



HAL
open science

Conception pour l'impression 4D multi-matériaux : Développement d'un algorithme pour la génération d'assemblages de blocs interlockés

Kheira Benyahia, Jean-Claude Andre, Samuel Gomes, Hichem Seriket,
Frédéric Demoly

► To cite this version:

Kheira Benyahia, Jean-Claude Andre, Samuel Gomes, Hichem Seriket, Frédéric Demoly. Conception pour l'impression 4D multi-matériaux : Développement d'un algorithme pour la génération d'assemblages de blocs interlockés. S-MART 2023 : 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04278701

HAL Id: hal-04278701

<https://hal.science/hal-04278701>

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conception pour l'impression 4D multi-matériaux : vers la génération de polyvoxels emboîtés

K. Benyahia^a, H. Seriket^a, S. Gomes^a, J.C. André^b, F. Demoly^{a,*}

^a ICB UMR 6303 CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, Belfort, France

^b LRGP UMR 7274 CNRS, University de Lorraine, Nancy, France

* e-mail : Frederic.demoly@utbm.fr

1. INTRODUCTION

Depuis toujours, les approches de conception et les technologies de fabrication ont connu une évolution constante pour donner naissance à des objets innovants. La fabrication additive (FA) est un exemple parfait pour illustrer cette évolution. Cette technologie a suscité un intérêt exponentiel dans plusieurs domaines, ce qui a donné lieu à des innovations progressives et perturbatrices. L'impression 4D est l'une des innovations liées à la FA visant à combiner les techniques de FA et les matériaux intelligents (SMs) [1-3]. Elle permet de construire des objets intelligents dont la forme, la fonctionnalité ou les propriétés peuvent être modifiées en présence d'une stimulation énergétique telle que l'humidité, la chaleur, la lumière, le pH, etc. [1-4]. Considérée comme un domaine de recherche interdisciplinaire, l'impression 4D ouvre de nombreuses perspectives et suscite l'intérêt du monde universitaire aussi bien que de l'industrie [2,3,5]. Parmi les nombreuses études existantes dans la littérature, on peut remarquer que l'impression 4D peut être abordée par le biais d'un dépôt d'un matériau unique ou de plusieurs matériaux [4,6,7].

Bien que les deux directions méritent toute l'attention nécessaire pour améliorer les connaissances en termes d'impression 4D, il est important de répondre aux besoins industriels concernant les comportements physiques, la réversibilité et la réactivité, pour n'en citer que quelques-uns. À cet égard, l'impression 4D multi-matériaux offre une plus grande liberté dans l'ingénierie de conception de composites actifs qui présentent des propriétés à la fois structurelles et souples. Des études récentes sur l'impression 4D multi-matériaux ont mis en évidence la possibilité de calculer les distributions de matériaux dans une structure 3D en utilisant des technologies basées sur l'intelligence artificielle (IA), les matériaux numériques et la modélisation basée sur les voxels [1,8]. L'objectif de ces calculs est d'allouer le bon matériau (passif ou actif) au

bon endroit et le bon stimulus au bon moment, afin d'obtenir le changement de forme souhaité et des performances mécaniques optimales [1,8]. Cependant, les structures avec des distributions numériques de matériaux résultant des calculs sont compliquées à imprimer avec les techniques de FA disponibles, ainsi le développement de nouvelles stratégies de FA multi-matériaux est nécessaire. Une approche originale consiste à utiliser des assemblages par emboîtement de blocs ou polyvoxels (constitués de plusieurs voxels) de différents matériaux imprimés avec différentes techniques de FA [1,9,10]. Diverses méthodes d'assemblage par emboîtement sont explorées dans la littérature : mécanique, bio-inspirées et computationnelles [1]. Parmi les méthodes susmentionnées, l'emboîtement mécanique assisté par ordinateur offre plus de liberté en termes de combinaison de matériaux et de procédés FA. Il s'agit de partitionner des structures tridimensionnelles en éléments imbriqués, comme des blocs 3D de type puzzle, afin de contourner les limites de l'impression de larges pièces et/ou de la FA multi-matériaux [1,5]. Bien que de nombreuses études ont été réalisées sur la génération computationnelle d'assemblages 3D emboîtés, on dispose de très peu de connaissances sur l'impression 4D multi-matériaux en termes de distributions numériques de matériaux résultants d'algorithmes génétiques et de techniques basées sur l'IA.

