

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 13.04.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 18.10.24 Bulletin 24/42.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : SAFRAN ADDITIVE MANUFACTU-
RING CAMPUS Société par actions simplifiée (SAS) —
FR.

72 Inventeur(s) : MAYI Yaasin et BETBEDER-LAÜQUE
Xavier, Roger.

73 Titulaire(s) : SAFRAN ADDITIVE MANUFACTURING
CAMPUS Société par actions simplifiée (SAS).

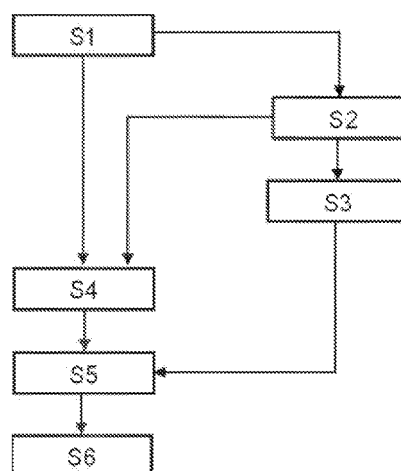
74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 Analyse thermique pour une pièce fabriquée par fabrication additive par l'étude des trajectoires d'outils.

57 Procédé de détermination du comportement ther-
mique d'une pièce en vue de production par fabrication ad-
ditive au moyen d'au moins un outil, comportant, pour un
ensemble de points d'une trajectoire dudit outil prévue pour
la production, des étapes de :

- détermination (S1) de valeurs d'un ensemble de pa-
ramètres primaires relatifs à la production par fabrication
additive ;
- détermination (S4, S5) de valeurs d'un ensemble ré-
duit de paramètres adimensionnés, en fonction des valeurs
de l'ensemble de paramètres primaires et d'une fonction de
corrélation liant les paramètres adimensionnés ;
- génération (S6) d'une carte thermique pour au moins
une couche de ladite pièce, en fonction desdits paramètres
adimensionnés, la carte thermique étant enregistrée sous
format numérique et associant une valeur représentative
d'une température en ces points.

Figure pour l'abrégé : Fig. 2



Description

Titre de l'invention : Analyse thermique pour une pièce fabriquée par fabrication additive par l'étude des trajectoires d'outils

DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention concerne la fabrication (ou impression) additive et en particulier la simulation et l'optimisation du comportement thermique d'une pièce produite par fabrication additive.
- [0002] La fabrication additive (FA), ou impression 3D, est une famille de procédés dans lesquels des pièces sont produites par ajouts successifs de couches de matériaux.
- [0003] Les pièces produites peuvent être de différentes natures, de différentes dimensions et de complexité variée. Certaines pièces doivent répondre en outre à des cahiers des charges stricts et peuvent faire l'objet de certifications. A titre d'exemples, dans le domaine aéronautique, la fabrication additive peut concerner des distributeurs haute ou basse pression pour turbomachines, des aubages redresseurs de turbomachines, des injecteurs, des carters, des échangeurs thermiques, des blocs hydrauliques, etc.
- [0004] De manière générale, on peut considérer tout procédé de fabrication additive par fusion ou consolidation de matière (métallique, polymère, céramique...) par applications successives ou simultanées d'une ou plusieurs sources de chaleur fournies par des outils suivant une trajectoire donnée. Ces outils peuvent en particulier être des lasers.
- [0005] Parmi les procédés actuellement disponibles, on peut notamment citer
- les procédés de frittage laser sur lit de poudre, tels que le frittage sélectif sous laser (« Selective Laser Sintering », SLS, en anglais),
 - les procédés de fusion laser sur lit de poudre, tels que par exemple la fusion laser sélective (« Selective Laser Melting », SLM, en anglais), la fusion par faisceau laser (« Laser Beam Melting », LBM), la fusion laser sur lit de poudre (« Laser Powder Bed Fusion », LPBF), le Frittage direct de métaux par laser (« Direct Metal Laser Sintering », DMLS), etc.
 - les procédés de fusion de lits de poudre par faisceau d'électrons, tels que la fusion par faisceau d'électrons (« Electron Beam Melting », EBM), la fusion par électrons sur lit de poudre (« Electron Powder Bed Fusion », EPBF), etc.
- [0006] En particulier, dans les procédés de fusion laser sur lit de poudre (SLM, LBM, LPBF, DMLS...), les pièces sont fabriquées par fusion laser et solidification d'une succession de couches de poudre.
- [0007] Pour chaque couche, un racleur étale un lit de poudre métallique d'épaisseur fixée. Ensuite un laser dont le déplacement est piloté vient fondre uniquement la surface cor-

respondant à la coupe de la pièce à construire, en balayant cette surface selon une trajectoire fixée par l'opérateur (voir plus loin). On nomme souvent « lasage » cette partie de l'opération. La poudre fondue se resolidifie après le passage du laser et la surface solide est ainsi créée. Le plateau est alors abaissé de l'épaisseur de la nouvelle couche de poudre qui sera étalée, et le processus est répété jusqu'à ce que la pièce soit complètement réalisée. La puissance, la vitesse et le plan de focalisation du laser sont contrôlés tout au long du processus. Ces paramètres déterminent la largeur et la profondeur de la zone fondue au passage du laser (appelé « cordon de lasage »).

- [0008] La trajectoire du laser est également fixée par l'opérateur. Cette trajectoire du laser est également nommée schéma, ou chemin, de lasage, schéma de scan ou encore stratégie de vectorisation. Cette trajectoire est prédéfinie lors de la phase de préparation à la fabrication (FAO pour « fabrication assisté par ordinateur »).
- [0009] L'état du matériau est fortement impacté par les cycles thermiques imposés par le passage du faisceau laser, et les refroidissements, successifs. Ces cycles thermiques peuvent ainsi provoquer différents défauts dans le matériau et la pièce en fabrication : porosité, fissuration, surface non plane, etc.
- [0010] Des propositions ont été faites pour déterminer le comportement thermique d'une pièce en cours de fabrication, notamment en amont de sa fabrication.
- [0011] Toutefois, les outils d'évaluation *a priori* du comportement thermique d'une pièce rencontrent des limites liées aux effets d'échelle associés aux procédés de fabrication additive, et notamment aux procédés de fusion laser sur lit de poudre tels que le procédé LPBF.
- [0012] Ainsi, il existe des outils numériques capables de simuler finement l'histoire thermique du procédé à l'échelle de quelques cordons, voire à l'échelle d'une couche, avec des temps de calcul associés relativement élevés (de quelques heures à quelques dizaines d'heures par couche et par pièce). Il existe également des outils qui permettent d'estimer en quelques heures les champs de température macroscopiques au cours de la fabrication, mais avec des hypothèses simplificatrices (par exemple source de chaleur homogène à l'échelle d'une couche) qui ne rendent pas compte des effets locaux que l'on souhaite analyser et ne permettent donc pas d'anticiper les anomalies du produit en cours de fabrication avec suffisamment de précision et de finesse.
- [0013] On peut citer à titre d'exemple la demande de brevet EP3318352 qui décrit une méthode de détection de zones de composants thermiquement critiques.
- [0014] Celle-ci présente notamment l'inconvénient de se baser sur la description géométrique de la pièce à fabriquer. Lorsque la pièce est volumineuse et complexe, les données descriptives peuvent devenir très lourdes à gérer et engendrer des temps de calcul incompatibles avec les contraintes industrielles. En outre, le fait de se baser sur la description géométrique d'une pièce implique nécessairement que la simulation

n'est valable que pour cette pièce et ne peut donc pas prendre correctement en compte les chemins de lasage lorsque plusieurs pièces sont fabriquées simultanément.

[0015] Par ailleurs, la stratégie d'apport d'énergie n'est pas considérée (chemin de lasage, présence éventuelle de plusieurs lasers, etc.). La modélisation thermique est donc très macroscopique et ne permet pas une prévision précise et efficiente des anomalies liées au comportement thermique de la pièce, en un temps de modélisation limité permettant une réduction des temps de cycle de modélisation et de fabrication.

[0016] Il existe donc un besoin d'améliorer les propositions actuelles de l'état de la technique.

Résumé de l'invention

[0017] À ces fins, selon un premier aspect, la présente invention peut être mise en œuvre par un procédé de détermination du comportement thermique d'une pièce en vue de production par fabrication additive au moyen d'au moins un outil, comportant, pour un ensemble de points d'une trajectoire dudit outil prévue pour ladite production, des étapes mises en œuvre par une unité de traitement d'un dispositif d'optimisation de :

- détermination de valeurs d'un ensemble de paramètres primaires relatifs à ladite production par fabrication additive ;
- détermination de valeurs d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés, en fonction des valeurs dudit ensemble de paramètres primaires et d'une fonction de corrélation liant lesdits paramètres adimensionnés ;
- génération d'une carte thermique pour au moins une couche de ladite pièce, en fonction desdits paramètres adimensionnés, ladite carte thermique étant enregistrée sous format numérique et associant une valeur représentative d'une température auxdits points

[0018] L'invention proposée ici n'exploite pas nécessairement le modèle géométrique de la ou des pièces analysées (donnée « lourde »), mais uniquement le ou l'ensemble des fichiers décrivant les trajectoires prises par le ou les outils durant la fabrication (donnée « légère »).

[0019] De ce fait, la méthode de calcul intègre fidèlement la séquence de fabrication de la ou des pièces fabriquées sans simplifier le mode de dépôt d'énergie (autrement dit, le mode d'élaboration exact des pièces est pris en compte), et permet de produire des analyses thermiques en des temps de calcul compatibles avec les contraintes industrielles. A titre d'exemple, un calcul de carte thermique représentant les zones de points chauds peut être obtenu en un temps d'environ une seconde par couche de poudre (pour un procédé de fusion laser sur lit de poudre).

[0020] Enfin, la méthode de calcul est dite « universelle », c'est-à-dire qu'elle s'adapte de façon auto-consistante aux conditions particulières des pièces analysées.

