

## Journée Technique - Mécatronique

---

# Un exemple de projet collaboratif en mécatronique : « Contactless Optical Torque Sensor (COTS) »

Eric PADIOLLEAU  
CETIM

Pôle Mécatronique, Transmissions et Capteurs



# Sommaire

---

- 1. Contexte**
- 2. Partenaires**
- 3. Description du projet**
- 4. Principaux résultats obtenus**
- 5. Synthèse**

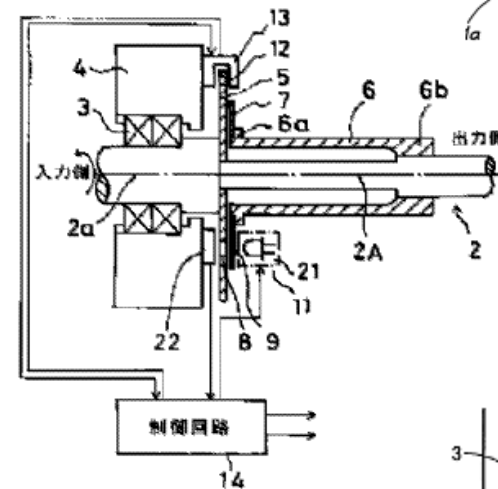
# Utilisation de la mesure de couple

- Dans le domaine de la surveillance des machines tournantes
  - Maintenance prédictive
    - Calcul de durée de vie résiduelle
    - Calcul de cumul de charge
    - Disponibilité machine
  - Détection de défauts
- Besoin
  - Technologie robuste et fiable
  - Coût réduit

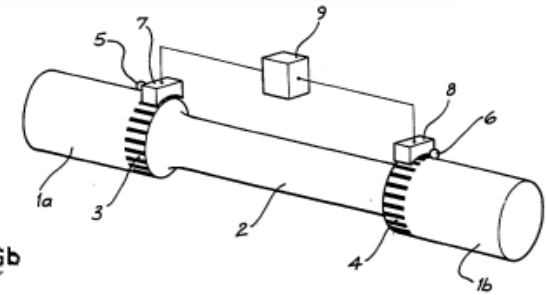
## Mesure de couple

### ● Technologies de mesure

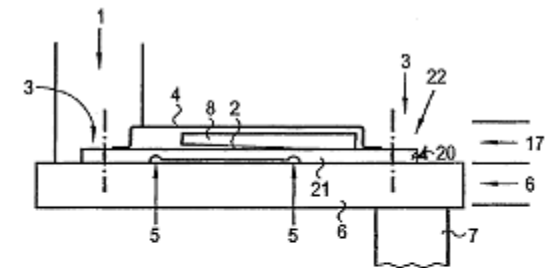
- Pont de jauges
- Méthode magnétique
- Méthode optique
- Ondes acoustiques de surface (SAW)
- Capacités
- Interférométrie
- Pression dans un liquide
- Impédance magnétique géante (GMI)



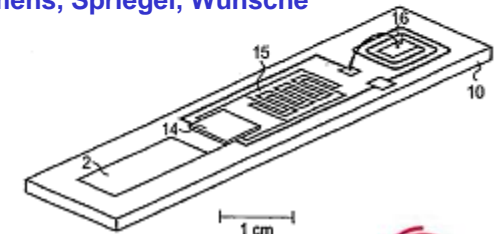
Harmonic Drive Systems



Bishop Innovation



Doemens, Spriegel, Wünsche



Centre technique des industries mécaniques **cetim**

### ● Technologies de transmission du signal

- Boucle d'induction
- Ondes radio
- Méthode optique

# UTC - Laboratoire Roberval

## ● Mesure de déplacement

- Capteur à fibres optiques
- Haute résolution et grands déplacements
- Composants simples et bon marché



**Laboratoire Roberval**  
Unité de recherche en mécanique

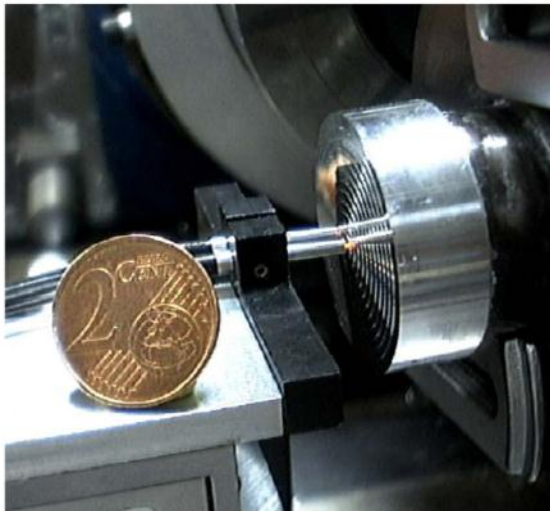


Fig. 15. Experimental setup for long-range measurement.

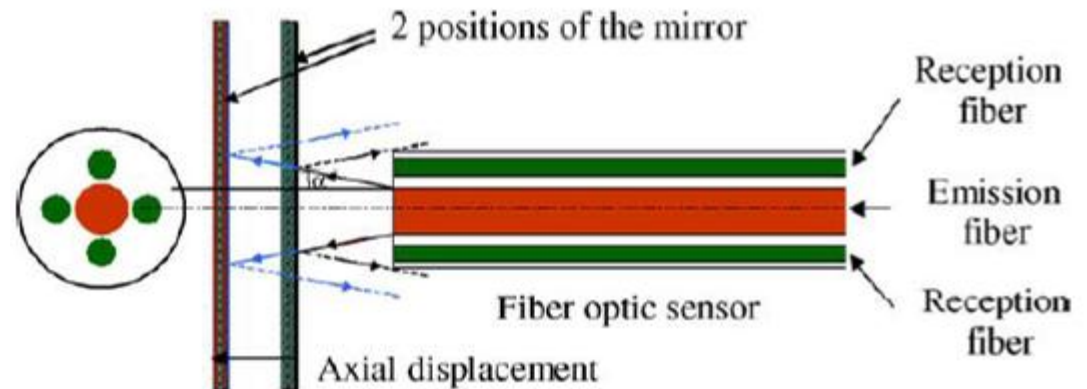


Fig. 1. Fiber optic sensor.