À cet égard, l'objectif principal de cet article est de proposer une approche de conception computationnelle dédiée à l'impression 4D multi-matériaux utilisant l'assemblage par emboîtement de blocs discrets 3D de type puzzle. Le point de départ est une distribution numérique de matériaux dans une structure 3D/4D, à laquelle un sous-ensemble de blocs emboîtés – destinés à être imprimés individuellement puis assemblés – est déterminé pour construire n'importe quelle structure à base de voxels comprenant des éléments solides et/ou en treillis [1,11,12]. Par la présente, un algorithme est

développé pour déterminer des arrangements judicieux de blocs assurant le maintien de l'assemblage sans dépendre des moyens d'assemblage supplémentaires. De cette manière, l'approche proposée fournit une méthode d'assemblage par emboîtement efficace qui n'est pas encore réalisée dans la littérature. Une représentation basée sur les voxels et un plugin de conception assistée par ordinateur (CAO) approprié à l'impression 4D multi-matériaux, sont adoptés dans le travail de recherche, afin de contrôler adéquatement la géométrie de la pièce en termes de propriétés et d'occupations des régions actives et inertes.

2. DEVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME POUR LA GENERATION DE POLYVOXELS EMBOTES

Comme le montre la Figure 1, la génération de l'assemblage de blocs emboîtés se déroule en quatre étapes principales :

- Partitionnement d'une structure multi-matériaux à base de voxels en des ensembles de voxels homogènes (même matériau) après analyse de la distribution numérique des matériaux dans la structure donnée.
- Détermination du ou des degrés de liberté (DDL) et des relations de blocage des ensembles de voxels identifiés lors de la première étape (en faisant appel à des modèles mathématiques).
- Calcul de l'assemblage des blocs emboîtés en déterminant d'abord les blocs clés (dernières pièces à insérer dans l'assemblage), puis les blocs fixes.
- Planification de la séquence d'assemblage des blocs.

2.1. Etape 1 : Partition de la distribution des matériaux numériques

L'objectif principal d'une structure multi-matériaux calculée basée sur les voxels est que les matériaux inertes et actifs soient répartis spatialement dans une grille de voxels 3D, afin d'obtenir le changement de forme désiré. La première étape consiste à sectionner la structure A en fonction de sa répartition numérique des matériaux après avoir identifié des blocs homogènes P_i (ensemble de voxels) dans cette représentation à base de voxels (cf. Figure 1).

2.2. Etape 2 : Modélisation des relations de blocage

Cette étape consiste à adopter des modèles mathématiques tels que les graphes orientés et les matrices d'adjacence, afin de décrire les relations de blocage dans toutes les directions ($\pm x, \pm y, \pm z$) entre les blocs identifiés P_i à l'étape précédente. Les graphes orientés sont d'abord établis, puis traduits en matrices d'adjacence correspondantes pour le calcul des DDL et la détermination des blocs emboîtés. Un exemple d'assemblage 2D est illustré à la Figure 2, pour interpréter les relations de blocage entre les pièces P_i . Soit un $(GOB)_d = (P_i, R_i)$, un graphe orienté de blocage où P_i sont des pièces

