuve mécanique incluse dans la chaîne cinématique et soumis au couple de torsion devant être mesuré. Un module électronique comprenant les sous ensembles d'alimentation, conditionnement, mise en forme et transmission est embarqué sur cette pièce. L'électronique reçoit les signaux issus du pont de jauge qu'elle alimente et transmet via une antenne la mesure vers la partie fixe, communément appelée 'récepteur'. L'utilisation de la transmission radio permet d'éliminer les problèmes mécaniques dus, par exemple, aux frottements, mais impose l'apport d'énergie par un moyen également affranchi de liaison mécanique.

Les piles ou batteries et les couplages inductifs permettent de résoudre ce problème.

La liaison radio en double modulation de fréquence FM / FM est insensible aux pollutions du type poussières, projection d'eau ou d'huile ou solvant, elle n'est pas affectée par les parasites électriques y compris les autres radio fréquence pourvu qu'une sélection de la fréquence porteuse ait été réalisée. Enfin, les vitesses de rotation et autres phénomènes mécaniques peuvent être pris en compte et devenir négligeables.

- Note : une note d'application sur les mesures en champs magnétiques intenses avec un système de télémessure existe.

Le récepteur restitue à partir de la liaison FM/FM en bande P élargie ( de 150 à 300 MHz – plus de 20 canaux disponibles ), un signal de + à – 10 V pleine échelle proportionnel au couple de torsion.

## Calcul pour la conception d'un couplemètre

Dans tous les cas de figure la chaîne cinématique doit être considérée avec soin et les différentes possibilités bien étudiées.

Une solution consiste, lorsque pour différentes raisons, aucune pièce ne peut venir s'intercaler dans la ligne d'arbre, à utiliser l'arbre machine comme corps d'épreuve et support de la télémessure. Cette solution simple n'est pas forcément la meilleure, une bonne implantation des jauges, une calibration mécanique sérieuse etc. étant souvent beaucoup plus difficile à réaliser.

La seconde possibilité, la plus pratique ( lorsque possible ), est de concevoir un corps d'épreuve particulier pour une application donnée.

Dans d'autres cas que ceux impliquant la télémessure, les considérations de taille, de précision, d'environnement, de coût et par extension du type de signal de sortie souhaité impose le choix d'un type d'équipement.

L'utilisation de la télémessure modifie le mode de réflexion du concepteur. Le calcul d'un corps d'épreuve approprié, en respectant les critères de dimensions, devient l'élément déterminant. La pièce ' sur mesure ' est prévue en fonction de déformations de surface de la structure et en conséquence en fonction des jauges de déformation utilisées et des capacités d'entrée des conditionneurs.

Il n'existe pas de liaison mécanique ou filaire entre rotor et stator, les deux couplées constituent un couplemètre parfaitement cohérent et transparent pour l'utilisateur mais dans le cadre d'une étude pour la réalisation d'un instrument, il est impératif de dissocier ces deux éléments au départ.

L'entrée du conditionneur est prévu pour **V mesure**, arbitrairement, dans le cadre de cette présentation +/- 100 mV. Le conditionneur délivre une tension d'excitation **Ve** que, pour l'heure nous admettrons être de 5 V +/- 0,01 %. La sensibilité maximale du capteur pour **V mes** = 100 mV est donc de +/- 20 mV/V.

D'où :

$$V_{mes} = V_e \cdot K \cdot \varepsilon$$

**K** = Coefficient des jauges et

$\varepsilon$  = Nombre de micro déformations

**K** est déterminé lors du choix des jauges et est une valeur connue. L'inconnue est donc  $\varepsilon$ .

Ces micro déformations conduisent à considérer des notions de base de mécanique.

SECTION	FLEXION		TORSION		
	$J_y$	$J_z$	$J_x$	K	$Z_m/T$
	$\frac{bh^3}{36}$	$\frac{hb^3}{48}$	$\frac{4bh^3 + 3hb^3}{144}$	Rectangle équivalent	
	$\frac{\sqrt{3}a^4}{96}$	$\frac{\sqrt{3}a^4}{96}$	$\frac{\sqrt{3}a^4}{48}$	$\frac{\sqrt{3}a^4}{60}$	$\frac{20}{3}$
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{hb^3}{12}$	$\frac{bh^3 + hb^3}{12}$	$bh^2 [1 - 0,25(1 - \frac{h}{2b})^2]$	$\frac{3b + 1,8h}{2 \cdot h}$
	$\frac{\pi D^4}{64}$	$\frac{\pi D^4}{64}$	$\frac{\pi D^4}{32}$	$\frac{\pi D^4}{32}$	$\frac{16}{\pi D^3}$
	$\frac{\pi (D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi (D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi (D^4 - d^4)}{32}$	$\frac{\pi (D^4 - d^4)}{32}$	$\frac{16 D}{\pi (D^3 - d^3)}$
	$J_y$	$J_z$	$J_x = J_y + J_z$	$\frac{S^2}{40 J_x}$	

Fig 3 : Moments d'inertie

Pour simplifier la compréhension, ce qui suit ne prend en compte que le couplemètre utilisant un arbre classique sur lequel les déformations de surface donneront la valeur du couple de torsion.

**ARBRE EN TORSION**

$M = Fl =$  moment appliqué  
 $L =$  longueur totale de l'arbre  
 $\alpha =$  angle de rotation en radians  
 La distance des jauges n'intervient pas  
 $\varepsilon_1 =$  indication de l'une des jauges  
 $\varepsilon_2 =$  indication de l'autre jauge

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \frac{M}{\pi G R^3} = \frac{R}{2L} \alpha$$

$$\alpha = \frac{2 M L}{\pi G R^4}$$

avec  $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$

Fig 4 : Calcul des micro déformations pour un arbre en torsion.

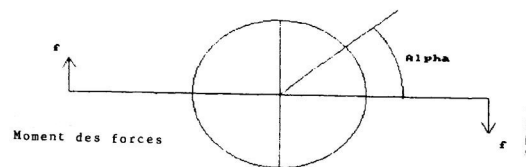


Fig 5 : Moment des forces

L'idée est de calculer  $R^3$  donc d'extraire sa valeur de l'équation initiale.

$$R^3 = M / \varepsilon \pi G = [ M / \varepsilon \pi ] \cdot [ 2 ( 1 + \mu ) / E ]$$

En extrayant la racine cubique de  $R$  on obtient  $R$ . Pour un arbre creux l'équation initiale s'écrit  $MR / \pi G (R^4 - r^4)$  d'où un peu de prudence.

