



HAL
open science

Méthode de segmentation des signaux de perçage d'empilages sans connaissances a priori de la configuration percée

Luc Gerber, Pierre-André Rey, Mathieu Ritou, Mehdi Cherif

► **To cite this version:**

Luc Gerber, Pierre-André Rey, Mathieu Ritou, Mehdi Cherif. Méthode de segmentation des signaux de perçage d'empilages sans connaissances a priori de la configuration percée. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784370

HAL Id: hal-04784370

<https://hal.science/hal-04784370v1>

Submitted on 15 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Méthode de segmentation des signaux de perçage d'empilages sans connaissances a priori de la configuration percée

Luc GERBER^(a, b), Pierre-André REY^(a), Mathieu RITOU^(b), Mehdi CHERIF^(a)

(a) Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

(b) Nantes Université, LS2N, UMR CNRS 6004, 44321 Nantes France

Mail : luc.gerber@ensam.eu

Résumé : Dans le contexte de l'industrie 4.0, il est possible de générer un grand nombre de données procédé qui doivent être traitées afin de pouvoir en extraire des informations pertinentes.

Dans cet article, on cherche à traiter de manière automatisée des signaux de perçage afin d'assurer un monitoring de la qualité des trous réalisés. Pour ce faire, une des premières étapes de traitement est la segmentation, c'est-à-dire le découpage des phases d'usinages. Cette opération est généralement réalisée en connaissant la configuration de perçage, or cette situation est peu représentative de l'application industrielle visée. Cet article présente une étude comparative entre deux méthodes de segmentation sans connaissances a priori de la configuration percée.

Les deux méthodes sont présentées et testées sur des signaux issus d'une UPA électrique. Pour les deux méthodes présentées, on considère qu'il est possible de représenter un signal de perçage par un ensemble de segments dont le changement de pente indique un changement de phase. Ces changements de pente sont identifiés avec des modélisations de droites et la dérivée locale.

Ces méthodes ont été validées avec les signaux issus d'une campagne d'essais existante, en comparant les résultats obtenus avec et sans connaissances de la configuration de perçage.

Mots clés : Smart Machining, Perçages Multi-Matériaux, Jumeau Numérique, Préparation de données.

1 Introduction

L'industrie aéronautique utilise aujourd'hui des unités de perçages automatiques (UPA) électriques pour le perçage d'empilement d'alliages d'aluminium, de titane et de matériaux composites à base de fibre de carbone (CFRP). Ces machines permettent l'enregistrement des paramètres machines, tels que les courants de moteur d'avance et de broche (Jallageas, 2013). Ces opérations de perçage qui permettent ensuite la pose de fixations, sont critiques d'un point de vue fonctionnel et économique. Les industriels cherchent donc à garantir la réalisation de ces opérations dans des conditions optimisées. Il a été montré dans la littérature que des méthodes d'usinages traditionnelles ne permettent pas obtenir des résultats pleinement satisfaisant c'est pourquoi on se dirige vers des méthodes avancées (Araujo et al., 2020; Jiao et al., 2023; Xu et al., 2023). Par exemple, le perçage orbital, le suit d'usure des outils ou la mise en place une stratégie de perçage intelligent qui s'appuie sur un jumeau numérique, c'est-à-dire une simulation du procédé actualisée par les signaux réels. Le jumeau numérique permet une rétroaction sur le procédé, via par exemple, un système d'aide à la décision. C'est dans ce contexte que le projet ANR SHAIR ambitionne de définir le perçage du futur et sa place dans l'organisation sociale et technique de l'entreprise. L'objectif principal du projet est de mettre en place un système d'aide à la décision de l'acceptabilité des alésages réalisés en particulier pour les alésages multi-matériaux. Il est donc important nécessaire d'obtenir des indicateurs sur les critères d'acceptabilité des alésages réalisés dans ce contexte.

La configuration de perçage d'un empilage de matériaux est propice à l'apparition de défauts propre aux matériaux comme les bavures dans les métaux ou d'écaillage dans les composites ou des défauts propre à la configuration empilée comme à la dégradation de l'état de surface des alésages lors de la remontée des copeaux métalliques (Doğan et al., 2022; Franz et al., 2022; Jiao et al., 2023; Le Dref, 2014; Xu et al., 2023). Il est aussi possible d'observer des désaxements du perçage d'un matériau à l'autre (Gao et al., 2015). Les défauts évoqués ci-dessus ne se produisent qu'à des moments spécifiques du procédé. Afin d'espérer pouvoir les caractériser, il faut d'abord être capable d'identifier chaque phase du procédé. Il s'agit de segmenter temporellement chacune des étapes du perçage. En général, cette opération est réalisée en connaissant la configuration de perçage (matériaux, outil, épaisseur etc.) (Abdoulaye et al., 2021; Jallageas, 2013). Mais cette situation n'est pas représentative de l'application industrielle visée, qui est le plus souvent sans connaissances a priori de la configuration percée. Par exemple des aléas comme la séparation des plaques percées faussent l'épaisseur apparente des matériaux sur les enregistrements (Gao et al., 2015).