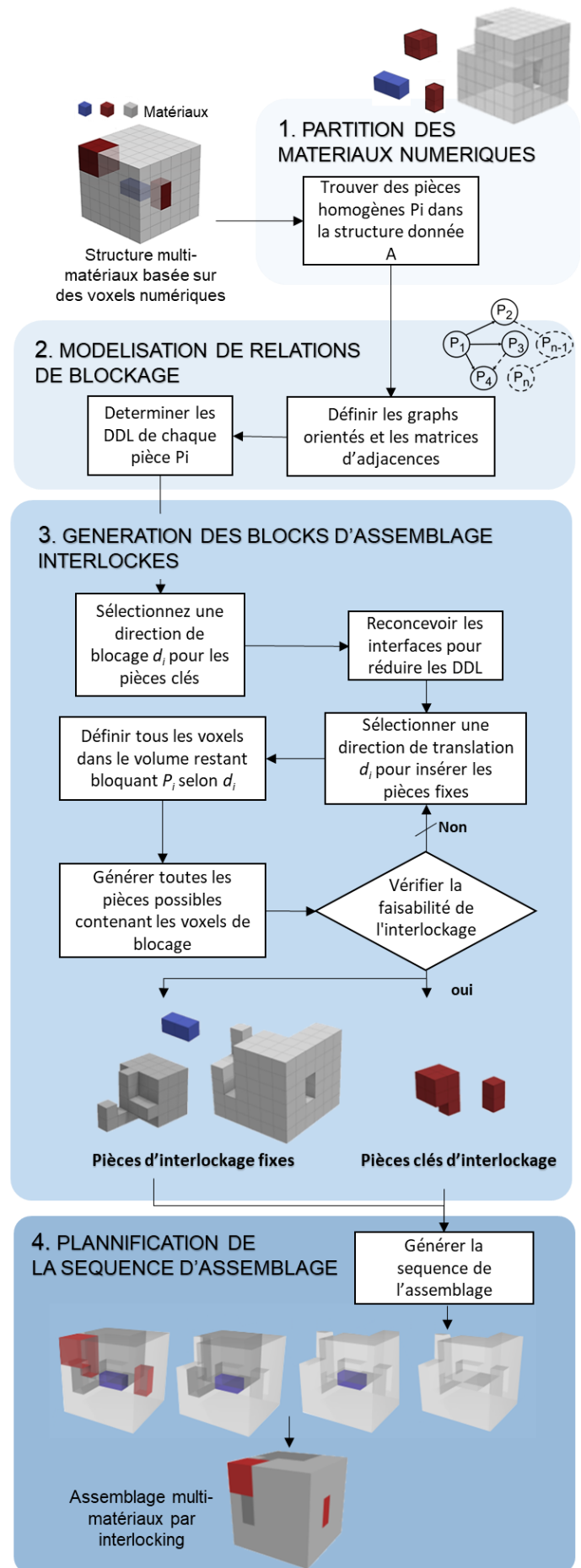


Figure 1 - Approche de conception computationnelle pour l'impression 4D multi-matériaux [1]

homogènes (blocs) de l'assemblage A , et R_i sont des paires ordonnées (flèches) de nœuds pour définir les relations de blocage entre P_i le long de la direction $d (\pm x, \pm y, \pm z)$. Par exemple, une paire ordonnée entre P_1 et P_2 indique que P_1 est bloqué par P_2 le long de d_i .

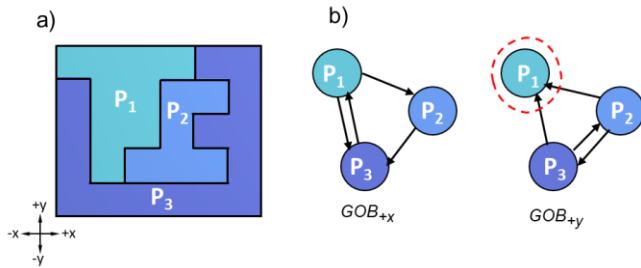


Figure 2 - Exemple d'un assemblage de trois pièces emboîtées. (a) agencement des pièces (b) GOB connexes le long des directions +x et +y. La pièce clé en direction de +y est mise en évidence dans le cercle rouge discontinu [1].

Un assemblage A est considéré comme emboîté lorsque chacune de ses pièces est complètement immobilisée une fois positionnée (insérée dans l'assemblage). La ou les pièces clés sont les seules pièces qui ont la liberté de se déplacer pour assurer la fixation mécanique de l'assemblage (à en assurer le montage et le démontage répétables), voir P_1 à la Figure 2.

2.3. Etape 3 : Génération d'assemblage de blocks emboîtés

Dans cette section, le calcul de la génération d'assemblages de blocs emboîtés sera abordé. L'algorithme développé a pour but de découper une structure 3D/4D multi-matériaux en blocs homogènes (pièces) et de définir leur arrangement par emboîtement. Une fois les blocs assemblés, la forme 3D/4D désirée est obtenue. Le calcul se fait en deux temps. Tout d'abord, toutes les pièces avec (DDL>1) sont redéfinies pour réduire leur DDL à 1 degré et classées comme pièces clés. Ensuite, les pièces (ou les voxels) encastrés avec (DDL=0) sont libérées pour faciliter leur insertion dans l'assemblage, en permettant un découpage supplémentaire dans le volume restant. Ainsi, de nouvelles pièces emboîtables sont générées (pièces fixes). Les pièces restantes (DDL=1) sont automatiquement définies comme des pièces clés.

Puisque la distribution numérique multi-matériaux est imposée par la modélisation basée sur les voxels, la génération itérative de blocs emboîtés peut être considérablement complexe et longue. Ainsi, quelques actions et conditions sont mises en place, afin de garantir l'emboîtement des pièces générées, et sont les suivantes :

- Des modifications mineures dans la distribution numérique multi-matériaux sont autorisées lorsque cela est nécessaire pour surmonter les limitations de calcul sans affecter les propriétés physiques de la structure.
- Chaque pièce peut être insérée dans une et une seule direction de translation.

- Une fois que la ou les pièces clés sont insérées dans l'assemblage, ce dernier est entièrement sécurisé et maintenu.