# CEDRAT Technologies

- **Conversion torsion / déplacement**
  - Capteur de couple existant mais...
  - ... mesure de déplacement onéreuse
    - Recherche d'une solution à bas coût

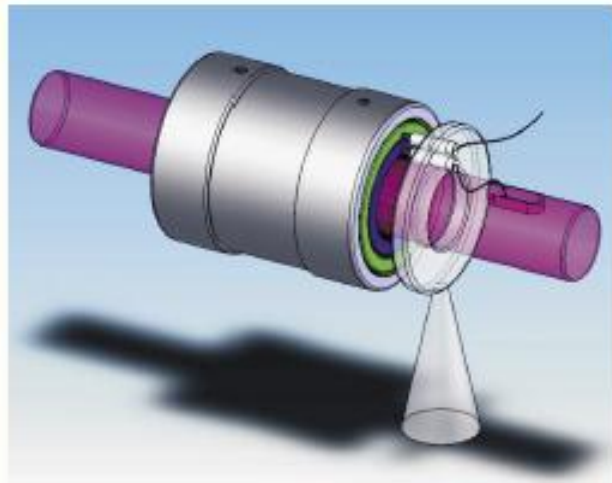


Fig. 1: Contactless torque sensor mechanical design.

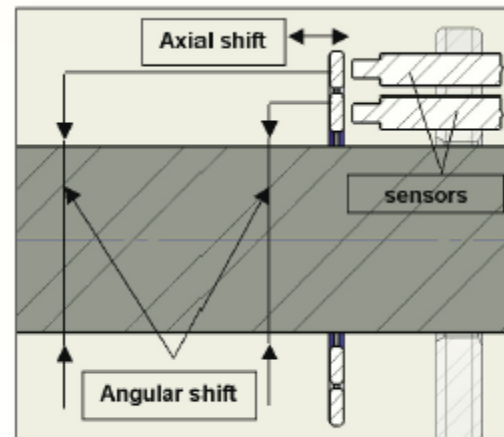


Fig. 2: Contactless torque sensor principle

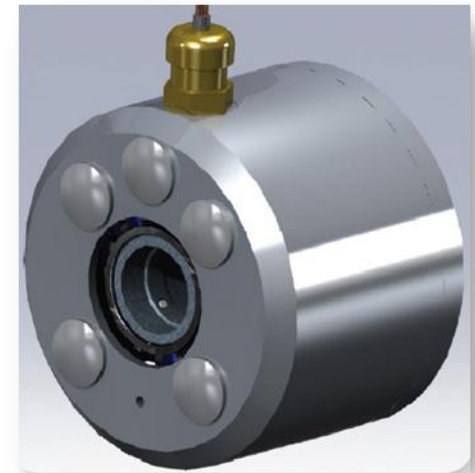
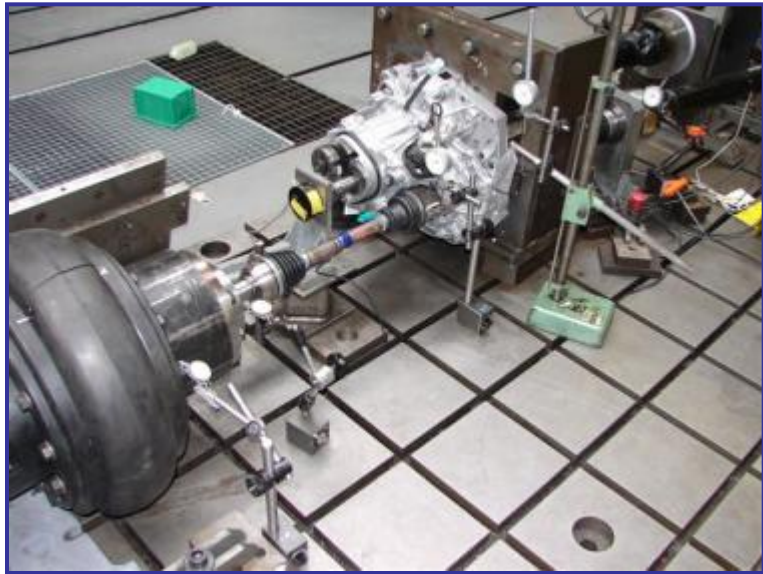


Fig. 3: Overview of a hollow shaft contactless sensor CTS 10



# Centre Technique des Industries Mécaniques

- **Application de la mesure de couple**
  - Cahiers des charges industriels
  - Moyens d'essais de caractérisation
  - Miniaturisation et intégration de l'électronique



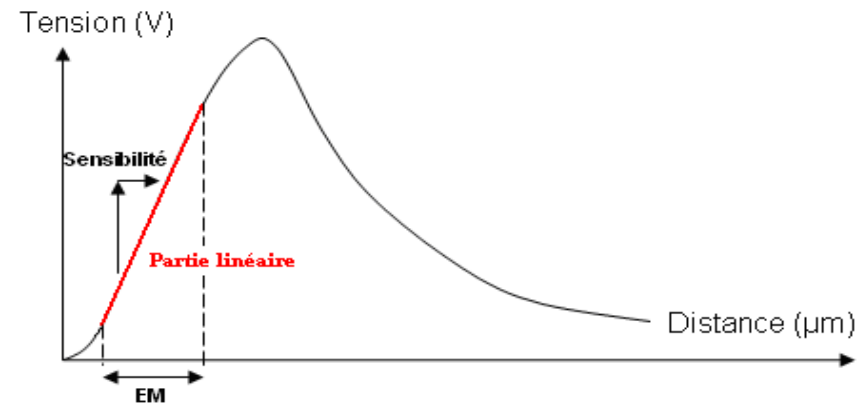
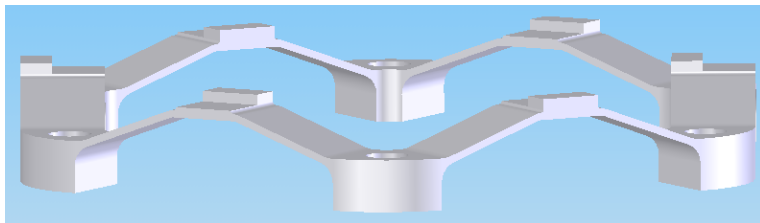
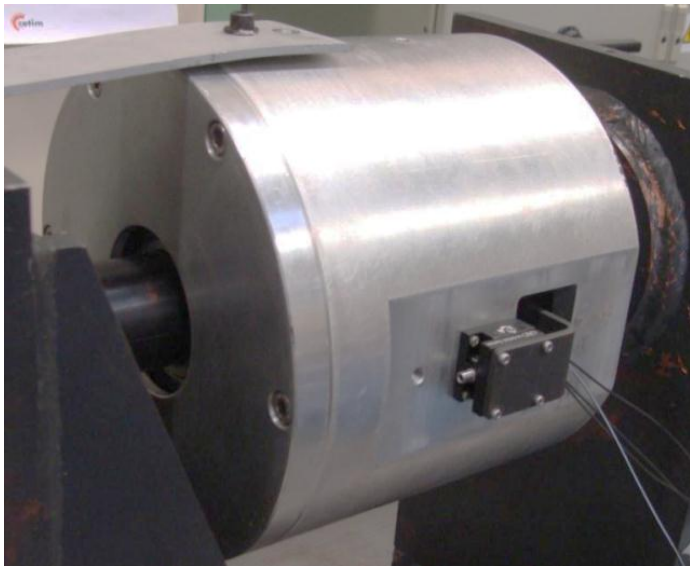
# Proposition

