

Depuis l'introduction par CD-adapco du solveur STAR-CCM+, combiné à un générateur automatique de maillage polyédrique, une question récurrente se pose parmi les utilisateurs de CFD : pourquoi utiliser des volumes de contrôle polyédriques plutôt que tétraédriques ? Le but de cet article est de fournir un certain nombre d'éclaircissements à ce sujet.

Les avantages du maillage polyédrique



Figure 1 : Aperçu d'un maillage polyédrique pour un calcul d'écoulement au travers d'un circuit de refroidissement moteur.

Avantages et inconvénients du Maillage Tétraédrique

Automatique mais peu efficace

Les tétraèdres sont les éléments volumiques les plus simples : leurs faces sont planes, de sorte que la localisation des points médians des faces et des volumes soit parfaitement définie. Les maillages tétraédriques sont par ailleurs faciles à générer automatiquement. Ils sont aujourd'hui utilisés par tous les outils de simulation CFD. Le point négatif est que ces éléments doivent respecter certains critères de régularité. Ainsi, pour être acceptables, ils ne peuvent être trop étirés ou écrasés : notamment, pour atteindre une précision raisonnable au niveau des couches limites le long de canaux étroits ou au niveau de petits interstices, un nombre plus important de volu-

mes de contrôle est alors nécessaire comparativement à l'utilisation d'un maillage structuré (hexaédrique). Ces problèmes sont partiellement résolus le long des parois par l'introduction de couches de prismes.

Imprecision des flux estimés et des gradients

Les volumes de contrôle tétraédriques n'ont que quatre plus proches voisins. Dès lors, le calcul des gradients au centre des cellules peut s'avérer problématique avec les techniques d'approximation usuelles (fonctions de base linéaires). L'un des problèmes est lié à la position spatiale des nœuds voisins, qui peuvent être pratiquement coplanaires, rendant imprécis voire impossible le calcul du gradient dans la direction normale à ce plan. Un autre problème rencontré concerne les éléments frontières. Prenons l'exemple d'une cellule dont une des faces correspond à une frontière du domaine : les trois cellules voisines restant peuvent engendrer

des configurations spatiales fortement pénalisantes pour le solveur ; la situation est pire aux arêtes ou aux coins du domaine où une cellule peut n'avoir qu'un ou deux voisins seulement. Outre la dégradation de la précision, cela peut entraîner de sérieux problèmes de stabilité numérique.

... d'où des difficultés de convergence et des temps de calculs élevés

Obtenir une précision et des propriétés de convergence convenables avec un maillage tétraédrique nécessite donc d'utiliser des techniques de discrétisation particulières, ainsi qu'un grand nombre de cellules. Ces deux caractéristiques ne correspondent pas à ce que l'on attend d'une solution de maillage optimale ; la première rend le code plus complexe, plus difficile à étendre et à maintenir, tandis que la seconde fait exploser les besoins en termes de ressources en mémoire et d'effort de calcul.

Les réponses apportées par le Maillage Polyédrique

Meilleure évaluation des flux et réduction de l'effort de convergence

Les polyèdres possèdent les mêmes avantages que les tétraèdres pour le maillage automatique, sans présenter les inconvénients qui viennent d'être cités. L'un des gros avantages des cellules polyédriques est qu'elles possèdent un plus grand nombre de plus proches voisins (typiquement une dizaine), de telle sorte que les gradients peuvent être évalués avec une bien meilleure précision (en utilisant les fonctions de base linéaire et l'information des plus proches voisins). Même dans les agencements les plus défavorables, sur les arêtes et dans les coins, une cellule polyédrique possèdera toujours suffisamment de plus proches voisins (au moins deux) pour atteindre une précision raisonnable à la fois sur l'estimation du gradient et celui de l'écoulement. L'augmentation du nombre de voisins entraîne celle des capacités de stockage et de calcul mais elle est largement compensée par le gain en précision, comme la suite va le démontrer.

Qualité et Robustesse dans les zones sensibles de l'écoulement

Les cellules polyédriques sont également moins sensibles aux déformations/étirements que les tétraèdres. De même, la génération de grille adaptée, combinée aux techniques d'optimisation offre une grande souplesse et de larges potentiels : les cellules peuvent être automatiquement fusionnées, divisées ou modifiées par l'introduction de points,