[0021] Suivant des modes de réalisation préférés, l'invention comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes qui peuvent être utilisées séparément ou en combinaison partielle entre elles ou en combinaison totale entre elles :

- ladite détermination de valeurs d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés comprend la détermination d'un sous-ensemble de paramètres adimensionnés à partir desdits paramètres primaires, et la détermination d'un paramètre adimensionné dépendant d'une élévation de température à partir dudit sous-ensemble et de la fonction de corrélation, ledit paramètre adimensionné dépendant d'une élévation de température étant inclus dans l'ensemble réduit de paramètres adimensionnés ainsi déterminé.
- ladite fonction de corrélation est estimée en faisant varier des valeurs pour les paramètres primaires dudit ensemble de paramètres primaires et en simulant une élévation de température associée.
- Lesdits paramètres primaires peuvent notamment être relatifs à ladite trajectoire prévue pour la production, et/ou au matériau utilisation pour cette production, et/ou audit au moins un outil.
- ledit au moins un outil est au moins un laser et lesdits paramètres primaires comprennent une irradiance dudit au moins un laser et/ou un temps d'exposition cumulé et/ou une durée de lasage et/ou une profondeur de matière dense et/ou une profondeur équivalente et/ou une conductivité thermique et/ou une diffusivité thermique.
- lesdits paramètres adimensionnés, π_1 , π_2 , π_3 sont au nombre de 3, et s'expriment :

[Math.1]

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta T_M^*}{T_{1D}} \\ \pi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \end{cases}$$

[0022] avec $T_{1D} = I_{abs} \delta / k \sqrt{\pi}$, ΔT_M^* étant ladite valeur représentant une température en un point dudit ensemble, I_{abs} étant ladite irradiance, δ étant une longueur caractéristique de diffusion dépendant de ladite diffusivité thermique, k étant ladite conductivité thermique, b' étant ladite profondeur équivalente, t_{expo}^{cumul} étant ledit temps d'exposition cumulé, et t_{scan} étant ladite durée de lasage.

- lesdits paramètres primaires comprennent en outre une vitesse de lasage et un rayon caractéristique dudit outil.
- lesdits paramètres adimensionnés, π_1 , π_2 , π_3 , π_4 , π_5 sont au nombre de 5, et

s'expriment :

[Math.2]

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta T_M^*}{T_{ID}} \\ \pi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \\ \pi_4 = \frac{t_{scan} V_L}{\delta} \\ \pi_5 = \frac{R_L}{\delta} \end{array} \right.$$

[0023] avec $T_{ID} = I_{abs} \delta / k \sqrt{\pi}$, ΔT_M^* étant ladite valeur représentant une température en un point dudit ensemble, I_{abs} étant ladite irradianc, δ étant une longueur caractéristique de diffusion dépendant de ladite diffusivité thermique, k étant ladite conductivité thermique, b' étant ladite profondeur équivalente, t_{expo}^{cumul} étant ledit temps d'exposition cumulé, t_{scan} étant ladite durée de lasage, R_L étant ledit rayon caractéristique et V_L étant ladite vitesse de lasage.

[0024] Selon un autre aspect, l'invention concerne un procédé de production d'une pièce par fabrication additive au moyen d'une machine pour la fabrication additive, comportant des étapes de

- détermination d'une carte thermique par le procédé tel que précédemment décrit,
- détermination d'au moins une zone à risque au sein de ladite carte thermique,
- adaptation d'au moins un paramètre de ladite machine en fonction de ladite au moins une zone à risque, ledit au moins un paramètre pouvant être un paramètre de ladite trajectoire.

[0025] Selon un autre aspect, l'invention concerne un programme d'ordinateur comportant des instructions pour mettre en œuvre un procédé tel que précédemment décrit.

[0026] Selon un autre aspect, l'invention concerne un système comportant une machine (200) pour la production par fabrication additive au moyen d'au moins un outil, adaptée pour produire une pièce à partir d'une trajectoire dudit outil, et comportant un dispositif d'optimisation configuré pour la mise en œuvre d'étapes de :

- détermination de valeurs d'un ensemble de paramètres primaires relatifs à ladite production par fabrication additive ;
- détermination de valeurs d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés, en fonction des valeurs dudit ensemble de paramètres primaires et d'une fonction de corrélation liant lesdits paramètres adimensionnés ;
- génération d'une carte thermique pour au moins une couche de ladite pièce,

en fonction desdits paramètres adimensionnés, ladite carte thermique étant enregistrée sous format numérique et associant une valeur représentative d'une température auxdits points

[0027] Selon un mode de réalisation, ladite machine est adaptée pour produire une pièce parmi un distributeur haute ou basse pression pour turbomachine, un aubage redresseur de turbomachine, un injecteur, un carter, un échangeur thermique, un bloc hydrolique...

[0028] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui suit d'un mode de réalisation préféré de l'invention, donnée à titre d'exemple et en référence aux dessins annexés.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0029] Les dessins annexés illustrent l'invention :

La [Fig.1] illustre schématiquement un système selon un mode de réalisation de l'invention, comportant une machine pour la production par fabrication additive.

[0030] La [Fig.2] représente schématiquement un organigramme des étapes d'un procédé selon un mode de réalisation de l'invention.

[0031] Les [Fig.3a] et [Fig.3b] illustrent des exemples de volumes élémentaires représentatifs.

La [Fig.4] illustre très schématiquement une carte thermique.

La [Fig.5] illustre un exemple de fonction de corrélation.

[0032] DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

[0033] Le procédé proposé s'applique aux diverses techniques d'impression ou fabrication additive (ou impression 3D). D'une façon générale, la fabrication additive comporte le parcours d'un ou plusieurs outils le long d'une trajectoire prédéfinie (pouvant être appelée « trajectoire d'outil ») afin de fournir une source ponctuelle de chaleur sur un matériau.

[0034] Le procédé s'applique en particulier aux procédés de fusion laser sur lit de poudre, et plus spécifiquement, mais non exclusivement, à la fusion laser sur lit de poudre (« Laser Powder Bed Fusion », LPBF).

[0035] Ce procédé permet de fabriquer des pièces à partir de la fusion sélective de couches de lit de poudre empilées successivement. Il permet la fabrication de pièces complexes plus légères comme les structures fines (de type lattice), et s'applique en conséquence au domaine de l'aéronautique.

[0036] Il est constaté que l'état métallurgique et mécanique (phases en présence, contraintes résiduelles, etc.), la santé du matériau (taux de porosité, fissuration, etc.), l'état de la surface, et donc, les propriétés thermomécaniques des pièces qui en découlent sont déterminées au premier ordre par les cycles thermiques qu'impose le procédé de fa-

brication additive.

- [0037] Il est donc primordial de comprendre l'influence des cycles de chauffe/refroidissement sur la thermique observée dans les pièces afin de pouvoir, le cas échéant, optimiser les paramètres de fabrication pour en supprimer, ou réduire, les effets néfastes.
- [0038] Dans le cas particulier d'un procédé LPBF, les cycles thermiques sont pilotés par les chemins de vectorisation (ou de lasage) imposés à chaque couche. En fonction de ces stratégies de lasage et de la configuration géométrique locale de la pièce, des points chauds peuvent se développer, liés à un apport d'énergie trop important par rapport à la capacité qu'a la pièce à évacuer la chaleur localement. C'est par exemple le cas des zones à faibles sections où le laser réalise de nombreux allers-retours dans un laps de temps relativement restreint et/ou des zones à contre-dépouille surplombant des massifs de poudre qui présentent une diffusivité thermique relativement faible comparée à celle de la matière dense.
- [0039] Ces « points chauds » sont à éviter car :
- L'accumulation de chaleur dans une zone localisée peut provoquer une coalescence des bains de fusion, qui forment une protrusion lors de la solidification. Lorsque cette surépaisseur locale dépasse l'épaisseur de la couche de poudre, le système de raclage peut entrer en collision avec la pièce en cours de fabrication, ce qui peut provoquer une dégradation de la géométrie fabriquée voire un arrêt de la fabrication. En conséquence, la matière fusionnée est perdue et les temps de cycles industriels sont rallongés.
 - Les points chauds peuvent favoriser les phénomènes de fissuration (fissuration à la solidification ou fissuration macroscopique)
 - Les zones de surchauffe peuvent favoriser la formation de « keyholes » (cavités en trou de serrure) instables qui, en s'écroulant, forment des porosités dans la pièce.
- [0040] Afin d'anticiper l'apparition de ces points chauds, il est proposé d'effectuer des modélisations et simulations numériques en amont de la fabrication proprement dite.
- [0041] En effet, en simulant l'apport de chaleur, ou énergie, dans une pièce produite par fabrication additive, et en prenant en compte les schémas de vectorisation (ou lasage), on peut évaluer *a priori* l'évolution du champ thermique au cours de la fabrication. On peut ainsi anticiper l'apparition de zones de surchauffe, et éventuellement déclencher des actions correctrices.
- [0042] Le procédé proposé vise ainsi à identifier des zones à risque, pouvant possiblement devenir des « points chauds » et induites par la stratégie de lasage exacte sur les pièces à produire, et ce avec un temps de calcul compatible avec les contraintes industrielles (c'est-à-dire quelques heures au plus par plateau de production).

