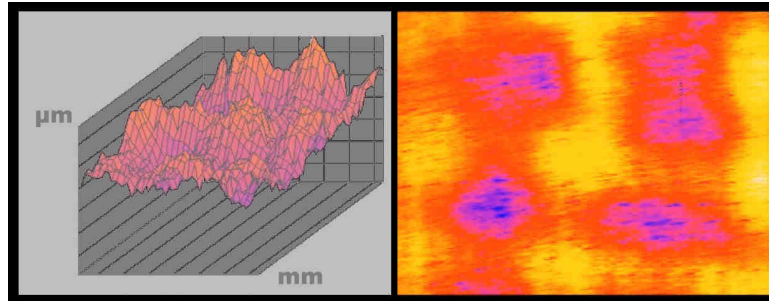


RUGOSIMETRE TRIDIMENSIONNEL¹

I PRESENTATION GENERALE

La rugosimétrie est la mesure de l'état de surface des pièces mécaniques. L'ordre de grandeur des défauts mesurés est le micron.

Figure 1 :
Relevé
rugosimétrique
tridimensionnel
d'une aube



La mesure de rugosimétrie repose traditionnellement sur deux éléments distincts : le capteur, qui peut être mécanique (palpeur) ou optique, et le traitement du signal et des données (algorithmes informatiques). De la conjonction des caractéristiques techniques du capteur et du traitement numérique vont découler les qualités essentielles du rugosimètre : sa rapidité ; sa résolution ; sa précision ; son amplitude de mesure. L'objet de cette étude est de valider / critiquer / améliorer certaines techniques et technologies retenues pour le prototype d'un rugosimètre 2D.

I.1 STRUCTURE GENERALE DU RUGOSIMETRE A GRANDE VITESSE

Le principe d'un capteur opto-mécanique (association d'un capteur optique et d'un capteur mécanique) a été retenu, pour ce prototype. Il est décrit succinctement ci-après (figure 2) :

- un capteur optique assure une résolution verticale comparable à celle des meilleurs capteurs mécaniques actuels (< 10 nm). Ce capteur, de faible amplitude de lecture (20 µm), permet une mesure rapide des hautes fréquences spatiales (variations rapides) des profils rugosimétriques mesurés ;
- un asservissement mécanique vertical à grande amplitude (environ 10 mm) permet à la tête optique de suivre les moyennes et basses fréquences spatiales (variations plus lentes) des profils. Un second capteur donne la position verticale de la tête optique.

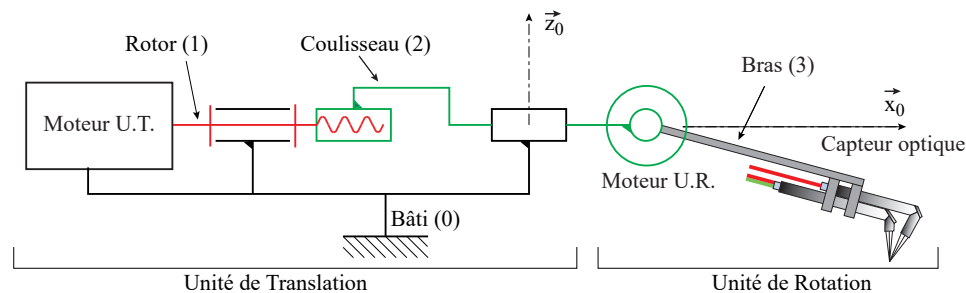


Figure 3 : Schéma du prototype de rugosimètre 2D

¹ Mines-Ponts PSI 2006

Le déplacement vertical du capteur optique est assuré par une Unité de Rotation (U.R.) portée par le coulisseau (2) (figure 3). Ce capteur opto-mécanique est lui-même déplacé au dessus de la surface à mesurer par une Unité de Translation (U.T.) à vitesse régulée (figure 3), ce qui permet d'obtenir un « profil 2D », z fonction de x . La vitesse de déplacement visée par ce prototype est de 20 mm.s^{-1} .

