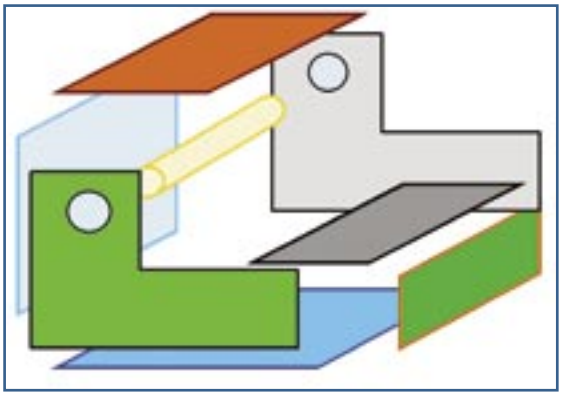
La résolution des problèmes liés au tolérancement devient une question centrale à laquelle tentent de répondre un nombre croissant d'éditeurs de solutions intégrées à la CFAO. Divers services d'une entreprise sont concernés par cette problématique : des études à la production, en passant par les méthodes et le contrôle.
Ceci n'est pas sans poser des difficultés d'unification des langages et d'harmonisation des démarches adoptées tout au long des étapes de conception, de réalisation et de qualification des nouveaux produits. Avec le développement d'outils numériques de plus en plus performants, les ingénieurs disposeront à l'avenir de moyens leur permettant de dimensionner de façon plus cohérente et immédiatement correcte les produits qu'ils conçoivent.

Gestion du Tolérancement : un mal nécessaire

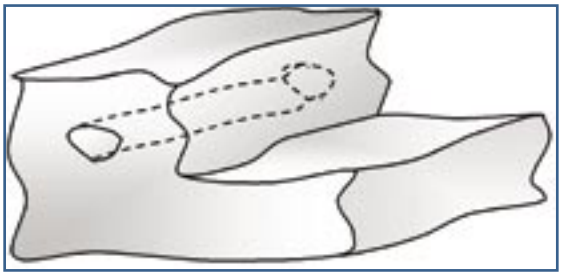
De la spécification fonctionnelle à la qualification des produits

Dans son principe général, le tolérancement consiste à exprimer sous forme de contraintes dimensionnelles et géométriques les conditions de bon fonctionnement d'un mécanisme. C'est, à la base, un travail qui incombe aux ingénieurs d'étude et qui entre dans le cadre de la démarche de spécification fonctionnelle des produits.

Après avoir imaginé un mécanisme répondant à un cahier des charges, et après avoir représenté ce mécanisme par le biais d'un modèle nominal, le travail du concepteur consiste à exprimer les conditions garantissant le bon fonctionnement de l'ensemble. Typiquement, dans le cas d'un assemblage, il faudra définir un jeu, un serrage, un dépassement. Cela se traduira, par la suite, au niveau de chacune des pièces du mécanisme, par l'identification des surfaces influentes au regard de la condition de fonctionnement visée, et par la formulation de contraintes dimensionnelles et géométriques venant fixer les limites de variation de forme, d'orientation et de position des surfaces correspondantes.



Les dimensions réelles d'une pièce mécanique ne correspondent jamais exactement à celles qui ont été spécifiées par les ingénieurs d'études en phase de conception. Certes, les outils et méthodes actuelles de fabrication industrielle permettent d'atteindre des niveaux de précision remarquables. Mais la vie réelle est ainsi faite qu'on ne pourra probablement jamais s'affranchir de toutes les

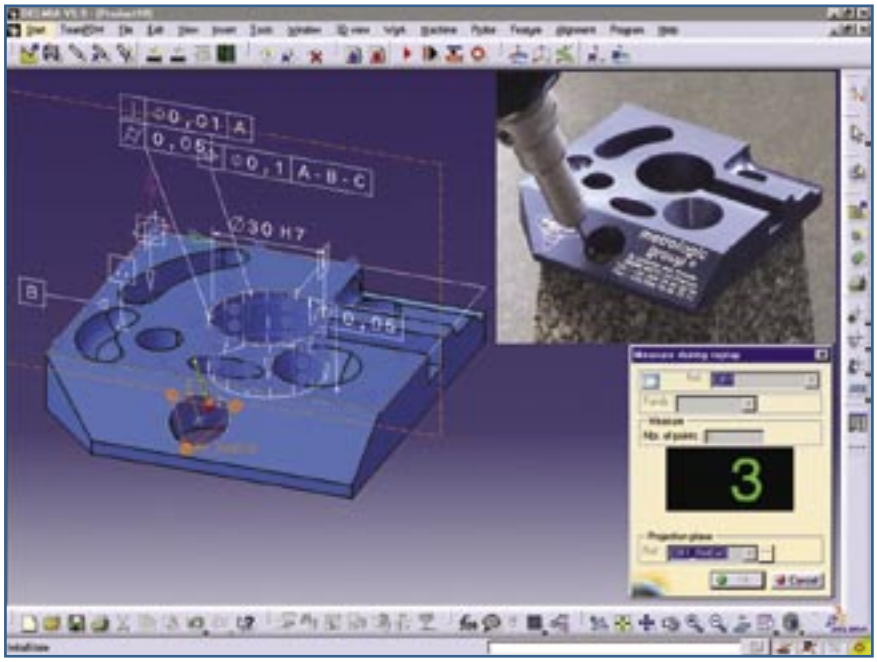


incertitudes. Une mèche de perceuse s'use avec le temps et voit son diamètre rétrécir, c'est un fait. Les ingénieurs sont donc bien obligés de « tolérer » un certain degré de variation par rapport aux spécifications dimensionnelles et géométriques des produits qu'ils conçoivent. Mais comment déterminer la limite d'usure à partir de laquelle le rétrécissement de la mèche devient nuisible au bon fonctionnement ou à la faisabilité industrielle du produit final ? Comment mesurer l'impact des variations cumulées relatives aux différentes pièces constitutives d'un assemblage ?

La détermination des valeurs caractérisant les zones de tolérances peut être réalisée suivant divers procédés : de façon expérimentale, par similitude avec d'autres mécanismes, ou par le biais du calcul. Dans le cas d'une détermination par le calcul il s'agit en général de procédés lourds et fastidieux faisant appel à des concepts mathématiques complexes, et pour lesquels des solutions intégrées à la CAO présentent aujourd'hui un intérêt grandissant. Plusieurs outils sont d'ores et déjà disponibles sur le marché, mais nous y reviendrons dans la suite.

Quoi qu'il en soit, dans la pratique, les valeurs de tolérance allouées par les ingénieurs d'étude correspondent rarement à des solutions optimales, en raison du peu de données dont ils disposent, notamment concernant le processus de fabrication. Comme l'explique Patrice Tibéri, responsable du développement produit au sein de la société Missler : *« Les concepteurs sont amenés à évaluer les précisions réalisables en fabrication afin de répartir les tolérances entre les surfaces, et cela avant même que les processus de production ne soient connus »*.

Or si les ingénieurs d'étude connaissent depuis longtemps l'importance du « jeu », qui constitue l'âme de la mécanique et affecte directement



Le tolérancement intervient dans différentes phases du développement des produits, de la conception à la fabrication, en passant par la qualification. *Source Delmia*

les performances des assemblages, les ingénieurs de production et de contrôle savent également depuis fort longtemps que la valeur des tolérances impacte inévitablement les coûts de fabrication et de contrôle, ceux-ci étant d'autant plus élevés que les tolérances sont serrées.

