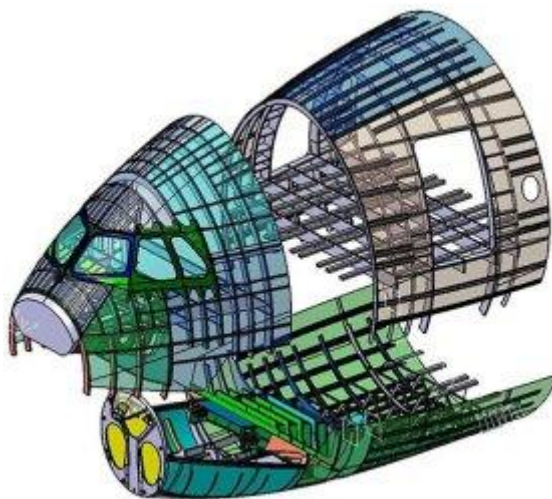


Ressource réalisée par Alain Stricher (doctorant au LMT-Cachan) et Lionel Gendre (professeur agrégé, docteur du LMT-Cachan).

Les défauts géométriques des pièces sont à l'origine de difficultés importantes lors de l'assemblage de structures constituées d'éléments non rigides, comme celles que l'on rencontre dans l'industrie aéronautique. En effet, les pièces sont déformées lors de leur montage. Cela peut entraîner le non-respect de conditions fonctionnelles, introduire des précontraintes néfastes pour la bonne tenue de l'ensemble, voire causer des détériorations accidentelles. Cette ressource montre comment la simulation numérique du processus d'assemblage peut aider à prévoir et maîtriser ces phénomènes.

1 - Le contexte : l'assemblage des structures aéronautiques

Dans l'industrie aéronautique, la minimisation de la masse est l'objectif qui guide la plupart des choix de conception. Ainsi, les structures des avions et hélicoptères sont essentiellement constituées de grandes pièces non massives, minces (panneaux, cloisons) ou élancées (poutres), voir figure 1. Du fait de leur faible épaisseur, ces pièces sont non rigides et peuvent se déformer élastiquement, de manière relativement importante, dans une ou plusieurs directions. Ce n'est qu'une fois assemblée que la structure acquiert une rigidité d'ensemble.



*Figure 1 : Vue des différents éléments de la pointe avant d'un Airbus A350
Image Aerolia [1]*

1.1 - Le rôle des défauts géométriques et du tolérancement

Comme toute pièce fabriquée, les éléments structurels des avions et hélicoptères possèdent naturellement des défauts géométriques, dus aux procédés de fabrication et susceptibles d'entraîner des problèmes lors de l'assemblage. Pour anticiper et contrer ces problèmes, les constructeurs s'appuient notamment sur le tolérancement ; ce dernier permet de limiter l'amplitude des défauts et, sous réserve de tenir compte des contraintes d'assemblage dans la spécification des tolérances, est un des moyens permettant de garantir le bon déroulement du montage.

Afin de faciliter la mise en œuvre de cette démarche, des logiciels d'analyse du tolérancement intégrés aux outils de CAO sont utilisés (figure 2). Ces logiciels effectuent, à partir de la géométrie nominale des pièces et de leurs tolérances, des calculs d'enveloppes géométriques permettant de prévoir si les pièces pourront être assemblées.