Dans cet article, on fait l'hypothèse que les signaux de perçage sont approximables par un ensemble de segments dont le changement de pente est caractéristique d'un changement de phase de perçage. Deux approches seront comparées pour estimer la pente. La première méthode proposée se base sur une modélisation de droite des moindres carrés sur une fenêtre glissante, l'autre méthode se base sur l'étude de la dérivée locale symétrique.

Pour valider la méthode, les signaux issus de la campagne d'Abdoulaye (Abdoulaye et al., 2021) seront utilisés. Le critère d'usure de l'outil proposé dans cet article (Abdoulaye et al., 2021) devra pouvoir être reconstruit avec nos méthodes de segmentation pour être validées. Cette validation permettra aussi de vérifier que les signaux utilisés permettent

d'estimer l'usure d'un outil, car les non-conformités (bavure, dimensionnel hors tolérance) observées dans l'industrie sont principalement liées à l'usure de l'outil coupant (Eynian et al., 2017). Il sera enfin discuté de la généralisation de ces méthodes pour une possible utilisation étendue.

2 Méthodologie

Le perçage d'empilages est caractérisé par plusieurs phases successives : entrée matière, perçage stable dans un matériau, transition entre deux matériaux, sortie matière. L'objectif de la segmentation du signal complet est d'identifier ces différentes phases pour en extraire des données pertinentes. Dans un premier temps, on souhaite distinguer les phases transitoires (entrée, sortie, transitions entre les matériaux) des phases stables (perçage en pleine matière). Ces phases se produisent a priori en alternance, comme représenté sur le signal théorique sur la Figure 1. Ce signal théorique peut être approximé par un ensemble de droites. Les phases transitoires peuvent être composées de plusieurs segments de droite non-horizontale. La forme exacte des phases transitoires dépend de la géométrie de l'outil (Ladonne, 2016). Les phases stables correspondent à un outil positionné hors matière, ou en pleine matière. Leurs longueurs dépendent donc de la longueur percée. Elles peuvent être approximées par des droites horizontales. La première étape de la méthode proposée est donc de distinguer les phases transitoires des phases stables, en considérant que l'outil utilisé et la pièce percée sont inconnus.

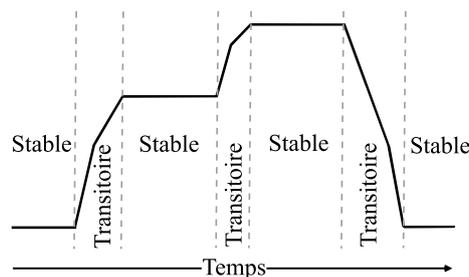


Figure 1 : Signal de perçage théorique d'un empilement de deux matériaux

L'hypothèse de base est qu'il est possible d'approximer le signal par des segments de droite. Il est donc proposé une méthode qui s'appuie sur la modélisation de droite sur des portions de signal.

Les enregistrements issus de l'UPA sont échantillonnés à 100 Hz, cette valeur a été fixée par le fabricant des UPA (Seti-Tec, 2021). Les enregistrements utilisés sont issus d'un perçage avec assistance vibratoire forcée (MITIS). D'après le critère de Shannon, la fréquence d'échantillonnage est trop faible pour observer précisément la coupe car du même ordre de grandeur que la fréquence de rotation de l'outil. On dispose d'enregistrements avec une fréquence d'échantillonnage, on observe sur ces derniers des oscillations de courant entre 0 et environ deux fois la valeur observée durant un perçage continu (Zou et al., 2021). Ces fortes oscillations à haute fréquence forcent l'utilisation d'un filtrage pour segmenter le signal. Une fréquence de 100 Hz ne demande pas de filtrage, mais reste cependant suffisante pour notre opération de segmentation. En effet, les phases transitoires ont une durée de l'ordre du dixième de seconde.

Sur les signaux extraits du perçage, une première étape de normalisation est réalisée afin de conserver les mêmes seuils de détection même si l'ordre de grandeur des courants

d'avance et de broche est différent et que leur magnitude change avec l'usure de l'outil (Abdoulaye et al., 2021).

Pour chaque date, une fenêtre glissante de points est extraite, afin de calculer la droite des moindres carrés sur l'ensemble de cette fenêtre. Dans notre étude, une fenêtre de $T= 0.1$ s a été choisie en prenant en compte les conditions de coupe.

