

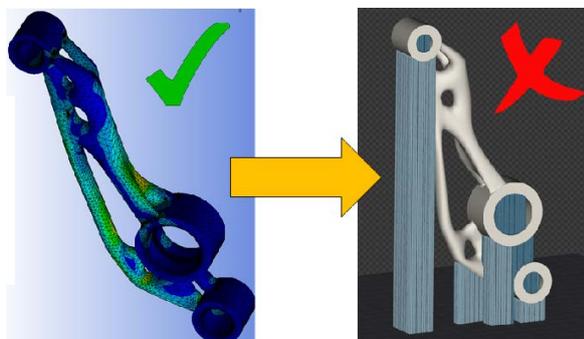
Conception pour la fabrication additive métallique - un guide pour les débutants

La fabrication additive (AM) nous donne une marge de liberté considérable pour créer des composants dotés de formes libres et de caractéristiques complexes, directement à partir de la CAO et sans la nécessité d'outillage coûteux. Il serait peu pratique, voire impossible, de produire ces conceptions complexes de façon classique. Les composants additifs sont souvent plus légers, plus efficaces et mieux adaptés à leur application.

Cette flexibilité ne nous donne toutefois pas une totale liberté au moment de concevoir les formes que nous pouvons imaginer. Ou tout du moins si nous souhaitons les fabriquer à un coût raisonnable.



Comme tout procédé de fabrication, les technologies AM ont leurs possibilités et leurs limites. Par exemple, dans le cas de la fusion laser sur lit de poudre, des supports perdus peuvent se révéler nécessaires pour permettre la fabrication de pièces conçues avec des éléments de porte-à-faux, qui sont fabriquées au-dessus de poudre non fondue. Ces supports augmentent le temps de fabrication, consomment de la matière additionnelle et exigent un post-traitement supplémentaire pour leur retrait.



Les pièces fonctionnellement optimisées qui n'ont pas fait l'objet d'une reconception ciblée AM peuvent exiger de nombreux supports et se révéler inadaptées à la fabrication.

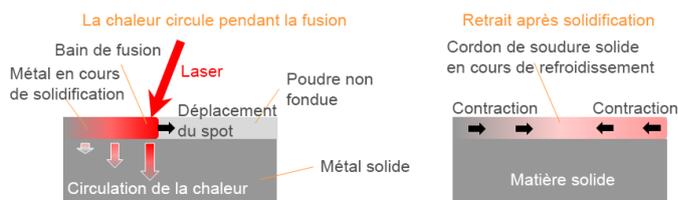
La conception pour la fabrication additive (DfAM) est donc cruciale pour produire des pièces qui combinent des performances exceptionnelles avec une fabrication additive à la fois pratique et rentable. La relation intime entre optimisation fonctionnelle et conception pour le procédé est abordée dans l'article [L'optimisation topologique est-elle vraiment optimale ?](#)

Cet article étudie les facteurs clés qui influencent le taux de réussite et la productivité des fabrications AM, et explique certaines des lignes directrices cruciales que les concepteurs doivent suivre pour créer des composants de production efficaces.

Facteur numéro 1 - contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont un résultat naturel du chauffage et du refroidissement rapides qui sont inhérents au procédé de fusion laser sur lit de poudre. Chaque nouvelle couche est créée en déplaçant le laser focalisé sur le lit, en faisant fondre la couche de poudre supérieure et en la fusionnant avec la couche de dessous. La chaleur circule du bain de fusion chaud vers le métal solide de dessous, puis le métal fondu refroidit et se solidifie. Toutes ces opérations se succèdent rapidement, en à peine quelques microsecondes.

Une nouvelle couche de métal se contracte immédiatement après sa solidification et son refroidissement sur la couche de dessous. Le nouveau métal est contraint par la structure solide de dessous, si bien que sa contraction crée des forces de cisaillement entre les couches.



Fusion laser d'un nouveau cordon de soudure au-dessus d'un substrat solide (à gauche). La poudre est fondue au fur et à mesure que le laser se déplace suivant le vecteur de numérisation, puis refroidit par conduction de la chaleur dans le métal solide en dessous. Après solidification, le métal en cours de refroidissement se contracte (à droite), générant des forces de cisaillement entre lui et la couche de dessous.

Les contraintes résiduelles peuvent être destructives. Au fur et à mesure de l'ajout de couches les unes sur les autres, les contraintes s'accumulent et peuvent entraîner une distorsion de la pièce : ses bords peuvent s'incurver et la pièce peut se détacher de ses supports.