D'évidence, ceci ne peut être réalisé que si le matériau du corps d'épreuve a été choisi.

Pour conserver une marge de manœuvre, les experts télémètre limitent à la moitié le signal  $V_{mes}$ . Ceci permet modifications et réglages essentiels étant donnée la distorsion possible entre calcul et monde réel.

Un grand pas est franchi mais une somme de travaille demeure.

Comme il est possible de le constater, la partie mécanique active est la section de l'arbre sur laquelle les jauges sont implantées. Sur un arbre circulaire, les déformations maximum apparaissent suivant les directions situées à 45 degrés angulaires de la génératrice. Deux jauges de déformation situées à 45 degrés angulaires l'une de l'autre sur la même génératrice et raccordées en demi pont donneront une idée du couple de torsion.

Pour simplifier le montage et s'affranchir des problèmes d'homogénéité liés aux moments de flexion, les jauges sont montées l'une à coté de l'autre. Habituellement, des jauges doubles en chevron sont utilisées et en considération des défauts d'uniformité de la distribution des contraintes, des sensibilités, stabilité et de la précision, 4 de ces doubles jauges sont disposées à 45 degrés angulaires sur une section de l'arbre et raccordées en un seul pont complet.

Le corps d'épreuve, les jauges de déformation et leur montage sont maintenant déterminés. Pour vérifier,  $V$  mes peut être déterminé en utilisant la relation entre la sensibilité en  $mV/V$  et la déformation en  $\Delta R/R$  où

**$V_{mes} = 0,250 \sum \Delta R/R$**  avec  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$  et  $\Delta R_4$  étant les variations de chaque jauge.

Or  $\Delta R/R = K \cdot \varepsilon$

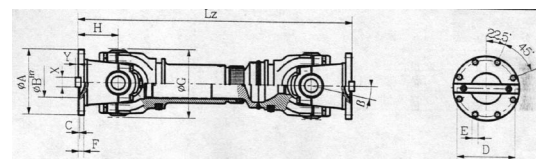
$V_{mes}$  devient accessible en multipliant la sensibilité par la valeur de tension d'excitation du pont soit : 5 V.

Ces calculs purement théoriques peuvent être relativement loin de ce que montrera la pratique. Même la compensation thermique, le soin apporté à la procédure d'installation n'éviteront pas les décalages. Dans la pratique, un étalonnage mécanique est la seule solution pour obtenir une mesure précise.

### Et en parlant de mécanique

Le corps d'épreuve est intégré dans une chaîne cinématique et la précision catalogue des couplemètres du commerce a du mal à s'appliquer à la réalité. Pourquoi ? D'abord le couplemètre du commerce étalonné au jour J dans un laboratoire a été soumis à des conditions idéales avec des liaisons mécaniques idéales.

La liaison mécanique permet la transmission du couple de torsion dans sa totalité comme si la ligne d'arbre n'avait jamais été interrompue. Dès que l'on considère une machine, les défauts d'alignement, les efforts de traction / compression etc. viennent entacher la mesure si l'on insère un corps d'épreuve dans la ligne d'arbre.



**Fig 6 :** Cardan classique

Le cardan classique permet de rattraper des défauts d'alignement mais ne représente pas une solution idéale pour des mesures de précision demandant une grande dynamique et où les efforts de traction compression peuvent être pénalisants.

D'autres accouplements flexibles existent comme des accouplements à lamelles.

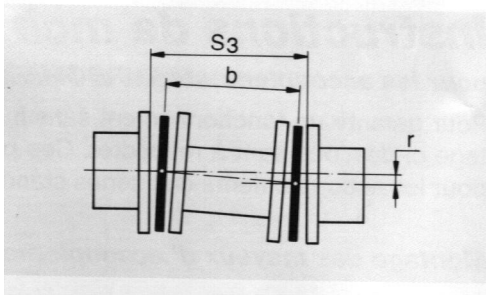


Fig 7 : Accouplement flexible

Les lamelles disposées de différentes façons permettent de réaliser une liaison suffisamment élastique pour absorber suivant les cas les défauts d'alignement ou les transitoires de couple etc. Excellente solution pour des défauts d'alignement, ce type de dispositif lors de mesures de faibles couples transmettra des efforts de compression par exemple. Par ailleurs, pour mesurer des transitoires lors de changement de sens de rotation, l'élasticité joue un rôle d'amortisseur et la dynamique sera filtrée.

La meilleure solution, qui malheureusement ne peut pas toujours être utilisée demeure l'accouplement à denture.

Pour résumer, il existe des accouplements de différents types à griffes, à ressorts, à tonneaux, etc. le choix peut être capital pour telle ou telle mesure.

### Calculs liés à la précision

La précision ou plutôt l'incertitude sur la mesure est une notion galvaudée de feuilles de caractéristiques en ineptie commerciale.

Les effets de la température sur un instrument sont loin d'être négligeables, ils sont de plusieurs natures. Au niveau des jauges de déformation, les demi ponts et ponts complets utilisés habituellement tendent à fournir une compensation inhérente au système si toutes les jauges sont soumises aux même températures. Toutefois, dans la pratique, ces conditions ne sont jamais parfaitement satisfaites et le choix d'une auto compensation doit être réalisé.

Par ailleurs, la dérive de l'échelle de mesure en température doit être compensée. Ceci est réalisé en insérant une résistance thermosensible dans la ligne d'excitation en tension du pont.

Cette résistance **Rcp** se calcule :

$( \Delta S \cdot R \text{ pont} ) \cdot ( \alpha C - \Delta S )$  où  $\Delta S$  est le pourcentage de variation d'échelle par variation d'unité de température, R est la résistance du pont et  $\alpha C$  le coefficient thermique de la résistance de compensation ( en % ).

Pour une première estimation :

$\Delta S = \Delta E + \Delta GF$  où  $\Delta E$  est la valeur en pour-cent de la variation du module d'élasticité du matériau par unité thermique et  $\Delta GF$  le pourcentage de variation du facteur de jauge par unité de variation thermique.

Les constructeurs de ces résistances fournissent des tables.

Il demeurera une erreur liée aux variations thermiques, cette erreur minimale ( au niveau du corps d'épreuve équipé ) doit toutefois être prise en compte dans le calcul global d'erreur de l'instrument.