Si le coefficient directeur de la droite est proche de zéro alors le point de référence de la fenêtre est considéré comme faisant partie d'une phase stable. Dans le cas contraire, le point de référence de la fenêtre est considéré comme faisant partie d'une phase transitoire. Les points de changements entre les phases transitoires et stables sont discriminés à partir de cette classification des points. Si des points se suivent avec la même classe, ils forment alors une même phase. À cause du bruit de mesure, il existe des points singuliers qui changent de classe. Pour éviter que ces points singuliers scindent une même phase, une mémoire tampon de $t= 0.05$ s est utilisée, durant laquelle la classe doit être la même pour acter un changement.

La longueur de cette fenêtre est très réduite compte tenu de la fréquence d'échantillonnage des signaux, mais a été délibérément choisie courte pour s'assurer que seul l'effet des points singuliers soit éliminé.

Les points qui forment le début et la fin des phases sont ainsi identifiés. Une nouvelle droite est alors modélisée entre ces points d'intérêt pour déterminer s'il s'agit d'une phase transitoire ou continue, toujours en se basant sur la valeur du coefficient directeur de cette droite.

Certaines perturbations dans le signal peuvent faire apparaître plusieurs phases stables qui se suivent, or des phases transitoires doivent entrecouper des phases stables. Donc si plusieurs phases stables se suivent, elles seront fusionnées en une seule phase.

Les premiers tests de cette méthode ont révélé que le temps de calcul pouvait être significatif et un frein potentiel à une intégration en ligne au cours du process.

Une autre méthode pour déterminer la pente locale du signal a été implémentée pour tenter de réduire le temps de calcul. Des auteurs ont proposé d'utiliser la valeur de la dérivée locale du signal pour permettre des surveillances en ligne (Pardo, 2021).

Cette méthode, qui a été utilisée sur des signaux d'efforts dans (Pardo, 2021), sera ici testée sur les signaux de courant.

La première méthode filtre le signal avec la fenêtre glissante en modélisant des droites. La seconde méthode ne filtre pas les signaux car elle travail point par point ce qui la rend très sensible au bruit. Les signaux sont donc lissés avec une moyenne glissante sur une fenêtre de même longueur que la fenêtre de modélisation de la première méthode ($T= 0.1$ s) afin que le filtrage des signaux des deux méthodes soit comparable.

Les valeurs des dérivées locales sont ensuite calculées pour séparer les phases stables et les phases transitoires.

Mise à part la façon de classifier les points comme transitoires ou stable, les deux méthodes fonctionnent de manière similaire pour éliminer les points singuliers et classifier les phases transitoires et stables. Par la suite, les deux méthodes seront identifiées selon leur méthode de discrimination, la première méthode sera notée : méthode des droites, et la seconde : méthode de la dérivée.

3 Collecte de signaux de perçage

3.1 Essais réalisés

Les enregistrements utilisés dans ces travaux sont issus d'une campagne d'essais réalisés sur une UPA électrique avec assistance vibratoire (Abdoulaye et al., 2021). Pour ces essais, un outil de perçage de diamètre 6.35 mm est utilisé, avec une éprouvette constituée de 11 mm d'épaisseur d'aluminium A17175 et de 16 mm de CFRP T800/M21 quasi-isotrope. Les conditions de coupe sont détaillées dans le Tableau 1. Le montage expérimental est instrumenté (Figure 2) pour permettre une analyse fine du procédé de perçage. Dans ces travaux, on s'intéressera essentiellement aux signaux de courant issus de l'UPA qui ne nécessitent pas d'instrumentation extérieure.

Tableau 1 : Conditions de coupe utilisées pour la campagne d'essais

| | | | |
|----------------------------|------|------|------|
| Vitesse de broche (tr/min) | 6000 | 6000 | 6000 |
| Avance (mm/tr) | 0.06 | 0.08 | 0.1 |
| Nombres d'essais | 27 | 184 | 3 |

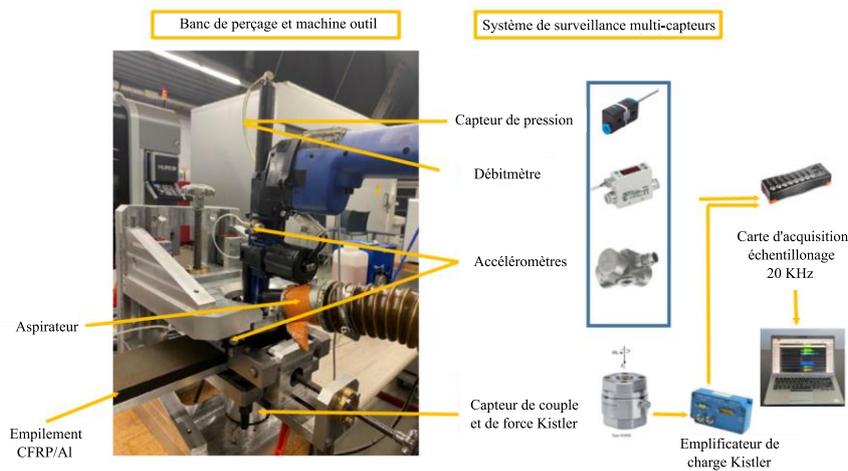


Figure 2 : Montage expérimental (Abdoulaye et al., 2021)

