

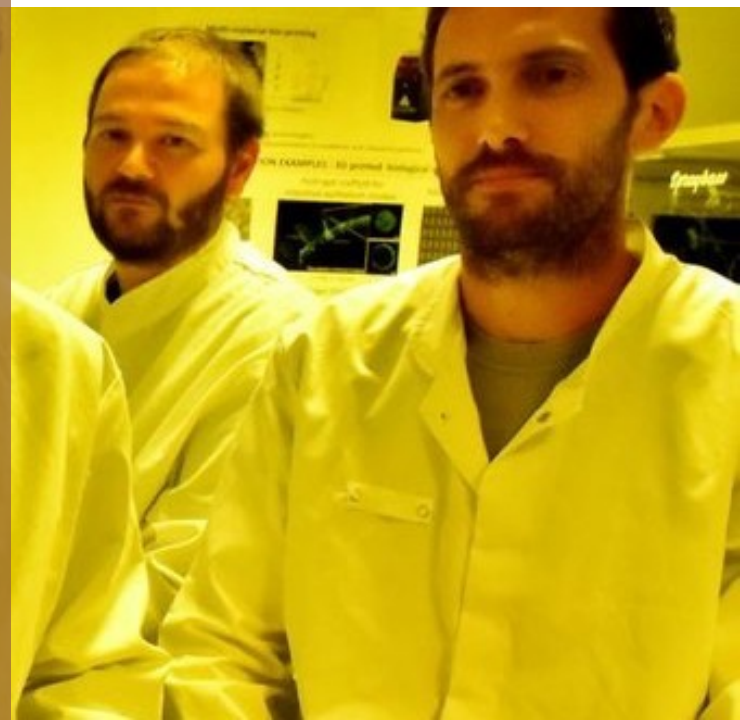
Fabrication additive :

Panorama des technologies et opportunités
pour les sciences de l'environnement



25/11/22

Rémi Courson, IFREMER, REM/RDT/LDCM
Vincent Raimbault, LAAS-CNRS, MNBT, MICA



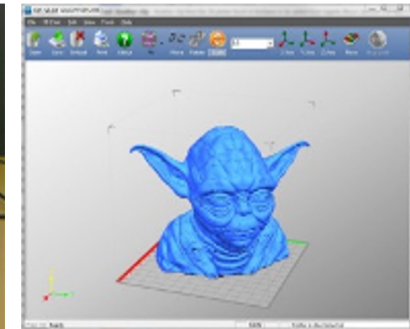
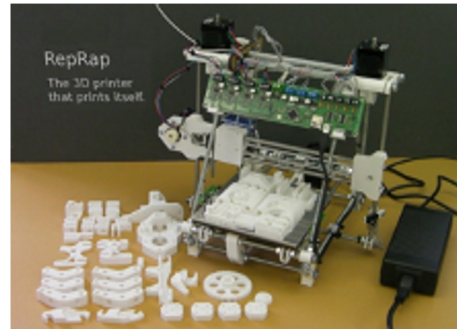
Que signifie Impression 3D ou Fabrication Additive (FA) aujourd'hui ?

- 80 First patent application for RP technology (Dr Kodama in Japan)
- 84 First demonstration of stereolithography (Dr JC André)
- 89 SLS patent was issued to Carl Deckard
- 90 EOS sold its first "stereos" systems
- 92 FDM patent was issued to Stratasys
- 96 Sanders Prototype (Solidscap) and Z corporation set up
- 97 Arcam was established
- 98 Objet geometries launched

L'impression 3D (ou fabrication additive, FA) est l'une des différentes techniques utilisées pour fabriquer un objet en trois dimensions. Dans l'impression 3D, des procédés additifs sont utilisés, dans lesquels des couches successives de matériaux sont placées sous contrôle informatique. Ces objets peuvent être de presque n'importe quelle forme ou géométrie et sont produits à partir d'un modèle 3D ou d'une autre source de données électronique. Une imprimante 3D est un type de robot industriel.