Par un choix de tolérance particulier, les concepteurs peuvent donc être amenés à restreindre les choix possibles pour une gamme d'assemblage (cas d'un ajustement serré par exemple). De même, ces choix auront une influence sur les moyens métrologiques mis en œuvre pour la qualification des produits (en fonction des moyens disponibles et du niveau de précision requis).

« Le tolérancement résulte finalement d'un compromis entre la précision nécessaire au respect des exigences fonctionnelles d'une part, et les possibilités et coûts de fabrication et de contrôle d'autre part », conclut Patrice Tibéri.

Or, pendant longtemps la gestion du tolérancement a été seulement réactive : c'est-à-dire, à bien des égards, beaucoup trop tardive et trop fragmentée. Typiquement, les problèmes liés à une mauvaise allocation des tolérances en phase de conception n'apparaissaient que lors de la phase d'industrialisation, ou pire, après le lancement en production ; autrement dit à un stade d'avancement du projet où toute modification s'avère extrêmement coûteuse.

Clairement, de telles pratiques ne sont plus acceptables dans l'environnement concurrentiel actuel, où les seuls mots d'ordres sont : amélioration de la qualité, réduction des coûts et rapidité de mise sur le marché. Les enjeux d'une bonne gestion du tolérancement sont donc clairs : il s'agit dans un premier temps de rendre plus efficace la communication entre les différents acteurs responsables des phases de conception, de fabrication et de contrôle des produits, et dans un second temps de proposer des outils d'analyse permettant d'optimiser le calcul des tolérances, de manière à s'approcher d'une solution idéale dès la première tentative. (Do it right the first time)

Améliorer la communication

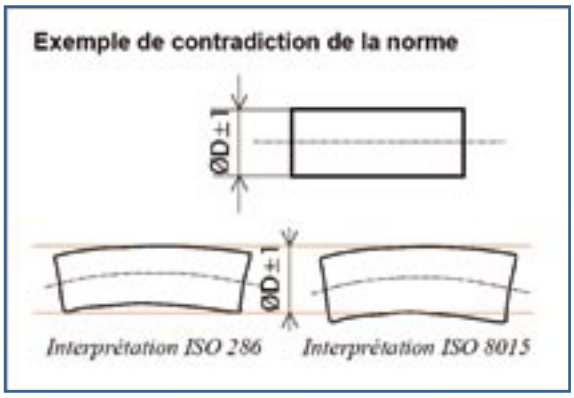
Compte tenu de ce qui vient d'être dit, un tolérancement harmonisé n'est pas une aberration, ni économique ni industrielle. Comme le souligne Patrice Tiberi : *« Faciliter la communication, garantir le transfert des données et leurs interprétations est un gage de qualité »*. Et cela est d'autant plus vrai à l'heure actuelle, avec le développement de pratiques telles que la sous-traitance internationale, qui oblige les entreprises à mieux gérer leur communication technique avec des partenaires lointains et de cultures différentes. La mise en place de plans d'assurance qualité de plus en plus exigeants, qui introduisent des contraintes réglementaires dans les relations entre clients et fournisseurs, interdisent toute interprétation approximative des spécifications formulées.

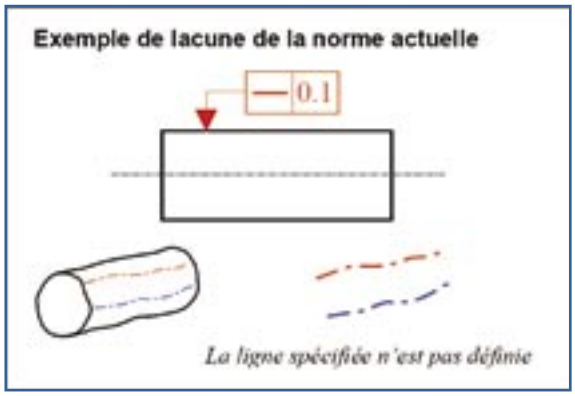
Aujourd'hui le tolérancement se base sur l'utilisation et l'interprétation d'un langage commun. Celui-ci s'est imposé au fil des temps comme la référence internationale : le langage ISO relatif au tolérancement. Il consiste en un ensemble de règles graphiques permettant de spécifier la géométrie réelle des pièces par une annotation des modèles nominaux. Ces règles ont été élaborées au fil des ans, et sont le fruit du travail de groupements d'utilisateurs et d'universitaires.

Mais si un nombre croissant d'industriels utilise le langage ISO pour le tolérancement, force est de constater que celui-ci possède un certain nombre de limitations importantes.

Tout d'abord, malgré la volonté affichée de la rendre univoque, l'utilisation du langage ISO pour le tolérancement est source d'ambiguïtés et donne lieu à des erreurs d'interprétation. En effet, une étude approfondie des textes met en évidence de nombreuses lacunes et incohérences. D'ordre contradictoire, tout d'abord : *« Comme pour un texte, les normes utilisent des indications syntaxiques et grammaticales pour apporter du sens, et il s'avère que certaines normes relatives au tolérancement préconisent des interprétations différentes pour des annotations identiques. C'est le cas par exemple des normes I.S.O. 8015 et I.S.O. 286 »*, explique Gaïten Legrais, doctorant rattaché au LMécA (Laboratoire de Mécanique Appliquée de l'université de Savoie de Lausanne). Celui-ci a participé au développement du module d'aide au tolérancement 3D intégré au logiciel TopSolid de Missler.

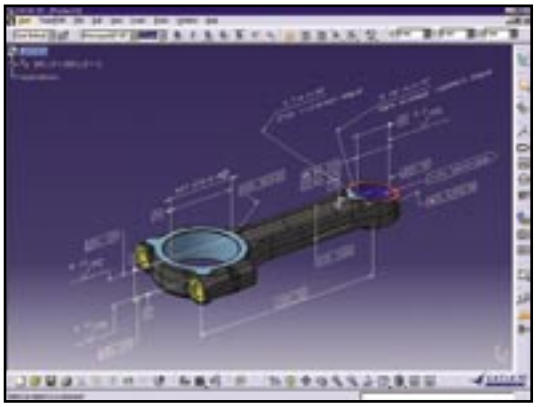
« On relève également un certain nombre d'ambiguïtés dues à une mauvaise définition de certaines normes, comme c'est le cas typiquement pour les tolérances d'angle et de cône. D'autre part, certaines normes traitent du même sujet ou peuvent avoir une interprétation équivalente. Pour un même problème, il sera possible de proposer plusieurs solutions de tolérancement. Et il n'est pas toujours simple de déterminer laquelle sera la mieux appropriée. La complexité du langage utilisé est là aussi un handicap. Le grand nombre de symboles, les tolérances particulières (symétrie, coaxialité...), l'absence de règles sur la mise en place des références sont autant de barrières à la pleine compréhension et à l'utilisation du tolérancement normalisé », explique Gaïten Legrais.