Ce type d'UPA a la particularité d'avoir un moteur dédié à l'avance de l'outil et un moteur dédié à sa mise en rotation (Jallageas, 2013), on parlera par la suite des courants d'avance et de broche. Le courant qui traverse un moteur électrique est proportionnel au couple qu'il fournit, ces courants donnent donc une image des efforts de coupe.

3.2 Contenu des enregistrements

L'enregistrement réalisé par l'UPA comporte les conditions de coupe, le temps et la profondeur du perçage mais pas d'informations sur la géométrie de l'outil ou la configuration percée. À chaque pas de temps, on retrouve : la position en mm, les courants de broche et d'avance, et les vitesses d'avance et la fréquence de rotation de la broche. On ne peut donc travailler que sur les courants moteurs, afin de segmenter les phases de perçage à partir de ces enregistrements et on pourra s'autoriser à utiliser les consignes de vitesse d'avance et de broche pour régler certains paramètres.

On remarquera que l'enregistrement ne contient ni la mise en mouvement initiale de l'outil ni sa remontée en fin de perçage, seule la phase d'usinage de l'outil est observable.

Il faut aussi remarquer que les courants enregistrés sont corrigés des courants consommés à vide par la machine. On ne travaille donc que sur les courants utiles à l'usinage (Seti-Tec, 2021).

4 Résultats

4.1 Segmentation

L'ensemble des signaux de courant ont été tracés en marquant les points de transition trouvés pour pouvoir être évalués par un expert. Tous les signaux ont été inspectés, et un dixième des signaux, répartis sur l'ensemble de la série, ont été inspectés en détail.

La Figure 3 montre la segmentation obtenue sur le courant de broche du premier perçage en connaissant la configuration percée et avec nos deux méthodes. On identifie clairement la phase d'approche de l'outil, l'entrée en matière, les phases en pleine matière, le changement de matériaux, et la sortie matière, bien que la détection de cette dernière présente un retard. On remarquera que la méthode des droites semble donner les résultats les plus intéressants pour cet enregistrement.

Il est à noter que le dernier point de changement de phase est toujours identifié comme le début d'une phase transitoire avec les deux méthodes proposées. Cela provient du fait que l'attribution de cette classe ne se fait qu'entre les points de changement de phase et que le dernier point n'a, fatalement, plus de point de référence pour déterminer ce qui se passe après lui. Comme la classe par défaut est transitoire, il est toujours classé ainsi.

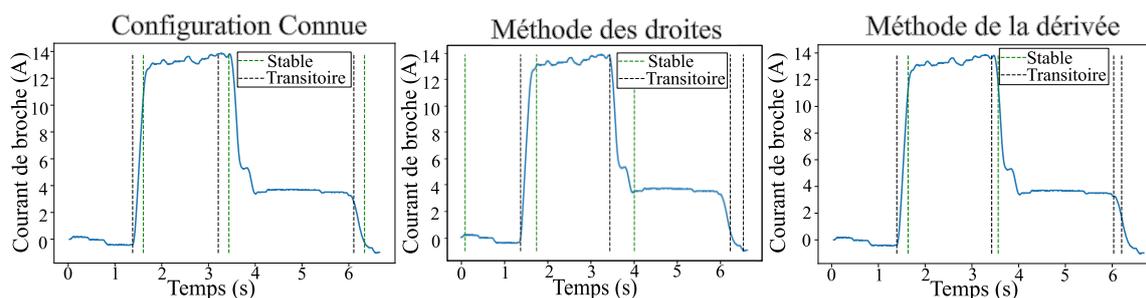


Figure 3 : Segmentation du courant de broche du premier perçage

La Figure 4 montre les résultats obtenus sur le courant d'avance du même perçage. Les phases de perçage sont clairement identifiables pour la méthode avec connaissance du procédé et la méthode de la dérivée, mais la méthode des droites n'est pas aussi performante sur ces signaux. À cause de la normalisation, les seuils de détections pour les deux signaux sont les mêmes. Le type de signal, la méthode et le paramétrage utilisés ont donc une influence sur la qualité de la segmentation.

