



## إعلان عن مناقشة أطروحة الدكتوراه الطور الثالث - ENPC

مناقشة رسالة الدكتوراه للسيد مسعودي فؤاد  
" قسم الهندسة الميكانيكية "  
الشعبة: الآلية، التخصص: بناء ميكانيكي

حول الموضوع:

“ Étude Expérimentale Sur La Réponse Vibratoire D'un Système D'usinage Robotisé ”

تجرى المناقشة يوم الخميس 18 جوان 2026 ابتداء من الساعة الرابعة بعد الزوال بقاعة المحاضرات الطابق الأول.

أمام لجنة الممتحنين المكونة من:

الاسم واللقب	الرتبة الجامعية أو البحثية	المؤسسة الأصلية	الصفة
خلف الله صالح	أستاذ	المدرسة الوطنية متعددة التقنيات - ملك بن نبي - بقسنطينة	رئيسا
جبارة عبد الحكيم	أستاذ	جامعة مصطفى بن بوالعيد باتنة 2	مشرفا
جنان محمد	أستاذ محاضر أ	المدرسة الوطنية متعددة التقنيات - ملك بن نبي - بقسنطينة	مشرف مساعد
كمال مفتاح	أستاذ	جامعة مصطفى بن بوالعيد باتنة 2	ممتحنا
شهايدية سيف الدين	أستاذ محاضر أ	المدرسة الوطنية متعددة التقنيات - ملك بن نبي - بقسنطينة	ممتحنا
مصمودي محمد	أستاذ محاضر أ	جامعة مصطفى بن بوالعيد باتنة 2	ممتحنا

الدعوة لكل شخص يهمه الموضوع



## Soutenance de thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle

Le 18 juin 2026 16h00

de M<sup>r</sup> MESSAOUDI Fouad

**THEME:** " Étude Expérimentale Sur La Réponse Vibratoire D'un Système D'usinage Robotisé "

**Spécialité:** Construction et Fabrication Mécanique.

**Filière:** Génie Mécanique.

**Département :** Génie Mécanique.

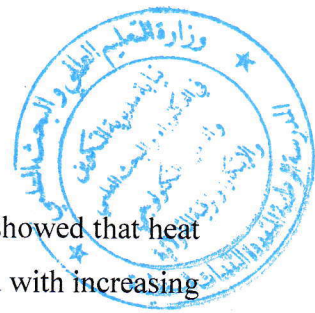
### **Abstract:**

This thesis presents an optimization of robotic drilling, which is a complex, multidisciplinary field integrating control systems and advanced sensing technologies. The proposed approach combines product of exponentials (PoE) modeling, second-order vibration dynamics, active damping, closed-loop compensation, and position optimization using the Gray Wolf Optimizer (GWO). This allows for consideration of quasi-static and dynamic error sources in a unified formulation.

The first part presents an experimental approach to evaluating the drilling capability of a six-axis industrial robot on aluminum alloy parts. The study examined a strategy based on statistical tests to quantify and predict the relative contribution of cutting parameters to cutting force and form errors during drilling. This technique identifies relevant sources of error during high-speed robotic machining. The quality of the machining was evaluated based on dimensional and geometric tolerances, chip formation and evacuation, burr formation, material buildup on cutting edges, tool wear, and surface damage.

The second part focuses on optimizing the robotic drilling stage. Simulation results confirm that, while rigidity optimization is necessary, it is not sufficient to ensure high geometric accuracy. Closed-loop PoE control effectively eliminates moment-induced static errors and significantly attenuates harmonic error components. These results guarantee an average positioning accuracy of less than 0.15 mm across all work points, meeting the drilling requirements of the aerospace sector. Considering rigidity when optimizing position minimizes conformity errors without necessitating mechanical modifications or extra sensors. Once dynamic deviation is eliminated through position optimization and closed-loop control, tool runout becomes the dominant limiting factor. Consequently, the lower limit of achievable circularity error is primarily determined by the accuracy of mechanical centering rather than structural rigidity or control performance alone.