Une notion récemment développée par l'organisation internationale de normalisation tente de résoudre ces problèmes. Il s'agit du GPS (Spécification Géométrique des Produits) : un concept visant à développer une série de normes particulières, cohérentes entre elles pour la spécification et la vérification de la géométrie des produits. Pour unifier les normes actuelles et futures et garantir la cohérence du système en cours de construction, le normalisateur propose une classification des normes suivant deux axes : le premier correspond au caractéristiques géométriques d'un objet, permettant de le caractériser en taille, forme, orientation. Le second correspond aux étapes de la cotation dimensionnelle et géométrique des produits, permettant de caractériser des éléments géométriques, d'évaluer les écarts dimensionnels, de définir et contrôler les instruments de mesure. Le tout s'inscrit dans un tableau à double entrée baptisé « matrice GPS », qui permet de dresser un bilan des normes actuelles, d'en repérer les redondances et les manques, et de programmer le développement des normes à venir.

Cependant, *« le GPS ne définit pas clairement une méthode de tolérancement : il se contente simplement de recenser des exemples, et c'est encore bien souvent le bon sens du concepteur qui permet d'obtenir des solutions à un problème donné »*, poursuit Gaïten Legrais.



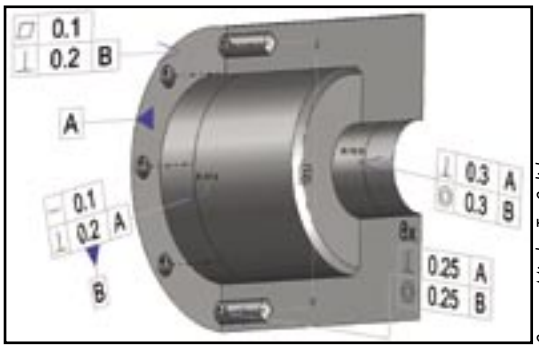
Source Catia V5

Enfin, autre limitation de taille : à l'heure actuelle, ni la norme ISO ni le GPS ne définissent de règles pour le tolérancement 3D. La pratique la plus répandue à ce jour consiste toujours en l'habillement de plans 2D issus de la CAO. Or comme chacun le sait, la capacité à intégrer une vision 3D constitue une étape importante de l'évolution des entreprises sur le chemin de l'intégration des données, avec pour point de mire l'accomplissement de l'objectif « zéro papier » : toutes les informations devront être disponibles à partir d'un modèle 3D unique, et les informations relatives au tolérancement ne font pas défaut à cette règle.

Des modules d'aide au tolérancement 3D intégrés à la CAO

Malgré le fait que les organismes de normalisation n'évoluent pas aussi franchement que nécessaire dans cette voie, un nombre croissant d'éditeurs de solutions intégrées à la CFAO se lancent aujourd'hui dans le développement de modules d'aide au tolérancement 3D.

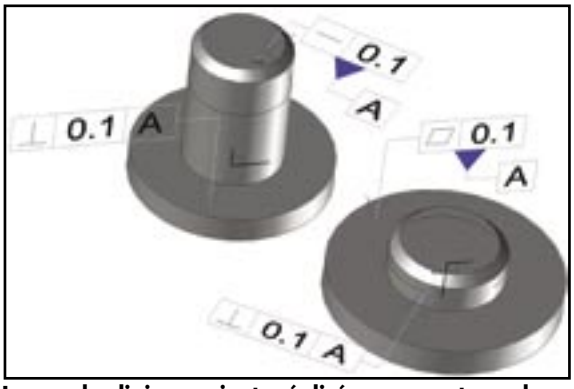
C'est le cas notamment de la société Missler, qui propose depuis peu un outil d'aide aux utilisateurs non experts pour la réalisation du tolérancement 3D. Intégré à la version 2005 du logiciel de CAO TopSolid, celui-ci permet de générer à l'échelle de la pièce et à partir d'informations fournies par l'opérateur, un tolérancement 3D conforme à la normalisation ISO.



Source Missler TopSolid

Comme le précise Gaetan Legrais : *« L'étude d'un tolérancement porte sur le mécanisme, mais son résultat n'est visible que sur les dessins de définition des pièces. Le tolérancement 3D sous TopSolid se base sur une hiérarchisation des surfaces fonctionnelles définie par l'opérateur à partir d'exigences issues du cahier des charges et relatives à l'assemblage des pièces constitutives du mécanisme. Le module assure un contrôle de la cohérence des interactions entre les diverses entités participant au tolérancement (références, cotes dimensionnelles, cotations géométriques et surfaces) et propose à l'utilisateur des solutions sans ambiguïté, en conformité avec la normalisation ISO »*.

Le module est destiné à évoluer vers une solution plus complète et automatisée, n'étant plus limitée à l'échelle de la pièce et permettant de procéder à



Le cas des liaisons pivots réalisées par centrage long ou court permet de mettre en évidence l'importance de la hiérarchisation des surfaces. Pour le centrage long, le cylindre est prépondérant par rapport au plan. Par contre dans le cas d'un centrage court, le plan est prépondérant par rapport au cylindre. *Source Missler TopSolid*

des analyses au niveau des assemblages. Dans cette optique, la R&D de Missler travaille en collaboration étroite avec le LMécA, sur l'exploitation d'une méthode numérique de calcul de tolérances basée sur le modèle de tolérancement des « domaines jeux et domaines écarts » développé par le LMécA (voir encadré).

Evidemment Missler n'est pas le seul éditeur à proposer de telles fonctionnalités. Les possibilités d'affichage de tolérances 3D sur les modèles de CAO, avec des capacités de projection dans le plan sont d'ores et déjà disponibles pour les principaux outils de CAO du marché que sont CATIA, NX, Solidworks, etc.

Allocation et analyse de tolérances

Nous venons de passer en revue les enjeux du tolérancement relatifs à la communication. L'étape suivante consiste à proposer des outils permettant de guider les ingénieurs dans la détermination des valeurs de tolérance, c'est à dire remplacer l'approche empirique couramment employée et basée sur l'expérience, par une approche scientifique fondée sur la modélisation et le calcul.

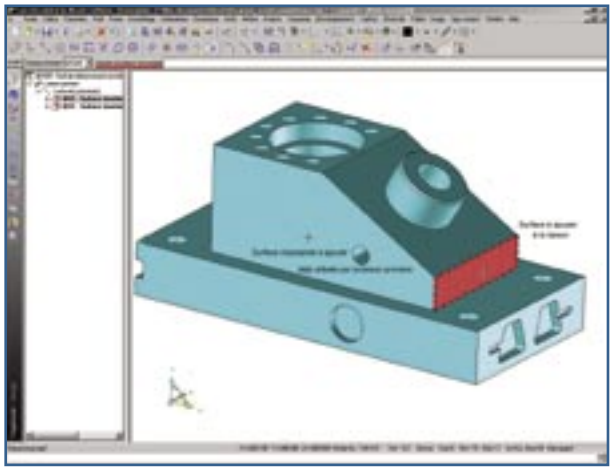
Il convient tout d'abord de bien faire la distinction entre ce que l'on appelle l'analyse de tolérances et son processus complémentaire, l'allocation de

