



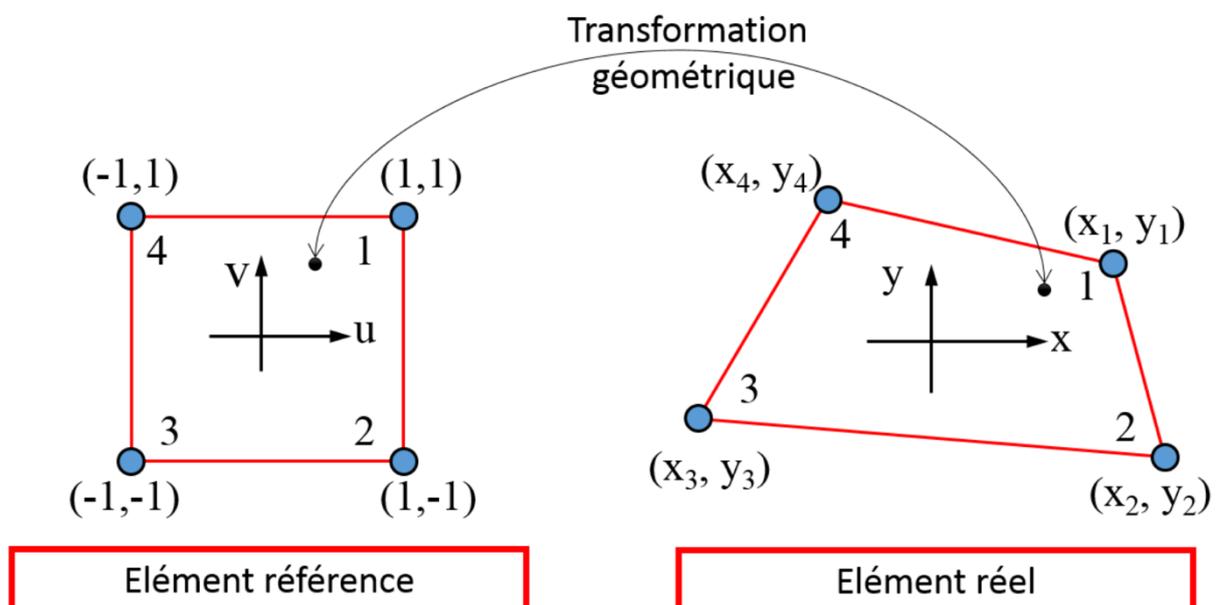
Intégration CAO-Calcul dans le processus de conception

La liaison CAO-CALCUL est une étape importante du processus de conception. Selon l'observatoire de la simulation numérique réalisé par MICADO, 90% des choix de conception sont réalisés grâce à la simulation. Le couple CAO-CALCUL doit, de fait, être performant en évoluant de concert.

L'observatoire de la simulation numérique est ouvert depuis 2010 et permet de faire un état de l'utilisation de la simulation numérique dans les entreprises

La **méthode des éléments finis** opère ses calculs sur des éléments de référence géométriquement parfaits (généralement les calculs sont interpolés sur les points de Gauss), encore appelés éléments isoparamétriques. C'est le passage des éléments distordus issus de la discrétisation du modèle CAO à cet élément de référence qui nécessite une attention particulière (voir Figure).

En effet, si l'élément réel est trop distordu, la transformation géométrique permettant de passer de l'élément réel à l'élément de référence peut être faussée.



Cette transformation est conditionnée par la possibilité d'inverser la matrice Jacobienne $[J]$ qui est une matrice de transformation permettant de relier de manière bijective les dérivées partielles. Cette possibilité est testée sur le Jacobien, calculé à partir du déterminant de la matrice Jacobienne. Si le Jacobien est négatif, la matrice Jacobienne n'est plus bijective. Ce résultat apparaît lorsque l'élément réel est trop distordu.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{bmatrix} \quad \{\partial_u\} = [J] \{\partial_x\} \quad \{\partial_x\} = [J]^{-1} \{\partial_u\}$$

Afin d'obtenir une réponse physique acceptable, il est ainsi nécessaire d'avoir un **maillage de qualité**. Un maillage de qualité correspond à la création d'éléments dont les formes sont les plus proches possible de l'élément de référence. La volonté d'avoir un maillage le plus structuré possible doit être en adéquation avec le type de calcul et le cahier des charges. En effet, l'obtention d'un tel maillage peut demander beaucoup de temps selon la qualité du modèle CAO.

