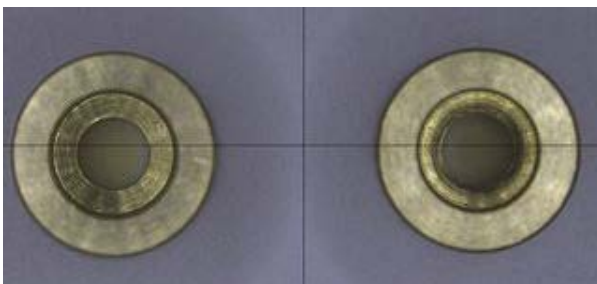


## UTILISER LES SYSTEMES OPTIQUES TELECENTRIQUES POUR OPTIMISER LA PRECISION ET LA REPRODUCTIBILITE DES IMAGES INDUSTRIELLES

### Comment éliminer les erreurs cachées en fabrication

#### Introduction

Lorsque les premiers microscopes à lentilles multiples furent inventés en 1590, les scientifiques s'émerveillèrent de cette nouvelle aptitude à voir de petits objets et des détails du monde naturel qui étaient auparavant invisibles et semblaient par conséquent inexistantes. En raison de la miniaturisation constante croissante des pièces et des produits utilisés dans la fabrication automatisée au cours des cinq dernières décennies, l'utilisation des microscopes s'est étendue du domaine scientifique au domaine industriel. On trouve aujourd'hui des microscopes dans une multitude d'applications d'assemblage et d'inspection, chaque fois qu'il est indispensable de visualiser et de mesurer des détails minuscules.



Les images dont nous disposons de nos jours sont grandes, nettes et brillamment éclairées. Avec une imagerie aussi impressionnante, on peut croire que les dimensions de ce

qui est affiché sont exactes, mais ce n'est pas forcément vrai. Lors de l'étude d'un point dont la distance par rapport à la lentille n'est pas connue avec précision ou qui n'est pas situé directement sur l'axe optique du système de lentilles d'un microscope, des principes optiques fondamentaux peuvent donner lieu à des distorsions entraînant des erreurs d'observation et de mesure.

Une optique standard peut suffire pour l'inspection d'objets surtout bidimensionnels, tels que les pistes d'une carte de circuit imprimé, ou pour l'analyse qualitative d'objets non plats. Toutefois, quand il s'agit de mesurer avec précision ou comparer les caractéristiques d'un objet tridimensionnel, comme la surface incurvée d'une pièce moulée par injection, ces erreurs posent problème.

Le choix d'un microscope équipé de l'optique appropriée peut considérablement réduire ces erreurs cachées et fournir des résultats à la fois plus précis et plus reproductibles, deux attributs essentiels pour l'inspection moderne comme pour la mesure optique.

---

#### Autor

Clinton Smith  
Senior Product Manager Stereo & Digital Heerbrugg,  
Leica Microsystems

## Types d'erreur

### Erreur de grossissement

L'erreur de grossissement est un phénomène selon lequel un objet placé devant l'objectif paraît plus petit ou plus grand que le même objet placé plus près ou plus loin (figure 2). Cette erreur est courante avec les microscopes équipés d'une optique standard. Elle survient lorsqu'on essaie de répéter la mesure d'une série d'objets qui ne sont pas à une distance uniforme par rapport à la lentille d'objectif, ou de mesurer plusieurs détails d'un produit tridimensionnel qui sont situés à des hauteurs différentes.

L'erreur de grossissement réduit la précision de la mesure des détails, et peut amener un inspecteur à refuser de bonnes pièces ou en valider des mauvaises, et augmenter ainsi les coûts de remise en fabrication et de rebut sur la chaîne de montage. Elle réduit aussi la reproductibilité des résultats quand la distance entre l'échantillon et la lentille varie, comme lors d'une inspection manuelle, d'une réinspection après remise en fabrication ou d'une réinspection après une étape d'assemblage qui modifie la hauteur de l'échantillon.