Les effets de la température sur l'électronique sont connus et des valeurs sont fournies par les constructeurs. Au niveau d'un émetteur, il est possible d'obtenir une dérive thermique inférieure à  $\pm 0,002$  % /°C/P.E. La dérive thermique au niveau de l'ensemble de réception est également fournie par le constructeur et peut être de l'ordre de  $\pm 0,02$  %/°C/P.E.

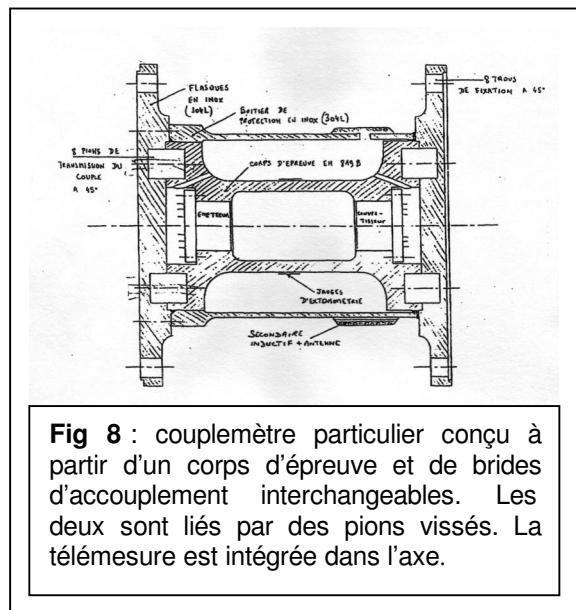
Lors du calcul d'erreur due aux variations thermiques il est important de dissocier l'erreur pour la partie embarquée et l'erreur pour la partie fixe. En règle générale, la partie embarquée est soumise à des températures différentes et fluctuant beaucoup plus que celles applicables à la partie fixe. D'ailleurs, les électroniques embarquées sont données, par exemple, avec des tenues thermiques de  $-40$  à  $+125$  °C alors que la partie fixe ne supporte que de  $0$  °C à  $+70$  °C.

Les erreurs dues à la température sont les plus importantes mais ne sont pas les seules, les défauts de linéarité doivent également être pris en compte. Là encore, l'erreur en terme de linéarité n'est pas identique au niveau de la partie embarquée et de la partie fixe. La partie embarquée possède une linéarité affectée par l'erreur de linéarité affectant le corps d'éprouve avec ses jauges de déformation et par l'erreur de linéarité inhérente à l'électronique alors qu'au niveau de la réception seule l'erreur de linéarité de l'électronique est à prendre en compte.

L'hystérésis n'est prise en compte qu'au niveau des jauges et du corps d'éprouve, elle est négligeable au niveau de l'électronique.

En terme d'erreurs, le point zéro doit être considéré avec soin, les problèmes de la mécanique comme les frottements, les jeux ou le fluage etc. interviennent pour une part non négligeable.

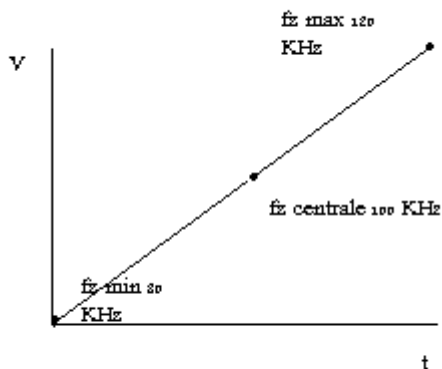
Le corps d'éprouve, équipé de ses jauges de déformation, représente un élément sensible qui aura été équilibré avec soin ( au niveau des jauges ).



**Fig 8 :** couplemètre particulier conçu à partir d'un corps d'éprouve et de brides d'accouplement interchangeables. Les deux sont liés par des pions vissés. La télémessure est intégrée dans l'axe.

Il demeure qu'un léger décalage du zéro est le plus souvent constaté et qu'il convient d'en tenir compte lors du couplage du capteur à l'électronique embarquée. Un ré-équilibrage peut être réalisé en ajoutant des résistances de précision sur deux branches de la moitié du pont. Cette opération lors de mesures extensométriques classiques est réalisée au niveau du module électronique au travers d'un potentiomètre. Dans le cadre de la télémessure l'équilibrage s'opère tel que décrit, en ajoutant des résistances parce que le potentiomètre ne supporte pas la rotation et qu'il n'existe pas de lien entre parties fixe et embarquée.

Un équilibrage fin prend en compte le conditionneur embarqué et la traduction du signal en fréquence.



**Fig 9** : Conversion tension / fréquence

En effet, le zéro mesure est traduit pour la transmission en fréquence de sous porteuse dont la valeur au centre de la bande utilisée correspond au zéro réel. En imaginant que la fréquence centrale est de 100 KHz, un pont parfaitement équilibré donnera cette valeur, un léger décalage se traduira par des fractions de Hertz. En négatif, le signal tension deviendra une valeur entre la fréquence centrale et la fréquence min et à l'inverse en positif entre la fréquence centrale et la déviation max. Pour un réglage pointu, un accès à cette fréquence de sous porteuse doit être disponible au niveau du récepteur. Un très faible décalage de zéro, traduit par un écart par rapport à la fréquence centrale pourra être rattrapé en trichant sur le zéro électrique accessible au niveau du récepteur.

Une astuce de réglage consiste à remplacer la résistance d'équilibrage par un potentiomètre pour peaufiner le réglage.

Il suffit d'implanter une résistance de précision de valeur voisine avant d'agir sur le potentiomètre du récepteur pour ajuster le zéro.

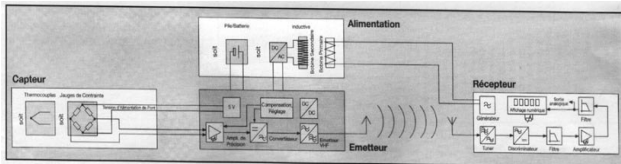
Toutes les erreurs interviennent dans le calcul de l'incertitude globale de l'instrument, une somme quadratique des erreurs donne une excellente idée du maximum d'incertitude susceptible d'entacher la mesure.

Un autre facteur intervenant pour la qualité de l'instrument est le niveau de bruit entachant la mesure effectivement restituée par le récepteur. Ce niveau de bruit est, dans le cadre d'un monovoie, de l'ordre de 60 dB.

