



HAL
open science

L'utilisation de la matière active dans les pratiques de recherche-création : utilisation d'un vocabulaire artistique pour l'impression 4D de polymères magnéto-actifs déployés dans des dispositifs expérimentaux et d'observation

Antoine Desjardins, Giancarlo Rizza

► To cite this version:

Antoine Desjardins, Giancarlo Rizza. L'utilisation de la matière active dans les pratiques de recherche-création : utilisation d'un vocabulaire artistique pour l'impression 4D de polymères magnéto-actifs déployés dans des dispositifs expérimentaux et d'observation. Dr les d'objets: un nouvel art de faire, Oct 2021, La Rochelle, France. 10.5281/zenodo.6059525 . hal-03597250

HAL Id: hal-03597250

<https://hal.science/hal-03597250v1>

Submitted on 4 Mar 2022

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.

L'utilisation de la matière active dans les pratiques de recherche-crédation : utilisation d'un vocabulaire artistique pour l'impression 4D de polymères magnéto-actifs déployés dans des dispositifs expérimentaux et d'observation.

Antoine Desjardins¹ et Giancarlo Rizza²

¹ Reflective interaction, EnsadLab, ENSAD, Paris

² Laboratoire des Solides Irradiés (LSI), Institut polytechnique de Paris, CEA/DRF/IRAMIS, CNRS, Palaiseau France

Résumé. En sciences sociales et en philosophie l'agentivité est définie comme la capacité d'un objet d'agir, sa faculté d'action dans et sur l'environnement qui l'entoure. Dans le cadre de nos pratiques de recherche-crédation, nous utilisons l'impression 4D de polymères magnéto-actifs pour questionner la notion de comportement, une notion de plus en plus fondamentale dans la création artistique contemporaine. Le répertoire de formes est le résultat d'une hybridation entre différents registres appartenant au monde naturel, plus précisément le floral et l'animal. L'objectif de notre projet n'est pas celui d'imiter la nature en imprimant des objets programmables avec des mouvements déterministes, mais de combiner des modèles structurels et des éléments naturels pour concevoir et fabriquer des objets à comportement qui manifestent un ensemble d'actions qui ne sont pas prévisibles et qui ne peuvent être déduites directement de leur environnement magnétique afin de créer et explorer des mondes artificiels, allusifs et dystopiques.

Introduction

Des millions d'années d'évolution ont conduit la matière vivante à développer un nombre infini d'architectures et de propriétés spécifiques, allant de la capacité à se mouvoir à la réponse aux stimuli environnementaux. Par exemple, la microstructure orientée et hiérarchisée des coquilles d'ormeaux et des crevettes est responsable de leur remarquable résistance aux chocs [1, 2]. Aussi, la microstructure est souvent exploitée par la nature pour agir comme actionneur : c'est par exemple le cas du mécanisme de perception-transmission des plantes carnivores telles que la *Dionaea muscipula*, ou le mouvement hygromorphe des pommes de pin [3-8]. Bien que la science des matériaux s'inspire continuellement de la nature, l'utilisation des techniques de fabrication conventionnelle pour imiter les architectures bio-inspirées a souvent fait face à des limites à la fois techniques et de résolution atteignable. Ces dernières années cette lacune commence à être comblée grâce au développement de l'impression 3D. Cette technique permet de construire un objet par dépôt additif de couches, ou sous-unités, d'un ou plusieurs matériaux à partir d'un fichier de *conception assistée par ordinateur* (CAO). Dans ce domaine en pleine effervescence une évolution majeure a été celle d'imaginer des objets imprimés qui pourraient changer de forme par eux-mêmes, sans intervention humaine mais simplement par l'effet d'un facteur externe comme la lumière, la chaleur, une vibration, etc... C'est le domaine de l'impression 4D [9], qui est, d'une certaine manière, la forme fonctionnelle de l'impression 3D [10-12]. À l'évidence,