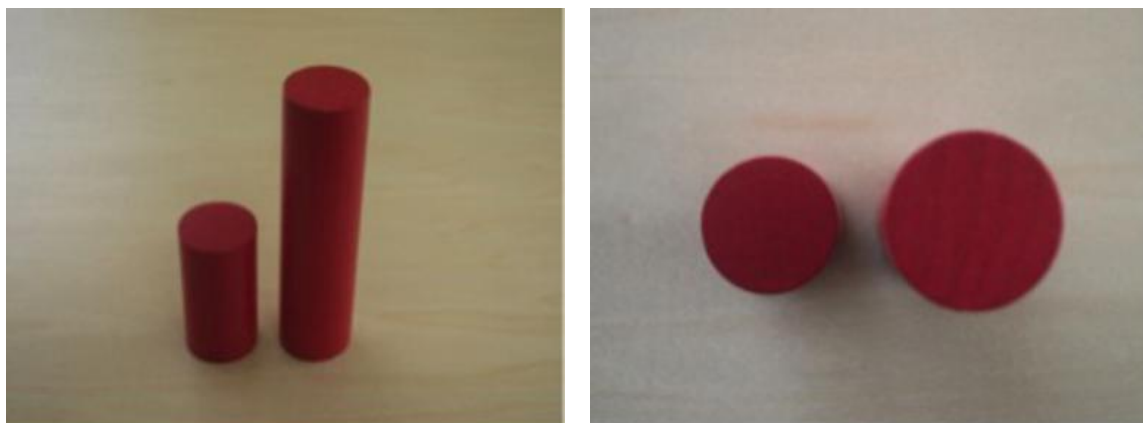


Fig. 2: Exemple d'erreur de grossissement où deux goujons de même diamètre ont des hauteurs différentes. La vue en perspective montre la taille relative (gauche). Dans la vue d'en dessus des mêmes éléments (droite), le goujon le plus haut paraît plus grand parce qu'il est plus près de la lentille.

### Erreur liée au zoom

L'erreur de grossissement cause aussi une erreur secondaire lors de l'utilisation d'une fonction de zoom. La variation de focale et de la mise au point avec des lentilles non télécentriques peuvent causer des variations de grossissement imprévues et incontrôlées. Cela réduit la précision de la mesure effectuée pendant l'inspection.

La " variation de focale effectuée librement " et à la main à un autre effet négatif sur la reproductibilité. La reproductibilité est définie comme la capacité à retrouver les mêmes paramètres pour des tests répétés et à refaire un

examen à une date ultérieure avec des résultats identiques. Du fait qu'il est courant pour un poste d'inspection de passer d'une configuration à l'autre pour des pièces et des assemblages différents et nombreux, une reproductibilité élevée est la clef. Il est très difficile de retrouver les mêmes paramètres de test avec un zoom libre manuel, et la variation humaine qui en résulte peut entraîner une irrégularité des mesures d'un test à l'autre.

### Erreur de parallaxe

L'erreur de parallaxe (également appelée erreur de perspective) est causée par une erreur de grossissement lors de la visualisation d'objets très tridimensionnels, ou de la comparaison d'objets situés à différentes hauteurs dans le trajet optique. Les points alignés à la verticale dans le champ visuel semblent ne plus être en ligne.

Cette erreur se produit lorsqu'on regarde l'objet selon un angle incliné (non perpendiculaire) (figure 3). Un exemple courant en microscopie est le déplacement apparent d'un réticule dans un viseur optique par rapport à l'échantillon testé, quand l'utilisateur bouge latéralement la tête. Le même effet est observable lors de la mesure d'une caractéristique d'un échantillon, en le tenant devant ou derrière le bord d'une règle ou les mâchoires d'un vernier, ce qui entraîne une disparité de hauteur entre l'objet et l'appareil de mesure.