Les éléments ci-dessus permettent d'aborder une calibration électrique. Une résistance de réglage de gain donne accès à l'ajustage de l'échelle de mesure.

Le gain est calculé de manière classique avec le rapport  $V$  sortie sur  $V$  entrée.  $V_s$  donné, par exemple à 1 V sur un maximum de 100 mV P.E. pour  $V_e$  soit un gain de 10. La résistance de réglage de gain est alors fonction de la résistance de contre réaction de l'amplificateur ( pour simplifier, notons 100  $K\Omega$  ). Pour éviter des signaux pouvant générer une oscillation de l'amplificateur, ce dernier est conçu avec deux étages dont un fixe avec une valeur de gain minimum de 5. Dès lors le gain de 10 doit être divisé par ce facteur de 5 pour trouver la plage réglable de 2. La résistance de gain devient alors  $100 / 2 = 50 K\Omega$ .

L'erreur globale sera fonction du réglage de la tension électrique en sortie de l'unité de réception et correspondant à la pleine échelle de mesure. Comme pour le zéro, l'accès à la fréquence de sous porteuse permet un excellent contrôle et de modifier le



réglage en agissant sur la sortie électrique.

**Fig 10** : Schéma de principe de la télémesure monovoie.

Un instrument calibré électriquement présente une erreur globale parfaitement calculable et vérifiable grâce à un étalonnage mécanique.

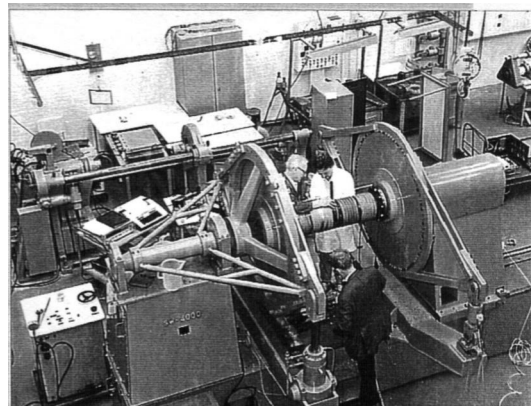
Pour terminer avec les calculs liés à la précision, il convient d'évoquer la résistance 'cran de calibration'. Au travers d'une alimentation inductive, il est possible d'envoyer des informations simples comme des informations tout ou rien de commutation. Ainsi, une résistance prévue pour réaliser un cran de calibration sera raccordée sur une branche du pont par l'intermédiaire de cette commutation. L'intérêt est de pouvoir vérifier le réglage électrique du gain et de le ré-ajuster en cas de besoin. De cette façon seule une dérive mécanique de type fluage pourrait altérer à brève échéance la précision de l'instrument. La vérification peut être réalisée pendant le fonctionnement ou bien avant ou après essais.

Les vitesses de rotation, les pollutions du type projections d'eau, de poussières, d'huile etc. sont sans effet.

De même que les champs électriques importants ( sous réserve de précautions ) ou les radio fréquences ( pourvu qu'elle soient distantes de la fréquence porteuse. ).

### Calibration mécanique

Le meilleur moyen de réaliser un couplemètre de précision est d'effectuer une calibration mécanique.



**Fig 11** : Banc d'étalonnage

La première idée qui vient à l'esprit est de bloquer l'arbre d'un côté et d'appliquer à l'extrémité d'un bras de levier connu ( 1 mètre par exemple ) des masses représentant l'effort.

Ceci n'est pas un moyen précis, l'application d'un couple réel est de loin beaucoup plus fiable. C'est donc avec un double bras de levier de part et d'autre de l'arbre et l'application de forces de même amplitude et de sens inverse qui permettra d'étalonner précisément le couplemètre. Des poulies peuvent être utilisées pour le montage. L'angle de l'arbre par rapport à l'horizontal doit être, s'il existe, mesuré et un calcul de son influence pris en compte. Les puristes et les laboratoires agréés prennent aussi en compte la gravité.



Lors d'utilisation de poids à l'étranger, plus particulièrement aux Etats Unis, la livre doit être prise avec sa valeur réelle 0,453 Kg.

Lors de la calibration sur banc utilisant des brides d'accouplement entre partie fixe et point d'application du moment de torsion, il convient d'utiliser des montages précontraints pour éviter les jeux et les erreurs, notamment d'hystérésis qui seraient générées. Pour parfaire le montage mécanique, les efforts parasites dus au corps d'épreuve, comme la flexion, peuvent être compensés.

L'expérience montre qu'un couplemètre étalonné en statique donne d'excellents résultats en rotation si, toutefois, la chaîne cinématique ne vient pas induire de nouvelles incertitudes.

Les erreurs mesurées sur un instrument étalonné sont inférieures à 0,2 % de la pleine échelle sur un gradient thermique de 50 °C. Un instrument de classe 0,1 % est tout à fait réalisable.

L'étalonnage mécanique permet de déterminer avec précision la sensibilité réelle du capteur c'est à dire du corps d'épreuve équipé de ses jauges de déformation. Le plus sage est souvent de réaliser cet étalonnage en évitant d'inclure la télémesure. En effet, la télémesure est une électronique délivrant une alimentation au pont de jauges, cette alimentation peut être mesurée et sa fidélité est incontestable. La tension électrique issue du pont peut être simulée à l'entrée de l'amplificateur et une calibration électrique pourra être réalisée.

En conséquence, un tracé de la courbe en sortie de l'électronique avec un signal simulé correspondant à la sortie du pont de jauges permet d'établir une correspondance point par point. Une intervention malencontreuse au niveau de l'électronique peut alors être réparée puisque l'étalonnage mécanique donne les valeurs en sortie du pont. Par ailleurs, cette procédure autorise le remplacement du corps d'épreuve par n'importe quel autre sous réserve d'un réglage électrique de l'électronique.

### **Multimesure**

Les couplemètres peuvent être réalisés avec deux ponts de mesures distincts soit pour prévenir un quelconque problème de pont endommagé soit pour obtenir une mesure redondante. Dans le cas d'une mesure redondante un ensemble de télémesure deux voies en multiplex de fréquence doit être utilisé ou bien deux émetteurs monovoie.