---

- Réalisation d'un capteur de couple à fibres optiques
  - Conversion de la torsion d'un arbre en déplacement
  - Mesure du déplacement
  - Calcul de couple correspondant
  
- Avantages
  - Mesure sans contact → pas de pertes d'énergie, pas d'usure
  - Système non intrusif → fixé autour de l'arbre, raideur conservée
  - Résolution importante → potentiel de très haute précision
  - Principe de mesure simple → coût réduit



## Présentation du démonstrateur COTS

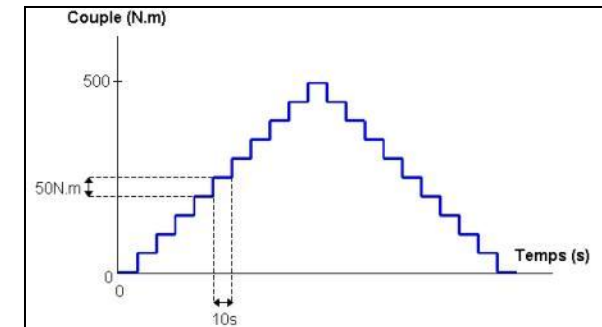


Caractéristiques recherchées	
Couple	0 – 500 Nm
Vitesse	0 – 3000 Tr/min
Sensibilité	0.16 $\mu\text{m}$ / Nm
Précision	+/- 1%
Encombrement	L = 146 mm / $\varnothing$ = 144 mm

# Conditions d'essais

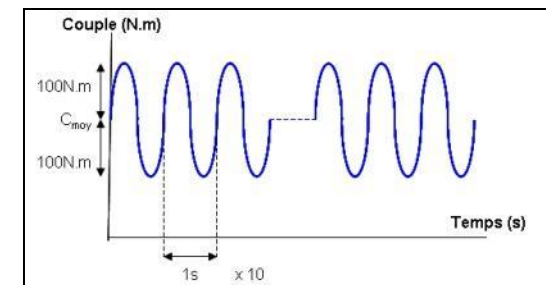
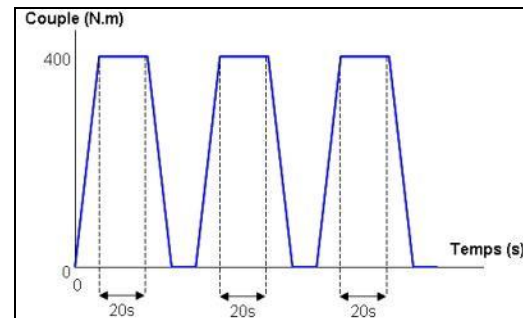
### ● Caractérisation quasi-statique :

- Vérifications des caractéristiques techniques
- Essais de calibration
- Suivi de consigne de couple sans rotation



### ● Caractérisation dynamique

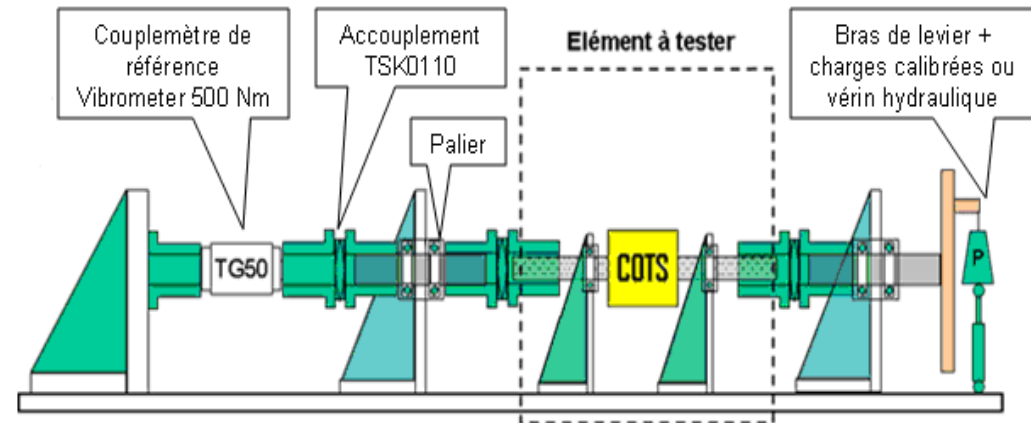
- Linéarité
- Chocs (Créneaux)
- Ondulations sinusoïdales
- Alternance couples positifs et négatifs
- Influence de la vitesse de rotation, des accélérations, du niveau de couple
- Réponse aux perturbations dans la ligne de transmission (engrènement)



