



Livre blanc

# Revoir les règles

du ratio des inerties

**KOLLMORGEN**



Le principe reconnu de l'adaptation de l'inertie du moteur à celle de la charge n'est plus pertinent avec les processeurs rapides et les algorithmes de régulation évolués actuels.

Cette méthode dépassée accroît les coûts et ajoute une masse inutile dans les applications où l'inertie de la charge est élevée et les besoins de couple continu sont faibles.

**L'inertie du moteur n'est qu'un des facteurs à considérer dans le développement d'une solution optimale nécessitant une large bande passante et une bonne rigidité de l'asservissement.**

## ORIGINES DE LA RÈGLE

Le ratio des inerties était censé garantir une régulation stable et efficace d'une charge entraînée reliée à un servomoteur. Au moment où, dans les années 70, les servomoteurs à balais ont commencé à remplacer l'hydraulique dans le monde de la machine-outil, les concepteurs calculaient les besoins d'inertie de charge, de couple et de vitesse en fonction des performances attendues des machines. Lors du choix d'un moteur répondant aux besoins de couple et de vitesse, si le rapport entre l'inertie du moteur et celle de la charge n'était pas proche de 1:1, on envisageait d'utiliser un moteur à plus forte inertie ou un réducteur (pour réduire l'inertie réfléchie au niveau du servomoteur), ce qui augmentait le coût du système. Même si le transfert de la puissance est effectivement optimal lorsque les inerties correspondent, l'efficacité opérationnelle du système n'est pas garantie. Dans l'idéal, il faudrait diminuer l'inertie totale du système pour dépenser moins d'énergie.

Toutefois, un moteur plus gros augmente les besoins de couple pour accélérer l'inertie accrue du moteur.

Dans le dimensionnement d'une application, il y a davantage de considérations que le seul ratio des inerties. Lors du passage des moteurs hydrauliques aux moteurs électriques, l'analyse rapide des systèmes mécaniques et de régulation tout entiers était limitée par la technologie disponible. La structure de ces servomécanismes en boucle fermée comprend des éléments qui peuvent fortement affecter les performances de la machine, comme le moteur, le capteur d'asservissement associé, le couplage à la charge et les capacités de réglage des boucles d'asservissement. Pour garantir de bonnes performances, les boucles d'asservissement sont réglées pour fonctionner avec la bande passante et la rigidité d'asservissement souhaitées, ce qui optimise la réponse aux commandes du

contrôleur avec un minimum de dépassement. Le servomoteur est commandé par un servovariateur qui utilise des boucles de courant, de vitesse et de position. Chaque boucle est réglée pour créer une réponse améliorée du système passant par la stabilité, les réactions rapides aux perturbations de couple ou de vitesse et la fluidité du fonctionnement. Les premières années, les boucles d'asservissement utilisaient des composants et des paramètres discrets pour ajuster les gains de boucle déterminés par l'expérimentation. Les outils analytiques et la puissance de traitement limités, ainsi que les composants discrets, exigeaient une correspondance étroite entre l'inertie du moteur et celle de la charge. Même lorsque les processeurs et les outils analytiques se sont améliorés et que des boucles d'asservissement à réglage numérique ont été mises au point, l'ancienne règle d'une correspondance optimale de 1:1 est restée en vigueur.



## ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE

Avec l'avènement de la technologie des moteurs sans balais, des aimants NeFeB à haute énergie et des boucles à réglage numérique, le protocole de mise en ratio des inerties a rencontré de nouvelles complications. Les aimants à haute énergie montés sur le rotor réduisaient sensiblement l'inertie du moteur par rapport à leurs prédécesseurs à balais. Les moteurs répondant aux exigences en termes de capacités de couple maximum et continu de l'application présentaient des décalages plus importants entre l'inertie de la charge et celle

du moteur. Alors que les boucles à réglage numérique du servomoteur facilitaient considérablement le réglage des gains et des filtres pour garantir la stabilité de la régulation, les faibles vitesses des processeurs, les capteurs d'asservissement basse résolution et d'autres facteurs limitants ont entraîné le développement d'options de moteurs sans balais présentant une inertie accrue.

Une puissance de traitement supérieure permettait aux analyses complexes de créer une modélisation

et une simulation mathématiques précises des réponses du système. Les capacités modernes incorporant de puissants outils de servovariateur intégrés créent des analyses interactives de systèmes mécaniques complexes qui simplifient l'optimisation des servomécanismes. L'analyse avancée permet aussi au concepteur de la machine de connaître précisément l'empreinte du système mécanique et de savoir comment traiter les limitations de performances.