I.2 PRINCIPE DE MESURE DU CAPTEUR OPTIQUE

Le principe de mesure du capteur optique est l'écartométrie. Un faisceau laser (« émission ») est focalisé sur la surface à mesurer. La tache focale se déplace devant les images de deux demi-disques de réception. L'intensité lumineuse d'émission se partage ainsi entre deux photorécepteurs. Cette différence d'intensité permet de calculer la position horizontale de la tache focale d'émission. Cette position horizontale de la tache focale est ensuite convertie en position verticale de la surface par rapport au point focal (qui sera noté par la suite (P)) (figure 4).

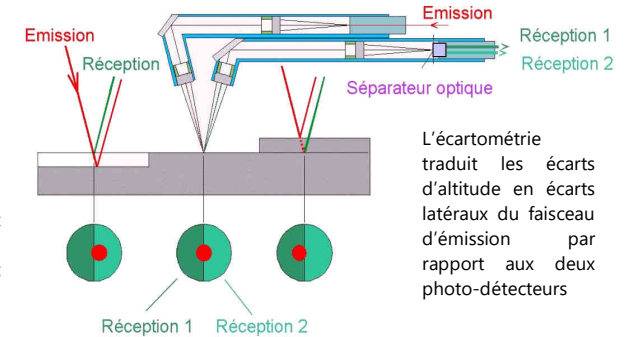


Figure 4 : Principe du capteur optique : l'écartométrie

II COMMANDE DE L'UNITE DE ROTATION (U.R.)

Ce rugosimètre ne peut fonctionner, dans des conditions idéales, que si le point focal (P) de la tête optique se situe en permanence au plus près du profil moyen de la pièce.

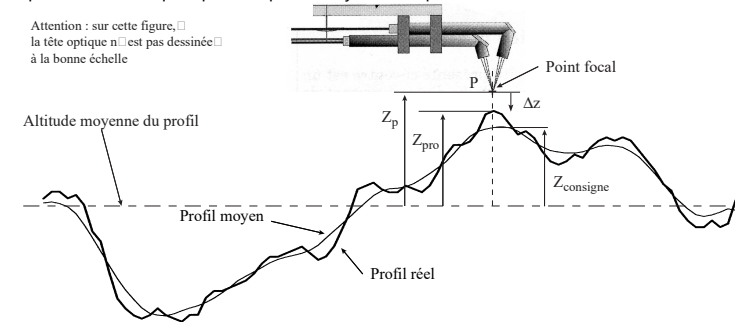


Figure 8 : Profil réel / profil moyen et grandeurs utilisées

La figure 8 illustre la problématique de mesure du profil de la pièce et met en place les différentes grandeurs utilisées dans la chaîne d'asservissement de l'unité de rotation :

- la tête optique (capteur optique) permet de mesurer la distance entre le point focal (P) du système optique et le profil réel de la pièce. Le signal de sortie de ce système est (Δ_z) avec $\Delta_z(t) = z_{\text{pro}}(t) - z_p(t)$;
- le pilotage (en altitude) du point focal (P) de la tête optique se fait sur une consigne particulière : la position moyenne du profil de rugosité. Cette consigne (z_c) est obtenue par une opération « Calcul de la moyenne » qui détermine la moyenne mobile, sur un temps caractéristique (τ), de l'altitude du profil de la pièce. La position réelle du point focal ($z_p(t)$) est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur.

Avant de commencer une mesure, l'altitude moyenne de la pièce à mesurer est réglée (par un mécanisme, non décrit dans cette étude), de telle façon qu'au début de la mesure le profil réel de la pièce soit ($z_{pro}(t=0) = 0$), ce qui correspond à une consigne du bras (θ_c) également nulle : ($\theta_c(t=0) = 0$).