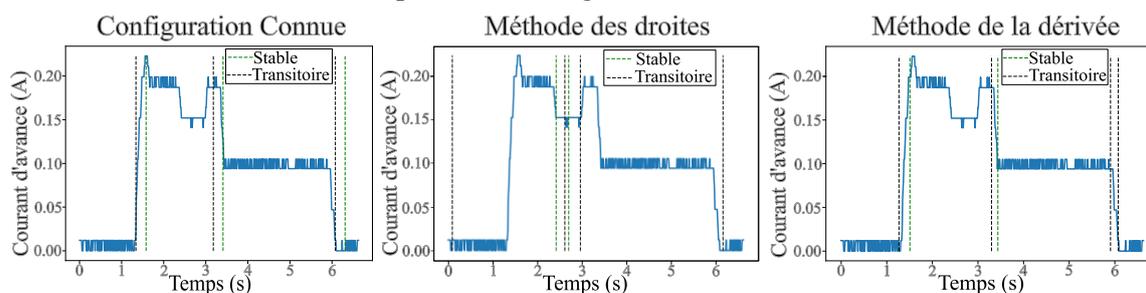


Figure 4 : Segmentation du courant d'avance du premier perçage

4.2 Usure

Les signaux utilisés ont été produits lors d'une campagne d'essais d'usure de l'outil (Abdoulaye et al., 2021). Cette étude a mis en évidence l'augmentation de l'effort moyen durant les phases stables avec l'usure de l'outil en utilisant une méthode de segmentation qui prend en compte la configuration de perçage. Les courants moteurs étant une image des efforts de coupe, on devrait y retrouver la même tendance. On testera donc la possibilité d'automatiser l'extraction de l'information de courant moyen durant les phases stables avec nos méthodes de segmentation sans connaissances a priori.

La Figure 5 montre les résultats obtenus pour la méthode des droites. On retrouve la même tendance que celle mise en évidence précédemment.

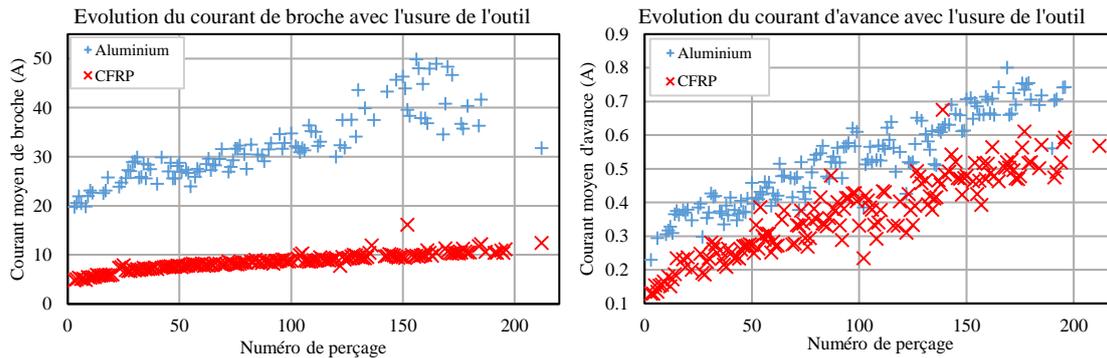


Figure 5 : Évolution des courants moyens relevée avec la méthode des droites

La Figure 6 montre les résultats obtenus avec la méthode de la dérivée. Ici aussi, on retrouve l'augmentation de courant moyen attendu.

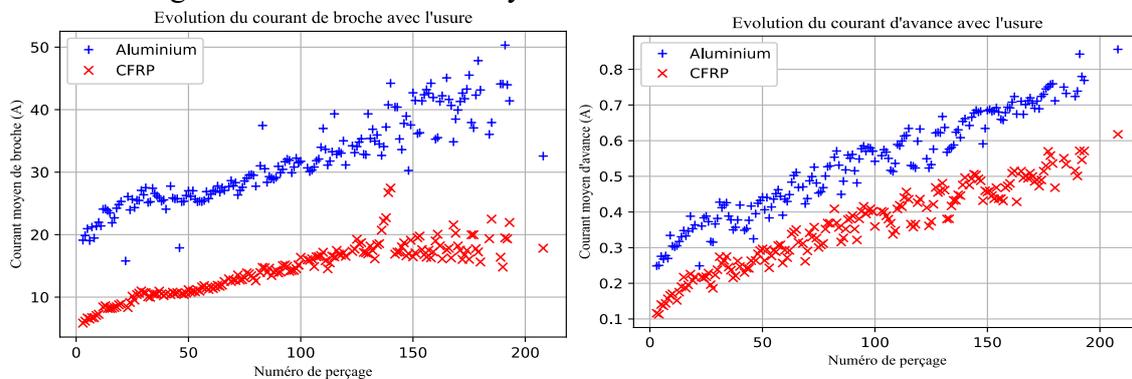


Figure 6 : Évolution des courants moyens relevée avec la méthode de la dérivée

Les résultats obtenus avec les deux méthodes semblent conformes à ceux d'Abdoulaye (Abdoulaye et al., 2021). Dans la partie suivante, on veut mettre en avant les différences entre ces méthodes et leurs limites.