Afin de mieux expliquer cette étape essentielle, la Figure 3 présente un exemple simple d'un assemblage 3D contenant quatre blocs homogènes. Il illustre une représentation basée sur les voxels ($6 \times 6 \times 6$ voxels) avec une distribution aléatoire des matériaux numériques. Chacun des quatre blocs composant la structure initiale P_1, P_2, P_3 et P_4 , respectivement, représente un matériau ou une propriété spécifique. Tout d'abord, les pièces clés sont générées, puis la génération des autres pièces emboîtées suit.

2.3.1. Génération des pièces clés

Comme illustré sur la Figure 3a, P_1 a DDL>1 (pièce mobile), en d'autres termes, P_1 est capable de se déplacer le long de plus d'une direction de translation (-x, -y, +z) sur la Figure 3a. Dans ce cas, une légère modification de la distribution initiale du matériau est nécessaire pour assurer l'assemblage par emboîtement de P_1 . Supposons que nous voulons bloquer P_1 le long des directions -x et -y, et la garder mobile uniquement le long de +z. Dans ce but, nous sélectionnons tous les voxels voisins de P_1 (cf. Figure 3b), puis nous choisissons aléatoirement un voxel candidat qui remplit la condition de blocage (cf. Figure 3c). Le candidat choisi sera ensuite ajouté à la pièce clé P_1 (cf. Figure 3d). De cette manière, la pièce clé P_1 restera mobile le long d'une seule direction de translation +z. P_3 sur la Figure 3a a un seul DDL. Cette pièce sera automatiquement définie comme une deuxième pièce clé.

2.3.2. Génération des pièces fixes

Comme l'illustre la Figure 3a, P_2 est entièrement encastré dans P_4 , il est donc impossible de l'insérer ou de la désassembler. Pour contourner ce dilemme, le développement de l'algorithme envisage des raisonnements successifs. Tout d'abord, une direction aléatoire est choisie pour insérer la pièce concernée (par exemple, +y sur la Figure 3e). Ensuite, une sélection de tous les voxels bloquants dans la direction choisie suit (voxels en vert sur la Figure 3e). Ensuite, l'algorithme génère toutes les pièces possibles contenant les voxels de blocage. Enfin, seules les pièces qui garantissent l'insertion vers une seule direction et les conditions de blocage, sont conservées comme options (cf. Figure 3f pour un exemple de génération d'emboîtement valide).

2.4. Etape 4 : Planification de la séquence d'assemblage

Cette étape est considérée comme cruciale. Elle a lieu pour déterminer l'ordre d'assemblage de chaque pièce emboîtée et générée afin de construire finalement la structure 3D/4D multi-matériaux désirée. Pour ce faire, l'algorithme va classer l'ordre de génération des pièces i-

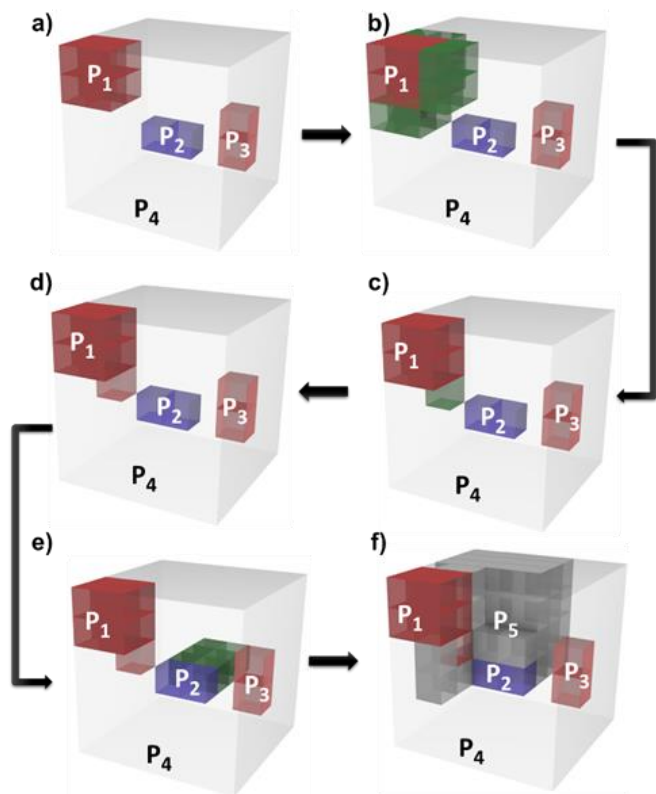


Figure 3 - Cube à base de distribution multi-matériaux numérique contenant $6 \times 6 \times 6$ voxels, (a) structure d'entrée, chacune des couleurs des voxels correspond à un type de matériau/propriété, (b) à (d) génération de pièces clés, (e) et (f) génération de pièces fixes emboîtées [1].