Pour des mesures particulièrement pointues, il est possible d'associer la mesure de couple de torsion à une mesure thermique prise au droit d'une jauge de déformation de manière à réaliser une corrélation. La calibration doit alors être prévue avec un cycle thermique en étuve et le relevé des points de mesure tient compte à la fois de la dérive corps d'épreuve / jauges pour la première étape puis de la dérive globale de la partie embarquée incluant l'électronique.

Les problèmes de dynamique des signaux ne se posent plus réellement tant pour des mesures de couple redondantes que lors de l'association de la mesure thermique. Un émetteur 2 voies permet de conserver une bande passante, par voie, du continu à 10 KHz.

Les mesures complexes peuvent être prises en compte, des balances multicomposants peuvent être créées avec les mesures des trois moments et des trois forces.

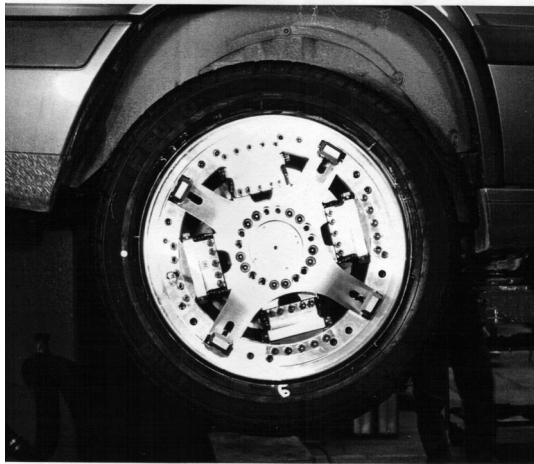


Fig 12 : Roue Vélos

La roue dynamométrique est un excellent exemple d'utilisation de la télémesure multivoie en multiplex de fréquence.

La roue dynamométrique permet les mesures des trois moments et des trois forces, un tel développement suppose une expertise dépassant les compétences des partenaires usuels, le LBF de Darmstadt en Allemagne a investi son temps pour concevoir le capteur et fait confiance à la télémesure pour la transmission.

#### **Le point sur l'apport d'énergie**

L'apport d'énergie est loin d'être simple lorsque l'on supprime les liaisons filaires.

Les sources d'énergie embarquée, si l'on excepte les solutions farfelues du type capteurs solaires etc. sont forcément représentées par des piles, des batteries ou des couplages inductifs.

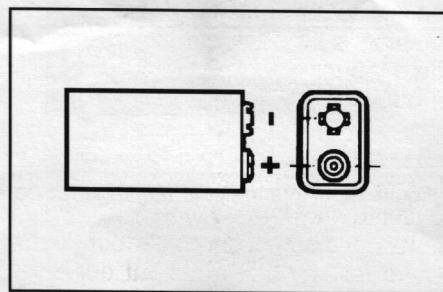


Fig 13 : Pile 9 V Lithium classique utilisée dans une application télémesure.

La pile Lithium donnent d'excellents résultats tant en terme de durée que de tenue aux accélérations, vibration et températures.

Il existe d'autres types de piles et batteries mais l'idéal demeure l'alimentation inductive.

Il s'agit d'un transformateur utilisant l'air comme entrefer. Nul besoin de rotation et nul besoin de contact physique, l'alimentation inductive apporte l'énergie d'un primaire de transformateur sur un secondaire et cela sans contact physique. S'il existe des possibilités de calcul de ces couplages, l'idéal pour un néophyte est de faire confiance en l'expérience des spécialistes télémesure.

Les années d'expertises montrent qu'il faut une formation sur le tas et une solide expérience pour éviter tous les pièges de l'induction.

Mécaniquement, un primaire et un secondaire en vis à vis sont installés. Electriquement, l'un induit sur l'autre avec des pertes considérables l'énergie utile à l'alimentation.

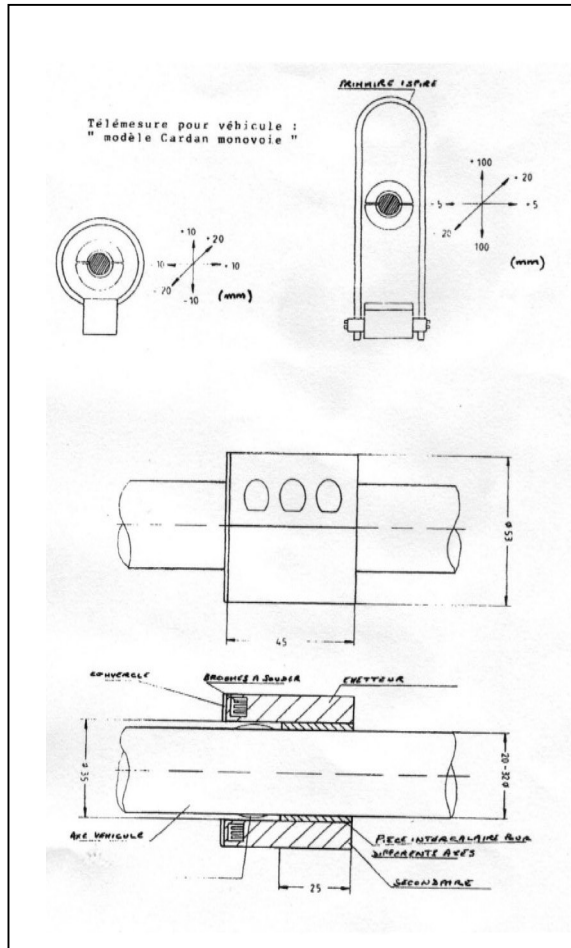


Fig 14 : Alim. Inductive sur transmission de roue

Le couplage inductif utilise la résonance de deux bobines, primaire et secondaire, ce moyen pourrait sembler séduisant pour transmettre l'information mesure. Il faut toutefois conserver en mémoire que les fluctuations et erreurs induites par ce type de transmission ne sont pas gênantes pour le transfert d'énergie ou d'ordres simples tout ou rien, en revanche la transmission d'une mesure précise est plus délicate.

Ceci justifie le choix de la double modulation FM plutôt que de l'induction pour le transfert précis de la mesure.

### Connectique embarquée

Habituellement, le couplétre est inséré dans une chaîne cinématique et l'utilisation de connecteurs est à proscrire car il est impossible de les disposer coaxialement par rapport à l'arbre.

Certains couplétres montés sur machines tournantes sont liés à un collecteur tournant installé en extrémité de l'arbre. Il va de soi que la télémètre remplace très avantageusement le collecteur tournant puisqu'elle n'est ni sujette à l'usure ni au parasitage.