Le LMéca partenaire de Missler pour le tolérancement 3D sous TopSolid

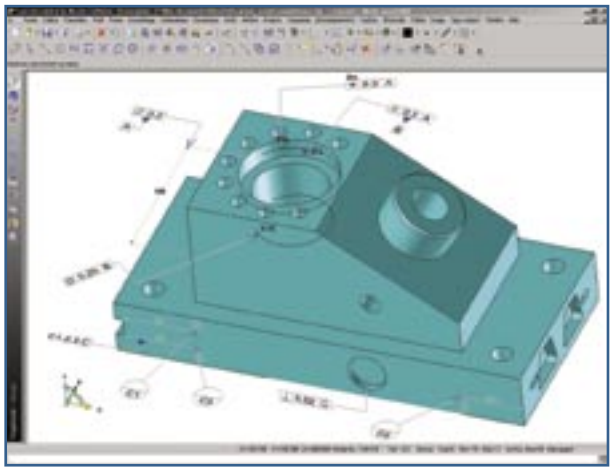
La collaboration entre le LMécA (Laboratoire de Mécanique Appliquée de l'université de Savoie de Lausanne) et Missler a pour objectif de mettre à la disposition des concepteurs des outils pour faciliter le tolérancement. La première préoccupation a consisté à développer des tolérances s'affichant en 3D directement sur le modèle CAO TopSolid. Ensuite, des fonctionnalités de vérification de la cohérence des tolérances ont été ajoutées. Un outil récent permet d'exploiter des informations fonctionnelles succinctes renseignées par le concepteur sur une pièce, afin de proposer de manière automatique un tolérancement complet de la pièce en question. Ceci permet des gains de productivité lors de la création des dessins de définition. On peut aussi penser que des concepteurs peu familiers du tolérancement et des normes s'y rapportant trouveront là la possibilité de faire leurs classes tout en acquerrant des compétences. Une autre préoccupation consiste à utiliser les données des tolérances pour les autres produits de Missler, comme TopControl ou TopCam dédiés au contrôle et à l'usinage. L'unicité des données liées aux tolérances, lors de la conception des gammes de contrôle ou de fabrication, assurera qualité et gains de productivité.

Les outils à venir concernent le tolérancement fonctionnel des mécanismes ou assemblages. Ils reposeront sur le modèle des « domaines jeux et domaines écarts » du LMécA. Il s'agit d'un modèle de tolérancement basé sur les torseurs de petits déplacements, qui permettent de décrire les déplacements des éléments géométriques fonctionnels, comme faces planes ou axes de faces cylindriques, les uns par rapport aux autres. Les déplacements ont au plus six composantes correspondant à des rotations et des translations. Par exemple, une tolérance de localisation entre deux plans parallèles limite la translation et les deux rotations du plan tolérancé par rapport au plan référence. La tolérance en question est alors modélisée par un volume limitant les valeurs que peuvent prendre les composantes du torseur. On appelle ce volume « domaine écart ». De même pour un guidage, un ajustement H7e7 entre un arbre et un alésage limite les composantes de déplacement entre l'axe de l'arbre et celui de l'alésage. On l'appelle domaine jeu. Aux tolérances en général, on associe donc des domaines. Des opérations sur ces domaines, comme le cumul ou l'intersection ont été développées. Elles permettent par exemple de traiter une condition fonctionnelle d'assemblage. Une transposition de la fameuse règle qui dit que les jeux doivent compenser les défauts, consiste à vérifier que le cumul des domaines écarts est à l'intérieur du domaine jeu. Des conditions fonctionnelles de précision, ou des problèmes complexes, avec systèmes de références, références communes ou encore groupe d'éléments peuvent être traités par cette méthode.

Pascal Hernandez, enseignant chercheur au LMéca



Le tolérancement 3D sous TopSolid est basé sur une hiérarchisation des surfaces.



tolérances. L'analyse de tolérances est un processus que l'on qualifiera d'ascendant, qui consiste à partir de valeurs de tolérances connues pour chacun des contributeurs*, à calculer la résultante globale au niveau de l'assemblage, en regard d'une condition fonctionnelle visée.

L'allocation de tolérances, au contraire, est un processus descendant qui consiste à déterminer l'ensemble des valeurs de tolérances de chacun des éléments contributeurs en vue de satisfaire une condition fonctionnelle connue. Ce dernier cas de figure est celui auquel sont le plus fréquemment confrontés les ingénieurs. Ces derniers doivent alors répartir le plus judicieusement possible les valeurs de tolérances entre les différents contributeurs, en prenant garde à ne pas serrer ou desserrer inconsidérément certaines de ces valeurs.

Aujourd'hui, les outils d'aide au tolérancement les plus avancés intègrent ces deux approches.

*** Contributeur = Elément de la chaîne de cote influent au regard de la condition fonctionnelle visée.**

Avec WorkNC, passer la vitesse supérieure n'a jamais été aussi facile

WorkNC 5 axes

Parce que l'usinage complexe exige des solutions simples. Sescoi innove et révolutionne l'univers du 5 axes.

Aussi fiable que facile à utiliser, cette nouvelle solution FAO/CAO 5 axes bénéficie de tout le savoir-faire WorkNC, référence mondiale de l'usinage 3 axes automatique. Avec son nouveau module Auto 5, WorkNC est capable de convertir automatiquement les parcours 3 axes en trajectoires 5 axes simultanées. Vous disposez ainsi de la réponse la plus intelligente aux problématiques d'usinage les plus compliquées.

Le logiciel WorkNC 5 axes s'impose d'ores et déjà comme "LA" solution aux applications des secteurs technologiques les plus pointus, tels l'automobile ou l'aéronautique.

WorkNC, L'usinage 5 axes enfin à la portée de tous.

Sescoi

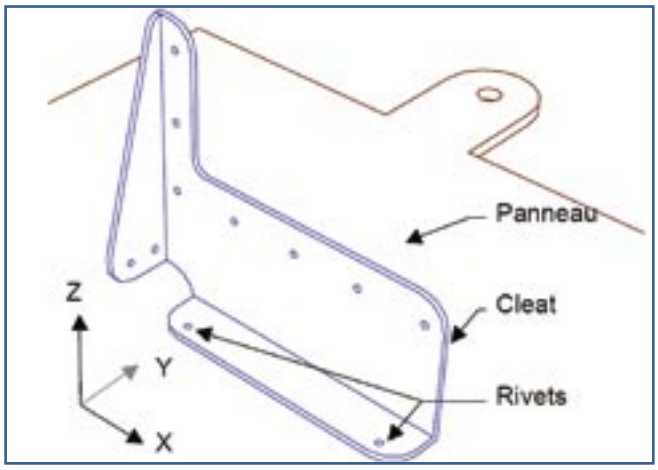
N'attendez plus, contactez-nous au 03 85 21 66 21

Pour ce qui est des fonctionnalités d'analyse, la plupart d'entre elles reposent sur des méthodes de calcul standard, arithmétiques (worst case) ou statistiques (RSS pour Root Sum Square), ainsi que sur des algorithmes de simulation plus avancés du type Monte Carlo. Comme le précise Alain Guillon, ingénieur support technique chez UGS, *« ce type d'analyse permet, à partir des tolérances spécifiées et connaissant l'ordre et les conditions d'assemblage, de simuler un grand nombre d'opérations d'assemblage, avec des pièces générées aléatoirement dans les limites de tolérance »*.