- [0043] Le procédé proposé se base sur la stratégie, ou schéma, de lasage et non pas, comme certaines propositions de l'état de la technique, sur la géométrie des pièces à produire. Cela permet d'une part de réduire drastiquement les temps de calcul nécessaires tout en conservant une précision élevée dans l'estimation des zones à risque, et aussi de prendre en compte l'ensemble d'un plateau de production, pouvant comporter plusieurs pièces alors que les propositions antérieures optent pour une approche pièce par pièce. Il est important de noter que le schéma de lasage étant commun pour l'ensemble du plateau de production, une approche par produit introduit forcément un biais dans l'estimation.
- [0044] La [Fig.1] illustre schématiquement un contexte d'utilisation d'un procédé proposé.
- [0045] Une machine, ou imprimante, 200 pour la fabrication additive consomme des matériaux 210 afin de produire une, ou plusieurs, pièces 220. Cette machine est paramétrée par un jeu de paramètres qui en spécifie le fonctionnement et qui peuvent être modifiés en cours de fabrication : vitesse de déplacement du laser, puissance du laser, etc.
- [0046] Dans le domaine de l'aéronautique, la machine 200 peut être adaptée pour produire des pièces aussi variées que, par exemple, un distributeur haute ou basse pression pour turbomachines, un aubage redresseur de turbomachines, un injecteur, un carter, un échangeur thermique, un bloc hydraulique, etc.
- [0047] Un dispositif d'optimisation 100 est également prévu et adapté pour la simulation du comportement thermique d'une pièce 220 en vue de sa production par fabrication additive au moyen de la machine 200. Cette simulation est mise en œuvre en amont de la production par la machine pour fabrication additive et vise à déterminer des zones à risque qui sont notamment susceptibles de donner naissance à des points chauds.
- [0048] Ces zones à risque peuvent être indiqués à l'utilisateur. Par exemple, une carte thermique peut être affichée sur un écran, avec éventuellement une mise en exergue des zones à risque.
- [0049] En fonction des zones à risque déterminée dans le comportement thermique de la pièce 220 à produire, un utilisateur peut intervenir sur les paramètres de la machine afin d'éviter, ou de réduire, l'apparition de ces zones à risque, ou bien que ces zones à risque deviennent effectivement des points chauds.
- [0050] Selon un mode particulier de réalisation, le dispositif de simulation peut être adapté pour directement déterminer des adaptations dans le jeu de paramètres de la machine afin d'optimiser le processus de fabrication additive afin d'éviter ou minimiser l'apparition des points chauds. En particulier, on peut ainsi optimiser les cycles de chauffe et refroidissement pendant la fabrication additive grâce aux résultats de la phase de simulation
- [0051] La [Fig.2] illustre schématiquement un organigramme du procédé proposé.

- [0052] Dans une étape S1, on détermine les valeurs d'un ensemble de paramètres primaires relatifs à la trajectoire du ou des outils prévue pour la production d'une (ou plusieurs) pièces, au matériau utilisé pour cette production et au ou aux outils. Dans le cas où ce ou ces outils sont des lasers, la ou les trajectoires représentent le schéma de lasage.
- [0053] Selon le procédé proposé, des paramètres primaires sont sélectionnés car identifiés comme ayant une influence de premier ordre sur la thermique à l'échelle locale.
- [0054] Ces paramètres sont de différentes natures. Ils peuvent être relatifs au(x) laser(s) employé(s), et/ou au matériau utilisé (notamment à ces propriétés thermo-physiques) et/ou au schéma de lasage.
- [0055] Pris individuellement, ces paramètres primaires ne suffisent pas nécessairement à expliquer le comportement thermique de la pièce à produire, et, *a fortiori*, l'éventuelle apparition de points chauds.
- [0056] Cependant, grâce à une analyse dimensionnelle, ces paramètres sont combinés entre eux pour former un ensemble réduit de paramètres adimensionnés et indépendants, qui présentent une signification physique mieux à même de décrire le comportement thermique de la pièce lors de sa fabrication à l'échelle du schéma de lasage.
- [0057] Un de ces paramètres adimensionnés au moins doit se rapporter à la température mesurée localement (le long de la trajectoire d'outil analysée, par exemple du chemin de lasage analysé), tandis que les autres caractérisent les différents facteurs susceptibles de favoriser la surchauffe locale (zones en contre-dépouille, concentration relativement importante de vecteurs dans une zone, etc.).
- [0058] Le caractère adimensionné de ces paramètres permet ainsi de raisonner à partir de grandeurs indépendantes des spécificités de la vectorisation analysée. Autrement dit, les valeurs de ces paramètres sont valables quels que soient les matériaux utilisés ou les paramètres de la source de chaleur (laser) employée.
- [0059] La détermination des paramètres primaires repose sur une modélisation du processus de fabrication additive et du schéma de lasage associé.
- [0060] Cette modélisation est effectuée à l'échelle mésoscopique. Cette échelle mésoscopique est intermédiaire entre l'échelle macroscopique et microscopique ; elle est suffisamment étendue pour inclure un grand nombre de particules (de telle sorte que leurs propriétés statistiques ne fluctuent pas significativement), tout en restant suffisamment fine pour que les grandeurs thermodynamiques (pression, température, etc.) restent locales (ponctuelles à l'échelle macroscopique).
- [0061] En particulier, on peut définir l'échelle mésoscopique par l'influence que le laser a sur un point du schéma de lasage mais aussi sur les points à proximité de ce point, sur ce schéma de lasage, en amont ou en aval.
- [0062] La modélisation peut se baser sur un Volume Élémentaire Représentatif (VER) associé à un point considéré.

- [0063] Les [Fig.3a] et [Fig.3b] illustrent des exemples de volumes élémentaires représentatifs VER, pour un point M situé sur le schéma de lasage.
- [0064] Ce volume se caractérise par une surface centrée sur ce point M considéré, par une dimension de cette surface (diamètre dans l'exemple de la [Fig.3a], côté a dans l'exemple de la [Fig.3b]).
- [0065] La dimension caractéristique (diamètre, côté...) a une grandeur qui équivaut à quelques écarts-vecteur (i.e. distance entre deux vecteurs consécutifs), par exemple entre 5 et 10 écarts-vecteurs, et contient des portions des vecteurs qui ont une influence thermique sur le point M. Cette dimension caractéristique peut donc dépendre de différents paramètres relatifs au laser (puissance...) et au matériau (conductivité thermique...).
- [0066] La [Fig.3a] illustre tout ou partie d'une pièce 220 à produire. La surface supérieure de cette pièce est hachurée, ces hachures représentent schématiquement le schéma de lasage.
- [0067] Ce schéma de lasage peut être vu comme un ensemble de lignes correspondant au parcours du faisceau du laser (ou autre source de chaleur) en surface de la couche de la pièce en cours de fabrication.
- [0068] Ce schéma, ou stratégie, de lasage spécifie principalement la trajectoire du parcours du laser et la distance inter-cordons, c'est-à-dire la distance entre deux lignes voisines (et généralement parallèles) du schéma de lasage. Sur la figure, les lignes sont parallèles et la distance inter-cordon correspond à la distance entre deux lignes du hachage.
- [0069] Ce schéma de lasage est formé d'un ensemble de segments, chaque segment peut être représenté par un ensemble de paramètres : coordonnées d'un point de départ, coordonnées d'un point d'arrivée, vitesse du laser, puissance du laser...
- [0070] Ce schéma de lasage peut être fourni dans une structure de données qui peut être tabulaire, dans laquelle chaque ligne correspond à un segment et les colonnes correspondent aux différents paramètres associés aux segments (coordonnées, vitesse du laser, puissance du laser, diamètre du faisceau laser, profil d'irradiance, etc.)
- [0071] Cette structure de données peut être fournie par un fichier informatique. Ce dernier peut être selon différents formats : TXT, G-code, CLI, CLI+, HDFS, OVF, etc.
- [0072] La [Fig.3a] représente également un volume élémentaire représentatif VER de forme hémisphérique, correspondant à une zone 221 de la pièce 220, et centré sur un point M appartenant au schéma de lasage.
- [0073] Ce volume élémentaire représentatif contient plusieurs vecteurs du schéma de lasage. On appelle ici « vecteur » toute section rectiligne qui discrétise le parcours du laser sur la surface. Le schéma de lasage est ainsi également communément dénommé « schéma de vectorisation ». Il est possible lors de la conception de définir des lignes courbes

pour le lasage, mais celles-ci sont généralement discrétisées en un ensemble de segments de droite, ou vecteurs.

- [0074] L'intersection du schéma de lasage avec la surface supérieure du volume élémentaire représentatif forme un ensemble de segments entre un point d'entrée et un point de sortie (le schéma de lasage étant orienté dans la direction du parcours du laser).
- [0075] Ainsi, sur la [Fig.3a], on observe les segments orientés [1 ; 2], [3 ; 4], [5 ; 6], [7 ; 8], [9, 10]. Selon la définition d'un volume élémentaire représentatif, le passage du laser sur ces différents segments peut influencer le comportement thermique du matériau au point M (situé au milieu du segment [5 ; 6]).
- [0076] Le volume élémentaire représentatif peut présenter différentes formes : cube, hémisphère, héli-ellipsoïde, etc., en fonction de sa pertinence vis-à-vis du problème thermique que l'on souhaite résoudre, et des contraintes pratiques que ce choix impose sur l'implémentation du procédé proposé.
- [0077] La [Fig.3b] présente une autre forme de volume élémentaire représentatif. Sa forme cubique peut se caractériser par un côté caractéristique a.
- [0078] Le procédé vise à déterminer une donnée représentative du comportement thermique de la pièce à produire. Cette donnée représentative peut par exemple être une carte thermique pour chaque couche de la pièce à produire. Cette carte thermique peut associer une valeur d'une grandeur thermique (ou température) à chaque point M en lequel on souhaite évaluer cette grandeur. On suppose, selon la modélisation proposée, que cette grandeur dépend de paramètres primaires valables (et supposés constants) sur le volume élémentaire représentatif centré sur le point M considéré.
- [0079] Il est proposé de sélectionner un ensemble de paramètres primaires qui permet de simplifier au maximum la modélisation tout en permettant une bonne précision dans la carte thermique déterminée (ou plus généralement de la donnée représentative du comportement thermique de la pièce).
- [0080] Autrement dit, l'ensemble de paramètres primaires peut être choisi pour n'écarter aucun facteur important susceptible d'impacter le comportement thermique du matériau et de la pièce à produire.
- [0081] D'une façon générale, ces paramètres primaires relatifs à la production par fabrication additive concernent la trajectoire prévue de l'outil pour cette production, le matériau et le ou les outils à utiliser comme source ponctuelle de chaleur.
- [0082] Ainsi, dans le cas d'un laser, cet ensemble de paramètres primaires comprend des paramètres relatifs :
 - au schéma de lasage prévue pour la production d'une (ou plusieurs) pièce,
 - au matériau utilisé pour cette production et
 - au ou aux lasers (par exemple, puissance, vitesse, diamètre de spot, etc.)
- [0083] Il est ainsi à noter que les paramètres primaires ne portent pas sur la géométrie de la

pièce à produire.