A statistical analysis of the experimental results revealed a strong correlation between part accuracy and drilling force. An experimental model was developed to represent and predict this force, demonstrating high accuracy in error prediction. It was found that the thrust force was the main source of error affecting the



accuracy of machined parts at high cutting speeds and feed rates. Verification experiments showed that heat treatment (90 HRE) significantly reduced dimensional defects and that thrust force decreased with increasing cutting speed. The recommended cutting speed for robotic drilling is 6,000 RPM with a feed rate of 0.15 mm/min. This study provides valuable technical insights for improving the robotic drilling of aluminum alloys.

The simulation results demonstrate that the success of high-precision robotic drilling depends on the interaction of several factors: material behavior, thrust forces, structural stiffness, control strategy, and tool condition. Reducing runout while maintaining high stiffness results in a circularity error that is approximately one order of magnitude smaller than in the case of low stiffness. The small difference between the upper and lower diameter limits indicates that the tool's lateral movement is effectively limited, resulting in a hole geometry that closely approximates the tool's nominal circular profile. For a nominal diameter of 9.525 mm, the circularity deviation of 8.1  $\mu\text{m}$ , as measured according to ISO 286, is comparable to the total tolerance band associated with an IT6 or H6 class hole in precision mechanical assemblies. This demonstrates the high degree of control achieved in producing the hole. Analysis of the simulation results confirms significant progress in improving stiffness, process monitoring, and hole quality prediction. Thus, these industrial robots can achieve a level of precision close to that of dedicated CNC machine tools while retaining the flexibility and profitability advantages of robotic platforms.

**Keywords:** Industrial robot, high-speed machining, aluminum alloy, design of experiment, desirability and PoE/GWO optimization.

### **Résumé :**

Cette thèse présente une optimisation du perçage robotisé, un domaine multidisciplinaire complexe qui intègre des systèmes de contrôle et des technologies de détection avancées. En combinant la modélisation du produit des exponentielles (PoE), la dynamique des vibrations du second ordre, l'amortissement actif, la compensation en boucle fermée et l'optimisation de la position par le GWO (Gray Wolf Optimizer), l'approche proposée permet de prendre en compte les sources d'erreur quasi-statiques et dynamiques dans une formulation unifiée.

Le premier volet présente une approche expérimentale permettant d'évaluer la capacité d'un robot industriel à six axes à percer des pièces en alliage d'aluminium. Une stratégie basée sur des tests statistiques a été étudiée afin de quantifier et de prédire la contribution relative des paramètres de coupe à la force de coupe et aux erreurs de forme lors du perçage. Cette technique permet d'identifier les sources d'erreur pertinentes lors de l'usinage robotisé à grande vitesse. La qualité d'usinage a été évaluée en fonction de la tolérance dimensionnelle et géométrique, de la formation et de l'évacuation des copeaux, de la formation de bavures, de l'accumulation de matière sur les arêtes, de l'usure de l'outil et de l'endommagement de la surface.

Le second volet porte sur l'optimisation de l'étape de perçage robotisé. Les résultats de la simulation confirment que l'optimisation de la rigidité est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour garantir une grande précision



géométrique. Le contrôle PoE en boucle fermée permet de supprimer efficacement les erreurs statiques induites par les moments et d'atténuer considérablement les composantes d'erreur harmonique. Il garantit ainsi une précision de positionnement moyenne inférieure à 0,15 mm sur l'ensemble des points de travail, ce qui répond aux exigences de perçage dans le secteur aérospatial. L'optimisation de la position, prenant en compte la rigidité, permet de réduire les erreurs liées à la conformité sans nécessiter de modifications mécaniques ni de capteurs supplémentaires. Une fois la déviation dynamique efficacement supprimée grâce à l'optimisation de la position et à la régulation en boucle fermée, c'est le faux-rond de l'outil qui devient le facteur limitant dominant. Par conséquent, la limite inférieure de l'erreur de circularité réalisable est principalement déterminée par la précision du centrage mécanique, plutôt que par la rigidité structurelle ou les performances de contrôle seules.