Dans toute cette partie, vous considérerez que l'angle de rotation du bras (3) reste petit. Le schéma bloc de l'unité de mesure est décrit à la figure 9 :

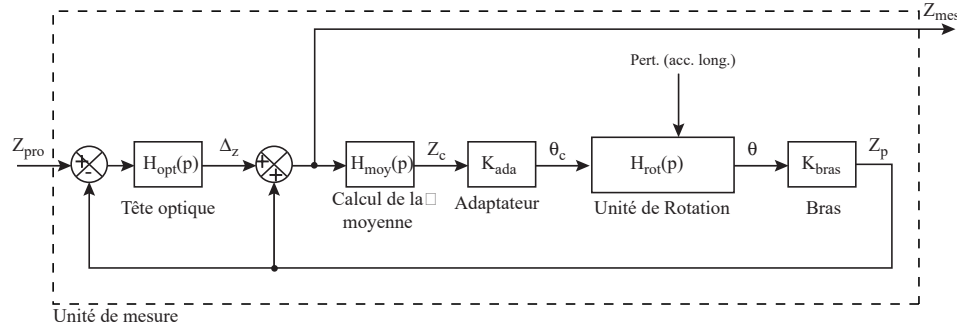


Figure 9 : Schéma fonctionnel de l'unité de mesure

- | | | | |
|------------|---|------------|--|
| Z_{pro} | Profil réel de la pièce (m) | θ | Position du bras (3) (rd) |
| Z_{mes} | Profil mesuré de la pièce (m) | Z_p | Position verticale du point focal (m) |
| Z_c | Consigne de position du point focal (m) | Δ_z | Mesure réalisée par la tête optique (m) |
| θ_c | Consigne de position du bras (3) (rd) | Pert | Perturbation créée, sur la position du bras (3), par l'accélération longitudinale (Nm) |

Les fonctions de transfert associées aux différents éléments sont données ci-après :

- | | | | |
|----------------|---|------------------------|----------------|
| Tête optique : | $H_{opt}(p)$; | Calcul de la moyenne : | $H_{moy}(p)$; |
| Adaptateur : | $H_{ada}(p) = K_{ada}$, avec $K_{ada} = 20 \text{ rad.m}^{-1}$; | Unité de Rotation : | $H_{rot}(p)$; |
| Bras : | $H_{bras}(p) = K_{bras}$, avec $K_{bras} = 5.10^{-2} \text{ m.rad}^{-1}$. | | |

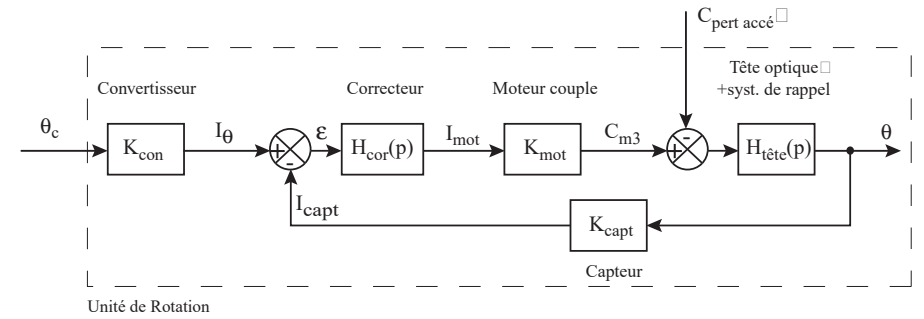
II.1 IV.1 CARACTERISATION GLOBALE DE L'UNITE DE MESURE

Afin d'optimiser les performances du capteur de rugosité, il est nécessaire de déterminer la relation entre la fonction de transfert globale et les fonctions de transfert élémentaires. Pour optimiser cette réponse globale, il sera possible de modifier localement certains composants, puis de réinjecter dans le calcul complet les nouvelles fonctions de transfert de ces composants.

Q1/ En supposant que le système se déplace à vitesse constante (pas de perturbation), déterminez la fonction de transfert globale de l'unité de mesure : $F_{Gmes}(p) = \frac{Z_{mes}(p)}{Z_{pro}(p)}$.