- [0084] Il est en effet constaté que la géométrie de la pièce à produire peut être extraite du schéma de lasage (ou plus généralement de la trajectoire des outils utilisés).
- [0085] En effet, l'analyse des segments sur un voisinage permet d'avoir une connaissance suffisante de la géométrie de la pièce sur ce voisinage, puisque les segments ne sont présents que sur des parties de la pièce. L'absence d'un segment sur une zone indique, implicitement, que la zone n'appartient pas à la pièce à produire.
- [0086] Cela présente l'avantage de ne pas avoir à prendre en compte les fichiers décrivant la géométrie des pièces à produire qui sont classiquement assez lourds, mais uniquement le fichier décrivant le lasage. Ce dernier est substantiellement de taille moindre et de structure plus aisée à gérer, ce qui peut permettre un gain important en performance.
- [0087] Le procédé proposé comprend une étape préalable de détermination, dans une étape S2, d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés à partir de ces paramètres primaires.
- [0088] On souhaite en outre que le nombre de paramètres adimensionnés soit minimal. En effet, moins il y a de paramètres, plus on simplifie le problème, et plus il est simple de construire un abaque comme il sera vu plus bas. Aussi, en vertu du théorème de Vaschy-Buckingham, il faut que le nombre de paramètres primaires soit également minimal.
- [0089] Un laser d'irradiance incidente I_0 parcourt la surface supérieure d'un volume élémentaire représentatif à une vitesse V_L . On peut écrire :
- [0090] [Math.3]
- $$I_0 = \frac{P}{\pi R_L^2}$$
- [0091] avec P la puissance du laser, R_L le rayon à $1/e^2$ du faisceau laser. La constante « e » représente ici $e=\exp(1)$. On considère dans ce mode de réalisation que le laser est gaussien, c'est-à-dire que la distribution spatiale d'irradiance suit une courbe bidimensionnelle gaussienne centrée sur le point d'impact. Pour un laser Gaussien, on définit arbitrairement le rayon de la tache focale comme la distance radiale à l'axe optique telle que l'irradiance incidente chute à 13,5% de l'irradiance maximale, mesurée au centre de la tache ($1/e^2 = 0,135$).
- [0092] Bien évidemment, il est possible d'envisager d'autres types de distribution spatiale de l'irradiance du laser, ou plus généralement de la source de chaleur, autour d'un point d'impact, et de caractériser cette distribution spatiale par un rayon caractéristique de la tache focale, ou toute autre grandeur ou ensemble de grandeurs.
- [0093] On peut définir la durée cumulée d'exposition au laser t_{expo}^{cumul} comme la somme des longueurs des portions de vecteurs contenus dans le volume élémentaire représentatif, divisé par cette vitesse du laser. S'il y a n vecteurs dans le volume élémentaire repré-

sentatif et que ceux-ci sont parallèles à l'un de ses côtés, on peut écrire :

[0094] [Math.4]

$$t_{expo}^{cumul} = n \cdot \frac{a}{V_L}$$

[0095] Cependant, les passages successifs du laser dans le volume élémentaire représentatif sont étalés dans le temps, sur une durée qui correspond à la différence entre l'instant t_{sortie} auquel le laser quitte le dernier vecteur dans le VER, et l'instant $t_{entrée}$ auquel le laser arrive sur le premier vecteur du VER.

[0096] Dans l'exemple de la [Fig.3b], l'instant $t_{entrée}$ correspond à l'instant où le laser arrive au point 1, et l'instant t_{sortie} correspond à l'instant où le laser quitte le point 10. On peut définir la durée de lasage t_{scan} correspondant à la différence entre ces deux instants :

[0097] [Math.5]

$$t_{scan} = t_{sortie} - t_{entrée}$$

[0098] Chaque passage individuel du laser est en fait séparé des autres par une durée de lasage hors du volume élémentaire représentatif considéré plus un temps de saut entre deux vecteurs (c'est-à-dire le temps de déplacement du laser de la fin d'un vecteur vers le début du vecteur suivant). Ainsi t_{expo}^{cumul} et t_{scan} sont contraints par l'inégalité suivante :

[0099] [Math.6]

$$0 < t_{expo}^{cumul} \leq t_{scan}$$

[0100] Par ailleurs, le volume élémentaire représentatif englobe une certaine quantité de matière dense 223 qui diffuse la chaleur. Potentiellement, il contient aussi une quantité complémentaire de poudre 222 (non exposée au laser) qui agit comme un isolant thermique. En simplifiant davantage le problème, en considérant un VER unidirectionnel, on note b la profondeur de matière dense 223 localisée sous la surface lasée. On peut écrire :

[0101] [Math.7]

$$b \leq a$$

[0102] Dans une pièce réelle, cependant, les portions de matière dense dans les VER ne sont généralement pas unidirectionnelles, en particulier dans les zones de dépouille et de contre-dépouille. On peut alors considérer l'épaisseur d'un élément unidirectionnel thermiquement équivalent b' :

[0103] [Math.8]

$$b' = f\left(\frac{V}{S}\right)$$

[0104] V représente le volume de matière dense 223 contenue dans le VER et S représente la surface caractéristique de référence (par exemple la surface supérieure irradiée, la somme des surfaces en contact avec le matériau dense, etc.). Par ailleurs, la matière dense présente une conductivité thermique k et une diffusivité thermique α supposées

constantes, tandis que la poudre 222 est supposée être un isolant parfait (conditions adiabatiques).

[0105] Enfin, on peut évaluer l'élévation de température au point M correspondant au VER considéré par la variable ΔT_M^* :

[0106] [Math.9]

$$\Delta T_M^* = T_M^* - T_0$$

[0107] T_M^* est une température caractéristique au point M, résultant de la séquence de vectorisation. Il peut s'agir de la température maximale ou de la température moyenne vues durant la séquence d'exposition ou de tout autre paramètre homogène à une température, pouvant caractériser l'échauffement local de la pièce. T_0 est la température de référence du volume élémentaire représentatif, VER, ou de la couche.

[0108] Cette grandeur ΔT_M^* déterminée pour l'ensemble des points M permet de déterminer une carte thermique de la ou des pièces à produire. La carte thermique peut donc associer à chaque point M de la trajectoire de l'outil (ici du laser) une valeur représentative d'une température qui peut par exemple être une élévation de température.

[0109] Ainsi, selon ce mode de réalisation, on choisit $p=7$ paramètres primaires, qui sont :

- l'irradiance du laser, I_0 (ou l'irradiance absorbée $I_{abs}=I_0.A$ avec A l'absorbance du matériau) ;
- le temps d'exposition cumulé t_{expo}^{cumul} ;
- la durée de lasage t_{scan} ;
- la profondeur de matière dense b , ou la profondeur équivalente b' ;
- la conductivité thermique k ;
- la diffusivité thermique α ;
- l'écart à la température de référence, ou élévation de température, ΔT_M^*

[0110] Ainsi que précédemment indiqué, ces paramètres sont relatifs au schéma de lasage (t_{expo}^{cumul} , t_{scan} , b , b'), au matériau (k , α), au laser (I_0). Un paramètre primaire est relatif à l'élévation de température, qui est la donnée que l'on cherche à déterminer.

[0111] Ces paramètres sont supposés reliés entre eux par une fonction mathématique $g()$.

[0112] Ces 7 paramètres dépendent de 4 unités fondamentales (masse, longueur, temps et température).

[0113] D'après le théorème de Vaschy-Buckingham (ou théorème π), si une équation physique met en jeu p variables physiques, celles-ci dépendant u unités fondamentales, alors il existe une équation équivalente mettant en jeu $p-u$ variables sans dimension construites à partir des variables originelles.

[0114] Dans le mode de réalisation présent, il existe donc une fonction mathématique $h()$ équivalente à la fonction $g()$, mettant en jeu $p-u=3$ nombres adimensionnés indépendants, que l'on peut noter π_1 , π_2 , π_3 . On peut écrire :

[0115] [Math.10]

$$\pi_1 = h(\pi_2, \pi_3)$$

.

[0116] Par la suite, on appellera cette fonction, fonction de corrélation, puisqu'elle permet de corréler les variations des paramètres adimensionnés π_1, π_2, π_3 .

[0117] De façon classique, en exploitant les propriétés de ces 3 nombres, on peut définir :

[0118] [Math.11]

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{k\Delta T_M^*}{I_{abs}\sqrt{at_{scan}}} \\ \pi_2 = \frac{\sqrt{at_{scan}}}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \end{cases}$$

[0119] On peut définir δ la longueur caractéristique de diffusion, telle que :

[0120] [Math.12]

$$\delta = 2\sqrt{at_{scan}}$$

[0121] La définition des paramètres adimensionnés peut alors s'écrire :

[0122] [Math.13]

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2k\Delta T_M^*}{I_{abs}\delta} \\ \pi_2 = \frac{\delta}{2b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \end{cases}$$

[0123] On remarque que π_1 dépend de la température T_{1D} calculée à la surface d'un milieu semi-infini absorbant l'intensité I_{abs} avec un écoulement thermique unidimensionnel. Cette température est notamment décrite dans Carslaw H.J., Jaeger, J. C., « *Conduction of heat in solids* », Oxford University Press, 1959. Elle peut être définie par l'expression :

[0124] [Math.14]

$$T_{1D} = \frac{I_{abs}\delta}{k\sqrt{\pi}}$$

.