**Une puissance de traitement supérieure permettait aux analyses complexes de créer une modélisation et une simulation mathématiques précises des réponses du système.**

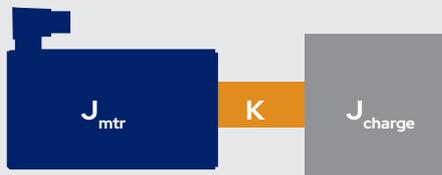
## COMPLIANCE : LE FLÉAU DES SOLUTIONS À LARGE BANDE PASSANTE

La compliance dans un système mécanique décrit l'élasticité naturelle des mécanismes entre la charge entraînée et le moteur, qui crée des temps de réponse différés et donc réduit la bande passante du système. L'introduction d'un décalage important entre les inerties dans le système accentue le problème, comme dans le cas d'un petit moteur possédant suffisamment de couple pour déplacer une charge exceptionnellement grande mais qui est connecté via un dispositif d'accouplement. Lorsque le petit moteur applique rapidement le couple à la charge importante, celle-ci hésite à répondre, étant donné qu'un objet à l'arrêt veut rester à l'arrêt. Le retard résulte d'une compliance d'accouplement entre le moteur

et la charge, qui crée une perte avant que la charge commence à bouger. Lorsque la charge finit par se synchroniser avec le moteur, la forte inertie entraîne le dépassement de la vitesse cible et donc le ralentissement du petit moteur pour s'adapter. Lorsque le système ajuste la vitesse excessive de la forte inertie, la vitesse cible est de nouveau dépassée, obligeant une nouvelle fois le petit moteur à s'adapter. Ce cycle continu crée une résonance et affecte la stabilité du système.

La plupart des systèmes mécaniques peuvent être modélisés et simulés mathématiquement en utilisant différentes fréquences d'excitation pour rapidement identifier la réponse en fréquence lorsqu'une résonance

se produit. La largeur de la bande passante d'un système ne doit jamais dépasser le point d'antirésonance initial du système. L'objectif d'une augmentation de la bande passante est de pousser vers le haut la fréquence de résonance initiale en identifiant et traitant la cause de la résonance. Dans un système compliant, lorsque la compliance ou élasticité augmente, la fréquence du point de résonance initial diminue, ce qui réduit la bande passante. Lorsque la charge entraînée est directement couplée au moteur pour limiter la compliance, le décalage est atténué, ce qui augmente la fréquence de résonance initiale et crée un système à bande passante plus large.



$$J_e = \frac{J_{mtr} J_{charge}}{J_{mtr} + J_{charge}} \quad F_{antirés} = \sqrt{\frac{K}{J_{charge}}} \quad F_{rés} = \sqrt{\frac{K}{J_e}}$$

Au fur et à mesure que le rapport entre  $J_{charge}$  et  $J_{mtr}$  s'accroît,  $J_e$  se rapproche de  $J_{mtr}$  si bien que si  $J_{mtr}$  diminue,  $J_e$  diminue aussi, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence de résonance. L'augmentation de  $K$  a également pour effet d'accroître la fréquence. La fréquence d'antirésonance ne change pas puisque l'inertie de la charge est constante mais augmente en rigidité. À noter que la fréquence ( $F$ ) est exprimée en rad/s dans ces équations.

## AUGMENTATION DE LA RIGIDITÉ ET DIMINUTION DE L'INERTIE DU SYSTÈME

Les modèles mathématiques représentant un système mécanique montrent que la solution suprême pour une plus grande largeur de bande et un bon rapport coût/efficacité consiste à accroître la rigidité mécanique et à réduire l'inertie totale du système.

Prenons l'exemple d'une solution à accouplement direct où la charge

est directement couplée au moteur avec une compliance quasi nulle. On pourra précisément commander le système avec une bonne bande passante même si le ratio des inerties dépasse 1000:1. Dans un système extrêmement rigide (non compliant), le système d'asservissement doit être dimensionné pour fournir le couple nécessaire afin de surmonter l'inertie du système de la manière requise par

l'application spécifique. Étant donné que les solutions à accouplement direct ne conviennent pas à toutes les applications, on introduit des éléments compliant dans le système. Les outils analytiques évolués actuels permettent de facilement identifier les éléments compliant qui affectent les performances du système.