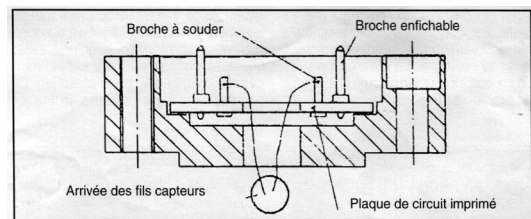


Fig 15 : Connecteur forte accélération centrifuge ( 100 000 g )

Le connecteur développé pour des applications turbines permet une installation rapide de l'électronique en extrémité de l'arbre. C'est à partir de cet accessoire qu'a été développée une nouvelle série de télémètres alimentés en inductif mais transmettant sur une porteuse infrarouge. Ce dispositif est 30 % moins coûteux qu'une liaison radio et représente une solution intermédiaire entre collecteur tournant et télémètre.

## Antennes

Le calcul et la conception des antennes sont à l'image du couplage inductif assez complexes et relèvent la plupart du temps de l'expérience. Dans l'absolu, le calcul d'une antenne d'un quart d'onde s'écrit :

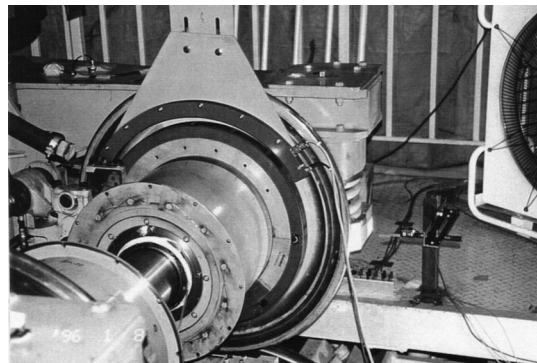
$\lambda/4 = V/fz$  ou  $V = 300$  Méga et  $fz$  est la fréquence porteuse.

Une fréquence porteuse choisie dans la bande P entre 215 et 260 MHz sera, par exemple de 240 MHz d'où une longueur d'antenne  $\lambda/4 = (300/240)/4 = 0,312$  mètre. Cette valeur est mal pratique car l'antenne ne doit pas être trop longue pour ne pas se reboucler ou trop courte induisant des trous de transmission. Par ailleurs, le rayonnement des antennes, les problèmes d'absorption d'ondes réfléchies etc. sont source de soucis. En réalité, l'étude et la réalisation des antennes sont assez simple parce que ne nécessitant pas une précision importante (sauf dans quelques cas particuliers).

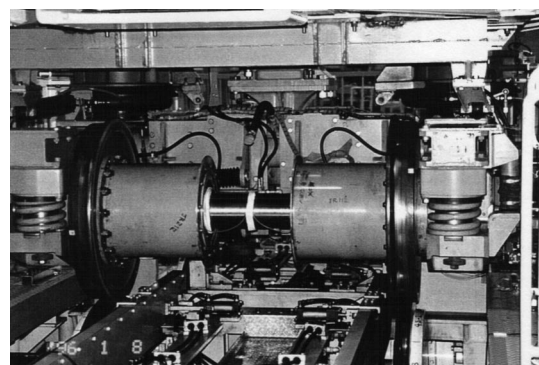
Parmi ces cas particuliers, les arbres tournant ou oscillant à l'intérieur d'un tube lui même tournant ou oscillant. Ces cas très particuliers imposent l'utilisation d'un double bouclage inductif et naturellement de 'relais' au niveau des antennes. Dans la pratique, les antennes d'émission et de réception utilisées avec des alimentations inductives sont directement construites à l'intérieur des bobinages primaires et secondaires.

## La mécanique annexe

Un couplemètre complet comprend donc le corps d'épreuve équipé avec les éléments indispensables à l'alimentation, au conditionnement, à la transmission etc.



**Fig 16** : Couplemètre monté sur une machine. Il est possible d'intégrer les composants embarqués au corps d'épreuve et de préparer, par exemple couplage inductif et antenne directement sur la pièce mécanique. Il est aussi possible de créer un support mécanique destiné à supporter les éléments (voir la couronne en Fig 16).



**Fig 17** : Autre vue du couplemètre de la Fig 16

Il n'existe pas de règle stricte en matière de support d'émetteur, tout peut être imaginé. Colliers, supports annulaires monoblocs ou en demi-coquilles etc. Préférer des matériaux légers comme l'aluminium pour supporter un émetteur et des matériaux non métalliques pour supporter les bobines secondaires en prenant soin de choisir un matériau compatible avec des collages à la résine époxy et aux vernis. Le montage sur l'arbre peut être effectué de différentes manières : collages, serrages par vis etc.

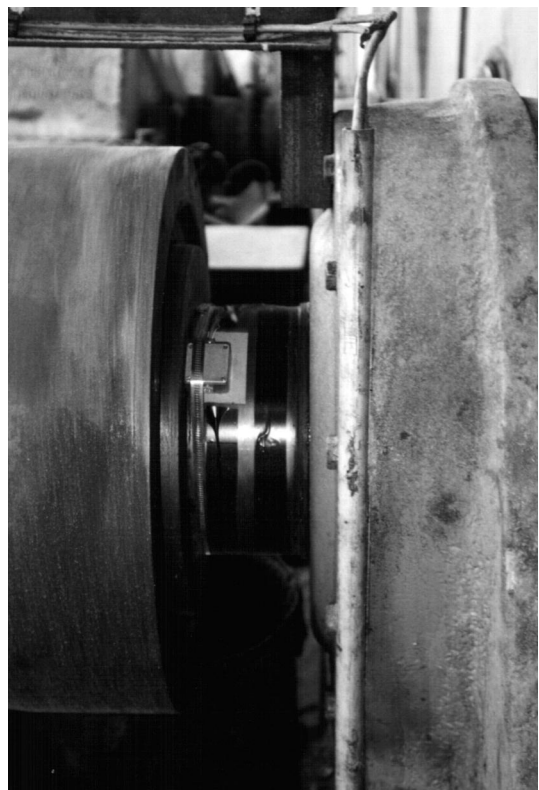
Les liaisons filaires entre élément sensible et électronique doivent tenir compte de la vitesse de rotation et d'éventuels parasites venant générer du bruit avant l'entrée de l'amplificateur. Les liaisons entre couplage inductif et émetteur ne posent pas de réel problème. En revanche, la liaison entre l'antenne et l'émetteur doit être constituée d'un câble coaxial au delà d'une certaine distance.