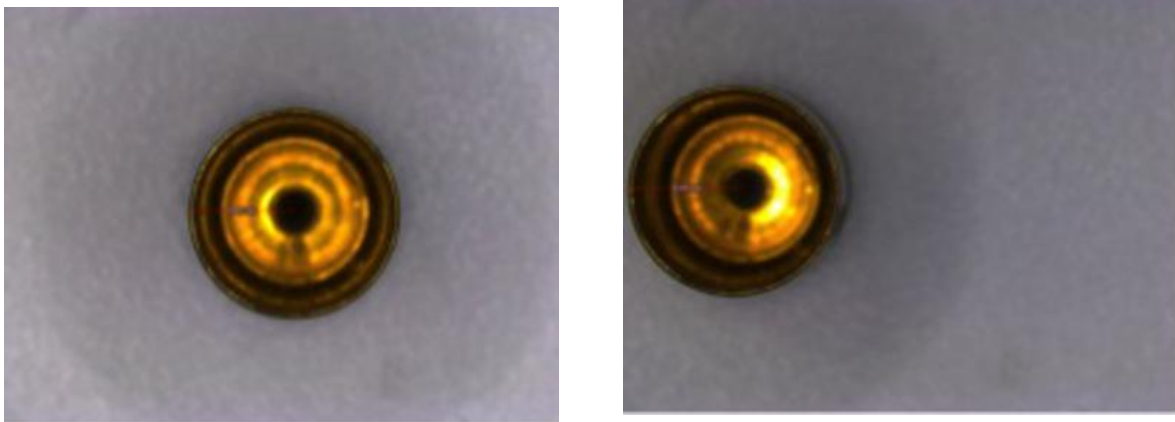


Fig. 3: Erreur de parallaxe qui cause une inexactitude lors de la mesure. Dans l'image de gauche, la douille est centrée dans le champ visuel et la mesure à l'écran indique 4.62 mm entre le centre du trou (loin de l'objectif) et le bord de la douille (près de l'objectif). Dans l'image de droite, la même mesure est décentrée et la valeur lue est 5.12 mm.

Une autre manifestation de l'erreur de parallaxe est que des structures caractéristiques qui font saillie à la surface du produit semblent s'incliner et s'éloigner de l'axe optique (le centre du champ visuel). La direction et le degré de l'inclinaison apparente varient selon la position du détail de la structure dans le champ visuel (figure 4). Du fait de cette distorsion, il est difficile d'obtenir un contrôle reproductible, à moins d'installer chaque fois l'échantillon exactement au même emplacement.

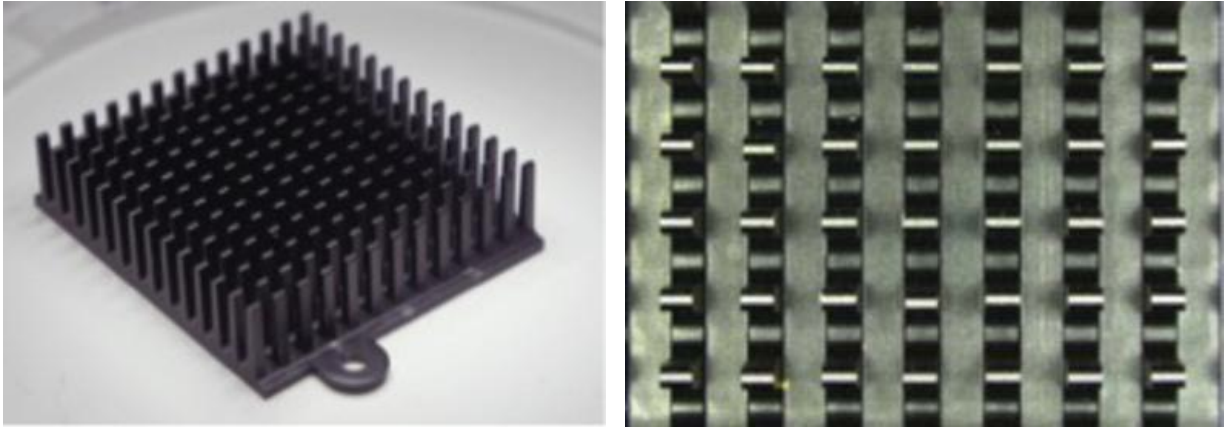


Fig. 4: L'erreur de parallaxe fait que les détails hauts (gauche) paraissent s'incliner et s'éloigner du centre du champ visuel dans la vue d'en dessus (droite).