Impression 3D =

Matériaux + Procédé de fabrication + Logiciel



Les matériaux...

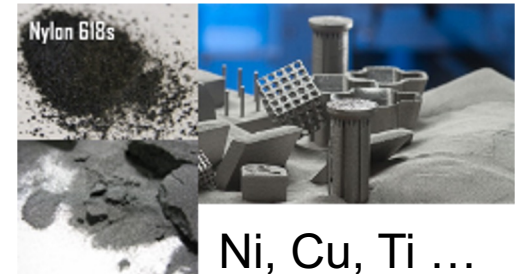


ABS, Nylon, PC, PETG, PLA, TPU ... : FDM (Fused Deposition Modeling)

Poudre de précurseur polymères (thermoplastique comme le Nylon, Polyamide, Polystyrene, ...)

Poudre de précurseur métallique (Ti, Ni, Cu, ...)

SLS (Selective Laser Sintering)



**Polymères photosensibles,
composites ... :**

SLA (Stereolithography Apparatus)

Jet d'encre (Objet Stratasys)

Matériaux pour la culture cellulaire



Bioprinting :

Cellules

Hydrogels (naturel, synthétique ...)

FA – Schéma général

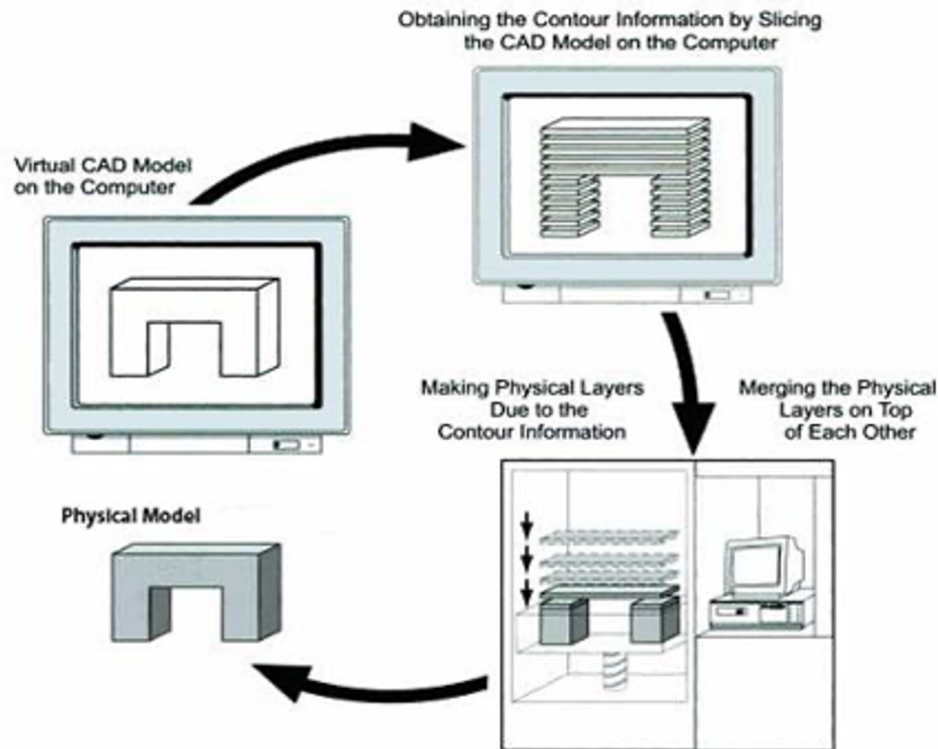
Points communs à tous les procédés

Les techniques de fabrication par couches sont mises en œuvre à partir d'une description numérique en strates de l'objet.