## Moyens d'essais du capteur COTS

### ● Banc statique

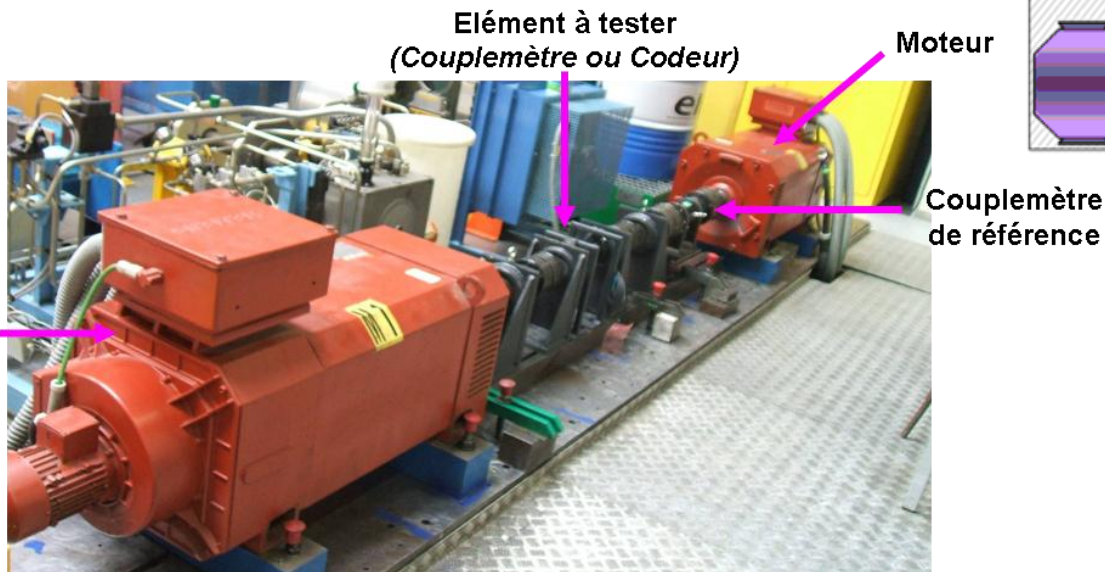
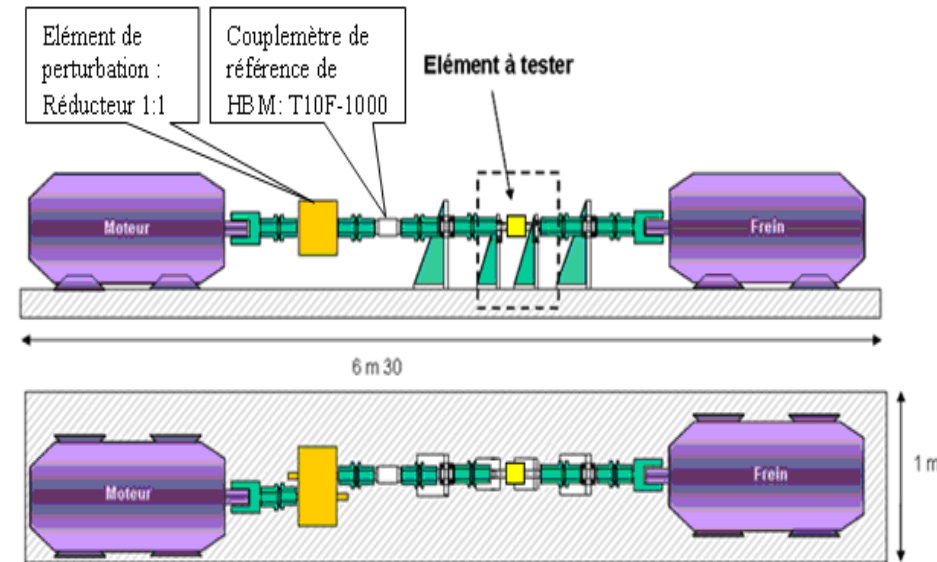
- Bras de levier + charges calibrées / vérin hydraulique
- Equerre de reprise de couple
- Capteur de référence Vibrometer TG50



## Moyens d'essais du capteur COTS

### ● Banc dynamique - 160kW

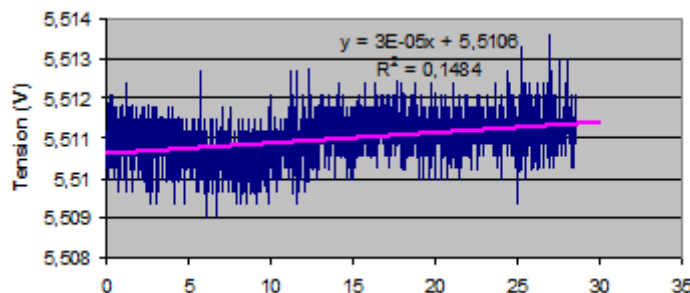
- Moteur d'entraînement en vitesse : 3000 tr/min
- Moteur de charge en couple : 500 Nm
- Capteur de référence HBM T10F-1000



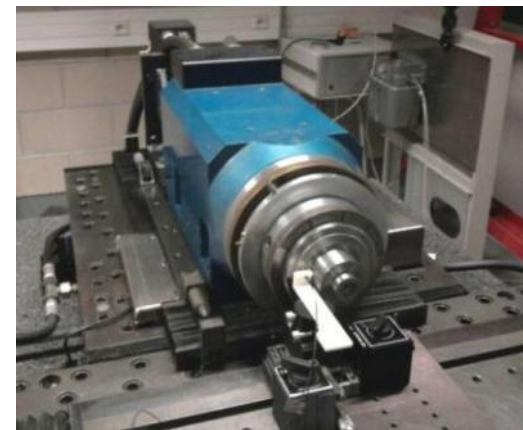
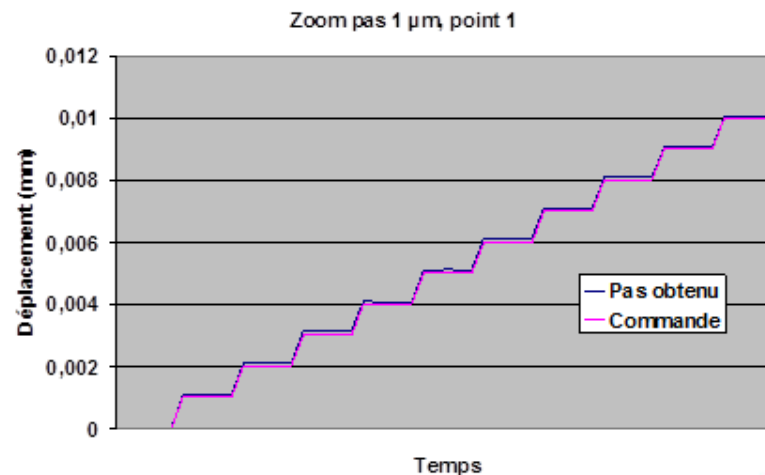