L'analyse statistique des résultats expérimentaux révèle une forte dépendance entre la précision de la pièce et la force de perçage. Un modèle expérimental a été développé pour représenter et prédire cette force, et une grande précision dans la prédiction des erreurs a été démontrée. Il a été constaté que, pour des vitesses de coupe et des avances élevées, la force de poussée constituait la principale source d'erreur affectant la précision des pièces usinées. Des expériences de vérification ont montré que les défauts dimensionnels étaient significativement réduits par un traitement thermique (90 HRE) et que la force de poussée diminuait avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La vitesse de coupe recommandée pour le perçage robotisé est de 6 000 tr/min, avec une avance de 0,15 mm/min. Cette étude fournit des indications techniques importantes pour améliorer le perçage robotisé des alliages d'aluminium.

Les résultats de la simulation montrent que le perçage robotisé de haute précision est régi par une interaction hiérarchique entre le comportement des matériaux, les forces de poussée, la rigidité structurelle, la stratégie de contrôle et l'état des outils. Lorsque le faux-rond est réduit tout en conservant une rigidité élevée, l'erreur de circularité diminue d'environ un ordre de grandeur par rapport au cas de faible rigidité. Le faible écart entre les limites supérieure et inférieure du diamètre indique que le mouvement latéral de l'outil est efficacement limité et que la géométrie du trou obtenu se rapproche du profil circulaire nominal de l'outil. Pour un diamètre nominal de 9,525 mm, l'écart de circularité de 8,1  $\mu\text{m}$  mesuré selon la norme ISO 286 est comparable à la bande de tolérance totale associée à un trou de classe IT6 ou H6 pour des assemblages mécaniques de précision. Cela signifie que le trou est réalisé avec une grande maîtrise du processus de perçage. L'analyse des résultats de simulation confirme que des progrès significatifs ont été réalisés dans l'amélioration de la rigidité, la surveillance des processus et la prévision de la qualité des trous. Ces robots industriels peuvent ainsi atteindre un niveau de précision proche de celui des machines-outils CNC dédiées, tout en conservant les avantages en termes de flexibilité et de rentabilité des plateformes robotisées.

**Mots-Clés :** Robot industriel, usinage à grande vitesse, alliage d'aluminium, plan d'expérience, désirabilité, optimisation PoE / GWO.