5 Discussions

Afin de différencier les deux méthodes, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres tels que la nature du signal source, la robustesse de la méthode face aux phénomènes d'usure, le temps de calcul.

5.1 Signaux de courant

Jusqu'à présent, il n'a pas été évoqué la question de la pertinence de l'utilisation du courant d'avance ou de broche ou des deux. Il s'est avéré que les deux méthodes peuvent être utilisées sur les deux signaux, mais la méthode des droites produit moins de détections aberrantes avec les courants de broche alors que la méthode de la dérivée en produit moins avec les courants d'avance, bien que cela soit moins significatif avec la méthode de la dérivée.

Si on compare les points d'intérêt entre l'avance et la broche, on remarque que la réaction du courant de broche présente un retard. Ce phénomène s'explique par le fait que la pointe de l'outil contribue majoritairement à la force de poussée et peu au couple de coupe (Ladonne, 2016). Pour notre cas d'application il est intéressant de remarquer qu'un des signaux réagit plus rapidement à ces changements de phase pour pouvoir se rapprocher d'un fonctionnement en temps réel.

Afin de diminuer le temps de calcul, il a été proposé de n'effectuer la segmentation que sur le courant d'avance et de transposer les résultats sur le courant de broche. La transposition se fera en tenant compte du retard entre les signaux.

5.2 La forme du signal

La première méthode repose sur le fait que les phases stables sont assimilables à des plateaux horizontaux et son fonctionnement ne permet d'identifier que des plateaux. Dans notre cas, avec l'usure de l'outil, on remarque que le signal de courant de broche est de moins en moins assimilable à un plateau, ce qui conduit à des détections partielles, voire impossibles du perçage stable, en particulier de l'aluminium (Figure 7). C'est pour cela que la densité de points sur la Figure 5 semble diminuer pour l'aluminium. L'allure des courants d'avance est moins sensible à l'usure de l'outil (Figure 8).

Cette différence de comportement face à l'usure des deux signaux justifie davantage le travail sur un seul signal comme proposé au paragraphe 5.1. La figure 6 montre les résultats obtenus avec la méthode de la dérivée. Ces résultats ont été obtenus en travaillant sur les courants d'avance pour déterminer les points d'intérêt qui ont été ensuite transposés sur le courant de broche en les corrigeant du retard entre les signaux.

On remarque sur la figure 6 que cette méthode réduit le nombre de mesures impossibles à cause de l'usure.

La modification de l'allure du signal est imputée à la modification de la micro-géométrie de l'outil, en particulier la perte d'acuité de ses becs et de ses doubles listels.

Ces modifications confirment les conclusions de Jallageas (Jallageas, 2013) et Pardo (Pardo, 2021) qui font remarquer que la modélisation des signaux réels par des droites n'est pas conforme aux résultats en condition de production industrielle. On remarquera tout de même que les problèmes de détection de la première méthode ne deviennent significatifs qu'après 160 perçages. Or l'étude précédente considérait l'outil utilisé après environ 115 perçages (Abdoulaye et al., 2021). La méthode des droites est donc utilisable sur toute la durée de vie utile de l'outil utilisé. L'impossibilité de réaliser des mesures avec cette méthode pourrait donc être un nouvel indicateur de l'usure des outils de coupe.