Dans certains cas plus extrêmes, la contrainte peut dépasser la résistance de la pièce et conduire à une rupture catastrophique du composant ou à une distorsion du plateau de fabrication.



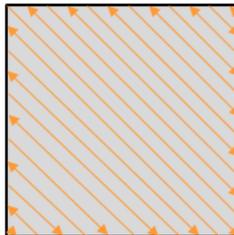
Ces effets sont plus prononcés dans les pièces ayant des sections élevées, car celles-ci ont tendance à avoir des pistes de soudure plus longues avec davantage de distance pour l'action des forces de cisaillement.

Minimisation des contraintes résiduelles

Une façon d'aborder ce problème consiste à changer de stratégie de numérisation, en choisissant une méthode mieux adaptée à la géométrie de la pièce. Lors du remplissage du centre de la pièce, activité dénommée « hachurage », le laser est généralement déplacé d'avant en arrière. Le motif choisi joue sur la longueur des vecteurs de numérisation et donc sur le niveau de contrainte qui est susceptible de s'accumuler dans le composant. Les stratégies avec des vecteurs de numérisation plus courts génèrent moins de contraintes résiduelles :

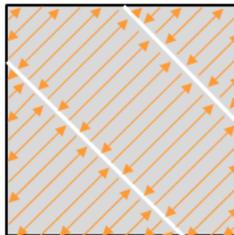
Motif d'hachurage simple

- Rotation de 67° après chaque couche
- Vitesse de fabrication plus élevée
- Augmente les contraintes résiduelles
- Convient aux éléments petits et fins



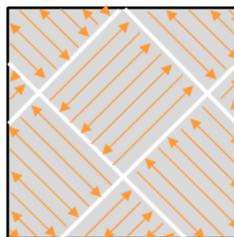
Motif d'hachurage en bandes

- Distribution homogène des contraintes résiduelles
- Convient aux grandes pièces
- Vitesse de fabrication plus élevée qu'avec le motif en échiquier



Motif d'hachurage en échiquier

- Chaque couche est divisée en îlots de 5 mm sur 5
- Rotation de 67° du motif entier et de chaque îlot après chaque couche
- Distribution homogène des contraintes résiduelles
- Convient aux grandes pièces



Figures ci-dessus : stratégies de numérisation et leur adéquation à différents types de pièce. Les deux stratégies les plus communes sont l'hachurage « simple » pour les pièces à parois minces (technique également connue sous le nom de *tramage*) et l'hachurage en « bandes » pour les pièces à sections plus épaisses. Les techniques en « échiquier » ou en « îlot » peuvent également se révéler efficaces. Les numérisations en bande et en échiquier raccourcissent les lignes de numérisation individuelles, réduisant ainsi l'accumulation de contraintes résiduelles.

Il est également possible de faire pivoter l'orientation des vecteurs de numérisation d'une couche à la suivante, afin que les contraintes ne soient pas toutes alignées dans le même plan. Une rotation de 67 degrés est généralement utilisée entre chaque couche pour garantir un maximum de couches réalisées avant que la direction de numérisation ne soit exactement répétée. Le chauffage du plateau de fabrication est une autre technique utilisée pour réduire les contraintes résiduelles, tandis que les traitements thermiques après procédé peuvent également libérer les contraintes qui se sont accumulées.

Conseils de conception relatifs aux contraintes résiduelles

Pour éliminer les contraintes résiduelles :

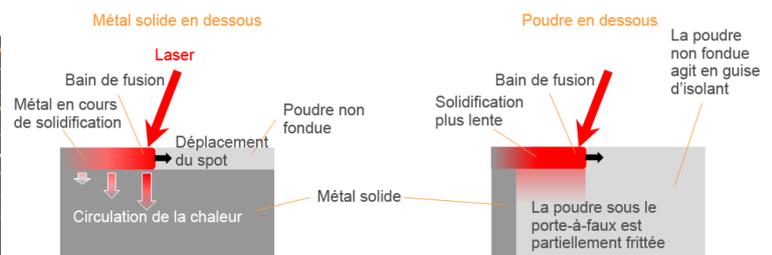
- Éviter les **surfaces de grandes dimensions fondues de manière ininterrompue**.
- Éviter les **variations de sections**.
- Les **fabrications hybrides** intègrent une plaque de base plus épaisse dans les pièces AM.
- Utiliser des **plateaux de fabrication plus épais** quand les contraintes risquent d'être élevées.
- Sélectionner une **stratégie de numérisation appropriée**.