### La télécentricité dans le design d'un microscope moderne

Avec autant d'erreurs cachées inhérentes à l'optique des microscopes standards, il peut sembler impossible d'inspecter de façon fiable quoi que ce soit qui nécessiterait l'établissement de rapports des données quantitatives. Une réflexion minutieuse sur le design optique d'un microscope permet toutefois d'éviter ce problème. Par exemple, certains microscopes sont disponibles avec une optique télécentrique qui élimine ou réduit considérablement les inexactitudes et la perte de reproductibilité dues à l'erreur de grossissement, au zoom et à la parallaxe.

Les lentilles télécentriques existent depuis des décennies, mais au cours du 20<sup>e</sup> siècle, elles étaient qualifiées d'"exotiques" et reléguées à des applications marginales. L'usage de cette technique se répandit pour la première fois pendant la décennie précédente, avec l'expansion de l'imagerie artificielle et des mesures de contrôle qualité basées sur la vision dans la fabrication industrielle.

La télécentricité est une caractéristique d'un système optique dans lequel tous les rayons principaux (le rayon central de chaque faisceau de rayons) qui passent à travers le système sont pratiquement collimatés et parallèles à l'axe optique. Un système optique peut être télécentrique dans l'espace image (l'oculaire/du côté de la caméra numérique), l'espace objet (du côté de l'objectif) ou dans les deux. La télécentricité s'obtient en plaçant une pièce de butée optique (un écran opaque avec un petit trou central) au point focal arrière de l'objectif composé (figure 5).

Autrement dit, lorsqu'un observateur visualise un objet à travers une lentille télécentrique, il regarde " depuis le haut " tous les points du champ visuel. Par contraste, avec une optique non télécentrique, l'observateur regarde depuis le haut uniquement le centre du champ visuel et il regarde selon un angle tous les points décentrés.