[0125] La définition des paramètres adimensionnés peut alors se réécrire :

[0126] [Math.15]

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta T_M^*}{T_{1D}} \\ \pi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \end{cases}$$

- [0127] Ainsi, les 3 paramètres adimensionnés obtenus après analyse dimensionnelle peuvent être décrits comme suit :
- [0128] π_1 est proportionnel à une élévation de température normalisée. Cette grandeur est inconnue *a priori* : c'est celle que l'on souhaite calculer le long du schéma de lasage afin d'obtenir la carte thermique.
- [0129] π_2 est proportionnel à la longueur de diffusion normalisée. Ce nombre caractérise l'aptitude qu'a la pièce à évacuer la chaleur localement. Plus la profondeur de matière dense b , ou la profondeur équivalente b' est faible devant la longueur caractéristique de diffusion δ , et moins la pièce est capable d'évacuer la chaleur localement (toutes choses égales par ailleurs). Comme décrit précédemment, cette valeur peut être calculée uniquement à partir de la structure de données décrivant le schéma de lasage (par exemple dans un fichier), en considérant le fait que seules les zones denses sont traversées par des vecteurs.
- [0130] π_3 est proportionnel au temps d'exposition normalisé. Plus la durée cumulée d'exposition au laser t_{expo}^{cumul} tend vers la durée de lasage t_{scan} , et plus rapide est l'accumulation de chaleur localement (toutes choses égales par ailleurs). Tout comme π_2 , ce nombre peut être calculé uniquement à partir de la structure de données décrivant le schéma de lasage.
- [0131] Grâce à l'équation $\pi_1 = h(\pi_2; \pi_3)$, énoncée précédemment, on peut exprimer π_1 en fonction de π_2 et π_3 , de façon à calculer l'élévation de température caractéristique ΔT_M^* le long du schéma de lasage :
- [0132] [Math.16]
- $$\Delta T_M^* = T_{1D} h\left(\frac{\delta}{b'}, \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}}\right)$$
- [0133] Cette expression montre que l'élévation de température ΔT_M^* est proportionnelle à la température T_{1D} , pondérée par une fonction de la longueur de diffusion normalisée δ/b' et de la durée d'exposition normalisée $t_{expo}^{cumul}/t_{scan}$.
- [0134] Dans une étape S3, qui peut être effectuée séparément (par exemple en amont) du procédé de simulation S1-S4-S5-S6, on cherche à estimer la fonction de corrélation $h()$ qui lie les paramètres adimensionnés.
- [0135] Cette étape peut être appelée étape de calibration, ou d'étalonnage, puisqu'il s'agit de rapporter les valeurs connues d'un sous-ensemble de paramètres adimensionnés à une fonction de corrélation pour obtenir la valeur du paramètre inconnu, c'est-à-dire celui qui dépend de l'élévation de température.
- [0136] Plusieurs méthodes peuvent être employées pour obtenir une estimation de cette fonction.
- [0137] Par exemple, cette estimation peut être effectuée en simulant la vectorisation et le comportement thermique associé à l'échelle du volume élémentaire représentatif,

VER, en faisant varier les différents paramètres primaires du procédé de fabrication additive dans une plage de valeurs pertinente vis-à-vis des capacités des machines ou de la fenêtre du procédé de fabrication additive mise en œuvre. On peut ainsi décrire un espace de valeurs pertinents et, pour chaque n-tuples de l'espace des paramètres, on peut obtenir par calcul ou simulation les paramètres adimensionnés π_1 , π_2 , π_3 .

- [0138] Il s'agit de réaliser un plan d'expériences numériques dans l'objectif de construire une surface de réponse permettant de corréler les paramètres adimensionnés π_1 , π_2 , π_3 . Lorsqu'une fonction $h()$ est difficile à déterminer, il est possible de construire une base de données dans laquelle les paramètres adimensionnés π_1 , π_2 , π_3 sont tabulés.
- [0139] Autrement dit, de ces p-tuples de valeurs de paramètres adimensionnés, on peut déterminer une loi générale (par approximation linéaire ou autre, par exemple), ou bien un tableau constituant une sorte d'abaque dont la connaissance de p-1 entrées permet de déterminer la dernière valeur du p-tuple.
- [0140] Cette simulation peut être effectuée par différentes méthodes de l'état de la technique telles que par exemple la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, la méthode de Galerkin discontinue (GD), etc.
- [0141] Le fait de simuler la vectorisation à l'échelle du volume élémentaire représentatif, VER, pour corréler les paramètres adimensionnés entre eux, au lieu de le faire à l'échelle d'une couche entière, permet de réduire considérablement les temps de calcul : ainsi, la simulation peut prendre quelques minutes pour un VER contre quelques heures, voire quelques dizaines d'heures, pour une couche entière.
- [0142] La [Fig.5] illustre le résultat d'un tel ensemble de simulation. Chaque point représente une simulation, et a pour abscisse la valeur de la fonction de corrélation appliquée au couple (π_2, π_3) et en ordonnée la valeur du paramètre adimensionné π_1 .
- [0143] On remarque que les points sont approximativement alignés pour toutes les configurations paramétriques, et en particulier pour des matériaux différents (puisque, durant les simulations, on a fait varier les types de matériaux et donc les paramètres k et α). Cela valide donc bien le caractère universel de la loi d'échelle ainsi obtenue. De ce fait, si le plan d'expérience est bien conçu, cette simulation peut n'être effectuée qu'une unique fois et réutilisée pour différentes simulations du comportement thermique d'une pièce en vue de production par fabrication additive.
- [0144] Ainsi, les aspects calculatoires de la simulation sont déportés vers la construction de cet abaque. Ils peuvent être effectuée en amont de son utilisation et être mutualisés pour plusieurs utilisations. Ces calculs ne viennent ainsi plus pénaliser le traitement de la détermination du comportement thermique d'une pièce à produire.
- [0145] Cet abaque peut donc être constitué en amont et réutilisé pour un ensemble de simulations du comportement thermique d'une pièce à produire du fait du caractère universel de ses valeurs.

- [0146] Suite à la détermination des valeurs des paramètres primaires, à l'étape S1, on peut, en étape S4, calculer les valeurs des paramètres adimensionnés qui ne dépendent pas de l'élévation de température ΔT_M^* .
- [0147] Dans le mode de réalisation précédemment décrit, ces paramètres sont les paramètres π_2 et π_3 .
- [0148] Ce calcul peut être effectué pour toute ou partie des couches de la pièce à produire.
- [0149] Chaque couche considérée est subdivisée en volumes élémentaires représentatifs, VER. La dimension caractéristique de ceux-ci et la distance entre deux volumes élémentaires représentatifs dépendent de la résolution spatiale et temporelle souhaitée pour l'analyse.
- [0150] Chaque volume élémentaire représentatif contient des portions du schéma de lasage, formant des segments entre un point d'entrée et un point de sortie dans le VER (Ainsi, pour rappel, sur la [Fig.3a], on observe les segments orientés [1 ; 2], [3 ; 4], [5 ; 6], [7 ; 8], [9, 10]).
- [0151] On peut calculer les paramètres adimensionnés ne dépendant pas de l'élévation de température pour chaque VER à partir de ces segments et sans recourir au modèle géométrique.
- [0152] Le calcul du paramètre adimensionné π_3 est direct : il dépend des valeurs des durées t_{expo}^{cumul} et t_{scan} . La valeur de ces durées dépend uniquement de la couche considérée.
- [0153] Le calcul du paramètre adimensionné π_2 dépend d'un ensemble de couches : il est nécessaire d'agréger les informations contenues dans les couches précédentes dans la profondeur a du VER, en particulier, de sommer toutes les longueurs de portions de vecteurs permettant de calculer le volume de matière dense.
- [0154] Dans une étape S5, on peut calculer la valeur du paramètre adimensionné qui dépend de l'élévation de température.
- [0155] Ce paramètre, π_1 ici, dépend en effet des autres paramètres adimensionnés et de la fonction de corrélation $h()$, déterminée en étape S3.
- [0156] Dans une étape S6, on peut calculer l'élévation de température ΔT_M^* , à partir de ce paramètre adimensionné π_1 dépendant de l'élévation de température.
- [0157] L'ensemble des valeurs déterminées pour l'élévation thermique ΔT_M^* pour un ensemble de points M du schéma de lasage peut ainsi fournir une carte thermique.
- [0158] La [Fig.4] illustre très schématiquement une telle carte thermique.
- [0159] Cette figure représente une pièce à produire fictive 220. On suppose que le lasage est effectuée horizontalement. Les différents motifs de remplissage des zones 225, 226, 227 correspondent à des valeurs distinctes de l'élévation de température ΔT_M^* . Seules 3 valeurs sont représentées pour la clarté de la figure, mais en pratique, la carte peut présenter une continuité de valeurs (correspondant chacune à un niveau de gris, dans

une représentation graphique) ou à un plus grand nombre de valeurs discrètes.

- [0160] Dans la zone 225 (représentée en pointillés), l'échauffement est minimal car le laser parcourt une grande distance, au sein de la pièce (ou des pièces, dans le cas général) avant de revenir à proximité d'un même point. La chaleur a donc le temps de s'évacuer substantiellement entre deux passages du laser en un même voisinage (selon le schéma de lasage prédéfinie).
- [0161] En zone 227 (représentée par des hachures grasses), l'échauffement est fort car le laser effectue des allers-retours très courts dans la pièce qui présente, dans cette zone, une dimension très faible dans la direction du lasage. Entre deux passages du laser, la chaleur ne dispose pas d'assez de temps pour être évacuée, et la température s'élève.
- [0162] La zone 226 (représentée par des hachures plus fines), correspond à une situation intermédiaire à celles des zones 225 et 227, dans laquelle la zone est orientée à 45° par rapport au schéma de lasage de sorte que le temps de parcours du laser au sein de cette zone est plus long qu'en zone 227, mais pas suffisamment pour permettre une évacuation suffisante de la chaleur.
- [0163] Cette cartographie thermique peut permettre de déterminer les zones à risques, c'est-à-dire susceptibles de donner lieu à des points chauds pouvant entraîner des protrusions en surface, des fissurations, des cavités (« keyholes »), ou autres anomalies sur la pièce à produire.
- [0164] La détermination de ces zones à risque peut être effectuée de différentes façons et découle directement de la détermination de la carte thermique.
- [0165] Par exemple, on peut établir un seuil au-delà duquel un écart de température est révélateur d'une zone à risque.
- [0166] La détection d'une ou plusieurs zones à risque peut déclencher plusieurs actions de la part du dispositif de simulation 100.
- [0167] A titre d'exemple, ces actions peuvent comprendre une ou plusieurs actions parmi :
 - Alerter un utilisateur en mettant la ou les zones à risque en exergue sur une représentation graphique de la carte thermique ;
 - Alerter l'utilisateur de sorte à empêcher le déclenchement de la fabrication additive en l'état ;
 - Déclencher une optimisation de paramètres de configuration de la machine de fabrication additive 200, afin d'éviter, ou de réduire, l'apparition de ces zones à risque.
- [0168] Ainsi, le dispositif de simulation peut être adapté pour directement déterminer des adaptations dans le jeu de paramètres de la machine, afin notamment d'optimiser les cycles de chauffe et de refroidissement. En particulier, il peut s'agir d'homogénéiser l'apport de chaleur sur les couches sans pour autant (trop) pénaliser les temps de fabrication.