## DIAGRAMME DE BODE

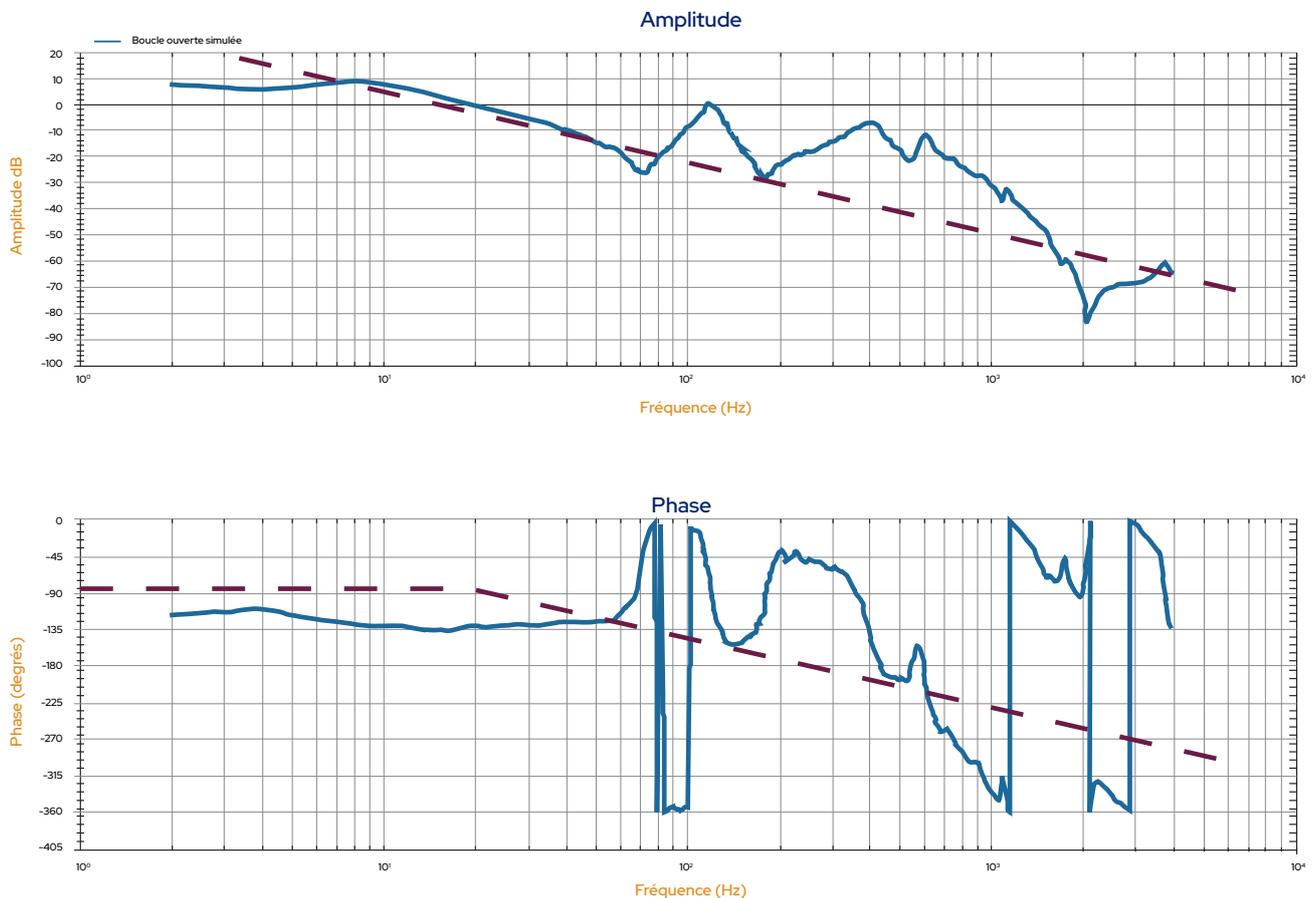
Le diagramme de Bode est un outil analytique puissant consistant en deux diagrammes qui décrivent la réponse en fréquence d'un signal injecté pour identifier l'amplitude et le retard de phase du système. La bande passante, les marges de phase et de gain, les points de résonance

et d'antirésonance sont quelques-uns des éléments représentés sur un diagramme de Bode. Il renseigne aussi sur le décalage entre les inerties, le nombre de corps connectés et les niveaux de friction, et identifie la bande passante de la boucle ouverte ou fermée, les marges

de phase et de gain et les fréquences de résonance. Ces informations sont précieuses pour optimiser les performances du système, car elles permettent d'ajuster les gains des boucles, d'installer différents filtres numériques et d'envisager des adaptations mécaniques.