mbriquées en utilisant les relations de blocage et les couches de raisonnement précédemment citées. La séquence d'assemblage est ensuite obtenue en inversant l'ordre de génération des pièces à imbriquer. C'est-à-dire que les dernières pièces générées seront les premières à être insérées dans l'assemblage et *vice versa*, ce qui est pertinent puisque les premières pièces générées sont des pièces clés (les dernières à être insérées pour fixer l'assemblage). La Figure 4 présente la séquence d'assemblage de l'exemple du cube.

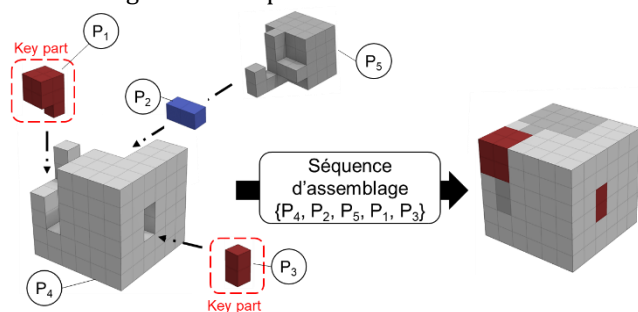


Figure 4 - Planification de la séquence d'assemblage d'un cube de $6 \times 6 \times 6$ voxels, avec distribution numérique aléatoire multi-matériaux [1].

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, un cas d'étude est mis en œuvre pour illustrer la pertinence et l'applicabilité de notre approche qui convertit une structure voxelisée 4D avec une distribution numérique multi-matériaux en un ensemble de blocs imbriqués homogènes, destinés à être imprimés

individuellement à l'aide de différents procédés de FA, puis assemblés selon la forme souhaitée. Le cas d'étude proposé est une barre mesurant $18 \times 18 \times 126 \text{ mm}^3$, composée de 1512 voxels ($3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ par voxel). Un matériau souple (Agilus30) imprimé avec la machine Objet260 Connex3 (Stratasys Ltd., USA) et un hydrogel sensible à la température (préparé selon les travaux de [13]) - celui-ci se contracte lorsqu'il est exposé à la chaleur - ont été utilisés pour construire une structure 4D capable de changer de forme.

3.1. Résultats de génération d'un assemblage de blocs emboîtés

Nous illustrons ci-après une implémentation de l'approche de conception computationnelle proposée par le biais d'un plugin nouvellement développé appelé VoxSmart dans l'environnement Rhinoceros 3D / Grasshopper. Ce plugin comprend trois composants principaux :

- Le voxeliseur qui convertit une structure 3D en un modèle détaillé de distribution des matériaux basé sur les voxels.

- Le partitionneur de la distribution des matériaux qui décompose la représentation basée sur les voxels en sous-ensembles homogènes de voxels.

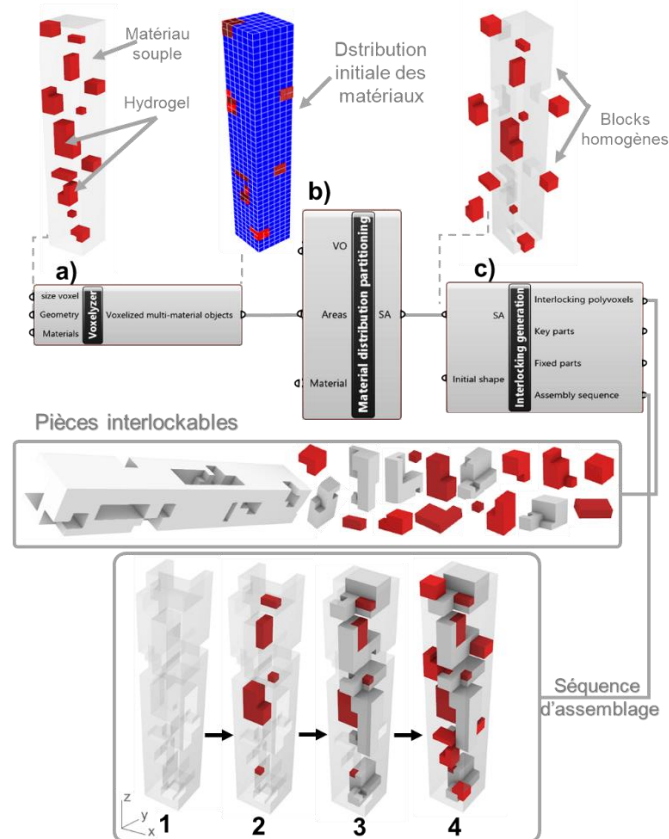


Figure 5 - Illustration d'un assemblage imbriqué d'une structure multi-matériaux de $18 \times 18 \times 126 \text{ mm}^3$ avec étapes de génération et plugin VoxSmart dans l'environnement Rhinoceros 3D / Grasshopper pour le calcul de l'emboîtement : (a) Voxeliseur, (b) partition des matériaux, (c) génération de blocs imbriqués.