au cœur de cette nouvelle technologie, se trouvent les matériaux à imprimer. Il s'agit de matériaux intelligents, homogènes ou composites, qui portent une ou plusieurs fonctions pouvant être activées par des stimuli physiques (champ électrique, champ magnétique, lumière, température, vibrations...), chimiques (pH, photochimie) ou biologiques (glucose, enzymes, biomolécules) et qui consomment activement l'énergie de l'environnement pour la transformer en travail mécanique. Ce changement de paradigme permet à un objet imprimé de s'adapter à son environnement et d'évoluer de manière contrôlée à travers l'application de stimuli. Cela revient à incorporer un morceau de code... dans un matériau : une fois la fonction activée, l'objet exécutera les actions programmées. Il ne s'agit plus de penser la matière comme une entité inerte qu'il s'agirait de former ou d'informer, mais bien de la considérer comme une sorte d'*objet à comportement* dont il faut prendre en compte sa puissance d'agir, son agentivité. La possibilité de combiner géométries complexes et comportements évolutifs permet à l'impression 4D de repousser les limites en matière de conception et fabrication d'objets. Cependant, plusieurs défis restent à relever : un travail de recherche fondamentale sur les matériaux intelligents (incluant aussi les métaux et les céramiques), un développement technique des imprimantes et des codes pour les adapter aux matériaux utilisés et aux stimuli introduits et une méthodologie qui se base sur la triade design-modélisation-simulation pour que l'objet imprimé réponde de manière appropriée aux excitations externes.

Bien que chaque matériau programmable possède un ensemble unique de propriétés, nous pouvons identifier des principes communs et des similitudes dans les méthodes de programmation des objets imprimés en 4D. Les matériaux programmables présentent trois caractéristiques principales (Figure 1) : i) leur composition - ce dont ils sont composés - et comment ils sont organisés - et leur structure à différentes échelles (macro, micro et nano), ii) l'énergie d'activation - ce qui déclenche la transformation et iii) la mécanique de transformation - le comportement fonctionnel du matériau lorsqu'il est soumis à une énergie d'activation.

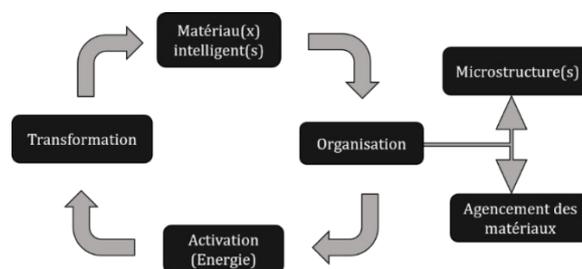


Figure 1. Diagramme identifiant les caractéristiques principales pour l'impression 4D des matériaux programmables.

Les matériaux programmables sont composés d'un ou plusieurs matériaux actifs, ou intelligents, c'est-à-dire des matériaux dont les propriétés changent de manière significative lorsqu'ils sont soumis à une énergie d'activation : un matériau programmable est généralement composé d'un matériau actif et d'un second matériau non actif qui se transforment en fonction d'une énergie d'activation. Par ailleurs, la

configuration spatiale et l'orientation spatiale des matériaux actifs et non actifs sont importantes pour orienter la direction de la transformation. De même, la géométrie et le placement des matériaux peuvent influencer considérablement le comportement final en termes de transformation mécanique (pliage, enroulement, étirement, rétraction) et de propriétés physiques (force de pliage, flexibilité, rigidité...).

Les matériaux programmables sont conçus pour répondre à un ou plusieurs types d'énergie (chaleur, lumière, son, humidité...). Ils peuvent se transformer pendant ou après l'exposition à l'énergie d'activation. La transformation qui en résulte peut être réversible, permettant idéalement une répétition à l'infini, ou permanente, entraînant une modification des propriétés du matériau et un état final stable. Différentes énergies d'activation peuvent être couplées à différents matériaux.

Pour pouvoir se transformer de manière précise, un matériau programmable doit être composé d'une combinaison spécifique de matériaux et recevoir une quantité spécifique d'exposition à l'énergie d'activation. Des portions différentes de matériau actif et non actif peuvent affecter la transformation. De même, la position du matériau actif par rapport au matériau non actif peut affecter la direction de la transformation.