## MESURES DU DIAGRAMME

Les diagrammes de Bode se composent d'un diagramme du gain et d'un diagramme de la phase, avec les caractéristiques illustrées ci-dessous.



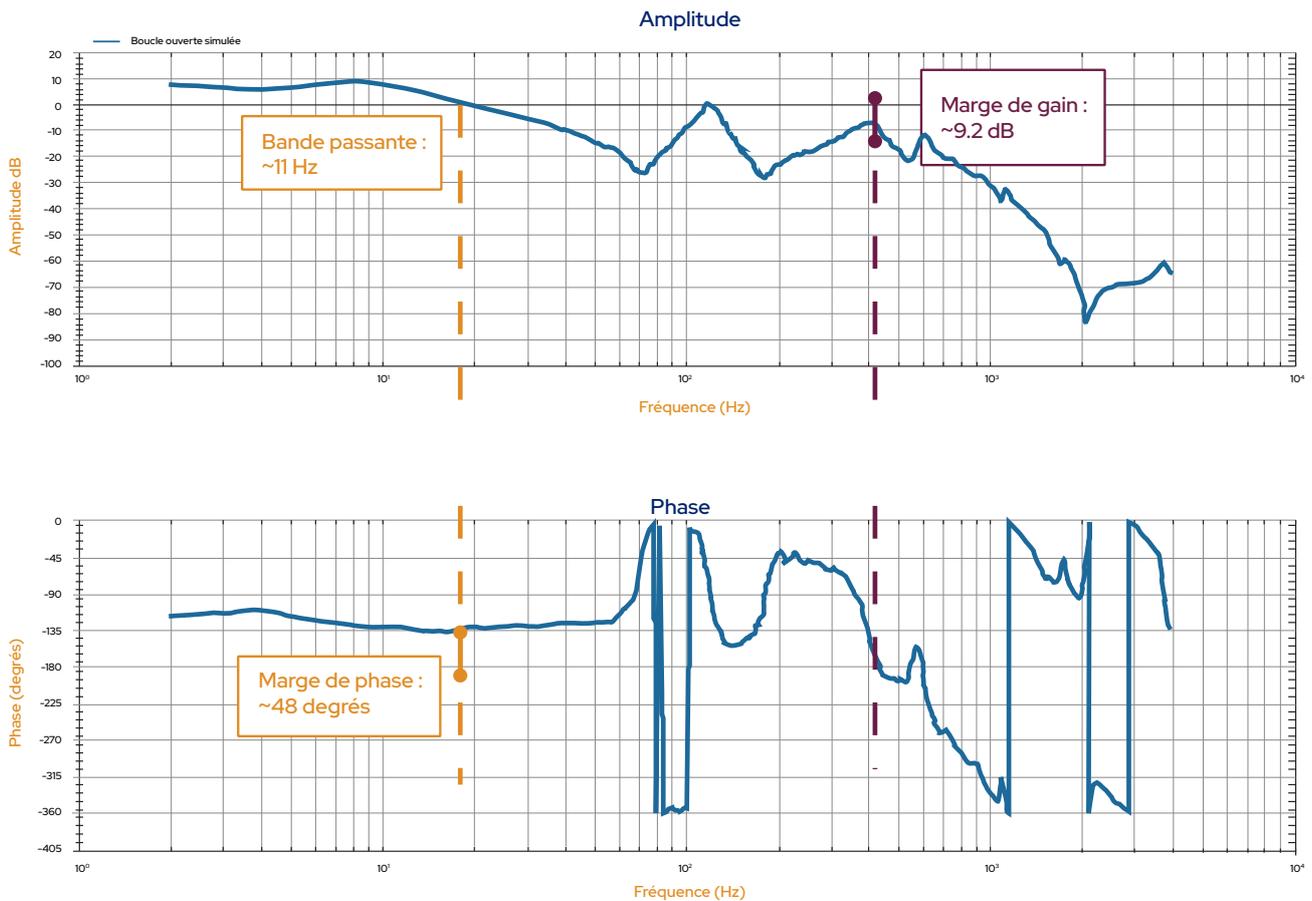
Dans un système idéal, le diagramme d'amplitude doit avoir une pente négative rectiligne de -20 dB/décade. Le diagramme de phase doit commencer à -90° et chuter à une pente négative depuis le point où l'amplitude franchit zéro dB.