II.2 ETUDE DETAILLEE DE L'UNITE DE ROTATION

La seule fonction qu'il reste à caractériser, puis à optimiser, est celle de l'Unité de Rotation (Moteur couple + Tête optique). Le schéma bloc de ce système est donné.



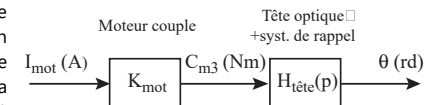
- | | | | |
|------------|---|-----------------|--|
| θ_c | Consigne de position du bras (rd) | C_{m3} | Couple moteur développé (Nm) |
| I_θ | Intensité correspondant à la consigne (A) | $C_{pert\ acc}$ | Couple perturbateur créé lors de l'accélération de l'unité de translation (Nm) |
| I_{capt} | Intensité en sortie du capteur angulaire (A) | θ | Position angulaire du bras (3) (rd) |
| I_{mot} | Intensité d'alimentation du moteur couple (A) | | |

Les fonctions de transfert associées aux différents éléments sont données ci-après :

- | | | | |
|----------------------------------|--|--------------|------------------------------------|
| Convertisseur : | $H_{con}(p) = K_{con}$, avec $K_{con} = 2 \text{ A.rad}^{-1}$ | Capteur : | $H_{capt}(p) = K_{capt} = K_{con}$ |
| Moteur : | $H_{mot}(p) = K_{mot}$, avec $K_{mot} = 0,05 \text{ N.m.A}^{-1}$ | Correcteur : | $H_{Cor}(p)$ |
| Tête optique + syst. de rappel : | $H_{tete}(p) = \frac{K_t}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2}$ | | |

II.2.1 Identification des paramètres de la tête optique

Pour identifier les paramètres du modèle associé à la tête optique, on soumet le système, décrit ci-contre, à un échelon d'intensité d'amplitude (2,5 mA). La réponse indicielle de ce système est donnée à la figure 12. La réponse a été adimensionnée (position / position finale)



pour faciliter les calculs ultérieurs. La valeur asymptotique finale est : 158.10^{-6} rd .

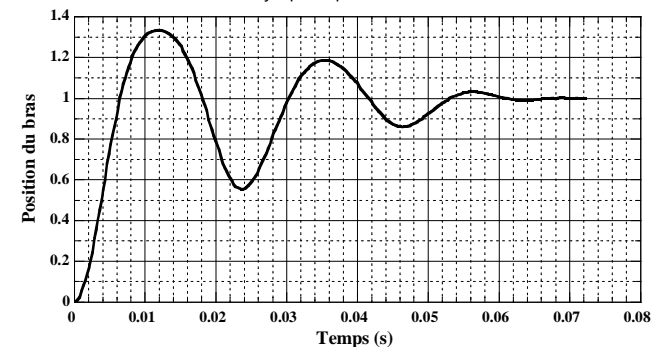


Figure 12 : Réponse indicielle adimensionnée (sortie/ valeur finale de la sortie)

Q2/ En utilisant la réponse indicielle de la figure 12, justifiez et critiquez le modèle qui a été retenu pour décrire, d'un point de vue mécanique, la fonction de transfert de la tête optique et du système de

rappel: $H_{tête}(p) = \frac{K_t}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2}$. Vous analyserez très finement les différents

dépassements.

Q3/ Donnez, après identification, les valeurs numériques et les unités des paramètres (K_t, ξ, ω_0).

Expliquez clairement votre démarche d'identification. Vous pouvez utiliser les abaques des figures 13 et 14. Toutes les grandeurs mesurées sur les figures 12, 13 et 14 devront être mentionnées sur ces mêmes figures.