Facteur numéro 2 - orientation

Quel que soit le procédé de fabrication additive, la direction de fabrication est toujours définie suivant l'axe Z, c'est-à-dire l'axe vertical par rapport au plateau de fabrication. Il faut toutefois noter que l'orientation de fabrication n'est pas toujours l'orientation d'utilisation générale. Elle doit être choisie pour produire la fabrication la plus stable avec un apport minime voire inexistant de matière de support.

Porte-à-faux et procédé de fusion

Dans les processus sur lit de poudre, où les formes sont fabriquées couche par couche, la relation entre les couches est importante. Chaque fois qu'une couche est fondue, elle s'appuie sur la couche de dessous qui sert de support physique et de voie d'évacuation de la chaleur.



Une fusion au-dessus d'un métal solide permet un refroidissement rapide (à gauche). Quand la fusion se produit dans une région en porte-à-faux au-dessus de poudre non fondue, le refroidissement est beaucoup plus long et de la matière supplémentaire non souhaitée peut s'attacher à la surface inférieure du composant.

Quand le laser fait fondre la poudre dans une région où la couche de dessous est un métal solide, la chaleur circule du bain de fusion vers la structure située au-dessous, en faisant refondre partiellement et en créant une soudure résistante. Après le retrait de la source laser, l'évacuation efficace de la chaleur permet aussi une solidification plus rapide du bain de fusion.

Quand des éléments de composant sont en porte-à-faux par rapport à ceux de dessous, au moins une partie de la zone sous le bain de fusion consiste en une poudre non fondue. Comme cette poudre est beaucoup moins conductrice thermique que le métal solide, la chaleur du bain de fusion est conservée plus longtemps, d'où un frittage accru de la

poudre tout autour. Résultat, de la matière supplémentaire peut être attachée à la surface inférieure des régions en porte-à-faux, si bien que les porte-à-faux peuvent présenter à la fois des surfaces déformées et une finition rugueuse.

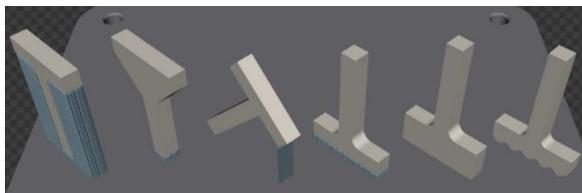
Options d'orientation

En général, les porte-à-faux de moins de 45 degrés par rapport au plateau de fabrication nécessitent un support.

Les surfaces en porte-à-faux sont désignées comme des peaux inférieures. Elles présentent généralement une finition de surface plus rugueuse que les parois verticales et les surfaces orientées vers le haut. Cet effet est dû frittage partiel de la poudre sous le porte-à-faux et résulte du refroidissement plus lent du bain de fusion.

Les pièces peuvent souvent être fabriquées avec de multiples orientations. Le choix de l'orientation doit idéalement permettre à la pièce d'être autoportante, de manière à minimiser les coûts de fabrication et le post-traitement.

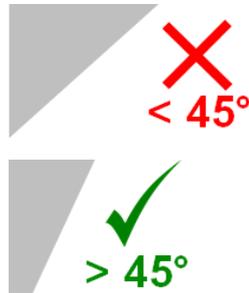
« Prendre en compte l'orientation de la fabrication à l'étape de conception est l'un des principes fondamentaux de la DfAM »



Généralement, de nombreuses orientations sont possibles pour la fabrication d'un composant. Le choix de l'orientation a un fort impact sur la quantité de déchets de support et sur le post-traitement requis.

De gauche à droite :

- Porte-à-faux de grandes dimensions exigeant une quantité importante de matière de support (en bleu).
- Conception modifiée avec ajout de matière en forme de cône pour réduire les supports, avec en conséquence une augmentation de la masse de la pièce et la possible nécessité d'appliquer un usinage ou une électroérosion après procédé.
- Inclinaison de la pièce à 45 degrés. La pièce devient pratiquement autoportante, à l'exception d'un minimum local (voir ci-après pour plus de détails). Les peaux inférieures et supérieures présenteront différentes rugosités superficielles.
- Retournement de la pièce avec supports courts sous la face inférieure : le temps de fabrication est plus court, mais une finition après procédé de la face supportée devient nécessaire.
- Fixation de la pièce au substrat avec une surépaisseur retirée par électroérosion. Avec cette stratégie, les contraintes résiduelles peuvent être un problème.
- L'approche est similaire, mais avec des régions de fixation plus petites pour réduire l'accumulation de contraintes. Il s'agit probablement de la conception la plus efficace d'un point de vue de la fabrication.