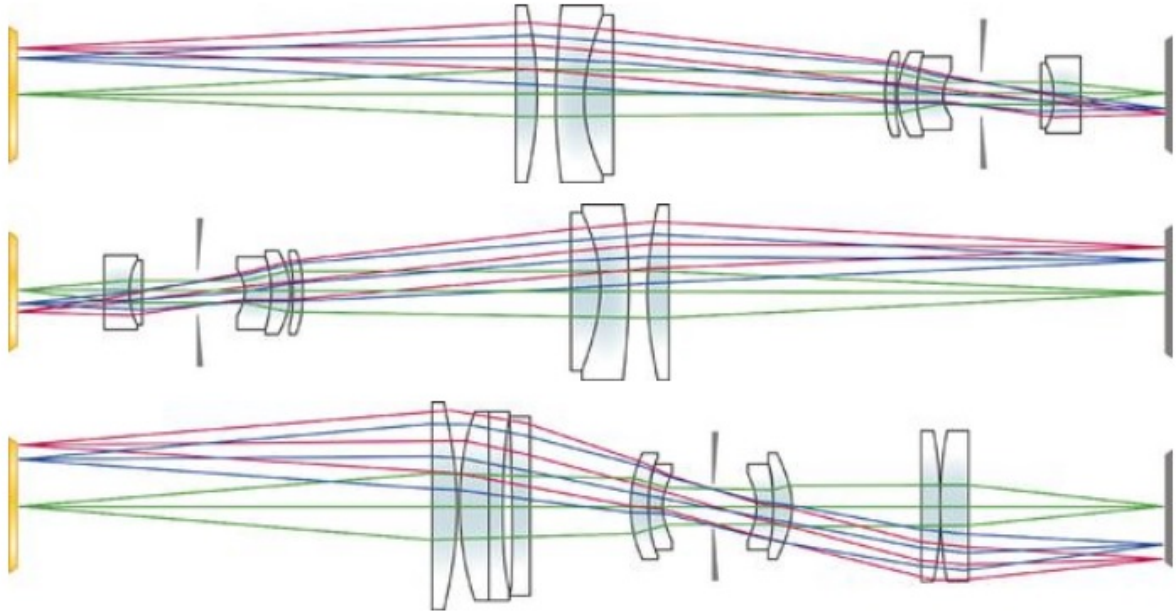


Fig. 5: Diagrammes de tracé de rayon de systèmes optiques télécentriques. Les rayons principaux sont parallèles à l'axe optique dans l'espace objet (haut), l'espace image (milieu) ou les deux (bas).

### Avantages de la télécentricité dans l'espace objet (du côté de l'objectif)

La conception d'un microscope en visant la télécentricité donne au système plusieurs propriétés optiques qui sont très bénéfiques pour la précision des mesures, la réduction de la distorsion et la reproductibilité des résultats.

#### Grossissement constant

La propriété la plus importante du système optique télécentrique est un grossissement constant à distance variable entre l'échantillon et l'objectif du microscope. Ce concept peut être difficile à appréhender parce que notre vision n'est pas télécentrique. Pour l'œil humain, les objets proches paraissent plus grands que les objets lointains. Ceci fonctionne pour la visualisation normale, mais lors de la création d'images de produits requérant des mesures précises et dont la répétition doit être fiable, il est crucial de disposer d'un grossissement constant.

Un grossissement constant fournit une meilleure répétabilité lors de l'inspection d'échantillons de différentes hauteurs parce que la taille apparente de l'objet ne change pas en fonction de la distance qui le sépare de la lentille d'objectif (figure 6). Il permet aussi d'obtenir des mesures plus précises de formes 3D complexes, telles qu'une pièce de grande taille dont les surfaces sont à des hauteurs variables.

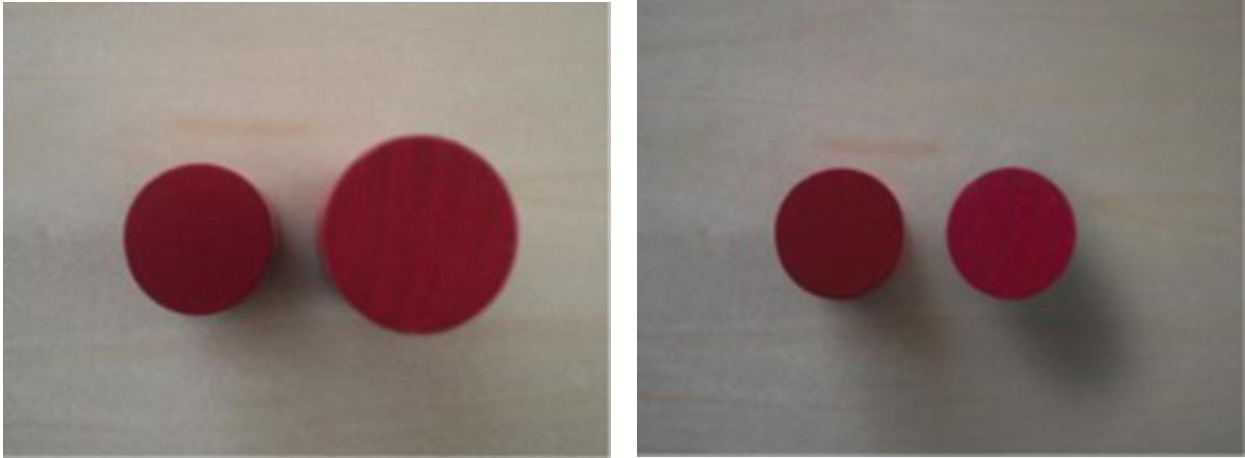


Fig. 6: Objets de même diamètre à différentes distances de la lentille (exemple de la figure 2), vus avec l'optique standard d'une caméra numérique (gauche) et avec l'optique télécentrique d'une caméra numérique (droite).