1. Les matériaux magnéto-actifs

Jusqu'à présent, l'approche de l'impression 4D a été appliquée aux polymères fonctionnels ou aux matériaux composites tels que les hydrogels [13], les polymères électroactifs [14], les polymères à mémoire de forme [15], ou les polymères sensibles au pH [16] et à la lumière [17]. Cependant, dans la littérature, la recherche sur les objets imprimés à microstructure contrôlée en est encore à ses débuts et se concentre principalement sur la fabrication de matériaux composites aux propriétés mécaniques améliorées, et seuls quelques travaux mentionnent la possibilité de contrôler la microstructure *in situ* pendant le processus d'impression [18-20].

En particulier, dans le domaine de l'impression 4D, l'utilisation de polymères composites magnéto-actifs est particulièrement intéressante. En effet, les objets imprimés peuvent être facilement actionnés par des champs à distance générés par des aimants permanents ou des bobines. De plus, comme les champs magnétiques peuvent pénétrer à travers les tissus organiques et les organes sans les endommager, ils peuvent être utilisés, entre autres applications, dans le domaine de la robotique souple pour les soins de santé et pour les applications biomédicales [21, 22]. Une première stratégie pour imprimer des polymères composites magnéto-actifs consiste à utiliser des microparticules de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, ce sont les aimants les plus puissants du fait de leur forte aimantation à saturation et de leur grande coercivité liée à une forte anisotropie magnéto-cristalline, et à orienter leurs dipôles permanents à l'aide d'aimants externes. Ce procédé a été principalement appliqué dans les techniques d'impression 3D de dépôt de fil fondu (DFF) et Direct Ink Writing (DIW). Une deuxième stratégie exploite l'auto-assemblage de charges magnétiques à base de ferrite, telles que les nanoparticules (NPs) de Fe_3O_4 . En particulier, lorsque les charges magnétiques sont dispersées dans un milieu liquide ou visqueux et exposées à un champ externe, elles s'assemblent spontanément

en structures filamenteuses en forme de chaînes alignées le long du vecteur de champ, Figure 2. La dimension et la direction des chaînes assemblées, c'est-à-dire la microstructure, peuvent être programmées en faisant varier les paramètres expérimentaux tels que le champ magnétique appliqué, la concentration des particules et la viscosité du milieu. Enfin, la microstructure peut être figée en durcissant la formulation contenant la résine et les charges auto-assemblées.

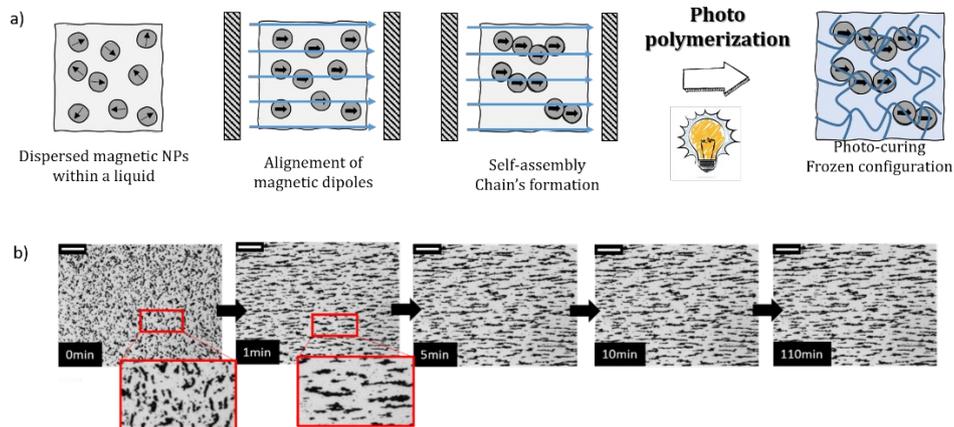


Figure 2. Auto-organisation de structures filamenteuses formées de nanoparticules magnétiques soumises à un champ magnétique. Les chaînes de particules sont ensuite figées dans la matrice hôte. Réf. [23].