# Etalonnage du système optronique

- **Résolution de l'ordre de 100 nm**
- **Caractéristique tension / distance**
  - Etendue du domaine linéaire de 150  $\mu\text{m}$
  - Sensibilité du domaine linéaire entre 52 et 57 mV/ $\mu\text{m}$ , avec cibles polies à 1  $\mu\text{m}$
- **Dispersion du signal**
  - Amplitude maximale du bruit de l'ordre de 0,5 mV crête à crête
  - Pas d'influence de l'échauffement des composants électroniques sur la mesure

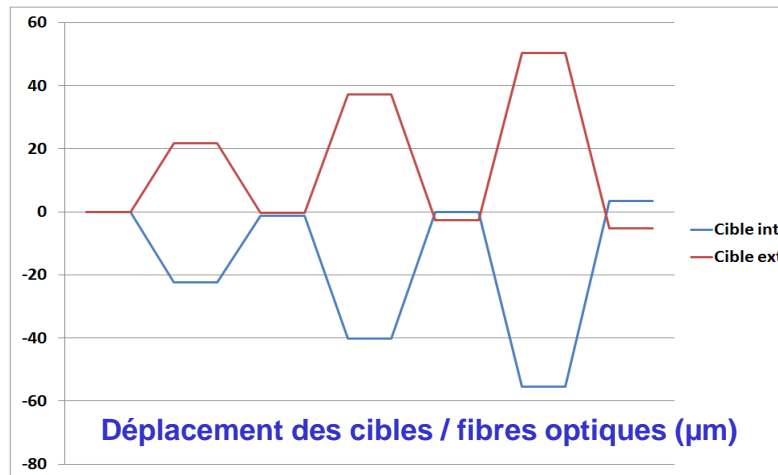
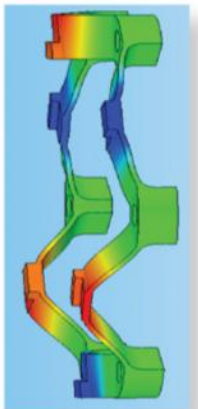
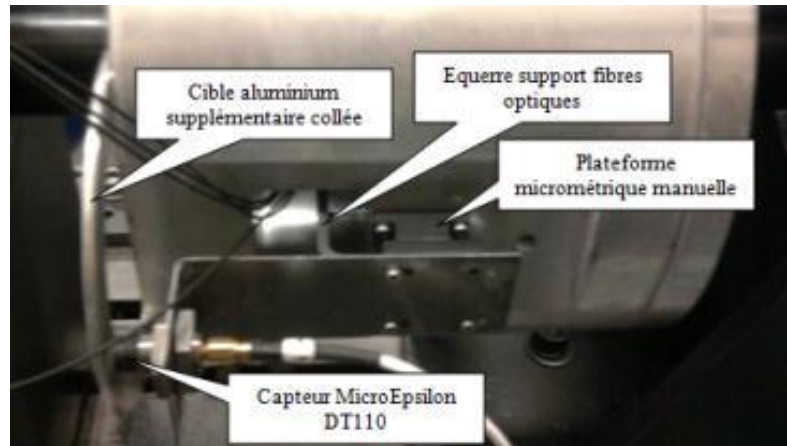


Dispersion du signal

Caractérisation en laboratoire  
sur tour numérique de haute précision



# Sensibilité du convertisseur

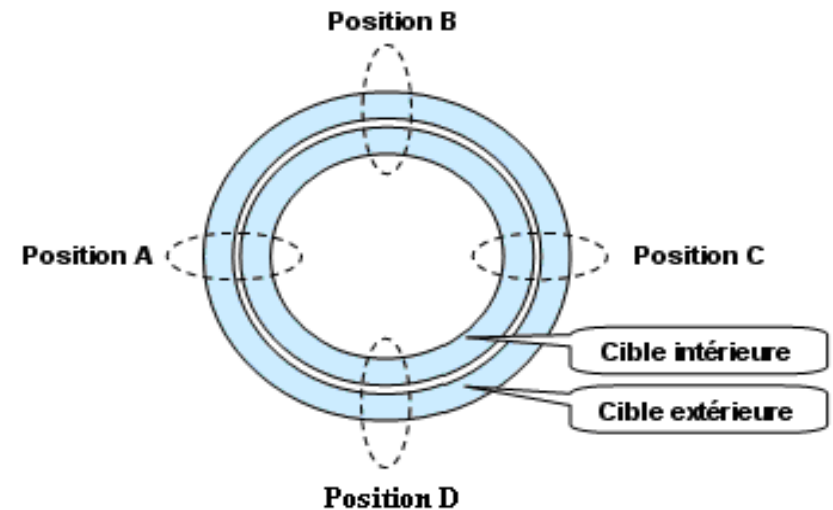


- Sensibilité moyenne d'environ  $0,11 \mu\text{m}/\text{Nm}$ , nettement inférieure à la sensibilité théorique égale à  $0,16 \mu\text{m}/\text{Nm}$ .
- La sensibilité est plus importante de  $0,1 \mu\text{m}/\text{Nm}$  sur la cible extérieure.
- Les différences peuvent être dues aux variations de température ou à l'anisotropie du matériau du convertisseur (prototypage rapide)

# Planéité des cibles

- Mode opératoire :