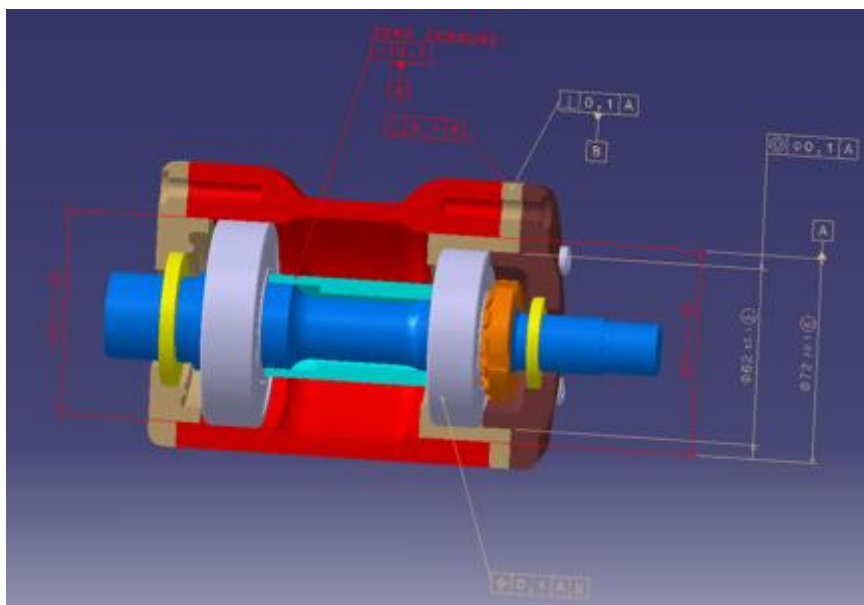


Figure 2 : Un exemple d'analyse du tolérancement sur des pièces rigides (ici, un montage de roulements).
Image LURPA [2]

Cependant, ces logiciels reposent sur l'hypothèse des solides indéformables, peu pertinente pour modéliser de grandes pièces minces. Cela les rend peu adaptés au tolérancement des structures aéronautiques pour deux raisons :

- L'hypothèse d'indéformabilité conduit ces logiciels à spécifier des tolérances extrêmement serrées, incompatibles avec les procédés de fabrication utilisés dans l'industrie aéronautique, et ce d'autant plus que les assemblages comportent généralement de nombreux rivets ou boulons, et les modèles associés sont donc fortement hyperstatiques, ce qui entraîne une multiplication des contraintes géométriques ;
- Les éléments structurels des avions possèdent une certaine souplesse, et les opérateurs chargés de l'assemblage ont souvent la possibilité de les déformer, ce qui permet de réaliser des assemblages qui, si les pièces étaient peu déformables, seraient irréalisables.

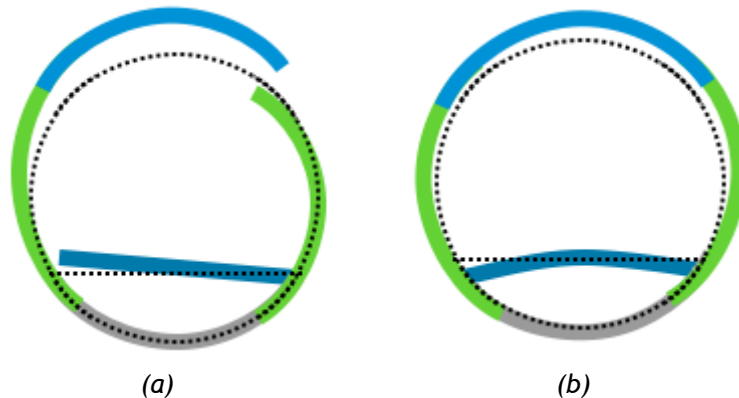
Pour ces deux raisons, les simulations d'assemblages basées sur l'hypothèse des solides rigides ne sont guère utilisables dans ce contexte : elles conduisent à des tolérances beaucoup trop strictes, dont le respect entraînerait des surcoûts importants et n'est absolument pas nécessaire en pratique. Les industriels sont ainsi souvent amenés à « passer outre » les indications données par ces logiciels.

1.2 - La problématique des pièces non rigides

La possibilité de déformer les pièces permet d'assembler les structures aéronautiques tout en conservant des tolérances (et donc des coûts de fabrication) raisonnables, mais cela ne représente pas pour autant une solution miracle. En effet, la déformation des pièces est à l'origine de nombreux problèmes, comme par exemple :

- La génération de précontraintes au sein des pièces, susceptibles de s'ajouter aux chargements subis en service et donc de mener à des détériorations prématurées ;

- Le non-respect de certaines conditions fonctionnelles géométriques, comme par exemple des jeux maximaux ou minimaux, des conditions d'affleurement... Ces conditions fonctionnelles ne portent pas forcément sur la surface qui est assemblée, voir figure 3 ;
- Dans le pire des cas, des détériorations lors de l'assemblage à cause d'efforts de montage trop importants.