- Le générateur de assemblages par emboîtement qui génère l'ensemble des pièces imbriquées clés ainsi que les pièces fixes, mais aussi la planification de la séquence de l'assemblage. Il faut noter qu'il existe plus d'un assemblage possible, qui peut être généré. Un exemple de génération d'assemblages de blocs imbriqués est fourni à la Figure 5.

3.2. Simulation

Comme évoqué à la Section 2.2, des complications de calcul peuvent survenir en raison de la distribution imposée des matériaux numériques. Par conséquent, des modifications mineures ont été autorisées lorsque cela était nécessaire afin d'assurer l'assemblage de toutes les pièces présentes dans la structure. Cependant, la moindre modification de la distribution des matériaux peut entraîner des conséquences considérables sur les propriétés physiques de la structure. Il est donc nécessaire de procéder à une phase de simulation pour déterminer si les propriétés physiques de la structure ont été négativement affectées ou non. On vise une différence

de déformation minimale entre la distribution initiale des matériaux et celle qui a été ajustée. La Figure 6 illustre les simulations de la distribution initiale et de la distribution ajustée, à différentes températures (25°C, 30°C, 40°C et 80°C). Quant au Tableau 1, il fournit des calculs de déplacement de voxels pour comparer quantitativement les deux distributions présentées.

Tableau 1 – Différences max entre les positions des voxels dans la distribution originale et celle ajustée à 25°C, 30°C, 40°C, et 80°C.

	25°C	30°C	40°C	80°C
Distance Max (10 ⁻² mm ±0,01)	0	7.74	24.22	24.61

En considérant les résultats de la simulation dans la Figure 6 et les mesures de distances dans le Tableau 1, on peut remarquer que les différences en termes de changement de forme et de propriétés physiques sont très faibles, voire inexistantes, à différentes températures. De ce fait, les légères modifications appliquées dans la distribution numérique des matériaux pour générer l'assemblage par emboîtement n'ont pas altéré le compor-