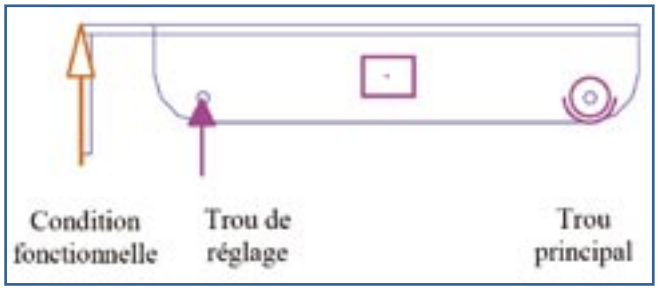
La simulation Monte Carlo utilise des générateurs pseudo-aléatoires de nombres qui peuvent correspondre à différents types de distributions (normale, gaussienne, etc.) et permettre ainsi de fournir des résultats plus proches de la réalité que les méthodes de calcul standard.

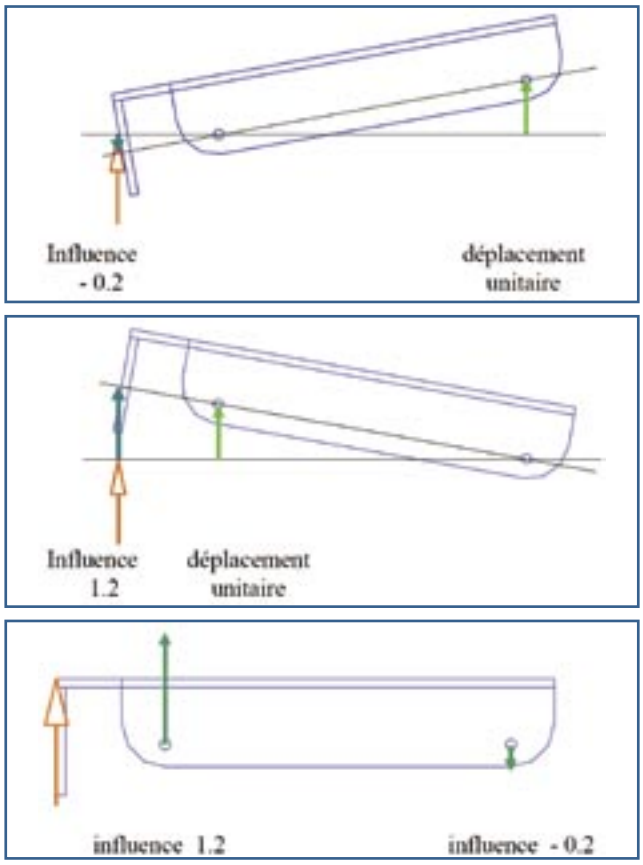
3DCS est un outil de simulation permettant de prédire les degrés de variation sur un assemblage et d'en déterminer les causes. *Source 3DCS Designer CAA V5 Based*

Du moins en théorie… Car comme le précise Bernard Anselmetti, enseignant chercheur au Lurpa (Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée) de l'ENS-Cachan : *« si les résultats*



Les influences (ou sensibilités) sont calculées généralement grâce à la simulation de petits déplacements, comme le montrent les figures ci-contre. *Source Mecamaster*





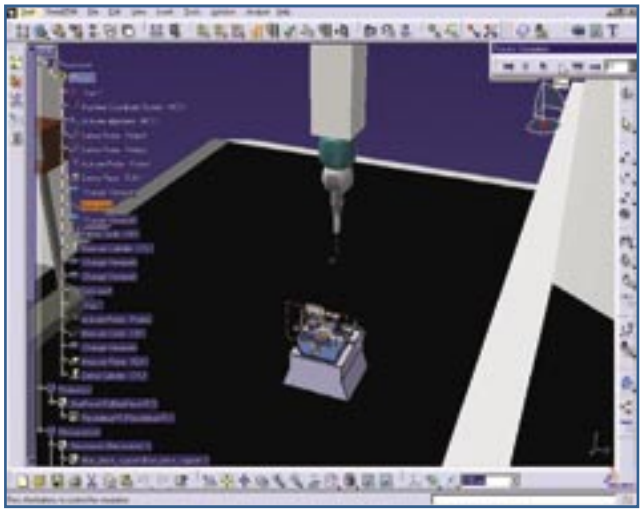
fournis par ces logiciels sont souvent très séduisants, ils sont également très difficiles à vérifier. De plus, les méthodes de calcul sont connues avec peu de précision, ce qui ne permet pas d'apprécier la validité des résultats obtenus ni les limites d'emploi des paramètres ».

Toutefois, dans l'ensemble, les tests réalisés en laboratoire montrent des résultats cohérents, et semblent justifier l'utilité de tels produits. *« Les logiciels d'analyse des tolérances sont des outils qui peuvent apporter une aide importante aux bureaux d'études »*, conclut Bernard Anselmetti.

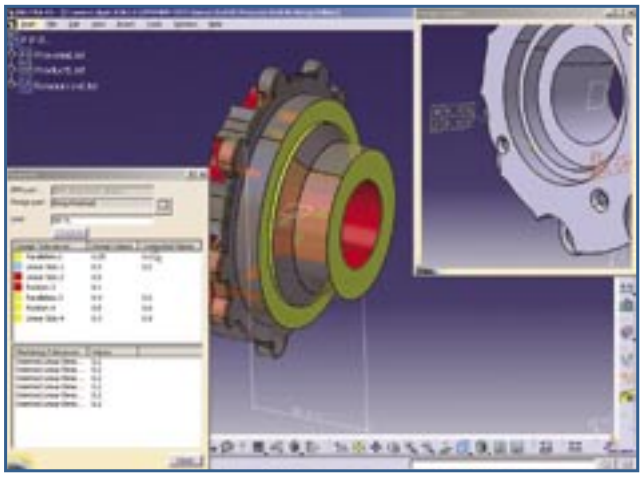
Concernant les fonctionnalités d'aide à l'allocation de tolérances, de nombreux outils offrent la possibilité d'identifier les principaux contributeurs, c'est-à-dire de trouver les maillons les plus influents d'une chaîne de cotes. Comme le précise Alain Guillon d'UGS : *« certains contributeurs peuvent avoir une influence plus importante que d'autres par rapport à une condition fonctionnelle donnée. L'identification des valeurs les plus influentes permet d'optimiser les spécifications en vue de diminuer les coûts de fabrication. Par exemple, si l'on s'aperçoit qu'une tolérance que l'on avait cru bon de serrer pour une raison ou pour une autre, s'avère finalement peu influente sur la qualité fonctionnelle de l'assemblage, cette tolérance pourra être relâchée, ce qui permettra de réduire le coût global d'assemblage ».*

Des outils pour la production et le contrôle

Comme nous l'avons précisé en introduction de ce dossier, de nombreux départements d'entreprises sont concernés par le tolérancement : outre les bureaux d'études chargés de la conception des produits, il y a les bureaux des méthodes ainsi que la production, chargés de concevoir les outils de fabrication, mais également les services de contrôle qualité. Ces derniers ont pour mission principale de vérifier par la mise en œuvre de moyens métrologiques que les pièces fabriquées sont bien conformes aux spécifications.



Delmia propose un ensemble de solutions basées sur l'architecture CAAV5 prenant en compte les informations de tolérancement pour l'inspection et la métrologie.