- [0169] Les paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour cette optimisation incluent :
- La puissance du laser. On peut conserver le schéma de lasage mais baisser la puissance sur un ou plusieurs segments du schéma de lasage qui correspondent à des zones à risque ;
 - La vitesse de lasage. On peut conserver le schéma de lasage, mais augmenter la vitesse du laser sur un ou plusieurs segments qui correspondent à des zones à risque.
 - Les temps de pause entre deux segments. On peut par exemple conserver le schéma de lasage, mais ajouter un temps de pause entre deux segments successifs dans ou autour d'une zone à risque afin de laisser la zone se refroidir.
 - L'ordre des segments. On peut conserver le schéma de lasage, mais sauter un ou plusieurs segments dans une zone à risque puis y revenir plus tard, afin de laisser la zone se refroidir entretemps. Cette option pénalise moins le temps de fabrication que l'introduction de temps de pause.
 - La longueur des segments. Dans le cas d'une stratégie de lasage en bandes, on peut agrandir la largeur des bandes afin d'augmenter le laps de temps entre deux passages du laser dans une même zone. On peut aussi accoler deux segments adjacents si l'un d'eux est trop court.
 - Le schéma de lasage, dans sa globalité.
 - La géométrie de la pièce à produire.
- [0170] Cette adaptation de paramètres peut par exemple comprendre la modification de la structure de données exprimant le schéma de lasage. Les paramètres du lasage (puissance du laser, vitesse du laser, diamètre du faisceau laser, profil d'irradiance, etc.) peuvent être directement modifiés segment par segment dans cette structure de données, l'ordre des segments peut y être modifié, de nouvelles lignes peuvent être ajoutées pour insérer une pause entre deux segments, etc.
- [0171] Selon un mode de réalisation, l'algorithme propose plusieurs scénarii. Chaque scénario présente des avantages et des inconvénients, que, par exemple, un ingénieur arbitre en fonction des autres contraintes présentes dans son cahier des charges.
- [0172] Par exemple, un premier scénario peut être de moduler (uniquement) la puissance en fonction de la longueur des vecteurs, de façon à ce que la température en chaque point de la surface passe en-dessous du seuil préalablement fixé. Cette modulation est calculée automatiquement via la méthode présentée ici.
- [0173] Dans ce scénario, la puissance minimale proposée par l'algorithme est peut-être incompatible avec les spécifications métallurgiques de l'alliage élaboré. Dans ce cas, l'ingénieur peut fixer une puissance minimale, ce qui contraint l'algorithme d'ajuster un deuxième paramètre (par exemple, des temps de pause entre deux vecteurs), de

façon à respecter le seuil de température fixé.

[0174] De ce fait, l'ingénieur choisit un scénario hybride, avec deux variables d'ajustement (la puissance laser, et le temps de pause inter-vecteurs).

[0175] Un autre scénario peut être d'ajouter des temps de pause entre tous les vecteurs. Cependant, cette solution allonge peut-être le temps de fabrication au-delà des spécifications. Dans ce cas, l'ingénieur peut choisir un scénario alternatif, dans lequel des temps de pause sont imposés uniquement aux vecteurs les plus courts (avec un seuil à définir), et moduler la puissance et/ou la vitesse du laser pour les autres.

[0176] En somme, l'algorithme doit proposer plusieurs scénarios, et l'ingénieur peut arbitrer en croisant les différentes contraintes qui lui sont imposées. Chaque contrainte imposée par l'ingénieur (puissance minimum, vitesse maximale, etc.) est prise en compte de manière auto-consistante par l'algorithme, qui adapte ses scénarii en conséquence.

[0177] Il est à noter que la description qui vient d'être faite est relative à un mode de réalisation. De nombreuses variantes peuvent être proposées.

[0178] En particulier, les paramètres adimensionnés proposés, π_1 , π_2 , π_3 ne sont pas uniques et d'autres paramètres adimensionnés peuvent être proposés, notamment en fonction des paramètres primaires que l'on choisit pour modéliser le comportement thermique de la pièce à produire. En effet, si l'on change les paramètres primaires, l'analyse dimensionnelle fournira un ensemble différent de paramètres adimensionnés.

[0179] Dans le mode de réalisation précédemment décrit, on a considéré que le processus d'absorption de l'énergie incidente fournie par le laser était un phénomène surfacique. On a donc considéré l'irradiance absorbée I_{abs} comme paramètre primaire. Cette hypothèse fonctionne particulièrement bien pour des alliages métalliques irradiés par des lasers YAG, en mode « conduction ». On peut alternativement considérer que la matière irradiée absorbe le rayonnement incident en volume (c'est par exemple le cas des céramiques irradiées par des lasers YAG ou, en première approximation, celui des métaux en mode « keyhole »).

[0180] En ce cas on peut remplacer l'irradiance absorbée I_{abs} (exprimée en W/m^2) par une source de chaleur volumique Q_{abs} (exprimée en W/m^3). Après analyse dimensionnelle, on peut calculer trois paramètres adimensionnés π'_1 , π'_2 , π'_3 :

[0181] [Math.17]

$$\begin{cases} \pi'_1 = \frac{4k\Delta T_M}{Q_{abs}\delta^2} \\ \pi'_2 = \frac{\delta}{2b} \\ \pi'_3 = \frac{p_{cumul}}{I_{scan}} \end{cases}$$

[0182] On peut considérer que Q_{abs} s'exprime comme le produit de l'irradiance absorbée I_{abs} et d'un coefficient d'absorption volumique β tel que $1/\beta$ est homogène à une épaisseur

d'absorption. On peut alors écrire :

[0183] [Math.18]

$$\begin{cases} \pi'_1 = \frac{2k\Delta T_M^*}{I_{abs}\delta} \cdot \frac{2}{\beta\delta} \\ \pi'_2 = \pi_2 \\ \pi'_3 = \pi_3 \end{cases}$$

[0184] Ou encore :

[0185] [Math.19]

$$\begin{cases} \pi'_1 = \frac{2}{\beta\delta} \pi_1 \\ \pi'_2 = \pi_2 \\ \pi'_3 = \pi_3 \end{cases}$$

[0186] Selon un mode de réalisation, on peut considérer le coefficient d'absorption volumique β comme un paramètre primaire. Dès lors, l'analyse dimensionnelle peut fournir 4 paramètres adimensionnés, $\pi''_1, \pi''_2, \pi''_3, \pi''_4$. Ces paramètres adimensionnés peuvent s'exprimer comme :

[0187] [Math.20]

$$\begin{cases} \pi''_1 = \pi_1 = \frac{2k\Delta T_M^*}{I_{abs}\delta} \\ \pi''_2 = \pi_2 = \frac{\delta}{2b'} \\ \pi''_3 = \pi_3 = \frac{t_{cumul}}{t_{scan}} \\ \pi''_4 = \beta\delta \end{cases}$$

[0188] Par ailleurs, dans les modes de réalisation précédemment décrits, la source de chaleur (laser) est modélisée par une irradiance seule (I_{abs}) ou une source de chaleur seule (Q_{abs}).

[0189] On peut toutefois souhaiter, selon le cas d'application, prendre en compte l'effet de la vitesse de lasage V_L et celui du rayon caractéristique R_L de la source d'énergie : en effet, un balayage laser sur une surface donnée n'équivaut pas strictement à une irradiance équivalente imposée de façon statique sur cette même surface.

[0190] On peut alors déterminer cinq paramètres adimensionnés $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$:

[0191] [Math.21]

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta T_M^*}{T_{ID}} \\ \pi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \\ \pi_4 = \frac{t_{scan} V_L}{\delta} \\ \pi_5 = \frac{R_L}{\delta} \end{array} \right.$$

[0192] De même, l'étape S3 de détermination d'une fonction de corrélation $h()$ peut être réalisée de différentes façons.

[0193] A la place de la simulation précédemment exposée, on peut mettre en œuvre une résolution analytique exacte, notamment pour des configurations géométriques et thermiques simples.

[0194] Pour ce faire, on peut écrire l'équation de conservation de l'énergie à la surface de chaque volume élémentaire représentatif :

[0195] $AP_L \cdot t_{expo}^{cumul} = \varphi_{eq} S t_{scan}$

[0196] φ_{eq} représente la norme du flux de chaleur homogène équivalent, absorbé à la surface S du VER pendant la durée de lasage t_{scan} , telle que l'énergie $AP_L \cdot t_{expo}^{cumul}$ est absorbée par le volume élémentaire représentatif.

[0197] On peut déduire de cette équation que

[0198] [Math.23]

$$\varphi_{eq} = \frac{AP_L}{S} \cdot \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}}$$

[0199] En posant $I'_{abs} = AP_L / S$, la densité de puissance, on obtient :

[0200] [Math.24]

$$\varphi_{eq} = I'_{abs} \cdot \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}}$$

[0201] On peut alors supposer que chaque volume élémentaire représentatif se comporte comme un milieu unidimensionnel de profondeur équivalent b' , avec des bords adiabatiques. On peut calculer l'élévation moyenne de température par l'expression :

[0202] [Math.25]

$$\Delta T_M^* = \frac{\varphi_{eq}}{k} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ ierfc\left(2n \frac{b'}{\delta}\right) + ierfc\left(2(n+1) \frac{b'}{\delta}\right) \right\}$$

[0203] On note $ierfc()$ la fonction intégrale de la fonction d'erreur complémentaire de la fonction d'erreur de Gauss, $erfc()$.