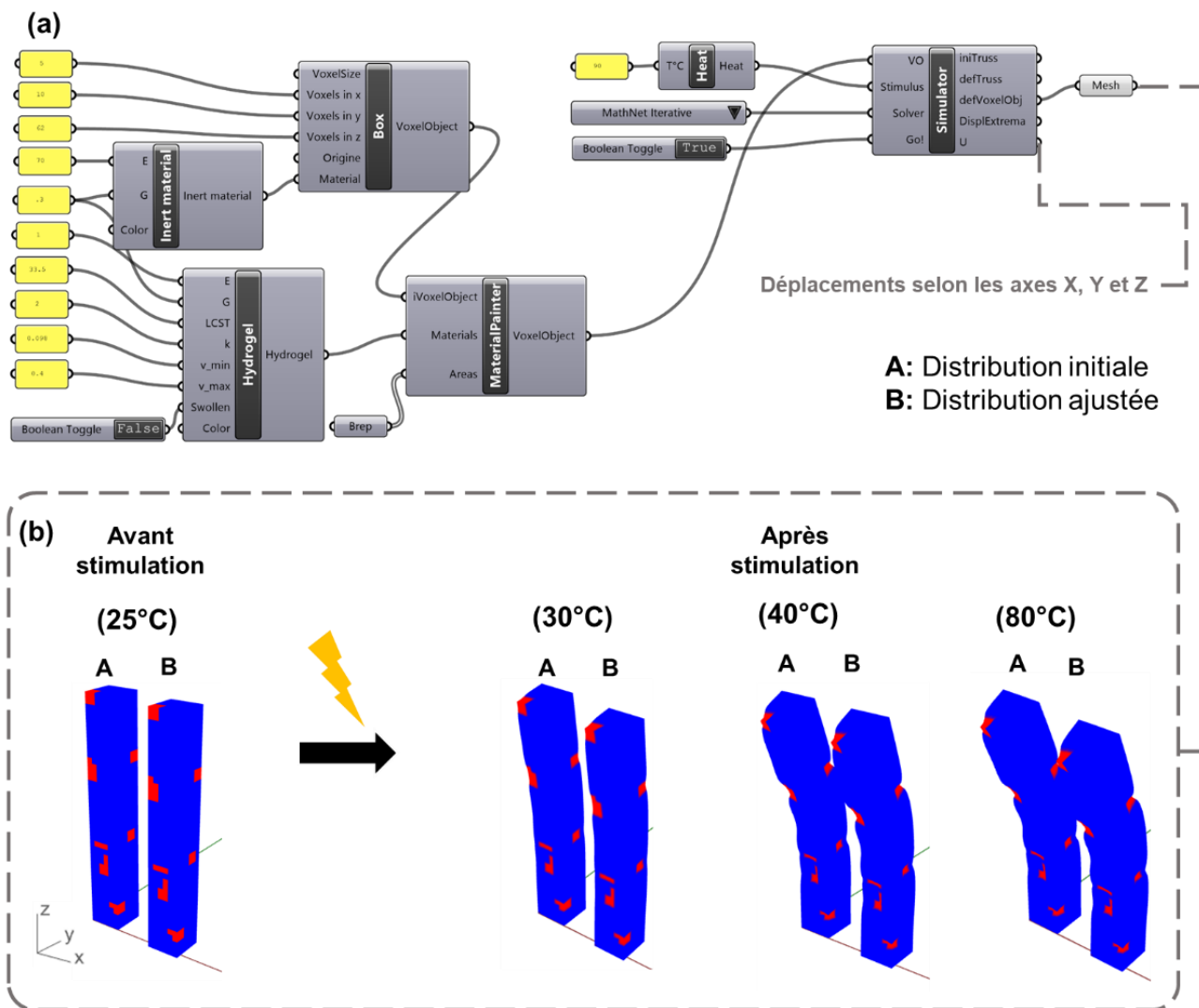


Figure 6 - Simulation de la déformation de la distribution originale (A) et de la distribution ajustée (B) : (a) plugins VoxSmart pour affectation des matériaux : matériau souple en bleu : Agilus30 ; matériau actif en rouge : hydrogel), et simulation SM, (b) distributions A et B avant stimulation thermique à 25°C et après stimulation à 30°C, 40°C et 80°C [1]

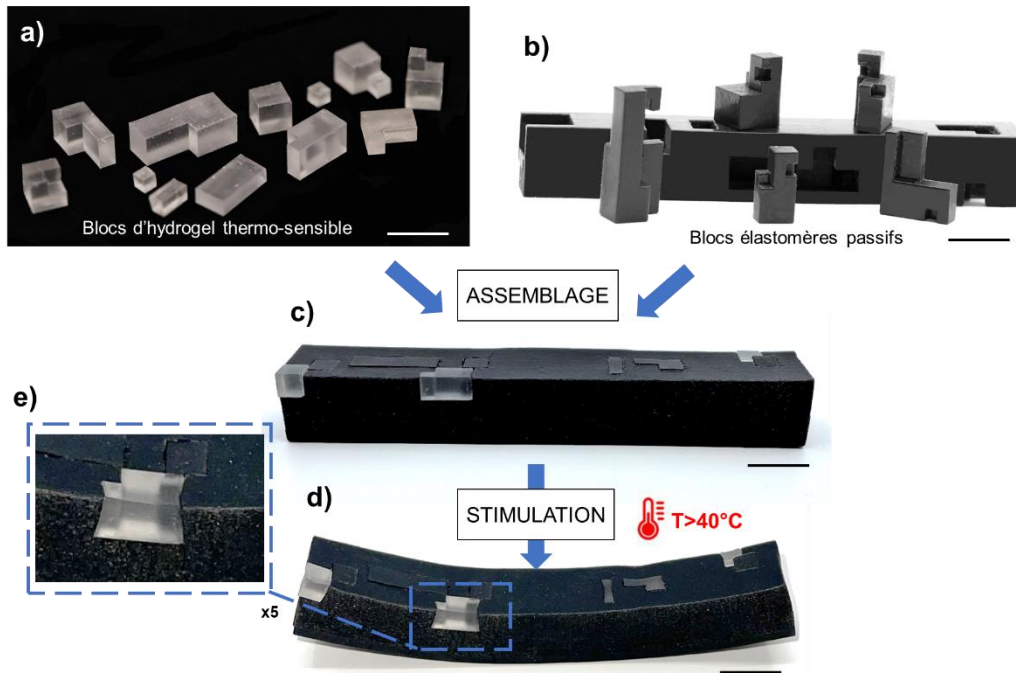


Figure 7 - Blocs imprimés : (a) hydrogel thermosensible, (b) blocs d'Agilus30, (c) assemblage des blocs imbriqués, (d) structure déformée après stimulation à l'eau chaude à 40°C, (e) agrandissement x5 [1].