A partir d'un modèle 3D surfacique ou solide, il est généré un fichier STL (triangulation) sur lequel des sections parallèles sont calculées perpendiculairement à la direction de fabrication : c'est le processus de « tranchage »

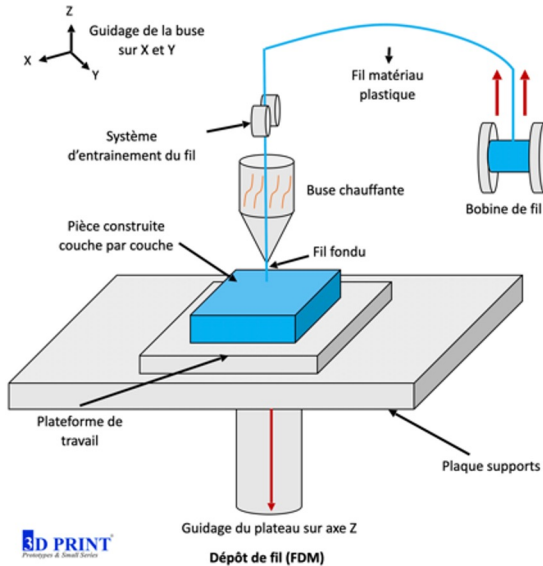
Le procédé de fabrication se fait :

- **par solidification** d'une résine ou d'un matériau thermo fusible
- **par agglomération** de poudre
- **par collage** de matériaux en feuilles.



Fusion de Fil

FFF (Fusion Filament Fabrication) / FDM (Fused Deposition Molding_Stratasy): dépôt strate par strate d'une fine couche de fil fondu



- Avantages :
 - choix matériaux (polymères et composites)
 - multimatériaux
 - grand volume d'impression
 - équipement peu coûteux
- Inconvénients :
 - rugosité de surface
 - retrait compliqué du matériaux support dans les parties poreuses
 - résolution
 - flambement

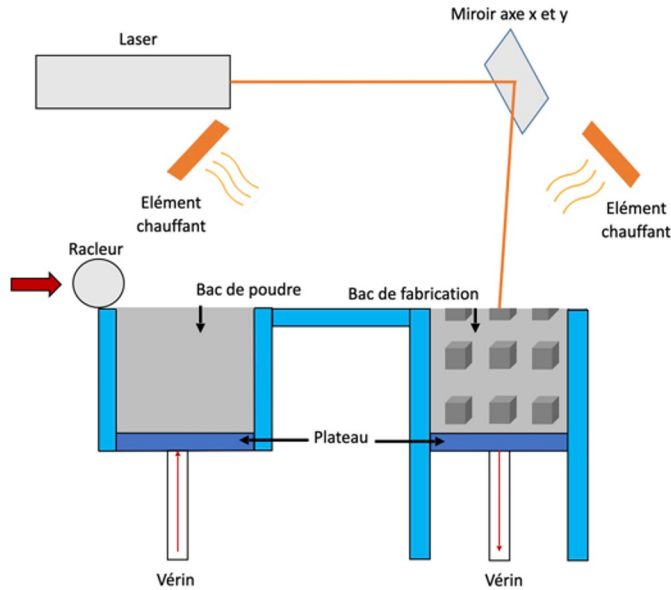


<https://www.youtube.com/watch?v=UdDMJnUWVKA&t=7s>

<https://www.3dprint.fr/prototypage/impression-3d-par-depot-de-fil-fondu-fdm/>

Fusion/Frittage de poudre

SLS/SLM : Frittage/Fusion par laser / EBM : Fusion par un faisceau d'électrons / LMD : dépôt de métal simultané avec sa fusion



3D PRINT
Prototypes & Small Series

Frittage de poudre (SLS)