Source Delmia

Certains éditeurs proposent des solutions intégrées à la CFAO, destinées à être utilisées dans des applications avales, pour la définition, la modélisation, la simulation et la documentation des processus d'usinage, d'assemblage ou de contrôle. C'est le cas notamment de Dassault Système, au travers de son offre Delmia, qui comprend les solutions DPM-Machining, DPM-Assembly et DPM-Inspection, ainsi que de Tecnomatix au travers de l'outil eM-Tolmate.

Conclusion

Les enjeux du tolérancement ne sont plus à rappeler, tant ils sont cruciaux en termes de compétitivité pour les produits industriels. Cependant, comme le précise Pascal Hernandez, enseignant chercheur au LMéca, *« aujourd'hui l'expérience et les expertises font état de nombreuses difficultés rencontrées au sein des entreprises, qui sont autant d'entraves à une bonne gestion du tolérancement. Sans chercher à être exhaustif, on peut recenser quelques unes de ces difficultés : la complexité cinématique ou géométrique de certains produits, la complexité des normes sur le tolérancement, le manque de formation des personnels techniques, l'absence d'intégration en CAO de certaines fonctionnalités utiles pour le tolérancement ».*

Le travail des groupements d'utilisateurs et des organismes de standardisation, ainsi que l'apparition sur le

marché de certains outils numériques intégrées à la CFAO, offrant des fonctionnalités avancées en matière de tolérancement, semblent aujourd'hui apporter un certain nombre de réponses aux besoins des industriels. Toutefois, *« la route semble encore longue avant de disposer d'une suite complète d'outils numériques intégrés à la CAO pour traiter les problèmes de tolérancement qui se posent de la conception au contrôle en passant par l'industrialisation. Les développements dans le domaine devront accompagner le milieu industriel dans ses évolutions »*, conclut Pascal Hernandez.

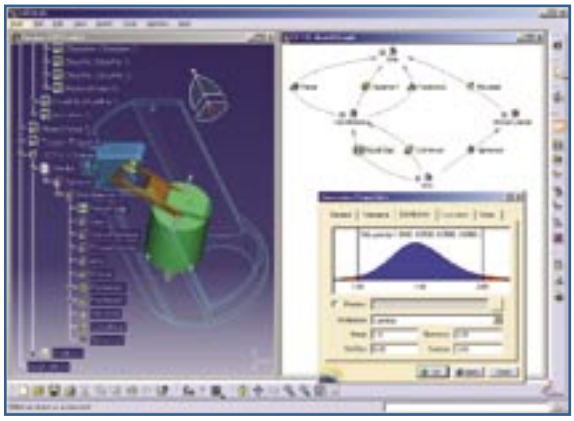
Les Outils Disponibles

Mecamaster de Mecamaster

Mécamaster est un logiciel 3D de tolérancement utilisé principalement en phase d'avant projet pour des applications d'assemblage. Il est basé sur une modélisation cinématique des liaisons entre les pièces pour déterminer à l'aide de torseurs de petits déplacements l'influence des défauts de chaque liaison sur la position des surfaces fonctionnelles. Il permet de connaître l'influence que les tolérances locales des pièces et assemblages ont au niveau des conditions fonctionnelles choisies, et réciproquement. Comme le précise Pierre Alain Rance, de la société Mécamaster : *« l'information est double. L'analyse permet à la fois de localiser les principaux contributeurs, et de vérifier la conformité de la condition fonctionnelle par des méthodes de calcul arithmétiques « au pire des cas » ou statistiques (RSS) »*. Une représentation 3D des influences et des contributions permet d'identifier immédiatement où de meilleures tolérances sont (ou ne sont pas) nécessaires. Le logiciel Mécamaster, autonome (Windows) ou intégré dans différents systèmes de CAO (AutoCAD, Catia) est utilisé quotidiennement par des acteurs de l'industrie automobile et aéronautique.

Ce/Tol 6 Sigma Sigmetrix/Rand

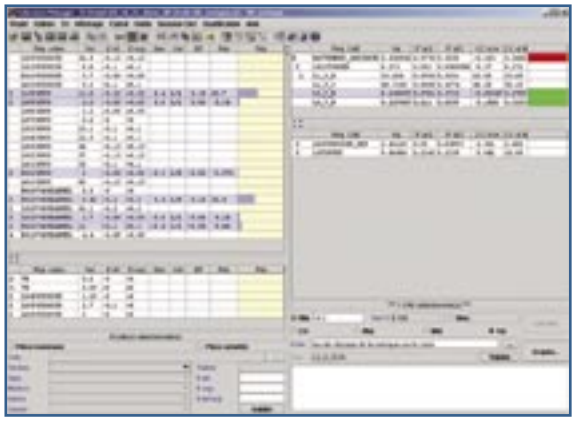
Ce/Tol 6 Sigma est une solution complète de gestion des tolérances qui entre dans le cadre de programmes de qualité totale à 6 sigmas. Le logiciel utilise la définition des fonctions ainsi que les cotes du modèle CAO, incluant la possibilité de renvoyer les tolérances optimisées dans le modèle et sa mise en plan. Ce/Tol 6 Sigma aide le concepteur dans la résolution des chaînes de cotes et lui permet de définir et d'optimiser le coût du tolérancement. Etroitement intégrée à Catia V5 et à Pro/Engineer, Ce/Tol 6 Sigma conduit l'utilisateur dans la modélisation, l'analyse et l'affectation de tolérances. Le processus d'optimisation des tolérances de Ce/Tol 6 Sigma prend en compte les exigences de qualité et de fonctionnement au niveau du produit ainsi que les capacités des procédés de fabrication.



Ce/Tol intégré à l'environnement Catia V5

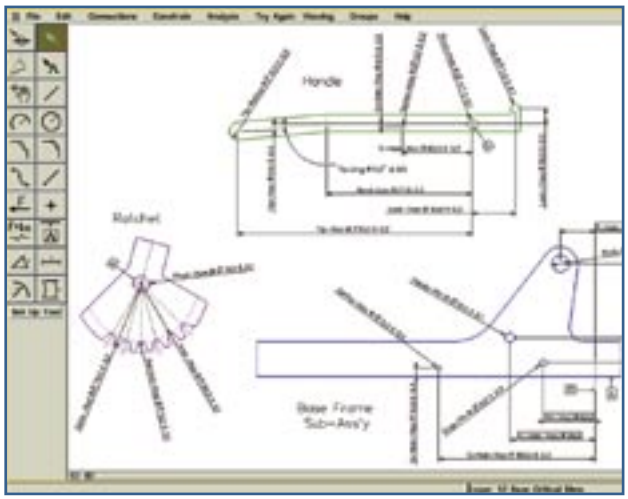
Tolerance Manager de PCO

Tolerance Manager est un outil 2D dédié aux concepteurs, ayant pour objectif de fournir la maîtrise de l'ensemble du dossier de cotation tout au long du process de conception. Intégré aux environnements CAO Solidworks ou Pro/Engineer, Tolerance Manager permet de déclarer les chaînes de cotes dimensionnelles, d'identifier les principaux contributeurs grâce à un calcul de sensibilité (ou coefficient d'influence) et de calculer dynamiquement les dispersions arithmétiques et statistiques des conditions fonctionnelles. Tolerance Manager repousse plus loin les limites de l'analyse de conformité en intégrant un aspect « multiphysique ». Les conditions d'aptitude à l'emploi ne sont alors plus uniquement des grandeurs qui se mesurent avec un pied à coulisse, mais peuvent également être des valeurs de forces, d'induction, etc. *« Tolerance Manager assure la cohérence entre les modèles 3D, les informations représentées sur les dessins de cotation et celles contenues dans la fiche de calcul de tolérancement »*, indique Philippe LeFaou, responsable de l'activité Tolérancement/Cotation Fonctionnelle chez PCO.