Au niveau des éléments statiques les longueurs de câbles sont également à prendre en compte pour, par exemple installer des boîtiers relais amplificateur entre générateur inductif et bobine primaire et dans certains cas une amplification sur la ligne d'antenne de réception ( au delà de 50 m ).

Que ce soit sous forme de valise portable, de rack ou de module embarquable pour l'automobile, le récepteur alimenté de 10 à 32 VDC ou en 220 V / 50 Hz est simple d'utilisation et délivre le signal mesure sous la forme de + à - 10 VDC pleine échelle filtré ou non filtré.

La bande passante d'ensemble est du continu à 5 KHz ( - 3 dB ) en standard et peut aisément être étendue de DC à 10 KHz ( - 3 dB ) pour des mesures de transitoires au démarrage, à l'arrêt, au changement de sens etc.

Des boîtiers IP 65 sont utilisés pour certaines atmosphères particulières et un ensemble couplemètre peut être fourni pour des atmosphères dangereuses ( Ex. ). Attention, ponctuellement des instruments complets on été qualifiés Ex, les éléments, individuellement sont conformes mais les couplemètres étant réalisés ' sur mesure ' il est impossible de qualifier rapidement et à moindre coût un ensemble.



**Fig 18** : Couplemètre comprenant un émetteur sous boîtier métal monté par collier serreflex.

## **Procédure**

Il existe une procédure particulière pour la réalisation d'un couplemètre basé sur la télémesure. Souvent cette procédure est utilisée en interne et n'est pas communiquée à l'utilisateur.

**Voir procédure en annexe.**

## **Un couplemètre intelligent**

Il est possible de réaliser un couplemètre intelligent. Un capteur intelligent est en réalité géré par microprocesseur. Il ne faut pas confondre capteur géré par un microprocesseur et transmission numérique. Les télémesure numérique effectuent un travail similaire à celui de la télémesure analogique puis transforment le signal en mots binaires. C'est ce mot qui est transmis. Les défenseurs du numérique le disent plus précis. En réalité, le mot est inaltérable, c'est le mot transmis qui est restitué ( si la transmission passe correctement ), la mesure n'est pas plus précise, le mot contient le bruit qui est converti avec la mesure et le résultat sera entaché d'erreurs de linéarité etc. inhérentes à l'étape analogique du traitement

Un capteur intelligent est constitué de l'ensemble capteur et transmission analogique, la sortie est alors traité par un microprocesseur. Pour ne plus avoir à raisonner en terme de linéarité, hystérésis, dérive thermique etc. Le capteur est soumis à un étalonnage physique conséquent durant lequel des coefficients de correction seront déterminés et intégrés à une équation gérée par le microprocesseur. Ainsi, la mesure restituée sous forme numérique après correction de toutes les erreurs sera de bien meilleure qualité.

L'utilité de créer un capteur intelligent peut sembler tout relatif, compte tenu des coûts d'étalonnage, des erreurs acceptées habituellement par les utilisateurs qui pensent aux précisions catalogue des constructeurs etc. Le meilleur des capteurs implanté dans une chaîne cinématique  $\lambda$  verra ses erreurs dues à la chaîne cinématique largement plus importantes que la marge offerte par un capteur classique de qualité

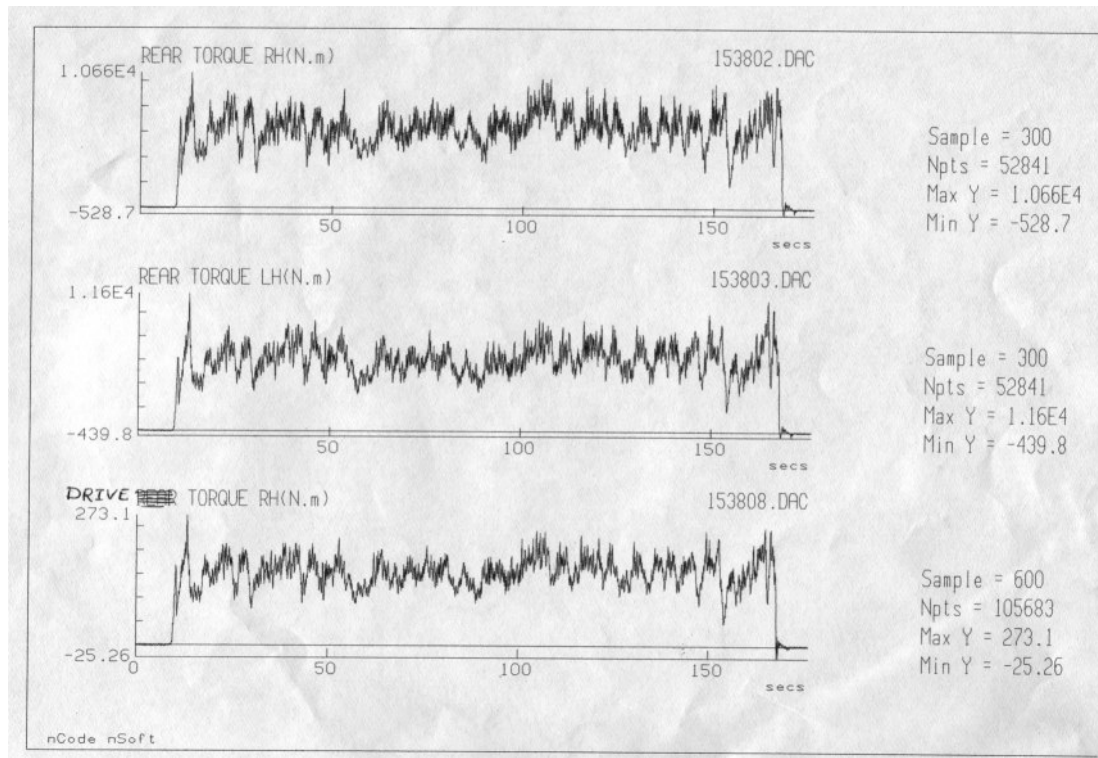
## **Des capteurs exotiques**

Des réalisations très particulières ont fait l'objet d'études approfondies. Des établissements hyper compétents comme le CETIM ou Hispano Suiza se sont attelés à résoudre des problèmes très délicats. Ainsi, un couplemètre 10 Nm pleine échelle a été réalisé par le CETIM pour des mesures de référence sur des machines d'essais de pompes. Un institut Allemand a réalisé comme montré sur la photo Fig 12 une roue dynamométrique où les couples ou moments en x, y et z sont mesurés et où l'interaction pendant le roulage est parfaitement connue.