Le passage de la CAO au calcul marque une **rupture importante** d'un point de vue culturel (vision différente entre les concepteurs et les calculateurs), technique (rupture entre les modèles) et collaboratif (préparation de la géométrie, gestion des formats d'échanges, ...).

Il existe deux types de méthodes permettant de faciliter la liaison CAO-CALCUL : les méthodes correctives directes et indirectes, et les méthodes préventives.

Les méthodes correctives directes et indirectes

Les **méthodes correctives directes** sont généralement utilisées assez tardivement dans le processus de conception. Elles permettent de corriger les erreurs de conception ou de simplifier le modèle. Plusieurs travaux sur la correction des discontinuités, des petites entités, des imprécisions sur les échanges de modèles, ... [16] [14] [8] ont permis le développement de routines pour corriger les défauts du modèle géométrique.

[11] a travaillé sur le développement de méthodes de contrôles, contenues dans une base de connaissances, permettant de corriger l'arbre de construction et ainsi reconstruire le modèle géométrique.

Une autre approche consiste à passer par des méthodes basées sur le maillage du modèle CAO en défaut. Par exemple, B. Leutenecker-Twelsiek, C. Klahn, and M. Meboldt [2] et H. Abramovitch *et al.* [10] ont développé un modèle appelé MCT (Mesh Constraint Topology) qui consiste à automatiser la suppression, la fusion d'arêtes ou de points dans un contexte calcul. Le modèle considère que les simplifications / idéalizations telles que les symétries, la suppression de trous, ... sont réalisées au préalable. L'un des points très intéressants de cette méthode est sa capacité à gérer des entités non-manifold, ce qui permet d'orienter la qualité du maillage. Une base de connaissances des bonnes pratiques est automatiquement associée à la reconstruction du BRep.

Les **méthodes correctives indirectes** sont quant à elles basées sur la modification du maillage et sont utilisées pour supprimer les défauts qualifiés par les contrôles usuels [17] [15] [13] ... Une revue complète des différentes méthodes de correction de maillage peut être trouvée dans "Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes" [4]. D'autres travaux consistent à travailler sur la reconnaissance de formes directement sur le maillage [7].

Sur le cas particulier de l'optimisation topologique, des modèles permettant de corriger et d'adapter le maillage sont développés pour permettre un lien direct avec une boucle en simulation numérique ou encore la fabrication additive [1], [3].

Les méthodes préventives

Les méthodes préventives font référence aux actions permettant de préparer un modèle CAO de haute qualité qualifié pour la simulation numérique.

Le groupe SASIG (Strategic Automotive product data Standards Industry Group) qui regroupe les industries de l'automobile mondiales a publié un guide de bonnes pratiques [12]. Ce guide type DFX contient des règles géométriques, fonctionnelles et liées au maillage. Chaque règle permet d'aider le concepteur à modéliser en évitant des erreurs de base.

Cependant la préparation de la CAO ne doit pas seulement se concentrer sur les règles géométriques mais également prendre en compte le processus de calcul. Le modèle CAO doit ainsi devenir fonctionnellement cohérent par rapport au cahier des charges calcul. Il doit intégrer les phases de **simplification** (par exemple la suppression facile de trous, congés, ...) et les phases d'**idéalisation** (par exemple une modélisation en surface neutre pour un calcul ayant une propriété coque). Un état de l'art complet sur les méthodes d'idéalisation et de simplification peut être trouvé dans « *Conception optimale de structures* » [9].

La gestion de la liaison entre entités de dimensions différentes (1D, 2D ou 3D) est régie, de nouveau, par des bonnes pratiques [6]. M. X. Gan and C. H. Wong [5] proposent une méthode de liaison CAO-CALCUL basée sur un modèle appelée « Common Data Model ». L'objectif est de définir au préalable le projet en prenant en compte très en amont des informations de conception conceptuelle et de simulation numérique.