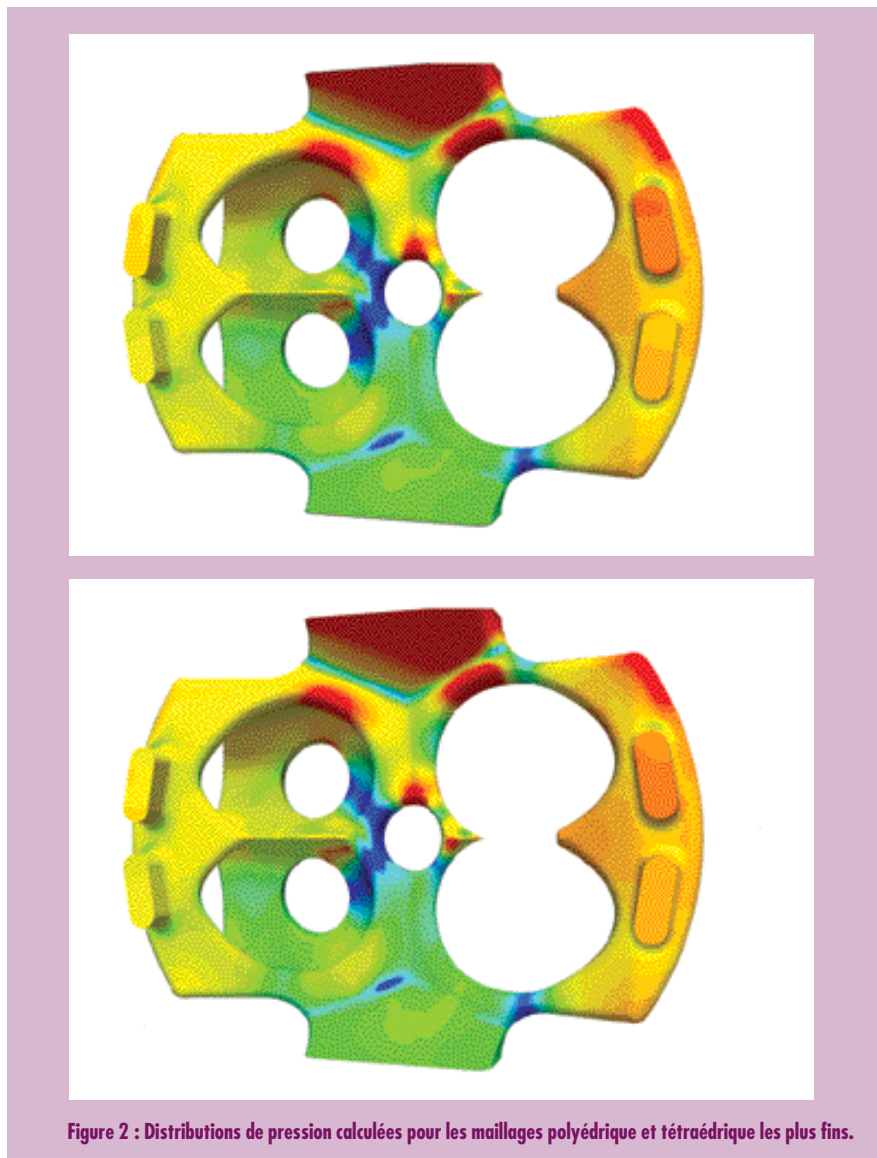


Figure 2 : Distributions de pression calculées pour les maillages polyédrique et tétraédrique les plus fins.

d'arêtes ou de faces additionnels. On observe ainsi des améliorations significatives de la qualité des maillages, bénéficiant aussi bien à l'efficacité du solveur qu'à la précision des solutions. Par ailleurs, de nombreuses situations qui requièrent des traitements complexes avec des maillages tétraédriques, sont rendues triviales en utilisant une topologie de cellules polyédriques ne nécessitant pas d'adaptation particulière au niveau du solveur. Ainsi, raffinement local, interfaces glissantes, surfaces périodiques, etc. certes créent des types de polyèdres particuliers, mais pour le solveur, ils sont tous topologiquement identiques et subissent les mêmes traitements.

Applications et Validations des Polyèdres

Les cellules polyédriques sont particulièrement intéressantes pour l'étude d'écoulements de recirculation. Des tests ont montré, par exemple, que dans le cas d'un écoulement au sein d'une cavité cubique à paroi mobile (problème classique de la cavité entraînée), un nombre beaucoup moins important de polyèdres est nécessaire pour une précision donnée, même par comparaison aux maillages hexaédriques cartésiens (qui, pourtant seraient les éléments naturellement

indiqués pour un domaine rectangulaire). Ceci s'explique simplement par le fait qu'une cellule hexaédrique ne possède que trois directions d'écoulement optimales (direction normale à chacun des trois ensembles de faces parallèles et pour lesquelles la précision est maximale) ; or, pour un polyèdre à douze faces, il y a six directions optimales, qui combinées avec un plus grand nombre de plus proches voisins, conduisent à des solutions plus précises avec un nombre moins important de cellules. Une analyse plus détaillée des propriétés des différents types de maillages ainsi que des résultats de tests ont été publiés dans un article de Milovan Peric (2004) (1).