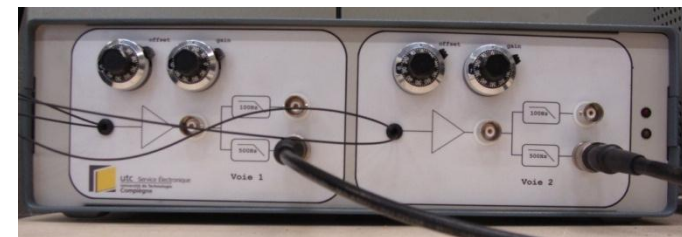
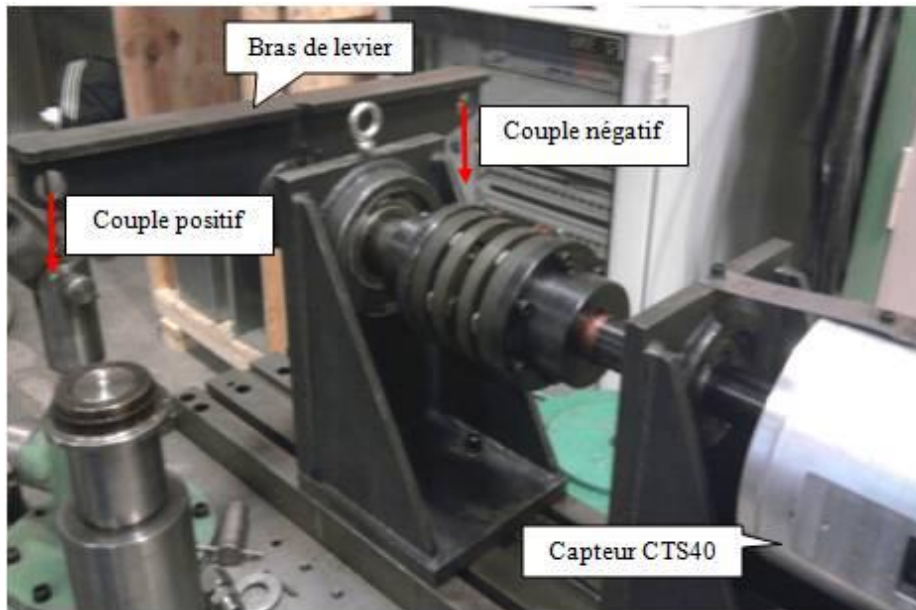
- Les fibres sont d'abord placées en position A. La distance cible/fibre est alors réglée et gardée fixe.
- Puis déplacement des fibres vers les positions B et C, par rotation du boîtier.
- Essai effectué dans le domaine linéaire.
- Aucun couple exercé.



- Planéité initiale mesurée en laboratoire de 24,6  $\mu\text{m}$ .
- Défaut de planéité admissible théorique de  $\pm 4 \mu\text{m}$  par cible. Ecart admissible entre les cibles théorique de  $\pm 2 \mu\text{m}$
- Le collage des cibles sur le convertisseur aggrave le défaut de planéité, la mesure en rotation dans le domaine linéaire serait impossible à pleine échelle de couple.

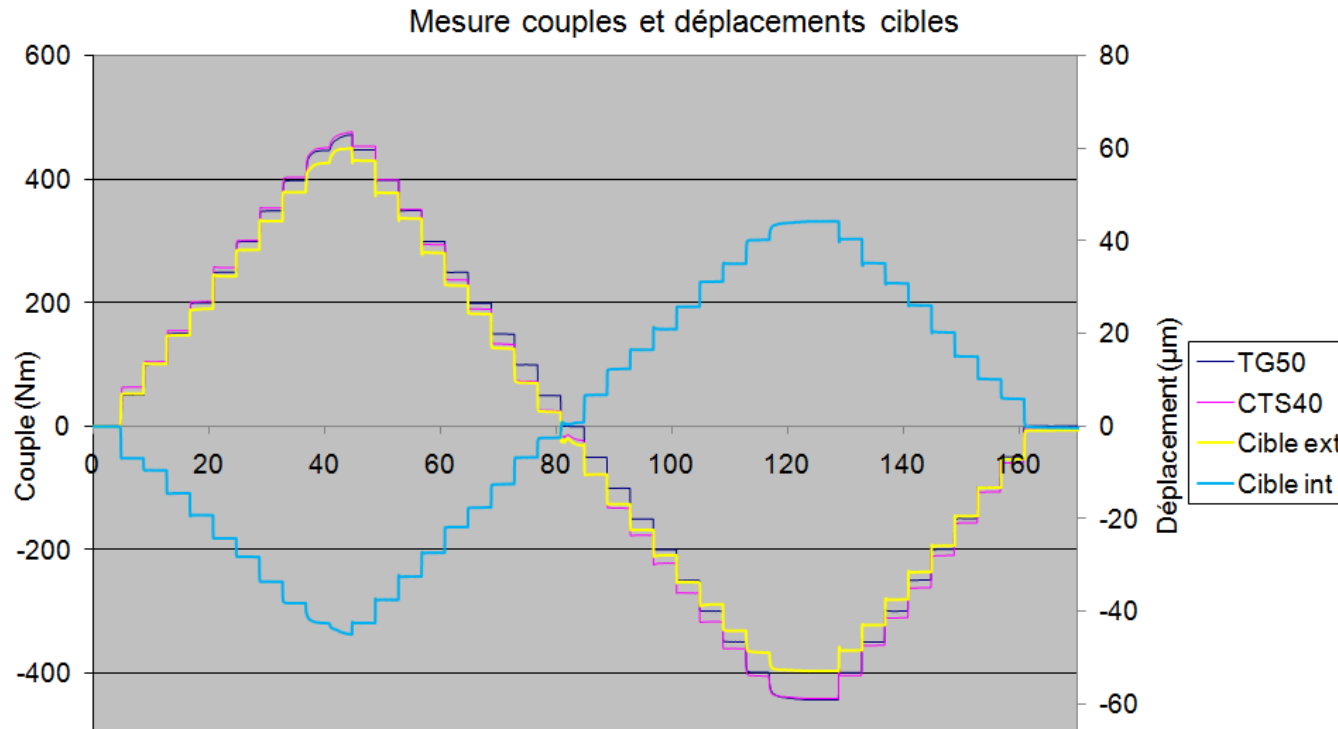
# Calibration statique

- Mode opératoire :
  - La séquence de couple 0 / C1 / 0 / C2 / 0 / C3 est appliquée à l'aide de trois masses, avec:
    - C1 = 185 Nm
    - C2 = 340 Nm
    - C3 = 496 Nm