## CALCUL DE LA BANDE PASSANTE - MARGES DE PHASE ET DE GAIN

En utilisant un diagramme de Bode valide, il est possible de déterminer les bandes passantes des boucles ouvertes et fermées, ainsi que les marges de gain et de phase associées. La bande passante est représentée par la fréquence à laquelle le diagramme de boucle

ouverte atteint 0 dB (~11 Hz). La marge de phase est le nombre de degrés au-dessus de -180 degrés (~48 degrés) alors que la marge de gain est la mesure d'amplitude correspondant à une phase de -180 degrés (~9,2 dB).

L'exemple qui suit montre comment optimiser les performances et le coût en appliquant une rigidité système améliorée à la solution, sans se préoccuper d'un décalage entre les inerties.



Une machine de découpe au laser à 3 axes a été conçue selon l'approche de ratio des inerties pour le choix des moteurs d'axe. Une nouvelle conception de la machine était souhaitée pour réduire le coût et améliorer les performances de la machine. Une analyse des besoins de l'application a montré que d'autres solutions moteur pouvaient augmenter le point de résonance du système afin d'obtenir des marges

de gain et de phase supplémentaires et d'améliorer la stabilité. Le servomoteur retenu réduisait l'inertie totale du système, augmentait la rigidité de l'axe avec un diamètre d'arbre plus grand (fréquence de résonance plus élevée), et offrait une densité de puissance supérieure dans un ensemble plus compact. La rigidité accrue de l'arbre réduisait la compliance, ce qui améliorait les performances.

Le tableau suivant montre les avantages obtenus en termes de performances et de coûts en éliminant l'approche de ratio des inerties en faveur d'une rigidité mécanique améliorée et d'une inertie réduite.

AXE	Jm initial (kg-cm <sup>2</sup> )	Nouveau Jm (kg-cm <sup>2</sup> )	Inertie de charge (kg-cm <sup>2</sup> )	Décalage d'inertie initial	Nouveau décalage d'inertie	% d'augmentation	% d'économies
X	120	67,7	256,75	2,14	3,79	77 %	17 %
Y	17	4,58	9,56	0,56	2,09	273 %	34 %
Z	121,6	80	29,4	0,24	0,37	54 %	17 %

## CONCLUSION

Les servovariateurs modernes, avec leurs capacités avancées de réglage, et les servomoteurs hautes performances incorporant un capteur d'asservissement haute résolution éliminent les problèmes de décalage

entre l'inertie de la charge et celle du moteur. Un dimensionnement correct de l'application et la mise en œuvre de bonnes pratiques dans la conception d'un mécanisme rigide permettent de créer un

système de mouvement hautes performances compatible avec des bandes passantes plus larges, des mouvements et des temps d'établissement améliorés et une régulation dynamique robuste.

## Vous souhaitez en savoir plus ?

Les sujets connexes supplémentaires sont la mécatronique, la théorie de la régulation, les techniques de filtrage numérique, le réglage des boucles d'asservissement, la modélisation mathématique et les résonances mécaniques. Kollmorgen propose une formation avancée, en plusieurs jours, sur le réglage de l'asservissement qui inclut l'application pratique des diagrammes de Bode et les techniques de réglage basées sur le filtrage numérique. Des sujets similaires sont traités dans les publications suivantes :

### Livres blancs (cliquer pour lire)

[Dimensionnement et choix de servocommandes](#)

[Gestion de l'énergie d'un servomoteur – Effets du rapport d'inertie](#)

[Conception de machines basées sur des modèles intégrés](#)

[Approche simplifiée de la conception des machines pour une commande optimale des servomoteurs](#)

## Pour obtenir des réponses, faites équipe avec Kollmorgen

Kollmorgen est bien plus qu'un fournisseur. Nous sommes le partenaire de votre réussite. Nous vous donnons un accès direct aux ingénieurs qui ont créé nos systèmes de contrôle de mouvement et qui savent répondre aux exigences spécialisées en matière de formage des métaux. Nos outils de conception autoguidés en ligne vous aident à modéliser, à choisir et à optimiser les produits. Et grâce à la présence mondiale de nos centres de production, de conception, d'application et de service, vous avez toujours accès à un approvisionnement fiable, à une expertise de co-conception et à un support personnalisé qu'aucun autre partenaire ne peut vous offrir. Que vous mettiez à niveau une machine existante ou que vous conceviez la machine de nouvelle génération qui définira la référence pour vos clients, nous pouvons vous aider à concevoir l'exceptionnel.

Prêt à découvrir tout ce dont votre machine est capable? Visitez [www.kollmorgen.com](http://www.kollmorgen.com)