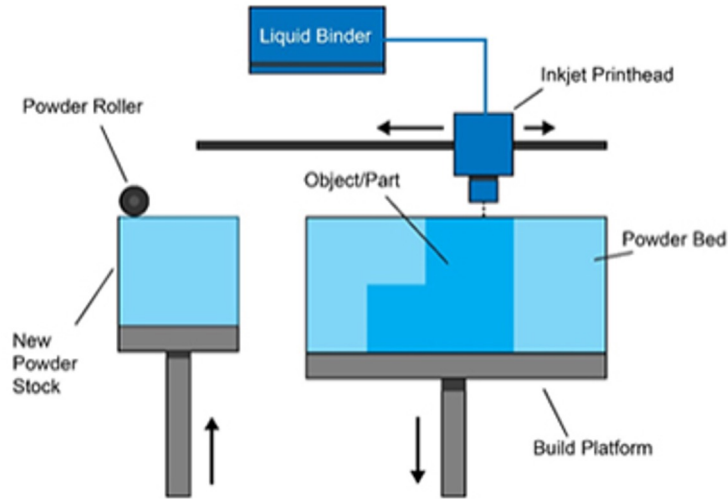
- Avantages :
 - polymère (SLS) ou poudre métallique (SLM/EBM)
 - grand volume d'impression (industriel)
 - pas de support
 - ...
- Inconvénients :
 - rugosité de surface
 - sécurité
 - coût de l'équipement (entre 18k\$ et 300k\$)
 - monomatériaux
 - post-traitement
 - ...



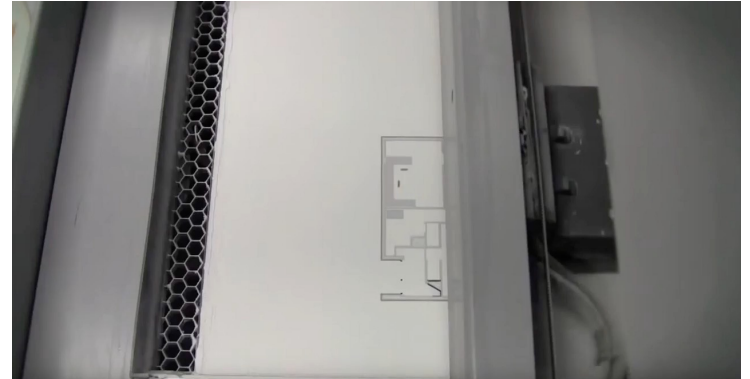
<https://www.youtube.com/watch?v=2YfyCYKiApp&t=1s>

Collage de feuilles ou de poudres

SDL : Selective Deposition Lamination / SC : Strato-Conception / 3DP, BJ : Three Dimensional Printing, Binder jetting



- Avantages :
 - réutilisation de la totalité de la poudre non utilisée (50 % en SLS)
 - pas de support
 - pas de flambement (Tamb)
 - impression couleur
 - ...
- Inconvénients :
 - post-traitement
 - pièces plus fragiles (SLS, SLM)
 - ...



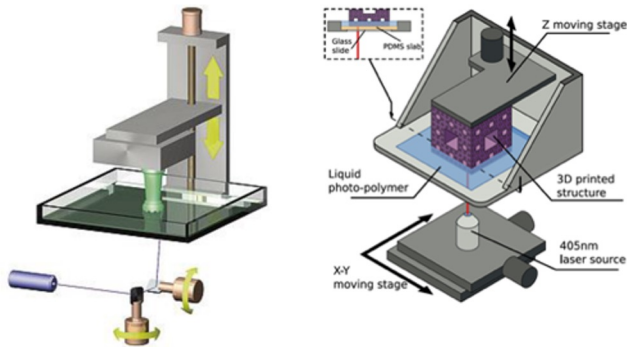
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>