[0204] On peut obtenir d'autres solutions analytiques en posant d'autres conditions limites différentes (conditions de Dirichlet sur la température, pertes par convection et rayonnement, etc.).

[0205] En combinant les deux précédentes équations, on peut obtenir

[0206] [Math.26]

$$\Delta T_M^* = \frac{I'_{abs} \delta}{k} \cdot \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ ierfc\left(2n \frac{b'}{\delta}\right) + ierfc\left(2(n+1) \frac{b'}{\delta}\right) \right\}$$

[0207] Enfin, en posant $T'_{1D} = I'_{abs} \delta / k \sqrt{\pi}$, on obtient :

[0208] [Math.27]

$$\Delta T_M^* = \sqrt{\pi} \cdot T'_{1D} \cdot \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ ierfc\left(2n \frac{b'}{\delta}\right) + ierfc\left(2(n+1) \frac{b'}{\delta}\right) \right\}$$

[0209] Ou encore

[0210] [Math.28]

$$\Delta T_M^* = T'_{1D} h\left(\frac{\delta}{b'}, \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}}\right)$$

[0211] Avec :

[0212] [Math.29]

$$h\left(\frac{\delta}{b'}, \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}}\right) = \sqrt{\pi} \cdot \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ ierfc\left(2n \frac{b'}{\delta}\right) + ierfc\left(2(n+1) \frac{b'}{\delta}\right) \right\}$$

[0213] L'avantage d'une solution analytique par rapport à l'estimation de la fonction h() par simulation est qu'elle permet d'économiser des coûts de calcul. Cependant, cette solution analytique exacte représente une configuration géométrique simplifiée avec des conditions limites peu représentatives de celles du procédé.

[0214] Encore une autre façon de faire consiste à utiliser des données expérimentales au lieu des données numériques (par exemple, des mesures par thermographie infrarouge, ou tout autre de mesure thermique *in situ*), acquise au cours de la fabrication d'éprouvettes technologique de calibration (ou échantillons) ou de pièces complètes.

[0215] L'avantage des éprouvettes technologiques comparées aux pièces complètes est qu'elles sont conçues pour présenter les caractéristiques géométriques représentatives de celles qui sont retrouvées sur les pièces industrielles que l'on cherche à fabriquer, tout en étant moins complexes et moins coûteuses à fabriquer que ces dernières.

[0216] Ainsi, il est possible de corréler les mesures thermiques aux paramètres adimensionnés le long du schéma de lasage et ainsi d'estimer une fonction de corrélation h().

[0217] L'avantage des données expérimentales par rapport aux solutions numériques est leur fiabilité (dans les limites inhérentes aux instruments de mesure). Cependant la simulation numérique permet d'économiser de la matière et du temps d'utilisation des machines de fabrication additive.

[0218] Bien entendu, la présente invention n'est pas limitée aux exemples et au mode de réalisation décrits et représentés, mais est défini par les revendications. Elle est notamment susceptible de nombreuses variantes accessibles à l'homme de l'art.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de détermination du comportement thermique d'une pièce en vue de production par fabrication additive au moyen d'au moins un outil, comportant, pour un ensemble de points d'une trajectoire dudit outil prévue pour ladite production, des étapes mises en œuvre par une unité de traitement d'un dispositif d'optimisation (100) de :
- détermination (S1) de valeurs d'un ensemble de paramètres primaires relatifs à ladite production par fabrication additive ;
 - détermination (S4, S5) de valeurs d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés, en fonction des valeurs dudit ensemble de paramètres primaires et d'une fonction de corrélation liant lesdits paramètres adimensionnés ;
 - génération (S6) d'une carte thermique pour au moins une couche de ladite pièce, en fonction desdits paramètres adimensionnés, ladite carte thermique étant enregistrée sous format numérique et associant une valeur représentative d'une température auxdits points.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication précédente, dans lequel ladite détermination de valeurs d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés comprend la détermination (S4) d'un sous-ensemble de paramètres adimensionnés à partir desdits paramètres primaires, et la détermination (S5) d'un paramètre adimensionné dépendant d'une élévation de température à partir dudit sous-ensemble et de la fonction de corrélation, ledit paramètre adimensionné dépendant d'une élévation de température étant inclus dans l'ensemble réduit de paramètres adimensionnés ainsi déterminé.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication précédente, dans lequel ladite fonction de corrélation est estimée (S3) en faisant varier des valeurs pour les paramètres primaires dudit ensemble de paramètres primaires et en simulant une élévation de température associée.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ledit au moins un outil est au moins un laser et lesdits paramètres primaires comprennent une irradiance dudit au moins un laser et/ou un temps d'exposition cumulé et/ou une durée de lasage et/ou une profondeur de matière dense et/ou une profondeur équivalente et/ou une conductivité

thermique et/ou une diffusivité thermique.

[Revendication 5]

Procédé selon la revendication précédente, dans lequel lesdits paramètres adimensionnés, π_1 , π_2 , π_3 sont au nombre de 3, et s'expriment :

[Math.30]

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta T_M^*}{T_{1D}} \\ \pi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \end{cases}$$

avec $T_{1D} = I_{abs} \delta / k \sqrt{\pi}$, ΔT_M^* étant ladite valeur représentant une température en un point dudit ensemble, I_{abs} étant ladite irradianc, δ étant une longueur caractéristique de diffusion dépendant de ladite diffusivité thermique, k étant ladite conductivité thermique, b' étant ladite profondeur équivalente, t_{expo}^{cumul} étant ledit temps d'exposition cumulé, et t_{scan} étant ladite durée de lasage.

[Revendication 6]

Procédé selon la revendication 4 ou 5, dans lequel lesdits paramètres primaires comprennent en outre une vitesse de lasage et un rayon caractéristique dudit outil.

[Revendication 7]

Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel lesdits paramètres adimensionnés, π_1 , π_2 , π_3 , π_4 , π_5 sont au nombre de 5, et s'expriment :

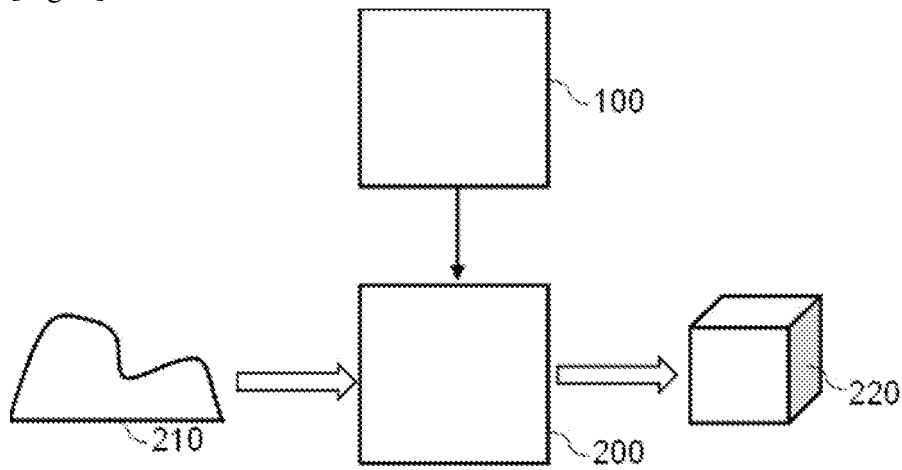
[Math.31]

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta T_M^*}{T_{1D}} \\ \pi_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{b'} \\ \pi_3 = \frac{t_{expo}^{cumul}}{t_{scan}} \\ \pi_4 = \frac{t_{scan} V_L}{\delta} \\ \pi_5 = \frac{R_L}{\delta} \end{cases}$$

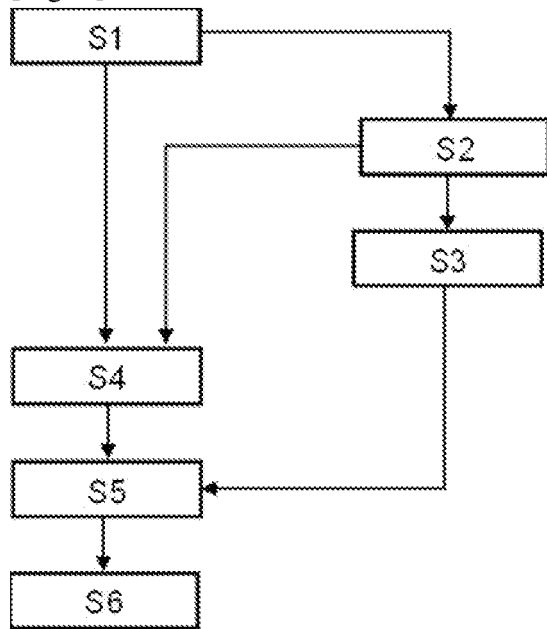
avec $T_{1D} = I_{abs} \delta / k \sqrt{\pi}$, ΔT_M^* étant ladite valeur représentant une température en un point dudit ensemble, I_{abs} étant ladite irradianc, δ étant une longueur caractéristique de diffusion dépendant de ladite diffusivité thermique, k étant ladite conductivité thermique, b' étant ladite profondeur équivalente, t_{expo}^{cumul} étant ledit temps d'exposition cumulé, t_{scan} étant ladite durée de lasage, R_L étant ledit rayon caractéristique et V_L étant ladite vitesse de lasage.