*Figure 3 : Problématique des assemblages de pièces non rigides :
 (a) la présence de défauts géométriques oblige à déformer les pièces pour les assembler ;
 (b) cela crée des précontraintes et entraîne le non-respect de conditions fonctionnelles.*

Ainsi, non seulement des problèmes peuvent se présenter au cours de l'assemblage, mais la durée de vie de l'appareil peut également être affectée par les précontraintes générées lors du montage. Les constructeurs aéronautiques souhaitent donc éviter ces difficultés autant que possible, ce qui nécessite de les prendre en compte dès la phase de conception.

Or, aucun outil prédictif adapté aux assemblages de pièces non rigides n'est disponible à l'heure actuelle. Les concepteurs ne peuvent donc compter que sur le retour d'expérience et doivent souvent s'en remettre au savoir-faire de l'atelier, qui est de plus en plus remis en question à cause des nombreuses innovations déployées dans l'industrie aéronautique et notamment le passage aux matériaux composites, dont l'assemblage est plus délicat que celui des pièces métalliques. Les retards de production dus aux difficultés d'assemblage sont ainsi relativement fréquents.

Pour cette raison, les constructeurs aéronautiques cherchent actuellement à s'affranchir de l'hypothèse des solides indéformables dans leurs analyses de tolérances, et à tenir compte non seulement des défauts géométriques des pièces, mais également de leurs déformations. Ils envisagent donc de modéliser et simuler le processus d'assemblage par éléments finis. Ces simulations ont pour objectif d'étudier, dès la phase de conception, la montabilité de la structure et de vérifier son état de contraintes et de déformations à l'issue de l'assemblage. Les constructeurs espèrent ainsi améliorer la pertinence de leurs pratiques de tolérancement et leur maîtrise du processus d'assemblage.

2 - Le principe des simulations d'assemblages

Dans un souci de simplicité, nous nous limitons ici à une seule pièce, élastique linéaire et de géométrie non parfaite, que l'on assemble sur un support, supposé indéformable et de géométrie parfaite ; la démarche est similaire dans le cas de pièces multiples. Cette démarche comporte trois étapes :

1. Modéliser la pièce avec ses défauts géométriques ;
2. Modéliser les actions mécaniques d'assemblage ;

3. Simuler l'assemblage et en déduire les « fonctions d'influence », c'est-à-dire les relations mathématiques permettant d'exprimer les quantités dimensionnantes (statiques, géométriques...) en fonction de l'amplitude des défauts.

Il est ainsi possible d'optimiser le tolérancement, c'est-à-dire d'adopter les tolérances les plus larges possibles assurant le bon fonctionnement et la montabilité, tout en testant des processus d'assemblage et des réglages. La suite de ce paragraphe présente chacune des trois étapes.

2.1 - Modélisation de pièces imparfaites

La première étape est de modéliser les pièces comportant des défauts géométriques. Pour ce faire, avant la fabrication, les concepteurs disposent généralement d'un modèle CAO de la pièce nominale, ainsi que de ses tolérances géométriques (voir figure 4a). Ces dernières définissent des zones de tolérance dans lesquelles doivent se trouver les éléments tolérancés (Figure 4b) ; elles spécifient donc l'amplitude maximale des défauts géométriques admissibles, mais pas leur allure. Pour modéliser une pièce imparfaite, il faut donc déterminer l'allure de ses défauts géométriques.