# Essai de Pyramide de couple

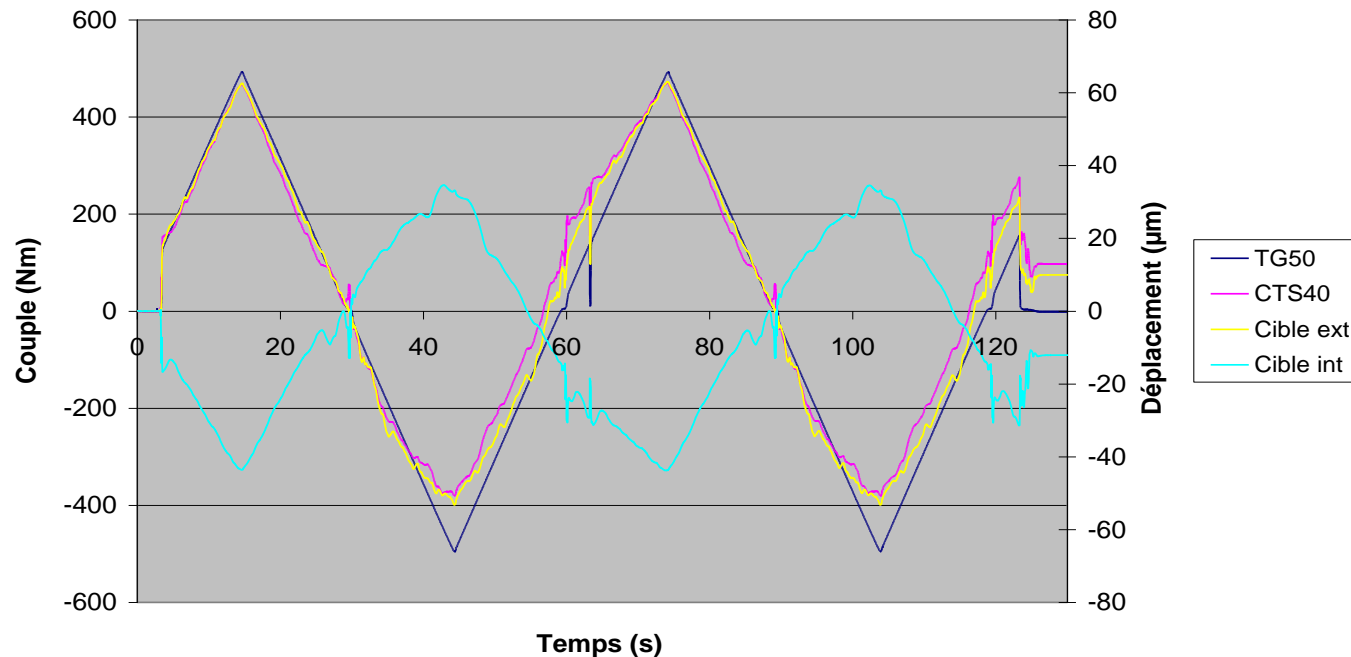
- $\Delta C$  initial important, diminue et se stabilise après le premier cycle de charge
- $\Delta C$  maximal de 20 Nm au palier à -100 Nm après stabilisation
- Caractéristiques de précision, linéarité et répétabilité non atteintes



## Essai de Rampes de charge et décharge

- $\Delta C$  Maximal de 150 Nm en chargement à - 500 Nm.
- Mise en évidence des défauts géométriques des cibles
- Mise en évidence de défauts de lecture du déplacement