- [Revendication 8] Procédé de production d'une pièce par fabrication additive au moyen d'une machine (200) pour la fabrication additive, comportant des étapes de
- détermination d'une carte thermique par le procédé selon l'une des revendications précédentes,
 - détermination d'au moins une zone à risque au sein de ladite carte thermique,
 - adaptation d'au moins un paramètre de ladite machine (200) en fonction de ladite au moins une zone à risque, ledit au moins un paramètre pouvant être un paramètre de ladite trajectoire.
- [Revendication 9] Programme d'ordinateur comportant des instructions pour mettre en œuvre un procédé selon l'une des revendications précédentes.
- [Revendication 10] Système comportant une machine (200) pour la production par fabrication additive au moyen d'au moins un outil, adaptée pour produire une pièce à partir d'une trajectoire dudit outil, et comportant un dispositif d'optimisation configuré pour, pour un ensemble de points de ladite trajectoire, la mise en œuvre d'étapes de :
- détermination de valeurs d'un ensemble de paramètres primaires relatifs à ladite production par fabrication additive ;
 - détermination de valeurs d'un ensemble réduit de paramètres adimensionnés, en fonction des valeurs dudit ensemble de paramètres primaires et d'une fonction de corrélation liant lesdits paramètres adimensionnés ;
 - génération d'une carte thermique pour au moins une couche de ladite pièce, en fonction desdits paramètres adimensionnés, ladite carte thermique étant enregistrée sous format numérique et associant une valeur représentative d'une température auxdits points.

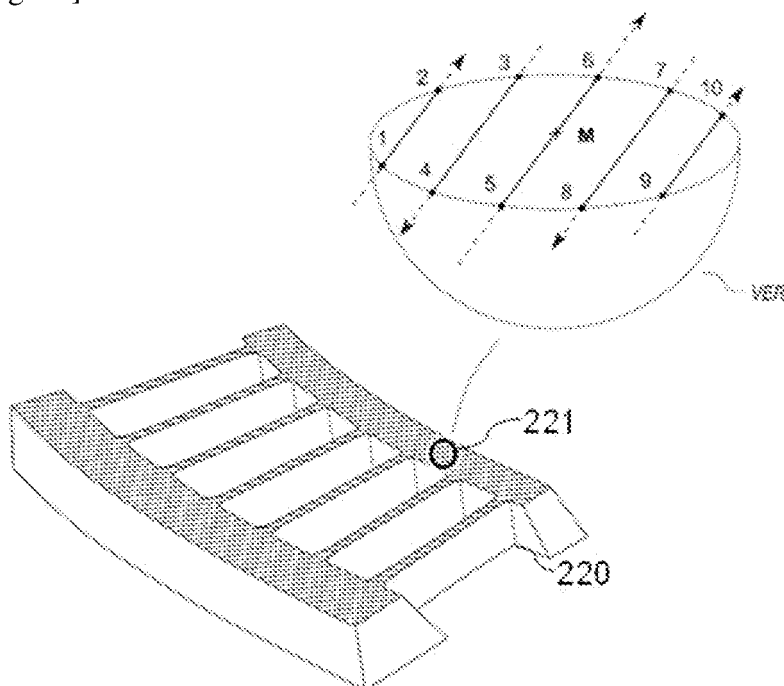
[Fig. 1]



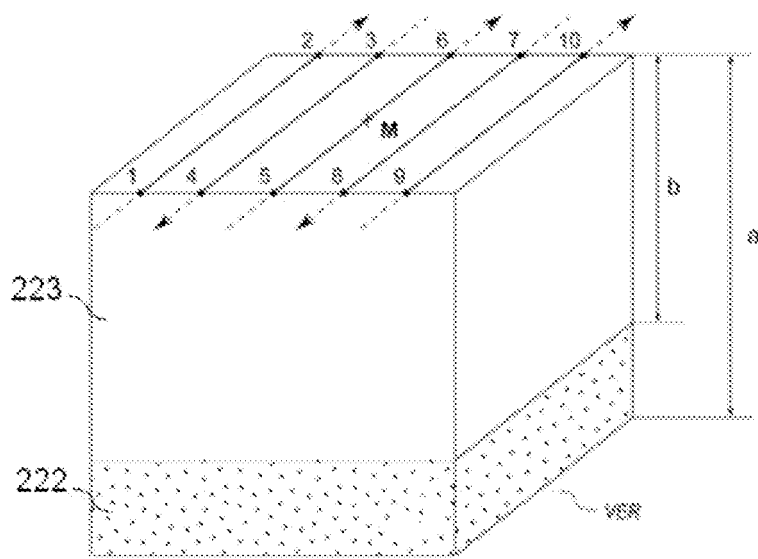
[Fig. 2]



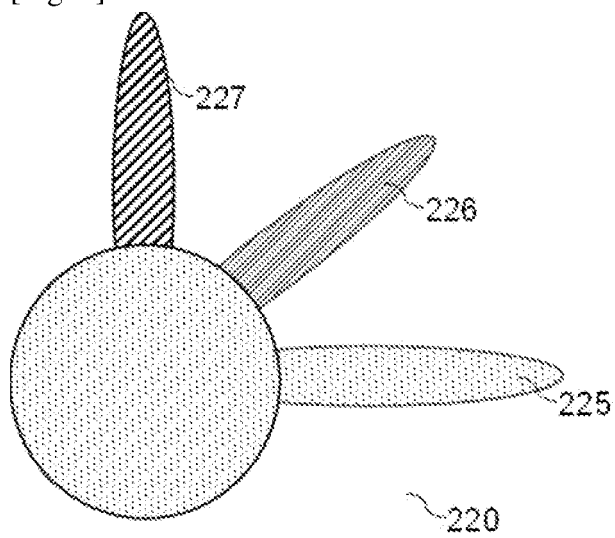
[Fig. 3a]



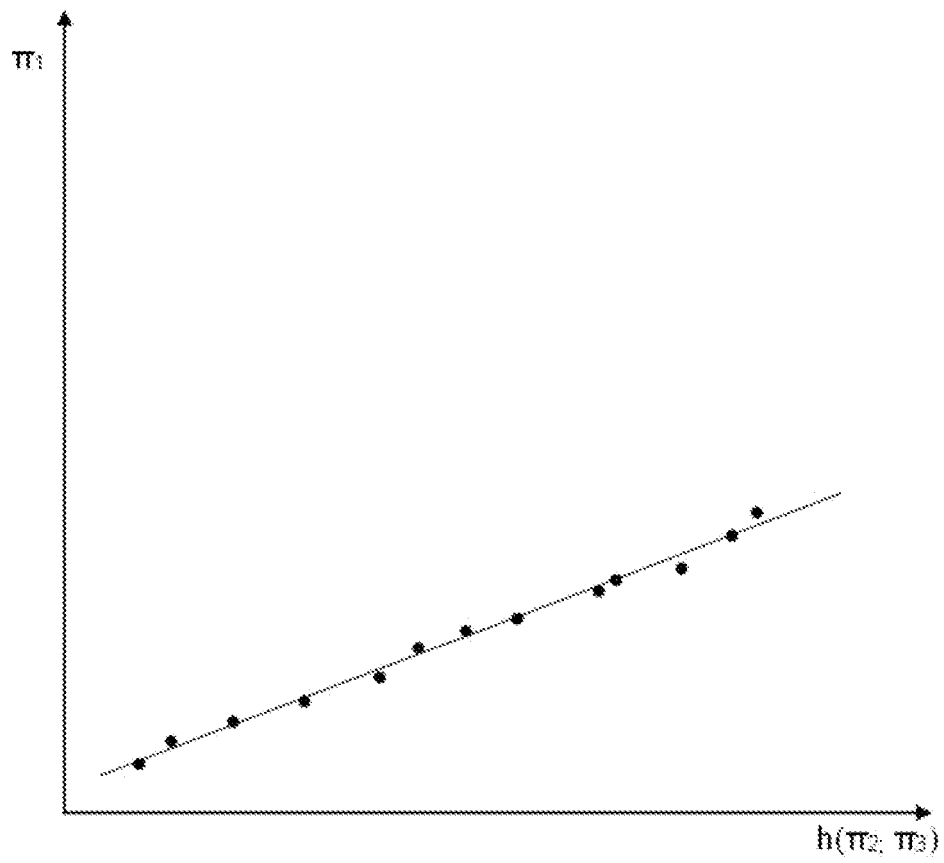
[Fig. 3b]



[Fig. 4]



[Fig. 5]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 919575
FR 2303692

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	GROSSMANN ALEXANDER ET AL: "Melt pool controlled laser powder bed fusion for customised low-density lattice structures", MATERIALS & DESIGN , vol. 181, 30 juillet 2019 (2019-07-30), XP085770948, DOI: 10.1016/J.MATDES.2019.108054 * le document en entier * * abrégé * * section 3 * * equations (2) à (4) * * figure 5 *	1-10	B29C 64/343 B29C 64/393 B33Y 50/02 G06F 17/00 G06Q 50/04
X	T. MUKHERJEE ET AL: "Printability of alloys for additive manufacturing", SCIENTIFIC REPORTS , vol. 6, no. 1, 22 janvier 2016 (2016-01-22), pages 1-8, XP055570369, DOI: 10.1038/srep19717 * le document en entier * * abrégé * * equations (1) à (6) * * figure 5 *	1-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G06F B33Y C22C B22F
----- ----- -/--			
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
23 novembre 2023		Rungger, Matthias	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 919575
FR 2303692

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	STUMP B ED - MISHNAEVSKYJR LEON ET AL: "An algorithm for physics informed scan path optimization in additive manufacturing", COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE, vol. 212, 11 juin 2022 (2022-06-11), XP087116843, DOI: 10.1016/J.COMMATSCI.2022.111566 [extrait le 2022-06-11] * le document en entier * * abrégé * * section 3 * * figure 1 * * section 3.1 * * section 3.3 * * section 3.4 * * figure 5 *	1-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
X	SHAHRI HAMID REZA ET AL: "A novel method towards approximation of the temperature distribution in electric discharge machining of Ti-6Al-4V by up-scaling approach", THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, vol. 96, no. 1, 24 janvier 2018 (2018-01-24), pages 503-520, XP036468967, DOI: 10.1007/S00170-018-1578-9 * le document en entier * * abrégé * * section 2.2 * * section 2.2.1 *	1-10	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
23 novembre 2023		Rungger, Matthias	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			