Lors de la mesure de caractéristiques d'objets avec un réticule (à l'écran ou non), le grossissement constant garantit que la distance entre les points sur un objet haut ne paraît pas artificiellement plus grande qu'une distance identique sur un objet bas. Il fournit aussi une meilleure reproductibilité lors de l'examen d'un échantillon que l'on a observé précédemment à une hauteur différente.

### Zoom amélioré

Un avantage essentiel du grossissement constant est qu'il permet de disposer d'une fonction de zoom répétable et précise. En éliminant pratiquement l'erreur de grossissement, les lentilles télécentriques réduisent au minimum les variations de grossissement imprévues et incontrôlées qui sont causées par le déplacement de l'objectif lors de la variation de focale et de la mise au point. Cela améliore grandement la précision de la mesure optique. Lorsqu'elles sont associées à une fonction de positionnement mécanique avec butée à dé clic ou à un zoom encodé, les lentilles télécentriques peuvent fournir une fonctionnalité de zoom à la fois précise et très répétable.

### Flou symétrique

Une optique télécentrique permet de mesurer avec exactitude les caractéristiques d'un échantillon même si elles ne sont pas au point, parce que les objets qui ne sont pas parfaitement mis au point deviennent flous de façon symétrique. Cela maintient constante la position centroïde et permet de localiser les caractéristiques et les bords avec exactitude et sans distorsion. Par conséquent, l'utilisateur n'est plus obligé de garder nets en même temps tous les points de l'échantillon.

### Pas d'erreur de parallaxe (erreur de perspective)

L'élimination de l'erreur de parallaxe joue un rôle fondamental pour l'obtention de résultats à la fois précis et reproductibles lors de l'examen d'objets particulièrement tridimensionnels, comme lors de la mesure de petits détails en divers points d'une pièce de grande taille (figure 7). L'utilisation de l'optique télécentrique garantit que la forme apparente et l'emplacement des caractéristiques de l'objet ne varient pas si la pièce est déplacée dans le champ visuel (ou si la pièce est enlevée et réinspectée ultérieurement à un autre emplacement).

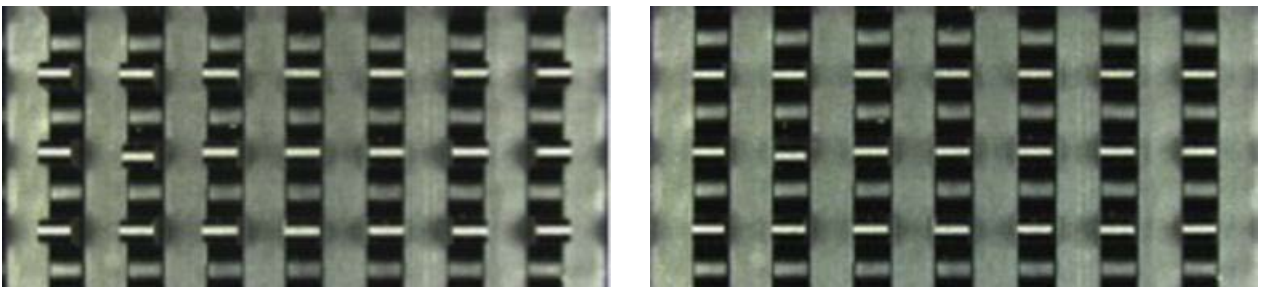


Fig. 7 : Comparaison de détails hauts (exemple de la figure 4), vus avec l'optique standard (gauche) et l'optique télécentrique (droite).

### Des lignes de visée identiques en tout point du champ visuel

Avec une optique standard, la ligne de visée est perpendiculaire au plan d'inspection seulement au centre du champ visuel, tous les autres points étant vus selon un angle. Cela signifie que des détails bas qui ne sont pas centrés dans le champ visuel peuvent être masqués par des détails hauts et adjacents. Du fait que l'optique télécentrique est conçue pour regarder depuis le haut tout point du champ visuel, elle élimine ces problèmes. Elle permet de visualiser des points difficiles à traiter, tels que les diamètres internes de deux tubes parallèles éloignés l'un de l'autre, ou les fonds de trous profonds qui sont décalés par rapport à la ligne médiane optique (figure 8).