La présence d'une microstructure orientée dans l'espace est associée à une anisotropie magnétique, c'est-à-dire un axe magnétique facile, où l'aimantation est la plus favorable. Cette propriété peut être exploitée pour actionner l'objet imprimé. En effet, lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué au matériau, ce dernier subit un couple magnétique qui force l'objet à aligner son axe magnétique le long du champ. Par conséquent, le contrôle de l'orientation de la microstructure magnétique permet de programmer les mouvements, la rotation et la flexion de l'objet imprimé [24], Figure 3.

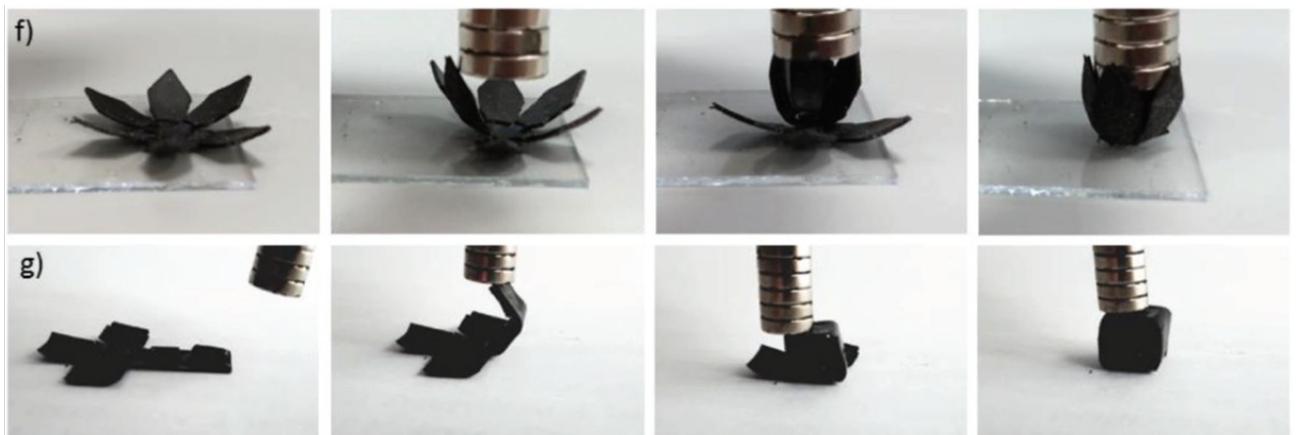


Figure 3. Objets magnétiques imprimés en 3D. a) Fleur imprimée qui se referme lorsqu'elle est exposée à un champ magnétique. b) Structure 2D composée d'éléments flexibles et rigides capables de créer un cube en 3D lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique. Réf (24)

2. L'impression 4D des matériaux agentifs magnéto-actifs et leur application dans la pratique recherche-crédation

En art, en design comme en architecture, en étroit dialogue avec les sciences, la question est posée de comment concevoir et mettre en œuvre des matériaux agentifs pour des créations dotées de sensibilité, au sens propre comme au sens figuré. Comment explorer artistiquement un rapport matière / forme où la structure interne de matériaux actifs, réactifs et adaptatifs devient « matière-grise » ? Comment envisager un objet artistique doté de comportements animés ou encore une méta-matière aux frontières de l'inerte, du vivant et du vivant artificiel ?

En particulier, ce travail développé dans le cadre de la chaire Arts&Sciences de l'École Polytechnique, l'École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs, PSL et de la fondation Daniel et Nina Carasso [25], s'intègre aussi dans celui du groupe Reflective Interaction qui depuis 2001 réunit un groupe multidisciplinaire d'artistes, de designers, ingénieurs et chercheurs autour d'un projet de recherche dans le domaine de l'art et du design pour étudier et expérimenter ce que ce que nous appelons les objets à comportement (behavioral matter) dotés de capacités de mouvement, d'action et de réaction expressives, et sont également capables d'afficher des intentions et de susciter des émotions. [26-29]

Les êtres et choses vivantes que nous pouvons côtoyer et dont nous apercevons les mouvements et les comportements grâce à l'observation ou à l'information nous renseignent sur le monde et guident les interactions que nous entretenons et développons avec celui-ci : qu'elles soient sensorielles ou abstraites, animées ou inanimées. Ce sont autant d'informations et d'évaluations accumulées sur les milieux, la perception d'autres échelles et la nature différente d'autres formes de vie. Un tel regard et une telle discipline, permettent des comportements adéquats dans nos expériences et circonstances variées et concourent à l'élaboration d'un rapport critique qui pourra servir de base à des représentations et activations.