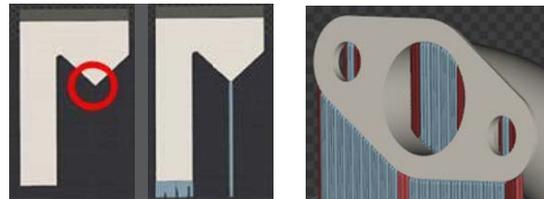


- Une dernière alternative (non illustrée) consiste à poser la pièce à plat sur le plateau. Cette approche réduit la hauteur de fabrication, mais limite également le nombre de pièces qui peuvent être imbriquées sur le plateau de fabrication et est sujette à de plus fortes contraintes résiduelles.

Il est conseillé d'évaluer toute une gamme d'orientations de fabrication au moyen d'un logiciel pour préparation de fabrication à un stade précoce du processus de conception des composants afin d'établir quelle est la plus prometteuse. Une fois la décision prise, la conception détaillée peut se poursuivre sur cette base.

Minima locaux

Les minima locaux correspondent aux régions de la pièce qui ne sont pas connectées à la couche de dessous. Ces régions nécessitent un support pour les ancrer pendant la fabrication. Si la fabrication commence sans une structure de support au-dessous, la première couche de fabrication sera vraisemblablement déplacée par le racleur lors du dosage de la couche suivante, conduisant à une fabrication défectueuse.

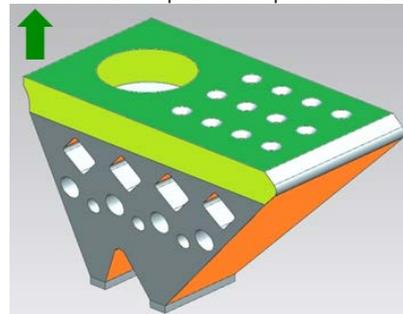


Certains minima locaux sont évidents, comme sur l'exemple illustré ci-dessus. Ils peuvent aussi apparaître en haut d'orifices latéraux et inclinés, à l'intersection avec le bord de la pièce (voir ci-dessus).

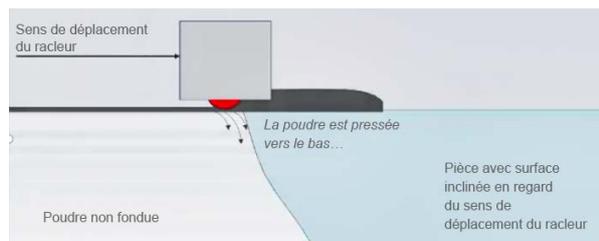
L'objectif est d'éliminer si possible les minima locaux afin de minimiser les supports.

Orientation des éléments

Comme mentionné précédemment, les peaux inférieures ont tendance à avoir une finition de surface de qualité inférieure. Pour produire des éléments détaillés avec la meilleure précision, il est préférable de les orienter sur la surface supérieure de la pièce, désignée comme peau supérieure. Les éléments détaillés qui sont insérés dans des peaux inférieures sont enclins à pâtir d'une perte de définition.



Un autre aspect à prendre en compte est l'orientation du composant par rapport au racleur de dosage. Quand une nouvelle couche de poudre est appliquée et que le racleur la pousse sur le lit, la poudre est progressivement pressée sous le racleur pour créer la nouvelle couche fortement tassée.

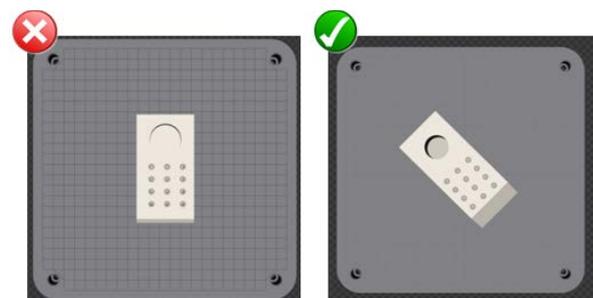


Interaction entre le racleur de dosage et le bord incliné d'un composant.