-tement physique de la structure. Pour illustrer le changement de forme physique, les blocs d'assemblage (actifs et passifs) ont été imprimés puis assemblés manuellement pour construire une structure multi-matériaux avec une distribution numérique des matériaux. La Figure 7 montre le changement de forme du cas d'étude comme prévu dans la phase de simulation. Les images de déformation ont été capturées après une exposition de 3 minutes dans de l'eau chaude à 40°C. Cette figure montre également que les blocs sont restés imbriqués malgré la déformation due à la chaleur et à l'immersion dans l'eau. Cela ajoute plus de valeur à l'approche de conception computationnelle proposée.

4. CONCLUSION

Dans cet article, nous proposons une approche de conception computationnelle dédiée aux assemblages 4D multi-matériaux. À partir d'une distribution numérique multi-matériaux qui répond à un comportement spécifique de changement de forme ou de propriété, l'algorithme développé convertit la représentation basée sur les voxels en un ensemble de blocs homogènes imbriqués permettant de construire la structure désirée une fois assemblée. L'étude démontre un moyen efficace de surmonter certaines limites de la FA, comme la construction d'assemblages complexes qui ne peuvent pas être imprimés par un procédé FA unique en une seule fois, en raison du volume d'impression ou de la compatibilité des matériaux. Dans ces conditions, on peut remarquer que notre cas d'étude était destiné à exécuter une configuration limitée de changement de forme. La relaxation de ces limitations devrait être abordée dans des travaux futurs, afin de généraliser l'approche actuelle.

REFERENCES

- [1] Benyahia, K., Seriket, H., Prod'hon, R., Gomes, S., André, J. C., Qi, H. J., & Demoly, F. (2022). A computational design approach for multi-material 4D printing based on interlocking blocks assembly. AM.
- [2] Demoly, F., André, J.C., Research strategy in 4D printing: Disruptive vs incremental?, Journal of Integrated Design and Process Science 24 (2020).
- [3] André, J.C., From additive manufacturing to 3D/4D printing. Breakthrough innovations: programmable material, 4D printing and Bio-printing, ISTE-Wiley, London, UK, 2017.
- [4] Dimassi, S., Demoly, F., Cruz, C., Qi, H.J., Kim, K.Y., André, J.C., Gomes, S., An ontology-based framework to formalize and represent 4D printing knowledge in design, Computers in Industry 126 (2021).
- [5] Demoly, F., Dunn, M.L., Wood, K.L., Qi, H.J., André, J.C., The status, barriers, challenges, and future in design for 4D printing, Materials & Design 212 (2021).
- [6] Hamel, C.M., Roach, D.J., Long, K.N., Demoly, F., Dunn, M.L., Qi, H.J., Machine-learning based design of active composite structures for 4D printing, Smart Materials and Structures 28 (2019).
- [7] Sossou, G., Demoly, F., Belkebir, H., Qi, H. J., Gomes, S., Montavon, G., Design for 4D printing: Modeling and computation of smart materials distributions, Materials & Design 181 (2019).
- [8] Doubrovski, E.L., Tsai, E.Y., Dikovskiy, D., Geraedts, J.M., Herr, H., Oxman, N., Voxel-based fabrication through material property mapping: A design method for bitmap printing, Computer-Aided Design 60 (2015) 3-13.
- [9] Song, P., Fu, C.W., Cohen-Or, D., Recursive interlocking puzzles, ACM Transactions on Graphics 31 (2012), 1-10.
- [10] Wang, Z., Song, P., Pauly, M., Desia: A general framework for designing interlocking assemblies, ACM Transactions on Graphics 37 (2018) 1-14
- [11] Tibbitts, S., 4D printing: multi-material shape change, Architectural Design 84 (2014), 116-121.
- [12] Jenett, B., Gershenfeld, N., Carney, M., Calisch, S., Spencer, W., Digital morphing wing: active wing shaping concept using composite lattice-based cellular structures, Soft Robotics 4 (2017) 33-48.
- [13] Lai, J., Ye, X., Liu, J., Wang, C., Li, J., Wang, X., Ma, M., Wang, M., 4D printing of highly printable and shape morphing hydrogels composed of alginate and methylcellulose, Materials & Design 205 (2021),