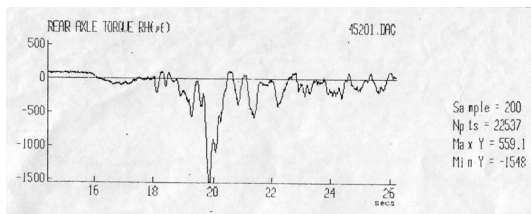
Fig 19 : Couplemètre intégré à une boîte à vitesse, l'émetteur fait 6 mm d'épaisseur, 50,5 de diamètre interne et 68 de diamètre externe.

## Des résultats



**Fig 20** : Mesures de couples simultanées sur arbres arriere de véhicule et arbre sortie de boîte.

Ces résultats ont été obtenus sur un tracteur agricole dans un pays d'Asie. On note la corrélation des points de mesure entre les trois couples. Pour différents motifs, ces mesures ne peuvent être commentées plus avant mais représentent un excellent exemple.



**Fig 21** : Couple de torsion sur roue arriere de tous terrains.

Ce deuxième exemple montre une mesure différente qui sans faire état de la précision permet d'évaluer un comportement sur terrain très difficile.

Les exemples d'enregistrements ne manquent pas et il serait aisé de présenter des corrélations couples sur différentes machines, des analyses de puissance lorsque la vitesse de rotation est associée au couple ou des analyses d'organes ( freins, embrayages etc. ) sur des machines d'essais ou en réel sur véhicules routiers ou ferroviaires etc.

Les résultats sont parlants car ils représentent le quotidien des spécialistes d'essais. Les préoccupations sont multiples mais l'absence de lien physique et l'excellence des résultats sont particulièrement significatives pour des experts.

## Conclusions

La mesure de couple de torsion est un métier à part entière et la télémesure est une autre forme d'expertise. Combiner les deux ne permet pas de se proclamer spécialiste car les spécialistes en mécanique, les spécialistes des jauges de déformations, les spécialistes de la télémesure, des couplages inductif et parfois de l'enregistrement et du traitement analytique ( voire nombre d'autres ) doivent se réunir pour offrir une solution ' cousue main ' correspondant à l'application. Attention, cette somme d'expertise ne conduit pas à des instruments plus onéreux d'autant que la conjoncture fait que les experts ont besoin de vivre et que l'accroissement constant de la demande permet d'utiliser des savoir faire acquis.

La solution télémesure est en passe de devenir la solution élégante et bon marché que les utilisateurs espéraient.

La télémesure n'est plus une aventure et la mesure de couple de torsion vendue sur catalogue devient dépassée, faute de science exacte, le moyen de mesure ' adapté ' répond enfin aux attentes des utilisateurs.

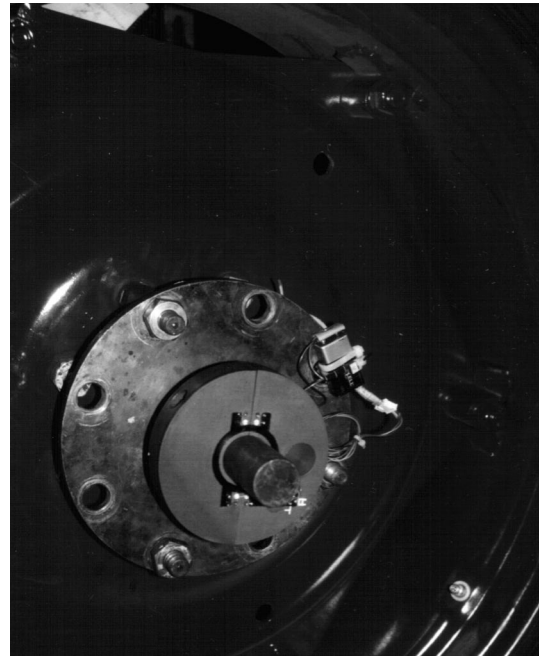


Fig 22 : Télémesure sur roue de véhicule.

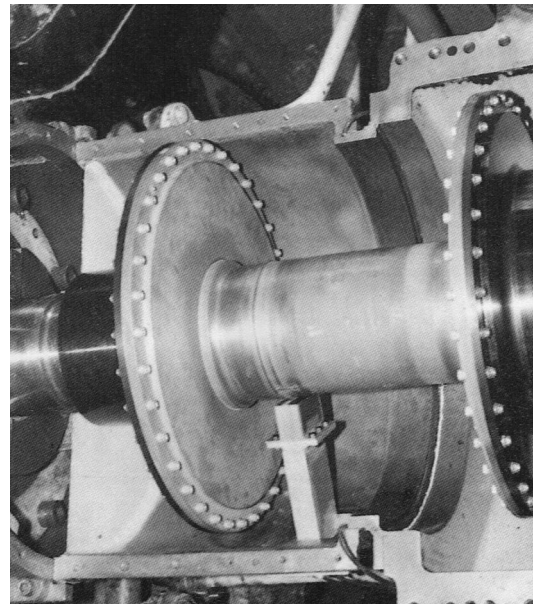


Fig 23 : Couplémètre industriel sur accouplement Bendix.



## **Références**

Vishay Micromesure	Lyonel
Ricard CETIM Senlis	Raymond Buisson
Aydin Vector	Richard Van
Doren	
Telemetrie Elektronik	Klauss Diefenthaler
Hispano Suiza	Christian Roger
Micro Com Corp	Peter Snedker
Fraunhauffer Institute	Andréas
Rupp	
White Sands M.R.	Telemetry standard Team
M.C.E.	L'équipe du Labo
Photos	Telemetrie Elektronik Gmbh / MCE
Illustrations	Vishay Micromesure / MCE. / Utilisateurs

Ce document est référencé 99/061 et est une mise à jour de Naptor – version juin 2006.

Complément et autres documents sur demande.

De : Jean Louis Rouvet – Giacintec

***Giacintec***  
*Mesure, Télémessure, Equipement*

***T.C.E.***  
*Télémessure, Capteur, Electronique*