Nous partons du principe qu'il est préférable dans le cadre du concept de PLM et de traçabilité numérique de travailler sur des méthodes préventives. L'objectif est ainsi de mieux utiliser les capacités des outils de CAO en adéquation avec les contraintes de la simulation. Ainsi, il ne faut pas uniquement regarder les aspects géométriques mais bien toutes les contraintes permettant de préparer correctement le modèle pour la simulation. Cette vision globale amène à ne parler non pas uniquement de liaison CAO-Calcul mais bien d'une **intégration CAO-Calcul**.

La récente intégration des méthodes dites "meshless" (sans maillage) dans les outils commerciaux (les méthodes en elles-mêmes existent depuis des dizaines d'années) vient bousculer ces difficultés de liaison CAO-CALCUL, basés sur des outils CAO utilisant des modeleurs hybrides (CSG+BREP). Ces méthodes basées sur des nœuds dispersés se recouvrant de manière arbitraire permettent d'affranchir de la contrainte de déformation des éléments. Souvent sur la base de maillage de type Octree ces outils permettent un gain de temps énorme en ne se préoccupant pas de correction, de simplification ou d'idéalisation.

Même si pour le moment les solveurs associés sont limités et que les résultats sont de l'ordre du pré-dimensionnement, nuls doutes que de gros progrès vont permettre d'alléger voire supprimer les contraintes de liaison CAO-CALCUL.

[1] J. Kranz, D. Herzog, and C. Emmelmann, "Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4," *J. Laser Appl.*, vol. 27, no. S1, p. S14001, Feb. 2015, doi: 10.2351/1.4885235.

[2] B. Leutenecker-Twelsiek, C. Klahn, and M. Meboldt, "Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 50, no. Supplement C, pp. 408–413, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.016.

[3] A. Townsend, N. Senin, L. Blunt, R. K. Leach, and J. S. Taylor, "Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review," *Precis. Eng.*, vol. 46, no. Supplement C, pp. 34–47, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.06.001.

[4] S. P. Moylan, J. A. Slotwinski, A. L. Cooke, K. K. Jurens, and M. A. Donmez, "Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes," in *NIST*, 2012, doi: 911953.

- [5] M. X. Gan and C. H. Wong, "Practical support structures for selective laser melting," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 238, no. Supplement C, pp. 474–484, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006.
- [6] B. Cheng and K. Chou, "Geometric consideration of support structures in part overhang fabrications by electron beam additive manufacturing," *Comput.-Aided Des.*, vol. 69, pp. 102–111, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.06.007.
- [7] G. Allaire and F. Jouve, "Structural Optimization by the Homogenization Method," in *IUTAM Symposium on Variations of Domain and Free-Boundary Problems in Solid Mechanics*, P. Argoul, M. Frémond, and Q. S. Nguyen, Eds. Springer Netherlands, 1999, pp. 293–300.
- [8] R. Roy, S. Hinduja, and R. Teti, "Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 2, pp. 697–715, 2008, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.007>.
- [9] G. Allaire and M. Collaborateur. Schoenauer, *Conception optimale de structures*. New York: Springer, 2007.
- [10] H. Abramovitch *et al.*, "Smart tetrachiral and hexachiral honeycomb: Sensing and impact detection," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 7, pp. 1072–1079, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.07.017.
- [11] M. P. Bendsøe, "Optimal shape design as a material distribution problem," *Struct. Optim.*, vol. 1, no. 4, pp. 193–202, Dec. 1989, doi: 10.1007/BF01650949.
- [12] Nicolas Gardan, "CAO et simulation numérique en FA." Veille CETIM, 2017.
- [13] A. Schneider, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2016.
- [14] M. S. Vimawala and G. M. Turkiyyah, "Computational procedures for topological shape design," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 125, no. 1–4, pp. 257–285, Sep. 1995, doi: 10.1016/0045-7825(94)00803-U.
- [15] N. Gardan, "Knowledge Management for Topological Optimization Integration in Additive Manufacturing," *Int. J. Manuf. Eng.*, vol. 2014, p. e356256, Feb. 2014, doi: 10.1155/2014/356256.
- [16] N. Gardan and Y. Gardan, "Management and Economics Design Optimization: Fundamentals and Case Study," *Int. J. Econ. Manag. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 32–41, 2014.
- [17] N. Gardan, *De la simulation à l'Optimisation : contexte, atouts et exemples pour les PME et les ETI*, Guide Micado. 2013.