Des temps de calculs divisés par un facteur 5 à 10

De nombreux tests pratiques ont permis de démontrer que dans le cas de maillages polyédriques, le nombre de cellules nécessaires est réduit d'un facteur 4, la capacité mémoire d'un facteur 2 et les temps de calcul d'un facteur 5 à 10, comparativement à l'utilisation de maillages tétraédriques, et ce, pour des précisions et des solutions physiques identiques. De plus, les convergences sur les maillages polyédriques sont nettement améliorées. En outre, elles ne nécessitent pas d'ajustements particuliers des propriétés du solveur. L'exemple présenté dans la suite illustre cet avantage.

Exemple d'application : circuit de refroidissement d'un moteur

Le cas étudié concerne le circuit d'eau de refroidissement d'un moteur ; la grandeur observée est la perte de charge entre l'entrée et la sortie. Les calculs ont été réalisés sur six maillages polyédriques et six maillages tétraé-

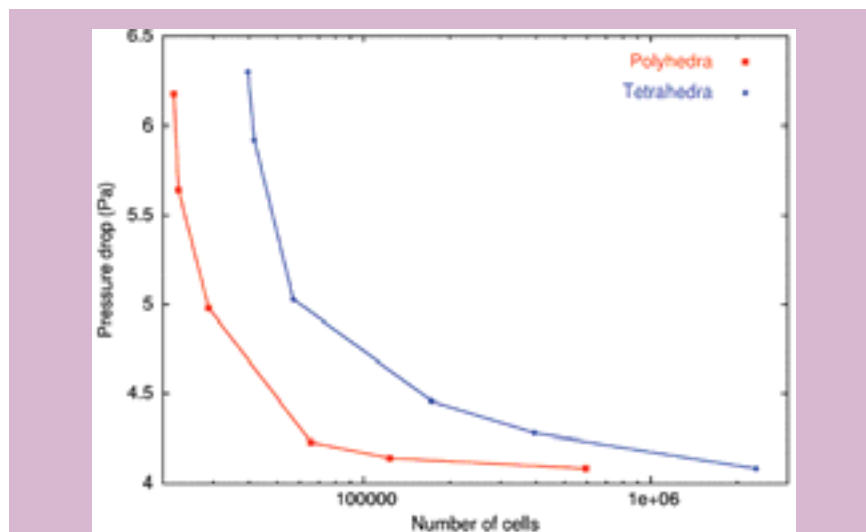


Figure 3 : Estimation de la perte de charge entre l'entrée et la sortie d'un circuit de refroidissement moteur, avec différentes tailles de maillages polyédriques et tétraédriques.

driques, avec un nombre de cellules variant entre 21 872 et 593 888 pour les maillages polyédriques et entre 39 587 et 2 322 106 pour les maillages tétraédriques. Des couches de prismes ont été systématiquement générées le long des parois. La figure 1 donne un aperçu du maillage polyédrique. La figure 2 représente les distributions de pression calculées pour les maillages polyédrique et tétraédrique les plus fins. Etant donné la finesse de ces deux maillages, on observe des résultats très proches. La sensibilité de la perte de charge calculée en fonction du type de maillage est représentée en figure 3. L'ensemble des résultats obtenus converge, conformément aux attentes, vers une valeur asymptotique indépendante du type et de la finesse du maillage. Dans tous les cas, la méthode de discrétisation et de résolution utilisée est la même : schéma décentré du second ordre pour les flux convectifs.

On constate que, à taille de maillage équivalente (en nombre de cellules), le résultat obtenu avec les polyèdres est toujours plus précis que le résultat obtenu avec des tétraèdres. En fait, on observe même que le résultat obtenu avec un maillage polyédrique à

65 513 éléments s'avère légèrement plus précis que le résultat obtenu avec un maillage tétraédrique à 393 273 éléments (soit environ 6 fois plus d'éléments). Le temps de calcul sur le maillage polyédrique est environ dix fois plus court, et ce, avec une précision équivalente sur la solution.

Disponibilité de la technologie Polyèdre

Des conclusions similaires ont pu être tirées à l'issue des nombreux autres tests effectués, confortant CD-adapco dans sa décision d'adopter cette nouvelle technologie. Avec la généralisation de cet outil de maillage polyédrique, actuellement disponible et intégré dans les environnements CAO (CATIA v5, Pro-Engineer Wildfire, UG-NX et SolidWorks), le maillage polyédrique est sans doute destiné à devenir le futur standard des applications d'ingénierie assistée par ordinateur. ■

Article de Milovan Peric et Stephen Ferguson, CD-adapco

Traduit de l'anglais par Cad-magazine

1 M. Peric : Flow simulation using control volumes of arbitrary polyhedral shape, ERCOFTAC Bulletin, N° 62, September 2004.