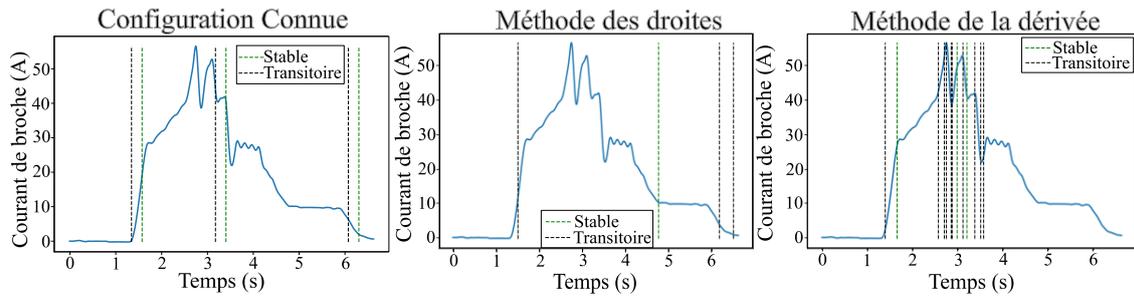


Figure 7 : Segmentation du courant de broche du dernier perçage

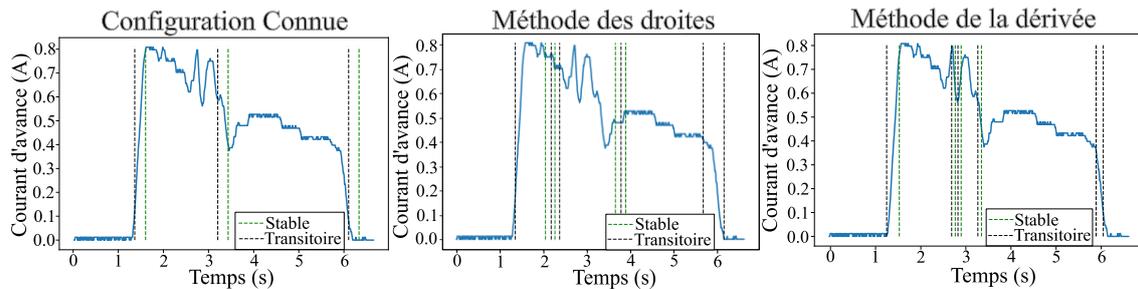


Figure 8 : Segmentation du courant d'avance du dernier perçage

5.3 Le temps de calcul

La méthode des droites demande de modéliser un nombre important de droites ce qui est demandeur de ressources de calcul pour une opération de conditionnement du signal. Cela peut se traduire par un temps de calcul de l'ordre de la seconde. Ce constat peut être rédhibitoire pour une utilisation en ligne. D'autres méthodes se basant sur la modélisation de droites ont été testées, mais se sont avérées bien moins robustes que celle présentée dans cet article. L'intégration de connaissances supplémentaires, comme les conditions de coupe indiquées dans les enregistrements machine, pourraient permettre de rendre ces méthodes plus robustes et d'envisager de les utiliser.

La méthode de la dérivée ne modélise qu'un nombre limité de droites pour distinguer les régimes continus et transitoires. Les autres opérations faites par cette méthode sont bien moins coûteuses en ressources de calculs, ce qui réduit le temps de calcul à l'ordre du dixième de seconde. Elle est donc plus adaptée à une utilisation en ligne.

5.4 Paramètres de réglages

Les deux méthodes possèdent trois paramètres pour être ajustées : la longueur de la fenêtre de modélisation pour la première ou de lissage pour la seconde, la longueur de la mémoire tampon pour éliminer les points singuliers, et l'intervalle d'erreur qui sépare la classe « stable » de la classe « transitoire ».

Dans le cadre de nos travaux, ces paramètres sont initialement choisis en fonction de la fréquence d'échantillonnage et des conditions de coupe, puis ajustés finement par dichotomie. Nous avons fait remarquer au paragraphe 4.1 que le type de signal et la méthode utilisée ont une influence sur la qualité de la segmentation obtenue. En revanche les mêmes paramètres de détection ont été utilisés pour les trois conditions de coupe disponibles, qui sont assez proches (Tableau 1).

Comme cela a été souligné au paragraphe 5.1, la méthode de la dérivée est performante sur les deux types de signaux. Elle semble être utilisable sur une plus grande variété de signaux avec les mêmes paramètres et donc plus robuste.

Pour étendre ces méthodes à d'autres configurations de perçage, il est vraisemblable qu'une étape initiale d'ajustement de ces paramètres, en particulier la longueur des fenêtres, soit ajoutée en fonction de la fréquence d'échantillonnage et éventuellement des conditions opératoires disponibles dans les enregistrements machine.

5.5 Qualité des détections

La modification de l'allure des signaux avec l'usure de l'outil met en défaut l'hypothèse des phases stables caractérisées par des plateaux. Cela provoque l'apparition de nombreuses phases qui peuvent être difficiles à interpréter ou à traiter automatiquement. La méthode des droites étant très dépendante de notre hypothèse, la détection n'est plus possible, ou demande une opération manuelle pour confirmer que les phases détectées correspondent aux phases que l'on cherche à identifier. La méthode de la dérivée ne fait apparaître et disparaître que des phases au niveau du changement de matériaux. Dans notre cas le premier régime continu a donc toujours été le perçage de l'aluminium et le dernier le perçage de CFRP ce qui a permis une automatisation simple du traitement du signal.