Une onde de pression est ainsi créée dans le lit de poudre quand la matière est compressée vers le bas. Celle-ci peut interagir avec des surfaces du composant qui sont inclinées vers le racleur, forçant la poudre vers le bas tout en poussant le bord avant du composant vers le haut. Le risque est que la pièce accroche ainsi le racleur et que la fabrication qui en découle soit défectueuse. Un racleur flexible peut toutefois réduire cet effet.

Si possible, les supports et les bords inclinés doivent donc être orientés à l'opposé de la direction du racleur. En faisant pivoter la pièce, l'onde de pression frappe la pièce suivant un angle oblique, réduisant ainsi la probabilité de distorsion.

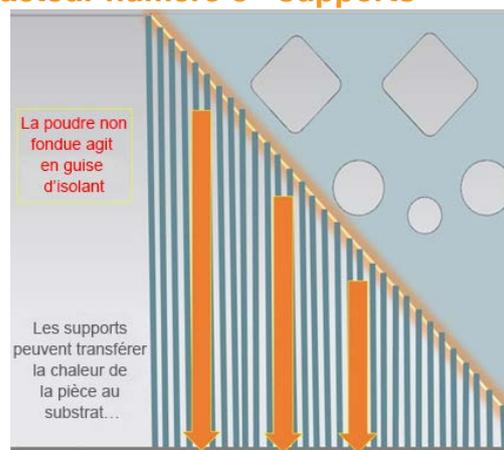
Si l'alignement en rotation ne peut pas être modifié ou si la pièce est symétrique en rotation, des supports peuvent être nécessaires, tout comme un possible usinage après procédé sur la face concernée.



Conseils de conception relatifs à l'orientation

- L'orientation de fabrication d'une pièce **conçue** pour l'AM doit être **évidente**.
- L'objectif des concepteurs est de créer des conceptions **autoportantes**.
- La **réussite de la fabrication** est la première préoccupation.
- Les **contraintes résiduelles** et la **finition de surface** sont également des facteurs clés concernés par l'orientation.
- L'orientation joue sur le **temps de fabrication et les coûts**.
- Les **géométries complexes sont difficiles à orienter** : il existe souvent un compromis entre qualité de surface, détails, temps de fabrication/coût et structures de support.
- Les concepteurs doivent évaluer les facteurs concurrentiels pour définir l'orientation.

Facteur numéro 3 - supports



Comme mentionné précédemment, il est vivement déconseillé de s'appuyer sur des supports pour résoudre un problème d'orientation. Alors que l'on peut tolérer un temps de fabrication supplémentaire et un post-traitement dans le cadre de la fabrication d'un prototype, certains déchets sont inacceptables dans la production de pièces AM. Un recours excessif aux supports est un indicateur d'une géométrie de pièce « marginale », avec de potentielles implications concernant le rendement de fabrication.

Objectifs des supports

S'il faudrait minimiser l'emploi de supports de par leur conception, il n'est pas toujours possible de tous les éliminer. Les supports ont trois fonctions principales :

Matière isolée : les supports sont utilisés pour « ancrer » la matière qui n'est pas connectée aux couches précédentes (si le porte-à-faux est inférieur à 45° par rapport au plateau de fabrication ou si l'élément est un minimum local). Il est préférable d'intégrer des structures de support dans la conception du composant.

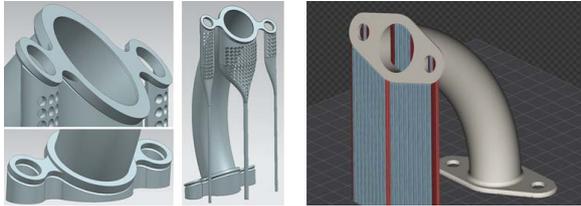
Contraintes résiduelles : la conception doit atténuer les contraintes résiduelles dans la fabrication, en évitant les bords coupants et les zones de matériau de grandes dimensions fabriquées directement sur le plateau de fabrication. Quand cela n'est pas possible, des supports peuvent être appliqués pour opposer des contraintes dans la pièce pour arrêter le décollement de matière du plateau de fabrication. Cela n'est pas recommandé pour les fabrications de production.

Dissipation de chaleur : la poudre non fondue est isolante. Les supports transfèrent de la chaleur à l'opposé des régions de peau inférieure et évitent une combustion, une fusion excessive, une distorsion et une décoloration, en particulier sur les peaux inférieures en regard de la direction du racleur. Il est possible de minimiser ces effets en faisant pivoter la pièce par rapport au racleur.