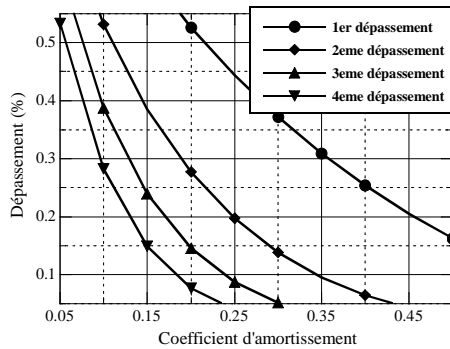


Figure 13 : Dépassement relatif (%) (1 = 100 %) en fonction du coefficient d'amortissement et du numéro du dépassement

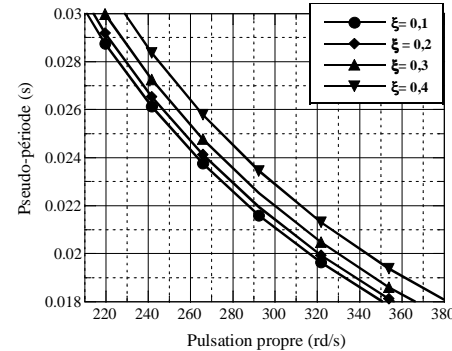


Figure 14 : Pseudo période en fonction de la pulsation propre et du coefficient d'amortissement

Une identification, plus fine (à l'aide de moyens informatiques), a permis de déterminer les valeurs des paramètres de $H_{tête}(p)$. Vous prendrez pour la suite du problème: $K_t = 1,2$ U.S.I., $\xi = 0,2$, $\omega_0 = 300$ U.S.I.. Dans cet essai, il n'y a pas de translation de l'ensemble du rugosimètre.

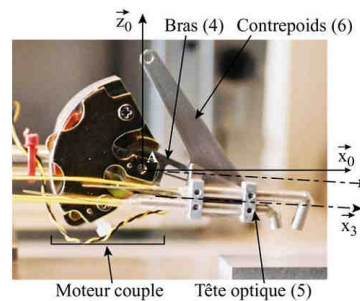
Un calcul de dynamique montre alors que le couple C_{m3} est donné par la relation :

$$B.\ddot{\theta} + f_3.\dot{\theta} + K_{tor}.\theta = C_{m3} + m_3.g.r.(\cos\theta - 1)$$

où m_3 , K_{tor} , f_3 , r sont des paramètres associés à l'ensemble mobile 3 (moteur + bras + tête + contre-poids, cf. figure).

Q4/ Donnez les relations liant les paramètres de la fonction de transfert $H_{tête}(p)$ et ceux utilisés dans l'équation de dynamique, lorsque l'on reste au voisinage de ($\theta = 0^\circ$).

Q5/ Donnez les valeurs numériques des coefficients K_{tors} (raideur du ressort torsion), f_3 (coefficient de frottement visqueux) et B (moment d'inertie).



II.2.2 Choix du correcteur

En ce qui concerne la précision de position angulaire du bras, les concepteurs de ce rugosimètre souhaitent :

- annuler, en régime permanent, l'influence d'une perturbation de type échelon. Cette forme de perturbation peut être rencontrée lors de la phase d'accélération de l'unité de translation ;
- limiter au maximum, sans nécessairement l'annuler, l'erreur de positionnement pour une consigne de type rampe (erreur de traînage). Cette entrée est suffisamment représentative si l'on considère un profil moyen qui serait décrit.

Pour cette exigence du cahier des charges, les concepteurs envisagent trois choix possibles : un correcteur proportionnel, un correcteur proportionnel-intégral, et un correcteur dont la fonction de transfert est

$$H_{Cor}(p) = \frac{K_p}{p^2}$$

Q6/ Donnez, parmi ces trois choix, le ou les correcteurs qui respecte(nt) les critères de précision.

Q7/ Quel est votre choix final (justifiez votre réponse).

Pour diverses raisons, que nous n'exposerons pas dans le sujet, le choix des concepteurs s'est finalement

porté sur un correcteur dont la fonction de transfert est $H_{Cor}(p) = \frac{K_p}{p}$ et dont il reste à déterminer le coefficient (K_p).

Le cahier des charges de l'unité de rotation nous impose d'avoir des marges de stabilité suffisantes, tout en ayant un système qui soit le plus rapide possible. La marge de phase doit être d'au moins 45° et la marge de gain minimale est de 6 dB.