6 Conclusions

Cet article présente deux méthodes de détection des phases de perçage avec un minimum de connaissances a priori de l'opération réalisée. Les tests ont été réalisés sur des enregistrements de perçages multi-matériaux et les méthodes se sont avérées efficaces pour trouver les phases de perçage continu. Cette segmentation a permis de retrouver les résultats obtenus avec des méthodes classiques issues de la bibliographie.

Pour notre application de surveillance, il est préférable d'utiliser la seconde méthode qui est plus robuste et permet plus facilement un traitement en ligne (faible temps de calcul). Pour le développement de notre modèle de jumeau numérique global, les méthodes proposées devront être étendues à d'autres configurations (outil, conditions de coupe, etc.)

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche SHAIR n°ANR-22-CE10-0009-01, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), et labellisé par les pôles de compétitivité AerospaceValley et EMC2.

Le travail a aussi été mené dans le contexte du groupe de travail Manufacturing'21 qui regroupe 24 laboratoires français. Les thèmes abordés sont la modélisation des procédés de fabrication, l'usinage virtuel et les méthodes de fabrication émergentes.

Références

- Abdoulaye, A. H., Rey, P.-A., Cherif, M., Abisset-Chavanne, E., & Yousfi, W. (2021, octobre 26). *Development of a methodology for the implementation of a smart drilling system for multimaterial aeronautical structures*. 16th International Conference on High Speed Machining, Darmstadt, Germany.
- Araujo, A. C., Landon, Y., & Lagarrigue, P. (2020). *Smart drilling for Aerospace Industry : State of art in research and education*. 99, 387-391. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.105>
- Doğan, M. A., Yazman, Ş., Gemi, L., Yildiz, M., & Yapici, A. (2022). *A review on drilling of FML stacks with conventional and unconventional processing methods under different conditions*. *Composite Structures*, 297, 115913. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115913>

- Eynian, M., Das, K., & Wremland, A. (2017). *Effect of tool wear on quality in drilling of titanium alloy Ti6Al4V, Part I: Cutting Forces, Burr Formation, Surface Quality and Defects*. *High Speed Manufacturing*, 3, 1-10. <https://doi.org/DOI.10.1515/hsm-2017-0001>
- Franz, G., Vantomme, P., & Hassan, M. H. (2022). *A Review on Drilling of Multilayer Fiber-Reinforced Polymer Composites and Aluminum Stacks : Optimization of Strategies for Improving the Drilling Performance of Aerospace Assemblies*. *Fibers*, 10(9), 78. <https://doi.org/10.3390/fib10090078>
- Gao, Y., Wu, D., Nan, C., Ma, X., Dong, Y., & Chen, K. (2015). *The interlayer gap and non-coaxiality in stack drilling*. *InternationalJournalofMachineTools&Manufacture*, 99, 68-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.09.007>
- Jallageas, J. (2013). *Optimisation du perçage de multi-matériaux sur unité de perçage automatique (UPA) [Thèse en Sciences Physiques et de l'Ingénieur Spécialité Mécanique, Université de Bordeaux]*. <https://theses.hal.science/tel-00982328>
- Jiao, F., Li, Y., Niu, Y., Zhang, Z., & Bie, W. (2023). *A review on the drilling of CFRP/Ti stacks : Machining characteristics, damage mechanisms and suppression strategies at stack interface*. *Composite Structures*, 305, 116489. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116489>
- Ladonne, M. (2016). *Modélisation du procédé de perçage assisté par vibrations forcées : Prise en compte de l'environnement Pièce-Outil-Machine. [Thèse en Sciences des Métiers de l'ingénieur, Université de Bordeaux]*. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02612216>
- Le Dref, J. (2014). *Contribution à la Modélisation du Perçage Assisté par Vibration et l'Etude de son Impact sur la Qualité d'Alesage. Application aux Empilages Multi-Matériaux [Thèse en Génie Mécanique, Mécanique des Matériaux]*. Université de Toulouse.
- Pardo, A. (2021). *Fundamental investigation of the drilling of multimaterial aerospace stacks to aid adaptive drilling [Thèse en Ingénierie Mécanique, Aéronautique et Civil]*. University of Manchester.
- Seti-Tec. (2021). *ÉVo EVO CONFIG V3.1.4 User Manual*.
- Xu, J., Kolesnyk, V., Li, C., Lysenko, B., Peterka, J., & Gupta, M. K. (2023). *A critical review addressing conventional twist drilling mechanisms and quality of CFRP/Ti stacks*. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6614-6651. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.226>
- Zou, F., Dang, J., An, Q., & Chen, M. (2021). *Mechanism and feasibility study of low frequency vibration assisted drilling of a newly developed CFRP/Al co-cured material*. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.020>