## الملخص:

تُقدّم هذه الأطروحة تحسينًا لعمليات الثقب الروبوتية، وهو مجال معقد ومتعدد التخصصات يدمج أنظمة التحكم وتقنيات استشعار المتقدمة. يجمع النهج المقترح بين نمذجة حاصل ضرب الدوال الأسية (PoE)، وديناميكيات الاهتزاز من الدرجة الثانية، والتخميد النشط، والتعويض ذي الحلقة المغلقة، وتحسين الموضع باستخدام مُحسّن الذئب الرمادي (GWO). يتيح ذلك مراعاة مصادر الخطأ شبه الساكنة والديناميكية في صياغة موحدة يعرض الجزء الأول منهجًا تجريبيًا لتقييم قدرة روبوت صناعي سداسي المحاور على الثقب في أجزاء من سبائك الألومنيوم. وقد تناولت الدراسة استراتيجيات تعتمد على الاختبارات الإحصائية لتحديد وتوقع المساهمة النسبية لمعايير القطع في قوة القطع وأخطاء الشكل أثناء الثقب. تُحدد هذه التقنية مصادر الخطأ ذات الصلة أثناء التشغيل الآلي عالي السرعة. وقد تم تقييم جودة الثقب بناءً على التفاوتات البعدية والهندسية، وتكوّن الرقائق وإزالتها، وتكوّن النتوءات، وتراكم المواد على حواف القطع، وتآكل الأداة، وتلف السطح يركز الجزء الثاني على تحسين مرحلة الثقب الروبوتية. تؤكد نتائج المحاكاة أنه على الرغم من ضرورة تحسين الصلابة، إلا أنها غير كافية لضمان دقة هندسية عالية. يعمل نظام التحكم المغلق PoE على إزالة الأخطاء الساكنة الناتجة عن العزوم بشكل فعال، ويخفف بشكل كبير من مكونات الخطأ التوافقي. تضمن هذه النتائج دقة تحديد الموضع أقل من 0.15 مم عبر جميع نقاط العمل، ما يلبي متطلبات الثقب في قطاع تصنيع الطائرات. يساهم مراعاة الصلابة عند تحسين الموضع في تقليل أخطاء المطابقة دون الحاجة إلى تعديلات ميكانيكية أو زيادة مستشعرات إضافية. بمجرد التخلص من الانحراف الديناميكي من خلال تحسين الموضع والتحكم المغلق، يصبح انحراف الأداة هو العامل المحدد الرئيسي. وبالتالي، فإن الحد الأدنى لخطأ الدائرية الممكن تحقيقه يتحدد بشكل أساسي بدقة التمرکز الميكانيكي وليس بالصلابة الهيكلية أو أداء التحكم وحده. كشف تحليل إحصائي للنتائج التجريبية عن وجود ارتباط قوي بين دقة القطعة وقوة الثقب. تم تطوير نموذج تجريبي لتمثيل هذه القوة والتنبؤ بها، مما أظهر دقة عالية في التنبؤ بالخطأ. تبين أن قوة الدفع هي المصدر الرئيسي للخطأ الذي يؤثر على دقة الأجزاء المشغلة عند سرعات القطع ومعدلات التغذية العالية. وأظهرت التجارب التحقيقية أن المعالجة الحرارية (HRE 90) تقلل بشكل ملحوظ من العيوب البعدية، وأن قوة الدفع تتناقص مع زيادة سرعة القطع. وتبلغ سرعة القطع الموصى بها للثقب الروبوتي 6000 دورة في الدقيقة مع معدل تغذية 0.15 مم/دقيقة. تقدم هذه الدراسة رؤى تقنية قيمة لتحسين الثقب الروبوتي لسبائك الألومنيوم. تُظهر نتائج المحاكاة أن نجاح الثقب الروبوتي عالي الدقة يعتمد على تفاعل عدة عوامل: سلوك المادة، وقوى الدفع، وصلابة الهيكل، واستراتيجية التحكم، وحالة الأداة. ويؤدي تقليل الانحراف مع الحفاظ على صلابة عالية إلى خطأ في استدارة الثقب أصغر بنحو عشرة أضعاف من الخطأ في حالة الصلابة المنخفضة. ويشير الفرق الطفيف بين حدي القطر العلوي والسفلي إلى أن الحركة الجانبية للأداة محدودة بشكل فعال، مما ينتج عنه شكل هندسي للثقب يُقارب الشكل الدائري الاسمي للأداة. بالنسبة لقطر اسمي يبلغ 9.525 مم، فإن انحراف الاستدارة البالغ 8.1 ميكرومتر، كما تم قياسه وفقًا لمعيار ISO 286، يُقارن بنطاق التفاوت الكلي المرتبط بثقب من الفئة IT6 أو H6 في التجميعات الميكانيكية الدقيقة. وهذا يُظهر درجة التحكم العالية التي تم تحقيقها في إنتاج الثقب. ويؤكد تحليل نتائج المحاكاة إحراز تقدم كبير في تحسين الصلابة، ومراقبة العملية، والتنبؤ بجودة الثقب. وبالتالي، يمكن لهذه الروبوتات الصناعية أن تحقق مستوى من الدقة يقارب مستوى أدوات آلات CNC المخصصة مع الحفاظ على مزايا المرونة والربحية للمنصات الروبوتية.

**الكلمات الرئيسية:** روبوت صناعي، تصنيع عالي السرعة، سبائك الألومنيوم، تصميم التجربة، النتيجة المرغوبة وتحسين PoE/GWO.