Mechanical Advantage de Cognition

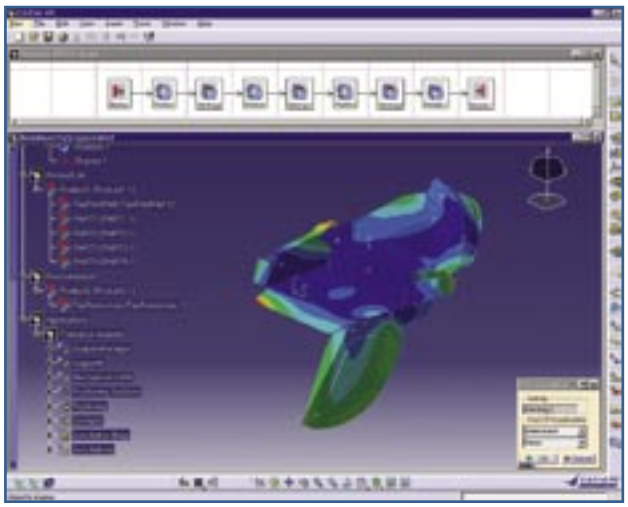
La société Cognition propose un outil d'aide au tolérancement 2D baptisé Mechanical Advantage. Orienté mécanisme, il est principalement utilisé en phases d'avant-projets mécaniques pour l'étude de principes fonctionnels (système d'ouverture, boîte de vitesse, etc.) pour lesquels on cherche à déterminer les principaux contributeurs, c'est-à-dire les éléments dont les variations affectent le plus le fonctionnement global du mécanisme. Mechanical Advantage ne s'intéresse pas qu'aux contributeurs dimensionnels et géométriques, mais également aux contributeurs de type forces, moments, variables ou contraintes. Par exemple un contributeur peut être le coefficient de raideur d'un ressort.



Mechanical Advantage de Cognition

CATIA Tolerance Analysis of Deformable Assembly (TAA)

La plupart des outils d'analyse de tolérances existant partent du postulat que les pièces étudiées sont infiniment rigides et ne subissent aucune déformation. Tolerance Analysis of Deformable Assembly (TAA) permet de réaliser des analyses de tolérance arithmétiques et statistiques en prenant en compte non seulement le processus d'assemblage mais également les déformations subies par les pièces. TAA peut être utilisé en phase de conception, à partir des variations spécifiées, pour définir ou valider le processus d'assemblage (ordre d'assemblage, ordre de soudage, de rivetage, etc..), les tolérances spécifiées, la géométrie des pièces ou encore les propriétés des tôles (épaisseur, matériau). Il peut également être employé en phase de fabrication, à partir des variations mesurées, pour permettre aux ingénieurs de trouver les actions correctives à mener afin de résoudre les problèmes apparus durant les opérations d'assemblage.


Tolerance Analysis of deformable Assembly de Dassault Système.

Sigmund de Varatech

La société américaine Varatech propose une suite d'outils d'analyse de tolérances disponibles en stand-alone (SigmundStacks) ou intégrés aux environnements Pro/Engineer (SigmundPro), SolidWorks (SigmundWorks) ou SolidEdge (SigmundEdge). Ces outils permettent d'évaluer, dès la phase de conception, l'influence des tolérances spécifiées ainsi que celles des variations du processus d'assemblage sur la qualité fonctionnelle du produit final. Sigmund propose cinq types d'analyses : Worst Case, RSS (Root Sum Squares), RSS modifié, Monte Carlo, ainsi que des analyses RSS centrées sur le process, prenant en compte des facteurs tels que les variations dues à l'usure des outils. Sigmund permet également de déterminer la répartition des tolérances locales en regard d'un objectif donné au niveau de l'assemblage.

eM-Tolmate de Tecnomatix

eM-Tolmate fait partie de l'offre eM-Power de Tecnomatix, qui sera désormais intégrée à l'usine numérique E-Factory d'UGS (suite au récent rachat de Tecnomatix par UGS). eM-Tolmate permet l'identification des principaux contributeurs ainsi que l'analyse des variations causées sur le produit final par les tolérances spécifiées et par l'altération ou la modification du processus d'assemblage. eM-Tolmate est présent dans les domaines de la mécanique et de l'électronique, avec des utilisateurs prestigieux tels que Mazda, Hurel Dubois, ou encore Toshiba. Ce dernier affirme avoir réduit de deux tiers le nombre de problèmes rencontrés lors des

opérations d'insertion des lecteurs de CD-Rom dans les Laptop. Une analyse de tolérancement a en effet permis aux ingénieurs de production de détecter un problème inhérent à la méthode d'insertion utilisée. Celle-ci a ensuite pu être modifiée en conséquence.

NX Quickstack d'UGS

Dans le domaine du tolérancement UGS propose un produit baptisé NX QuickStack encapsulé dans NX, permettant de procéder à des études statistiques (Monte Carlo) sur les assemblages. Le logiciel prend en compte les tolérances spécifiées, à la fois dimensionnelles et géométriques, ainsi que l'ordre de montage des pièces et enfin les conditions d'assemblage (positionnement isostatique en l'absence de tolérance). L'analyse consiste par la suite à simuler un grand nombre d'opérations d'assemblage, avec des pièces générées aléatoirement dans les limites de tolérance. L'interprétation des résultats permet par la suite d'identifier les spécifications les plus influentes.

NX Quickstack permet de réaliser une analyse de tolérancement 3D grâce à une introduction des paramètres normés répondant aux standards ANSI Y14.5M, ASME Y14.5M et ISO 1101 GPS).

Selon Alain Guillon : *« l'analyse de tolérancement 3D s'adresse à un marché relativement restreint, non pas qu'il ne présente pas d'intérêt mais parce qu'il nécessite le déploiement d'importants moyens et de fortes compétences »*. Parmi les utilisateurs prestigieux de NX Quickstack on trouve notamment Général Motors, qui se sert de l'environnement UGS pour le dimensionnement de boîtes de vitesse.

ToleranceCalc de Geomate

La société Geomate propose une solution économique d'analyse de tolérances baptisée ToleranceCalc. Fonctionnant avec n'importe quel système de CAO capable de produire des fichiers DXF (notamment les produits Autodesk), ToleranceCalc permet de simuler différents scénarios de tolérancement et de calculer les valeurs « au pire des cas », maximum et minimum des variations. Le logiciel intègre également des fonctionnalités statistiques et d'analyse Monte-Carlo pouvant s'inscrire dans une démarche de qualité totale.

Un exemple d'application pour le ferrage de portière

En production, l'assemblage des portes d'une automobile sur la « caisse en blanc » est une opération importante, car elle conditionne la qualité du produit fini. L'objectif est d'avoir des jeux (par exemple porte/caisse, porte avant/porte arrière...) les plus faibles possibles (réduction des bruits aérodynamiques, esthétique) et les plus réguliers possibles (esthétique: éviter la « queue de billard »).