Q8/ Tracer pour $K_p=1$ les diagrammes asymptotiques de Bode ainsi que les allures réelles sur le document réponse et en déduire les marges de gain et de phase. A toute fin utile, le tableau ci-contre donne les phases (en °) et les modules (en dB) de la

$$\text{transmittance } H(j.\omega) = \frac{1}{1 + \frac{0,4}{300} .j.\omega - \frac{1}{9.10^4} .\omega^2}$$

pour différentes valeurs de pulsations.

Q9/ Déterminez (en justifiant votre réponse, votre démarche) le gain (K_p) optimal, vis-à-vis des marges de stabilité, du correcteur. Vous pouvez utiliser et compléter, si vous le jugez nécessaire, les diagrammes du document réponse.

Pulsation (rd/s)	Phase (°)	Amplitude (dB)
100	-8,5	0,9
200	-25,6	4,2
246	-45,0	6,7
300	-90,0	8,0
366	-135,0	3,21
1000	-172,5	-20,2

Le réglage qui vient d'être réalisé concerne principalement la stabilité du système. La précision a été respectée par le choix du type de correcteur (question 12). Il reste maintenant à se pencher sur la rapidité de ce système. Pour cela, nous avons simulé, avec un logiciel dédié, la réponse indicielle du système de commande de l'Unité de Rotation (fig. 10) pour trois valeurs de (K_p): celle qui correspond au réglage des marges de stabilité (K_p Marge stabilité), 90 % de cette valeur de K_p Marge stabilité et 110 % de K_p Marge stabilité.

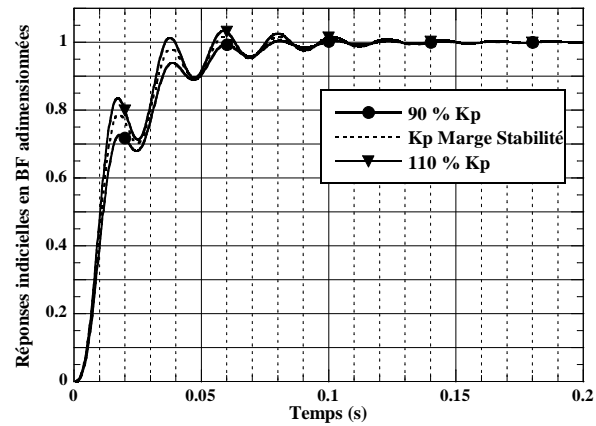


Figure 16 : Réponse indicielle adimensionnée de l'Unité de Rotation

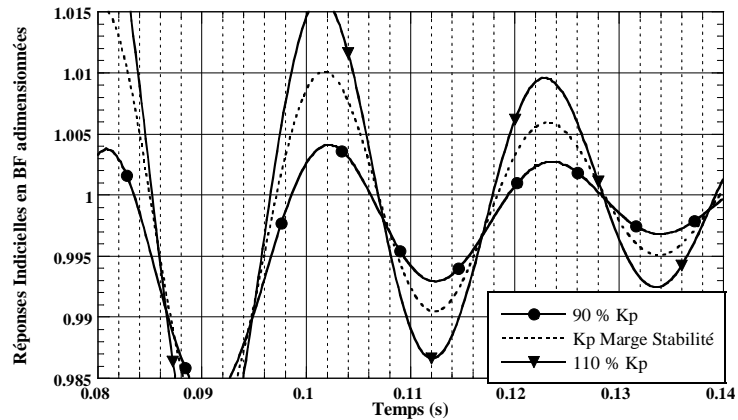


Figure 16bis : Zoom de la réponse indicielle adimensionnée de l'Unité de Rotation

Q10/ Déterminez parmi ces trois courbes, celle qui présente le meilleur temps de réponse à 1 %. Donnez ce temps de réponse à 1 %. Réalisez les tracés nécessaires sur le document réponse. Explicitez votre choix final du coefficient K_p et concluez sur la commande de l'unité de rotation.