Supports primaires et secondaires

Les supports primaires sont ceux qui sont développés dans l'environnement de CAO conjointement avec le composant

et qui sont conçus comme des structures perdues qui seront retirées une fois la fabrication terminée. Les supports secondaires sont ceux qui sont générés dans un logiciel pour préparation de fabrication.



Supports primaires, développés par CAO (à gauche) et supports secondaires, développés avec un logiciel pour préparation de fabrication (à droite).

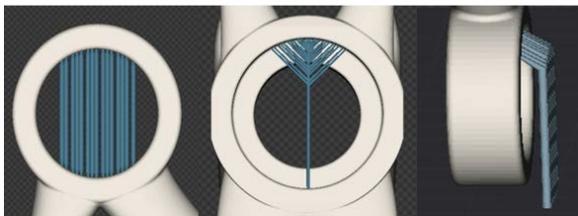
Les supports primaires pleins apportent un meilleur contrôle. Ils peuvent être importés dans le logiciel pour préparation de fabrication (sous la forme de fichiers STL) ou conçus avec le corps principal de la pièce. Ils peuvent être obtenus par l'intermédiaire de paramètres avec un contrôle de révision complet. Une analyse de contraintes par éléments finis peut aussi être réalisée. Il est également possible de concevoir et simuler des supports primaires qui dissipent la chaleur de façon contrôlée.

Les supports secondaires créés dans le logiciel pour préparation de fabrication peuvent aussi être gérés par l'intermédiaire de paramètres, mais sans traçabilité ni répétabilité. Il sera peut-être nécessaire de les recréer si la conception de la pièce est modifiée.

Supports simples

Supports en arbre

Supports inclinés

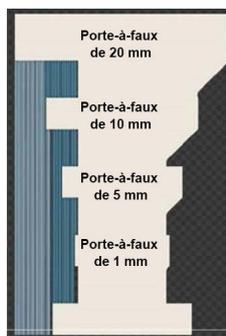


Types de supports secondaires, générés dans un logiciel pour préparation de fabrication. Les supports doivent être sélectionnés de manière à minimiser le temps de fabrication et les coûts de post-traitement.

La conception hybride de supports tire parti de la conception de CAO et du logiciel pour préparation de fabrication pour obtenir une résolution optimale.

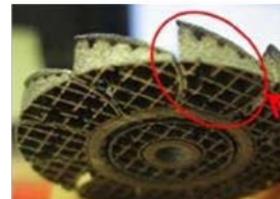
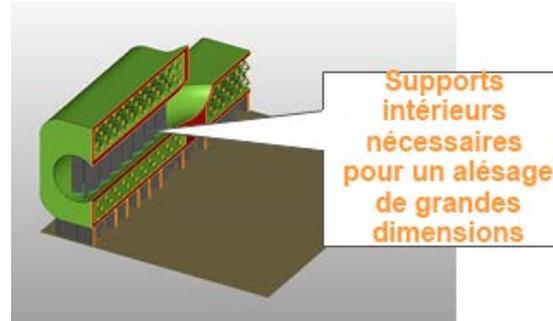
Congés et chanfreins

Bien que les porte-à-faux horizontaux de 0,3 à 1 mm soient autoportants, il est déconseillé de les utiliser. Par ailleurs, il est absolument nécessaire de reconcevoir ou de supporter les porte-à-faux de plus de 1 mm. Il est possible d'ajouter des congés et des chanfreins aux composants pour éliminer les porte-à-faux (voir ci-contre).



Défis liés à l'enlèvement des supports

Les supports situés à l'intérieur d'orifices et de tubes peuvent être difficiles à enlever et peuvent exiger un usinage postérieur. De même, les supports trop petits peuvent provoquer des difficultés. Si la géométrie de la pièce est plus faible que le support, il existe un risque élevé d'endommagement de la pièce pendant le post-traitement.



La pièce est trop petite et fragile pour rester attaché pendant le retrait de la matière de support

Les supports peuvent être difficiles à enlever sans endommager la pièce.

Exemple d'orientation pour minimiser les supports

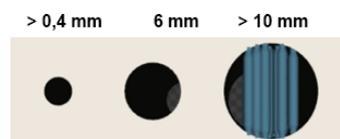
✓ L'orientation verticale permet une fabrication directement sur le plateau de fabrication avec une surépaisseur d'usinage supplémentaire. Les orifices ont plus de chances d'être circulaires. Le nombre de supports est réduit au minimum et le taux de réussite est élevé.