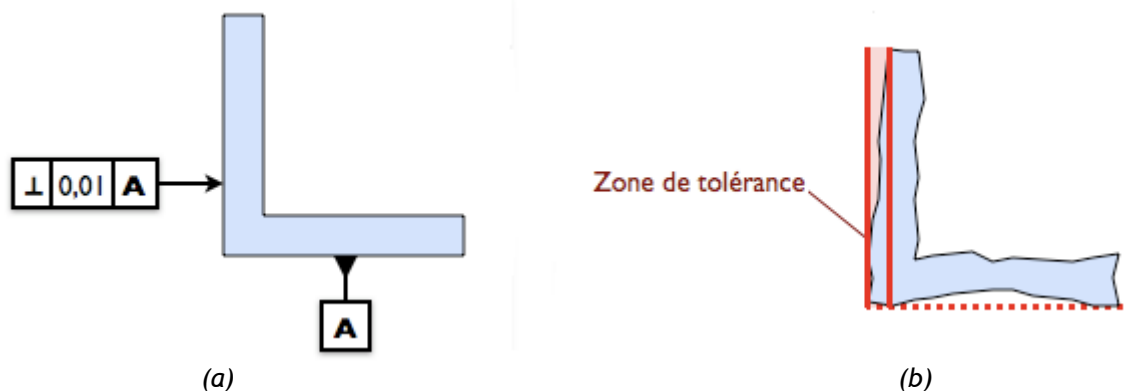


Figure 4 : (a) Une pièce nominale avec une tolérance de perpendicularité ;
(b) la zone de tolérance correspondante.

Pour cela, l'idéal serait de réaliser directement des mesures sur une pièce fabriquée ; malheureusement, au stade de la conception, la pièce n'existe pas encore ! La plupart des travaux sur le sujet consistent donc à se donner des objets mathématiques modélisant l'allure des défauts, comme par exemple :

- Des surfaces s'appuyant sur le maillage éléments finis de la pièce ; les défauts sont alors obtenus en maillant la pièce nominale, puis en faisant varier aléatoirement la position de ses nœuds (figure 5a). Cette modélisation est très simple à mettre en œuvre, mais souvent peu réaliste ;
- Des surfaces polynomiales, comme des splines ou des surfaces de Bézier (figure 5b) ; cela permet d'obtenir des défauts d'allure régulière qui peuvent être, au choix, plutôt étendus ou plutôt localisés ;
- Les modes de vibration de la pièce (figure 5c), ce qui fournit des défauts réguliers et étendus.

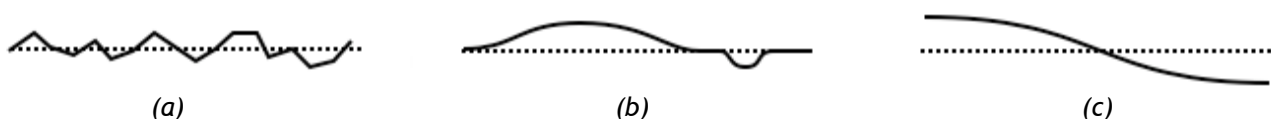


Figure 5 : Quelques modélisations des défauts géométriques sur une surface réputée plane :
(a) en déplaçant les nœuds du maillage nominal ; (b) à partir de surfaces polynomiales ;
(c) à partir des modes de vibration.

Toute la difficulté est naturellement de sélectionner une modélisation rendant compte des défauts réels que l'on obtiendra sur la pièce, une fois celle-ci fabriquée. Ces défauts dépendent essentiellement du procédé de fabrication ; dans le cas des procédés utilisés pour fabriquer de grandes pièces minces, leur allure est malheureusement assez mal documentée à l'heure actuelle (seul l'usinage a été étudié de façon approfondie). Là encore, le retour d'expérience est donc indispensable.

Le reste de la modélisation (adaptation de la géométrie, choix des éléments, maillage...) s'effectue selon la démarche habituelle (voir les quatre ressources « *Le modèle en éléments finis d'un produit dans son environnement* »).

2.2 - Modélisation et simulation des actions d'assemblage

Une fois la pièce imparfaite modélisée et maillée, l'étape suivante est de modéliser puis de simuler le processus d'assemblage lui-même.