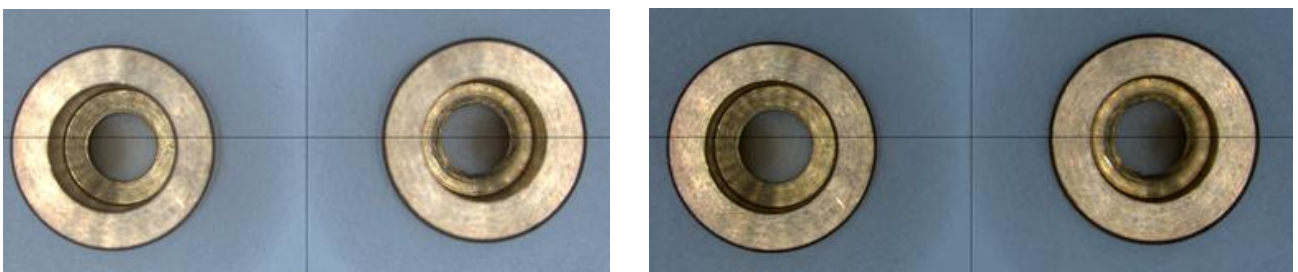


Fig. 8 : Comparaison des vues de formes difficiles à traiter, obtenues avec l'optique standard et avec l'optique télécentrique. Les lignes de visée pointant vers les fonds de trous profonds sont en partie obstruées par les bords supérieurs des trous lors de l'observation décentrée avec l'optique standard (gauche). Lors de l'observation avec l'optique télécentrique (droite), toute la surface du fond du trou est visible.

## Autres solutions que les lentilles télécentriques

### Logiciels

Les utilisateurs d'un équipement pourvu d'une optique télécentrique se trompent souvent : ils pensent qu'un mécanisme logiciel ajuste l'image pour obtenir un grossissement constant et réduire les erreurs. Bien qu'une réalisation partielle soit possible, de nombreux avantages fournis par les lentilles télécentriques sont infaisables pour un logiciel.

### Certification et calibration de l'optique

Un autre malentendu fréquent dans la communauté des microscopistes est que le certificat délivré par une tierce partie pour chaque optique de microscope garantit l'exactitude et la reproductibilité des inspections. En réalité, les organismes gouvernementaux de normalisation certifient habituellement l'équipement de calibration, mais pas les appareils individuels.

Les fabricants de microscopes peuvent effectuer des calibrations internes sur des appareils individuels, mais ici un autre inconvénient de la fonction de zoom libre entre en jeu. Après la calibration initiale par le fabricant, la variation introduite par le réglage du zoom complique la reproduction des conditions de calibration dans le champ visuel.

## Conclusion

Les systèmes optiques qui équipent les microscopes modernes peuvent être soumis à diverses sortes d'erreurs cachées. Une réflexion minutieuse sur le design optique de l'équipement revêt une importance cruciale. L'utilisation de microscopes pourvus de systèmes optiques télécentriques réduit ou élimine un grand nombre de ces erreurs afin d'optimiser la qualité des images, la précision des mesures et la reproductibilité.

## Lectures complémentaires

Klein C., Buttermore W., Doppler M.: [Using Telecentric Optical Systems to Optimize Forensic Image Accuracy and Reproducibility - How to eliminate hidden errors in forensics](#), Leica Science Lab, July 2015

Gislao M. J., Smith C.: [Webinar: How More Accurate and Reproducible Measurements can be Made through "Telecentricity"](#), Leica Science Lab, June 2013

Leica Microsystems (Schweiz) Ltd. · Max-Schmidheiny-Straße 201 · 9435 Heerbrugg, Schweiz  
T +41 71 726 34 34 · F +41 71 726 34 44

[www.leica-microsystems.com](http://www.leica-microsystems.com)