Le rapport à la nature est en art une histoire originelle qui se superpose à la question du modèle dans sa pertinence, son accessibilité, sa variabilité, osons, sa vivacité. Si l'on s'en tient à l'apparition de la modernité dans l'art au tout début du XX^e siècle et à ses conséquences dont nous sommes toujours tributaires, la nature au travers de son observation (Paul Cézanne, Piet Mondrian..), de l'usage de ses mécanismes (Marcel Duchamp), de son décryptage philosophique ou scientifique (Wassily Kandisky, Robert Delaunay, Kasimir Malévitch...) s'est trouvée au cœur de réflexions et évolutions qui ont produit de nouveaux territoires esthétiques et procédures de travail en grande partie autour d'emprunts aux sciences dans leur curiosité au monde, la source est identifiée et revendiquée sous tous ses aspects.

Dans sa richesse et diversité ce regard curieux et introspectif de l'artiste ouvre des territoires de questionnement et d'analyse des morphologies, des environnements et des systèmes à l'échelle de l'expérience visuelle élémentaire. Incidemment cette approche sensible impose des dimensions et protocoles tant physiques que mentaux qui ne correspondent pas à l'expérimentation et à la vérification scientifique. La

collaboration art-science produit ainsi des situations et génère des images que l'on pourrait qualifier de dynamiques en ce sens qu'elles portent plus que leur immédiate apparence pendant que la dichotomie de leurs origines plurielles en complexifiant leur conception vient alimenter leurs significations.

Nos objectifs ne se réduisent ni à la citation ni à la représentation fidèle mais s'apparentent plutôt à une exploitation libre et élargie des références et forces naturelles. Il s'agit de faire apparaître au sein d'une telle variété des situations et combinaisons originales et surprenantes qui permettront l'acquisition d'ensemble d'informations déterminantes pour l'élaboration de matériaux et de structures à même d'être influençables et modifiables par des forces magnétiques et leurs combinaisons particulières.

3. Le contexte et la forme

L'usage de champs magnétiques pour activer nos prototypes dicte les espaces et détermine les environnements, l'organisation des formes et la nature des charges. Leur intensité et leur positionnement résulteront des systèmes et des dispositifs permettant l'activation des objets. La coordination de la mobilité des sources est fondamentale car elle va induire les séquences et harmonies des divers mouvements. Dans une relation de causalité elle provoquera des situations riches en informations variées. La diversité de ces informations nous entraîne au-delà du système plastique et visuel et leur convergence pointe vers l'intimité de la matière et l'organisation des forces qui l'animent.

Pour constituer des répertoires de formes, un premier niveau consiste à interpréter sur un mode analogique les êtres et les choses du vivant dont les formes et les comportements se prêtent aux conditions d'expérimentation dans un fluide. Ces répertoires sont constitués des résultats de l'observation directe et de l'expérience avec par exemple les fleurs ou de la consultation de documents en ce qui concerne par exemple les échinodermes, les mollusques, voire les champignons ou les algues.

Nous nous situons pour la conception dans une sphère formelle référentielle élargie où les caractéristiques de motricité et de mécanique prévalent et où l'hybridation tient lieu de système, nous générons des êtres originaux qui tiennent plus de la chimère que de la citation. Leur constitution artistique est tributaire des contraintes physiques mais elle ne s'y plie pas et ne s'y égare pas et elle utilise ces paramètres pour rendre visible de manière plus fine et subtile les réactions et mouvements de la matière en conditions.

Un second niveau convoque une géométrie élémentaire pour une organisation rationnelle de la forme et de ses mouvements potentiels, symétrie radiale ou rayonnante figure et décomposition polyédrique.