! L'orientation inclinée peut réduire le volume de support nécessaires et évite la matière piégée. Mais elle peut donner lieu à des orifices elliptiques.

✗ L'orientation horizontale occupe davantage d'espace et est celle qui exige le plus de supports. Les supports à l'intérieur des orifices sont difficiles à enlever. Les orifices ont moins de chances d'être circulaires.

Détails horizontaux - support ou reconception

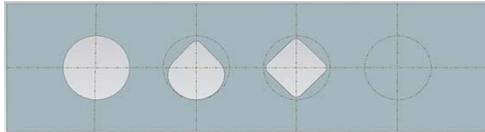
Les orifices latéraux qui débouchent sur les côtés de pièces peuvent également exiger des supports. La taille minimale d'un orifice sensible à la fabrication sur la plupart des machines laser sur lit de poudre est de 0,4 mm.



Les orifices et les tubes dont le diamètre est supérieur à 10 mm nécessitent un support central et devraient faire l'objet d'une reconception. Les orifices dont la taille est comprise dans cet intervalle peuvent être produits sans supports, mais ils subiront probablement une distorsion sur leurs surfaces de peau inférieure en raison d'un refroidissement lent du bain de fusion au-dessus du porte-à-faux.

Comme il est peu probable que les orifices soient parfaitement ronds, il est souvent judicieux de modifier leur forme afin qu'ils deviennent autoportants. Dans certains cas, une forme de goutte ou de losange peut être acceptable pour l'élément fini. Ces deux profils peuvent être utilisés pour les canaux de fluide en offrant des performances hydrauliques similaires, bien qu'une forme de losange apporte une résistance nettement supérieure aux forces de pression.

Dans d'autres cas, quand un orifice rond de précision est essentiel, un usinage après procédé sera nécessaire. Les losanges permettent d'obtenir des trous guides symétriques pour le fraisage et à cet égard, conviennent mieux que les gouttes. Dans de nombreux cas, la solution la plus judicieuse est de remplir l'orifice puis d'usiner le volume plein.



Possibilités pour les orifices latéraux (de gauche à droite) : fabrication à la taille voulue avec une certaine distorsion, création de formes de goutte ou de losange autoportantes avec une certaine surépaisseur en vue de l'usinage, ou usinage de l'entité à partir d'un volume plein.

Conseils de conception relatifs aux supports

- **Reconcevoir les orifices de plus de 10 mm** en forme de losange autoportant.
- Utiliser un rayon de chanfrein pour **éviter les supports hauts**.
- **Éliminer les zones en porte-à-faux de moins de 45°** par rapport au plateau de fabrication.
- Faire pivoter les peaux inférieures à **l'opposé de la direction du racleur**.
- **Usiner de petits éléments** après la fabrication.
- **Fabriquer directement sur le plateau de fabrication** avec surépaisseur d'usinage supplémentaire.
- Éliminer les **peaux inférieures horizontales** des surfaces.

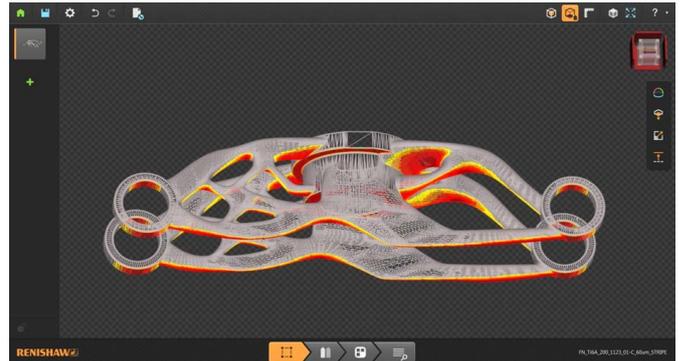
Facteur numéro 4 - optimisation

L'optimisation topologique et la conception générative sont de plus en plus utilisées pour concevoir des pièces efficaces. Les treillis offrent également des gains de poids avantageux. Grâce à sa capacité à produire des formes complexes, l'AM est idéale pour réaliser de telles conceptions.