Mesures couples et déplacements cibles

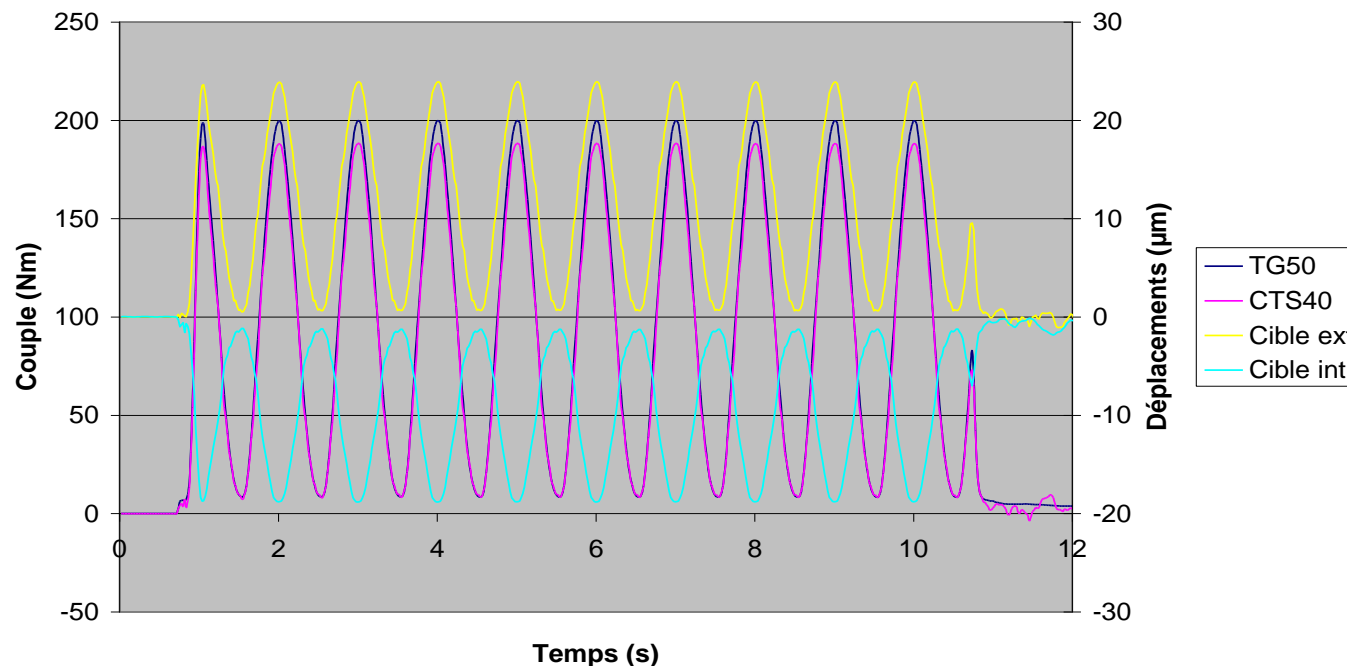




# Essai d'Ondulations de couple

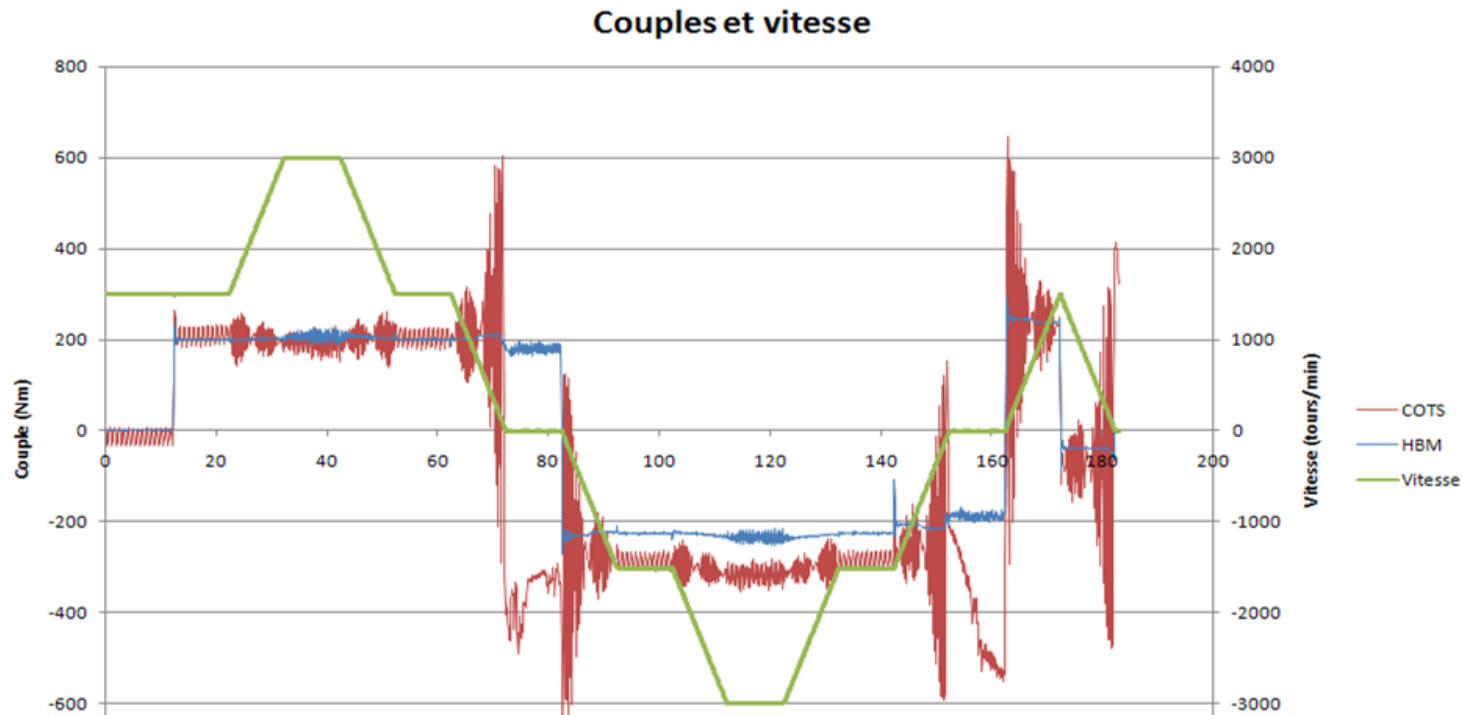
- Ecart de couples constatés équivalents à ceux trouvés lors des pyramides de couples
- Très bonne répétabilité de la mesure sur 10 cycles
- Suivi de consigne satisfaisant pour un couple oscillant à 1 Hz, d'amplitude 100 Nm.

Mesures couples et déplacements



# Essai de Variation de vitesse

- Pas d'impact de la vitesse de rotation sur la mesure de couple
- Influence notable des accélérations/décélérations
- Fort impact de l'arrêt en rotation ou du redémarrage



# Synthèse des travaux

<b>Optronique</b>	<b>Précision satisfaisante</b> <b>Réfectivité des cibles à maîtriser</b>
<b>Convertisseur de torsion</b>	<b>Sensibilité satisfaisante mais instable en raison du matériau utilisé</b> <b>Assemblage insatisfaisant</b>
<b>Paliers statiques de couple</b>	<b>Bonne répétabilité</b>
<b>Rampe de couple</b>	<b>Linéarité correcte</b>
<b>Ondulations sinusoïdales</b>	<b>Suivi de consigne correct</b>
<b>Comportement dynamique</b>	<b>Influence du voile des cibles et des accélérations brusques</b>

# Points durs à lever

- Capteur
  - Adaptation de la plage de mesure
  - Influence de la réflectivité de la zone de mesure
  - Ajustement axial / Etalonnage
- Convertisseur de torsion
  - Robustesse → Choix matériau / process
  - Planéité / Etat de surface de la zone de mesure → Fabrication
  - Battement axial (voile) des cibles → Assemblage
- Intégration système
  - Résistance à l'environnement (humidité, vibrations...)
  - Prix de revient de l'ensemble

# Conclusion sur le projet

- Concept de mesure de couple
  - Nombreuses utilisations potentielles, y compris de haute précision
  - Mesure insensible aux champs magnétiques, environnements explosifs et variations de température
  - Faible consommation d'énergie
  - Modularité importante de l'échelle de mesure (miniaturisation possible)
- Partenariat
  - Compétences complémentaires
  - Valorisation directe des travaux de recherche dans l'industrie
  - Référentiels de travail différents (objectifs, unités temporelles...)
- Perspectives
  - Recherche d'une application cible
  - Recherche d'un cadre de financement de la suite des travaux



# **MERCI DE VOTRE ATTENTION**

## **QUESTIONS / REPONSES**