Nous produisons ainsi des objets qui sont une réminiscence du vivant ou les charges magnétiques peuvent être positionnées sur ce qui équivaldrait à des articulations même si les croisements et superpositions des modèles issus de l'animal et du végétal ainsi que la flexibilité du matériau rendent toute attribution définitive hasardeuse. Le trouble à

l'interprétation ouvre le champ aux suppositions et construit des mondes artificiels et synthétiques à même de faire surgir l'imprévu.



Figure 4. Hybridations.

4. La représentation, l'expérimentation

La part artistique impose des paramètres de visibilité, des exigences matérielles et scénographiques et des critères esthétiques qui sont autant de facteurs qui vont contraindre et conditionner la part scientifique. Inversement, la part scientifique fixe un cadre technique et physique avec des objectifs identifiables et un déterminisme qui prend à défaut le cheminement dénué de lois de la pensée artistique, en tous les cas elle lui suggère un cadre spécifique. Une telle collaboration autour d'un sujet avec des intérêts distincts mais convergents est fondamentalement intéressante en ce qu'elle impose compromission et inventivité et produit des situations inédites, l'artiste laisse filer sa matière, le scientifique ses méthodes. Dans une liste rapide, ruptures d'échelles, incidence et impact technique, explorations matérielles et flux langagier deviennent autant de sujets et situations qui implémentent les échanges pour créer des conditions de productions originales qui s'avèrent tant riches plastiquement qu'informatives scientifiquement.

Milieu fluide et matière souple s'imposent comme éléments privilégiés pour un champ d'expérimentation étendu, nous sommes ainsi dans des conditions qui se retrouvent avec acuité dans un vocabulaire artistique identifié et proposé par Maurice Fréchuret dans son panorama transversal d'une histoire de l'art, *Le mou et ses formes*, "A l'art inéquivoque de la construction s'oppose un art plus ambigu que les remous de la matière rendent plus mystérieux encore. Aux contours toujours simplifiés de l'esthétique edificatrice succèdent les formes d'un art réellement expérimental où le hasard, dans ses multiples faces, participe à l'œuvre comme matière première." [30]. L'approche conceptuelle, la recherche formaliste et l'esthétique des objets sont ici contraints par les principes scientifiques et les données techniques. La part artistique se constitue ainsi en premier lieu dans l'intimité et l'organisation de la matière et le déploiement des agencements qui la révéleront. La répartition des composants réactifs est structurante et détermine des conditions et des contraintes qui vont également orienter les registres de formes et leur combinaison ainsi que les dispositifs d'activation et les choix de matières, les contraintes énergétiques et mécaniques fixent ou plutôt contraignent ainsi le vocabulaire formel.

Si une adéquation entre force magnétique et formes naturelles s'impose dans cette recherche pour faire entrevoir des solutions, la production de situations plastiques improbables s'avère indispensable à leur révélation. La création des objets implique des approches combinatoires qui croisent différents domaines de l'animal et du végétal, de l'assemblage et des structures, leur conception consiste à décomposer, fragmenter et combiner aboutissant ainsi à des êtres hypothétiques aux formes équivoques potentiellement mouvantes.

En parallèle les mécanismes et les dispositifs par la manipulation directe ou l'interaction proposent les conditions d'une chose évoluant dans un environnement soumis à des influences extérieures qui troublent un peu plus la perception et l'interprétation.