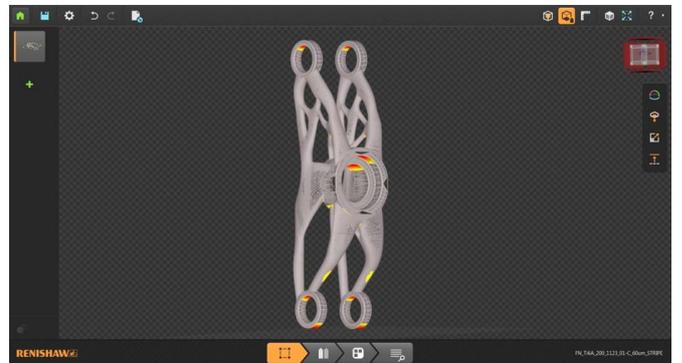


L'objectif principal de ces techniques d'optimisation est de conserver la résistance structurelle et la rigidité tout en éliminant la matière inutile. Les pièces optimisées ont souvent une apparence organique plus complexe. Il est important de noter qu'une pièce fonctionnellement optimisée peut ne pas convenir à l'AM, en particulier en termes d'orientation de fabrication.

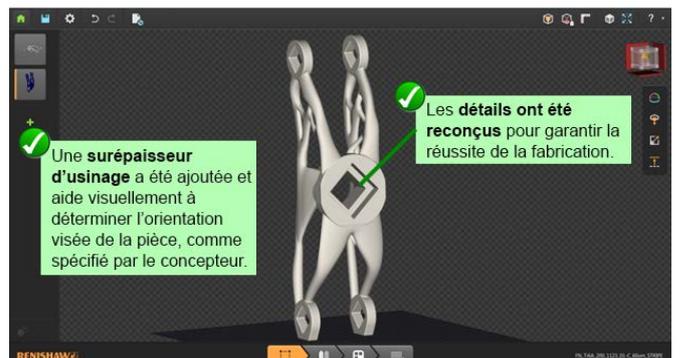
Par exemple, il apparaît clairement que la fabrication de cette pièce en l'orientant horizontalement nécessiterait de nombreux supports dans les régions en porte-à-faux indiquées en rouge.



Réorienter la pièce verticalement permet de réduire considérablement le nombre de supports requis. Les détails, comme les orifices circulaires, exigeront un support ou devront faire l'objet d'une reconception. Il faut également faire attention dans les angles des entretoises optimisées et les rayons de congés aux points de rencontre.



Une réévaluation de la pièce au stade de la conception a pris en compte l'orientation de fabrication, il apparaît donc clairement qu'il n'y a qu'une seule orientation possible pour cette pièce. Les détails tels que les orifices latéraux ont fait l'objet d'une reconception en vue de leur usinage ultérieur :



Conseils de conception relatifs à l'optimisation

- Appliquer des conseils d'épaisseur de paroi minimale.
- Identifier les surfaces critiques à usiner.
- Prendre en considération le positionnement et l'enlèvement des supports ou envisager une reconception pour éliminer la nécessité de recourir à des supports.
- Concevoir en fonction d'une orientation donnée et modifier les détails en conséquence.
- Déterminer, le cas échéant, si une finition de surface peut être obtenue.

Les concepteurs peuvent être amenés à combiner plusieurs techniques – optimisation topologique, pièces creuses, treillis (le cas échéant) – pour obtenir une conception efficace. L'orientation doit être un facteur clé après le réglage, la forme et le fonctionnement.

Résumé

La fabrication additive propose une grande liberté de conception pour produire des pièces efficaces et de haute performance. Mais la prise en compte des caractéristiques de procédés AM est essentielle à la fabrication de pièces de production avec un minimum de frais et de déchets.

L'intégration de la DfAM au processus de conception maximise la réussite de la fabrication et augmente la rentabilité du procédé AM. Par nécessité, les concepteurs doivent aborder le processus de fabrication additive de manière plus intelligente et compétente s'ils veulent être compétitifs.

À propos de l'auteur

Marc Saunders, Directeur des Applications AM

Marc Saunders affiche une expérience de plus de 25 ans dans la fabrication high tech. Lors de ses postes précédents chez Renishaw, il a joué un rôle clé dans le développement de la plate-forme primée d'usinage automatisé RAMTIC de l'entreprise et a apporté des solutions de métrologie clé en main aux clients dans le secteur de l'aérospatiale.

Marc gère le réseau mondial Renishaw de Centres de solutions de fabrication additive, permettant aux clients qui envisagent de déployer la fabrication additive comme processus de production d'acquérir une expérience pratique avec la technologie avant de s'engager dans une nouvelle installation.

www.renishaw.fr/additive