La figure 6a schématise la pièce avec défauts de la figure 4b, mise en position sur un support rigide de géométrie parfaite ; l'assemblage consiste à déformer la pièce en un ou plusieurs points de sorte à l'amener au contact avec le support (typiquement, à l'aide de boulons ou de rivets). Afin de modéliser cette action d'assemblage, on utilise des contraintes cinématiques (voir ressource « *Le modèle en éléments finis d'un produit dans son environnement : 4. Modélisation su monde extérieur* ») : en chaque nœud correspondant à un point de fixation, on impose la coïncidence de la position déformée du nœud avec la position du point du support sur lequel il est fixé. Ici, le support étant supposé indéformable, cette contrainte cinématique prend la forme d'un simple déplacement imposé (figure 6b).

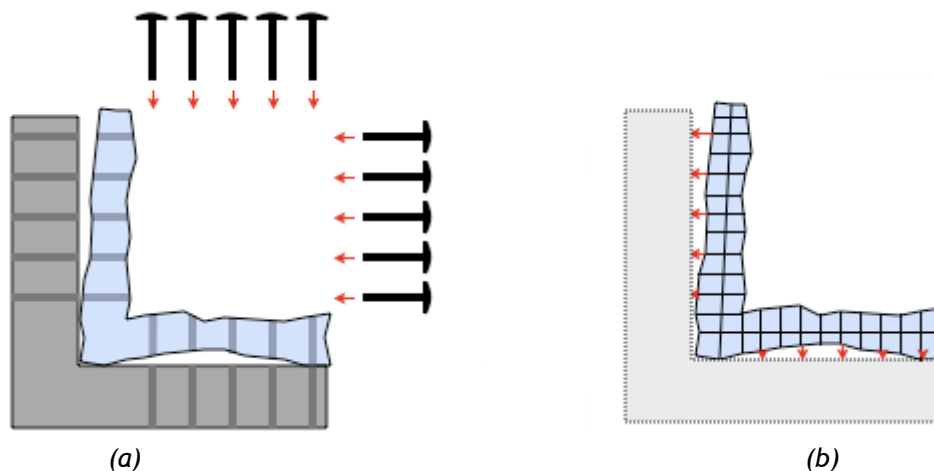


Figure 6 : (a) Une pièce déformable de géométrie imparfaite, mise en position sur un support rigide de géométrie parfaite ; (b) la modélisation Eléments Finis de l'assemblage à l'aide de déplacements imposés.

Les autres actions mécaniques exercées au cours de l'assemblage, comme la pesanteur, sont modélisées selon la méthodologie habituelle. La simulation permet alors de déterminer les valeurs de certains critères des fonctions de service correspondant à la phase d'assemblage, comme par exemple (figure 7) :

- La valeur de l'effort de liaison qu'il faut exercer sur le nœud pour le maintenir au contact avec le support, qui correspond généralement à l'effort de montage dans le cas de l'élasticité linéaire ;
- Les précontraintes installées dans les pièces à l'issue de l'assemblage ;
- La géométrie de la structure assemblée, caractérisée sous forme de distances, d'angles...

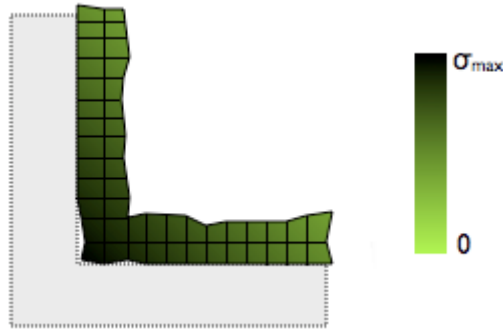


Figure 7 : Allure de la déformée et des précontraintes obtenues à l'issue de la simulation.