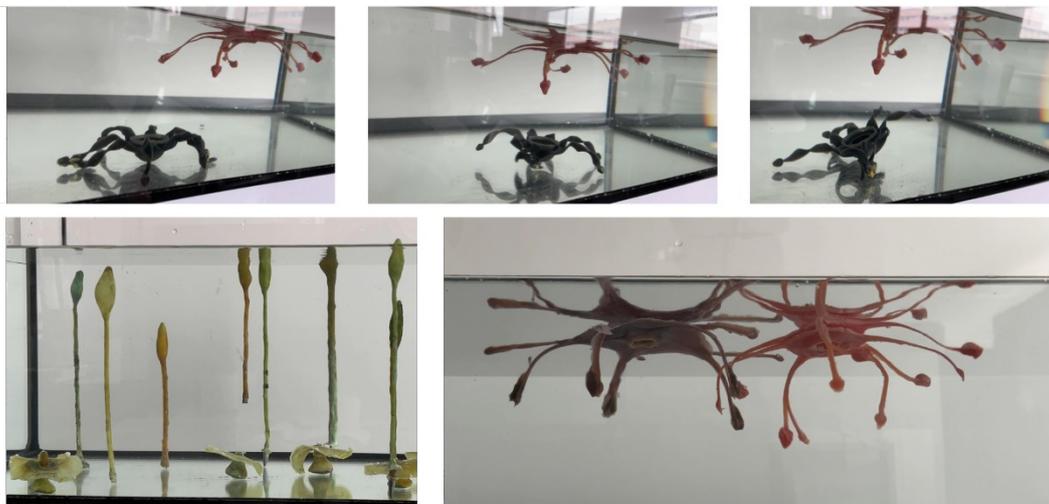


Figure 5. Dispositifs, expérimentations.

Si l'impulsion première est géométrique et dégagée du vivant les principes de cette géométrie trouvent leur origine dans une observation et une utilisation de la nature et de ses grands principes morphologiques. Les environnements et les dispositifs stimulant les objets recréent les conditions et aléas naturels. Nous pourrions considérer que nous sommes donc quelque part dans la conception d'une espèce originale, de nature synthétique évoluant artificiellement, qui est le fruit de l'expérience usuelle qu'elle soit directement liée à la nature ou de source médiatique et que cela s'avère nécessaire à la révélation de situations inédites.

Conclusions

L'objectif de notre projet de recherche création est la fabrication d'objets à comportement qui manifestent un ensemble d'actions qui ne sont pas prévisibles et qui ne peuvent être déduites directement de leur environnement magnétique. Pour faire cela, nous avons utilisé l'impression 4D de polymères magnéto-actifs et puisé dans un répertoire de formes résultant d'une hybridation entre différents registres appartenant au monde végétal, floral et animal. La possibilité de combiner géométries complexes et

comportements évolutifs nous permet de repousser les limites en matière de conception et de fabrication d'objets qui acquièrent par la nature des processus une valeur artistique. En pensant la matière non pas comme une entité inerte, mais bien comme une sorte d'objet à comportement dont il faut prendre en compte sa puissance d'agir, son agentivité, nous travaillons à la création et à l'exploration de mondes artificiels, allusifs et dystopiques.

Remerciements

Les auteurs remercient la Chaire Arts & Sciences de Ecole Polytechnique, l'Ecole Nationale des Arts Décoratifs, PSL et de la Fondation Daniel et Nina Carasso pour le support à la réalisation de ce projet de recherche-crédation.

Bibliographie

- [1] Weaver JC, Milliron GW, Miserez A, Evans-Lutterrodt K, Herrera S, Gallana I, et al. The stomatopod dactyl club: A formidable damage-tolerant biological hammer. *Science* (80-) 2012;
- [2] Grunenfelder LK, Suksangpanya N, Salinas C, Milliron G, Yaraghi N, Herrera S, et al. Bio-inspired impact-resistant composites. In: *Acta Biomaterialia*. 2014.
- [3] Emons AMC, Mulder BM. How the deposition of cellulose microfibrils builds cell wall architecture. *Trends in Plant Science*. 2000.
- [4] Burgert I, Fratzl P. Plants control the properties and actuation of their organs through the orientation of cellulose fibrils in their cell walls. *Integr Comp Biol*. 2009;
- [5] Fabricant A, Iwata GZ, Scherzer S, Bougas L, Rolfs K, Jodko-Władzińska A, et al. Action potentials induce biomagnetic fields in carnivorous Venus flytrap plants. *Sci Rep*. 2021;
- [6] Sachse R, Westermeier A, Mylo M, Nadasdi J, Bischoff M, Speck T, et al. Snapping mechanics of the Venus flytrap (*Dionaea muscipula*). *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020;
- [7] Le Duigou A, Castro M. Hygromorph BioComposites: Effect of fibre content and interfacial strength on the actuation performances. *Ind Crops Prod*. 2017;
- [8] Burgert I, Fratzl P. Actuation systems in Plants as prototypes for bioinspired devices. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci*. 2009;
- [9] *Active Matter*, Edited by Skylar Tibbits, The MIT Press (2017)
- [10] Khoo ZX, Teoh JEM, Liu Y, Chua CK, Yang S, An J, et al. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual Phys Prototyp*. 2015;
- [11] Mitchell A, Lafont U, Hołyńska M, Semprimoschnig C. Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*. 2018.
- [12] Shin DG, Kim TH, Kim DE. Review of 4D printing materials and their properties. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green*