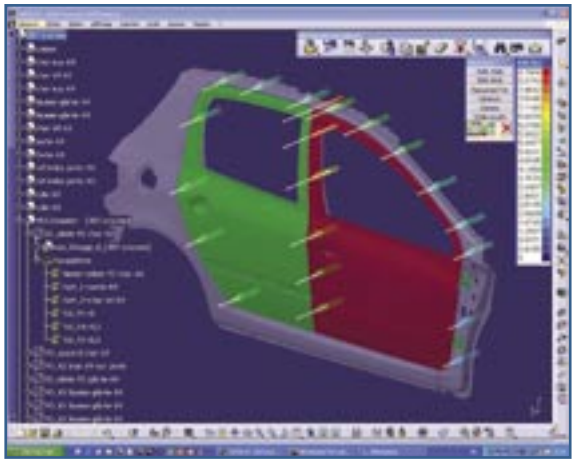
De même, l'affleurement (par exemple porte/caisse, porte avant/porte arrière...) se doit d'être parfaitement maîtrisé (réduction des bruits aérodynamiques, esthétique). Cet assemblage des portes d'une automobile sur la « caisse en blanc » peut se faire de différentes façons. Mecamaster est utilisé à cette fin chez plusieurs constructeurs automobiles, sur des simulations de différentes techniques d'assemblage.

L'étude ci-après décrit une technique industrielle très utilisée : La porte arrière est « prise », c'est-à-dire positionnée dans le dispositif d'assemblage avant, puis le dispositif est positionné sur la caisse. Les charnières de la porte arrière sont alors soudées. Ensuite, la porte avant est « prise » dans le dispositif d'assemblage avant, lequel est positionné sur la porte arrière et sur la caisse. Les charnières de la porte avant sont alors soudées. Ces différents positionnements utilisent des zones de contact et différents trous (trous de fixation de baguettes latérales, de fixation de pare-chocs, trous dédiés).

Les questions qui se posent sont du type : « où doit être l'appui du moyen avant sur la caisse ? », « les zones hautes de positionnement doivent-elles être confondues ? », « où doivent-elles être ? », « doit-on positionner le moyen avant exclusivement sur la caisse ou également sur la porte arrière ? »... et sans moyen de quantification rigoureux il est difficile de faire les choix.

L'obtention de certaines caractéristiques fonctionnelles d'un ensemble mécanique tridimensionnel, telles que la précision d'un positionnement, l'obtention d'un jeu fonctionnel dépend des pièces et des assemblages qui composent l'ensemble. Les assemblages sont constitués de surfaces en contact et peuvent être décrits par des liaisons (c'est en effet l'analyse exhaustive des contacts possibles entre deux pièces qui a conduit à la définition des liaisons normalisées).

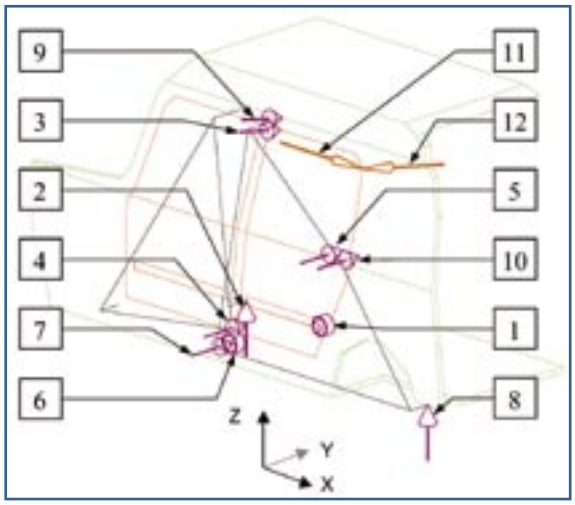
Le logiciel Mecamaster se base sur cette approche. Il nécessite donc la définition de l'ensemble mécanique par des liaisons. Une simulation cinématique permet ensuite de connaître l'influence que les tolérances locales des pièces et assemblages ont au niveau de conditions fonctionnelles choisies, et réciproquement.



Capture d'écran du logiciel Mecamaster intégré sous l'environnement CatiaV5.

Puis, la définition, pour les différentes liaisons, de valeurs de tolérances (qui peuvent correspondre à des tolérances de position 3D, des jeux...) permet d'évaluer la condition fonctionnelle choisie. On obtient l'équivalent d'une chaîne de cotes 3D.

Les liaisons sont choisies en fonction des positionnements qu'elles assurent. Noter qu'il peut y avoir des choix différents de références pour les différentes pièces. Par exemple, pour la porte, tout peut être défini par rapport à un repère «d'emboutissage et de sertissage», mais l'on aurait pu aussi choisir les trous de fixation des baguettes comme références (les tolérances définies ci-dessus pour la porte seraient alors différentes).



Le logiciel Mecamaster se base sur la définition de l'ensemble mécanique par des liaisons.

Lorsque les liaisons sont définies, il suffit de définir la ou les conditions fonctionnelles. Le même modèle permet d'analyser les différentes conditions fonctionnelles. On s'intéresse ici à «LA» question qui intéresse systématiquement les constructeurs automobiles : les positions sur X, Y, Z du coin supérieur arrière de la porte.

La valeur de la tolérance est ensuite calculée par Mecamaster, en arithmétique (pire des cas) et en statistique. La valeur finale dépend directement des valeurs des tolérances et des influences. On aura donc intérêt à agir d'abord sur les valeurs des influences, qui sont directement liées aux liaisons et à leurs positions, c'est à dire à agir sur l'architecture de l'ensemble mécanique, ce qui a priori ne «coûte» rien. Ensuite, on pourra se préoccuper des valeurs des tolérances.

Les résultats graphiques, avec des longueurs proportionnelles à leur intensité, sont les influences, qui ne dépendent que de la géométrie, et les contributions (contribution = tolérance x influence). Elles permettent une perception globale de la contribution de chaque liaison (ou composante) à la condition fonctionnelle. Les contributions dépendent de la géométrie et des tolérances.

Les résultats obtenus pour cette analyse ont permis de constater, ce qui était prévisible, que pour le jeu Caisse / Porte Arrière, le plus important se situe dans le plan XZ. (noter qu'en fait, les directions des liaisons n'ont pas été rigoureusement X Y et Z, mais celles d'un repère tangent à la carrosserie). De même, pour l'affleurement Caisse / Porte Arrière, les résultats obtenus ont montré que le plus important se situe dans la direction Y.

Le ferrage de la porte arrière présenté ici est simple et compréhensible.

Mécamaster permet le calcul des tolérances d'assemblage en arithmétique ou statistique.

Cependant, dès que l'on introduit la porte avant, avec des références communes, il se complexifie notablement. De plus, il y a souvent des gabarits au niveau des charnières et des serrures... Auparavant ces analyses étaient effectuées avec l'expérience, des connaissances métiers, et des chaînes de cotes 1D. Mais il était délicat de choisir entre les architectures, et la quantification restait peu précise. L'analyse MECAmaster apporte une réponse rigoureuse. Les gains de temps constatés sont énormes (des analyses qui nécessitaient 4 à 5 semaines sont réalisées en 1 journée), et plusieurs solutions peuvent être évaluées. Une difficulté subsiste cependant car les solides (principalement caisse et portes) ne sont pas infiniment rigides. ◻