La simulation est généralement menée pas à pas : on simule successivement chacune des étapes de la séquence d'assemblage. Outre l'influence des défauts géométriques, ce mode opératoire permet donc de tester des gammes d'assemblage. Il est également possible de simuler la mise en place de réglages (comme ceux que l'on trouve sur une portière de véhicule), toujours à l'aide de déplacements imposés. Cette méthodologie permet donc d'anticiper, dès la conception, un grand nombre de difficultés susceptibles de se produire lors du montage.

2.3 - Identification de la fonction d'influence

A ce stade, on connaît l'influence du défaut géométrique considéré sur le comportement de la structure. Cela permet de vérifier la pertinence du tolérancement vis-à-vis des performances attendues. Cependant, les concepteurs sont plus souvent amenés à résoudre le problème inverse : connaissant les performances attendues, quel est le tolérancement le plus large possible (et donc le moins coûteux possible) qui permettra de les assurer ?

Dans le cadre de l'élasticité linéaire en petites perturbations, une méthode simple existe. Elle consiste à lister les différents défauts que l'on souhaite prendre en compte, puis à simuler l'assemblage pour chacun d'entre eux. Si l'on note x le vecteur colonne dont les composantes sont les amplitudes des défauts, et y le vecteur colonne dont les composantes sont les valeurs qui interviennent dans les critères de dimensionnement, alors la linéarité du problème de mécanique fait que :

$$y = Ax$$

où A est une matrice rectangulaire, appelée matrice des coefficients d'influence, dont les composantes sont identifiées à l'aide des simulations décrites ci-dessus. Une fois l'ensemble des défauts possibles analysés, cette matrice est entièrement connue. Il est alors possible de déterminer l'amplitude maximale des défauts compatibles avec les critères de fonctionnement, puis de proposer un tolérancement adéquat.

Cependant, le domaine de validité de cette approche se limite aux problèmes linéaires ; si par exemple les liaisons ont des jeux non négligeables, si le matériau se déforme plastiquement, ou s'il est soumis à de grandes transformations (ces deux derniers cas sont courants avec les matériaux métalliques), alors la pertinence des résultats n'est pas garantie.

La figure 8 récapitule la démarche mise en œuvre au cours de ces études.

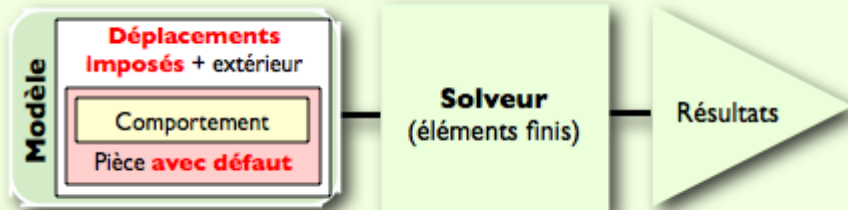


Figure 8 : Récapitulatif de la simulation d'un assemblage de pièces non rigides avec défauts géométriques.

3 - Conclusions

La simulation des processus d'assemblage par éléments finis est un moyen peu coûteux d'anticiper, dès la phase de conception, les difficultés pouvant survenir lors du montage d'une structure constituée d'éléments non rigides, comme celles que l'on trouve dans l'industrie aéronautique. Elle repose sur deux idées principales :

1. Modéliser les pièces avec leurs défauts géométriques, à partir de leur géométrie nominale et de leurs tolérances ;
2. Modéliser les actions d'assemblage par des contraintes cinématiques.

Chacune de ces deux idées fait l'objet de travaux de recherche visant à étendre le domaine de validité de cette pratique. Concernant la modélisation des défauts, il s'agit de proposer des géométries « défectueuses » réalistes, compte tenu des matériaux et des procédés employés. Concernant la modélisation de l'assemblage, il s'agit notamment de tenir compte des jeux dans les liaisons ou des comportements non élastiques. Ces travaux devraient déboucher sur une meilleure maîtrise des processus d'assemblage et, ainsi, une baisse de la fréquence des incidents de production.

Références :

- [1]: <http://www.aerolia.com/fr>
 [2]: <http://www.lurpa.ens-cachan.fr/>