Technology. 2017.

- [13] Bakarich SE, Gorkin R, Panhuis M In Het, Spinks GM. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromol Rapid Commun*. 2015;
- [14] Shao LH, Zhao B, Zhang Q, Xing Y, Zhang K. 4D printing composite with electrically controlled local deformation. *Extrem Mech Lett*. 2020;
- [15] Meng H, Li G. A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*. 2013.
- [16] Muzaffar A, Ahamed MB, Deshmukh K, Kovářik T, Křenek T, Pasha SKK. 3D and 4D printing of pH-responsive and functional polymers and their composites. In: *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials: Processes, Applications, and Challenges*. 2019.
- [17] Zhang X, Yang P, Dai Y, Ma P, Li X, Cheng Z, et al. Multifunctional up-converting nanocomposites with smart polymer brushes gated mesopores for cell imaging and thermo/pH dual-responsive drug controlled release. *Adv Funct Mater*. 2013;
- [18] Roppolo I, Chiappone A, Angelini A, Stassi S, Frascella F, Pirri CF, et al. 3D printable light-responsive polymers. *Mater Horizons*. 2017;
- [19] Arslan H, Nojoomi A, Jeon J, Yum K. 3D Printing of Anisotropic Hydrogels with Bioinspired Motion. *Adv Sci*. 2019;
- [20] Liu J, Erol O, Pantula A, Liu W, Jiang Z, Kobayashi K, et al. Dual-Gel 4D Printing of Bioinspired Tubes. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019;
- [21] Qiu F, Nelson BJ. *Magnetic Helical Micro- and Nanorobots: Toward Their Biomedical Applications*. Engineering. 2015.
- [22] Ceylan H, Giltinan J, Kozielski K, Sitti M. Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab on a Chip*. 2017.
- [23] Simone Lantean, PhD thesis, A novel approach to fabricate bioinspired programmable composite materials: the 3D Printing way, Politecnico di Torino-Ecole polytechnique (2021). <http://www.theses.fr/2021IPPAX024>
- [24] S Lantean et al, 3D Printing of Magnetoresponse Polymer Materials with Tunable Mechanical and Magnetic Properties by Digital Light Processing, *Advanced Materials Technology* 2019, 1900505
- [25] <https://chaire-arts-sciences.org/>
- [26] Bianchini S, Bourganel R, Labruno J-B, Ishii H, Mahé E, Quinz E, 2014, "The misbehavior of animated object", *Studio*, TEI 2014 [8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction], February 16-19 2014, Munich, Allemagne, ACM 978-1-4503-2635-3/14/02
- [27] Bianchini S, Bourganel R, Quinz E, Levillain F, Zibetti E, 2015, "(Mis)behavioral Objects", in Bihanic D. (Ed), *Empowering Users through Design*, Berlin, Springer:129-152
- [28] Bianchini S, Quinz E (Ed), *Behavioral Objects I, A Case Study: C'eleste Boursier-Mougenot*, Berlin-New York, Sternberg Press, 2016
- [29] Levillain F, Zibetti E, 2017, "Behavioral Objects: The Rise of the Evocative Machines", *Journal of Human-Robot Interaction*, 6(1):4-24

[30] Maurice Fréchuret, "Le mou et ses formes", Essai sur quelques catégories de la sculpture du XX^e siècle. (énsb-a), Ecole Nationale Supérieure des Beaux Arts. 1998, p 20.