<https://www.youtube.com/watch?v=tEpgsUsnF9g>

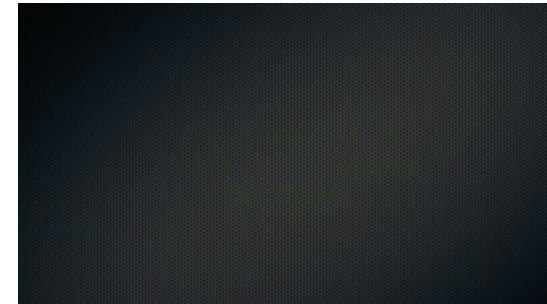
Stéréolithographie

SLA : StereoLithography Apparatus, DLP : Digital Light Processing

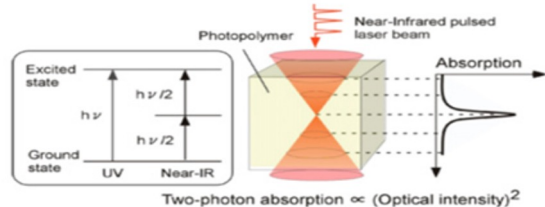
Monophoton



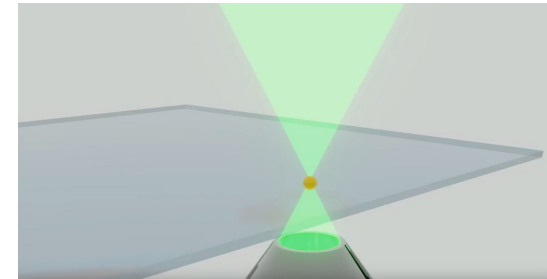
- Avantages :
 - grand choix de matériaux
 - équipement moyennement coûteux (dépend de la résolution)
 - très bonne résolution (monophoton : 5 μm et biphoton : 150 nm)
 - ...



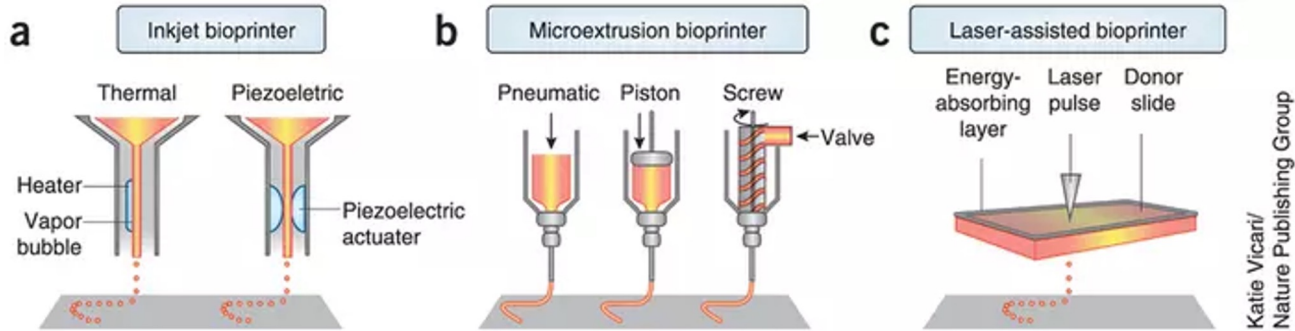
Biphoton



- Inconvénients :
 - multimatériaux
 - difficilement accessible
 - post-traitement, supports
 - volume d'impression limité
 - ...



Bio-Printing

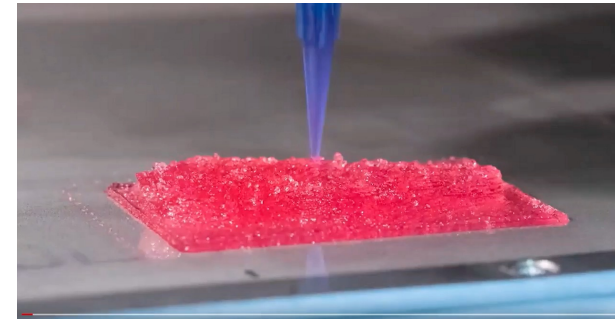


- **Avantages :**

- impression d'hydrogel avec ou sans cellules
- grand choix de matériaux
- équipement moyennement coûteux (dépend de la résolution)
- ...

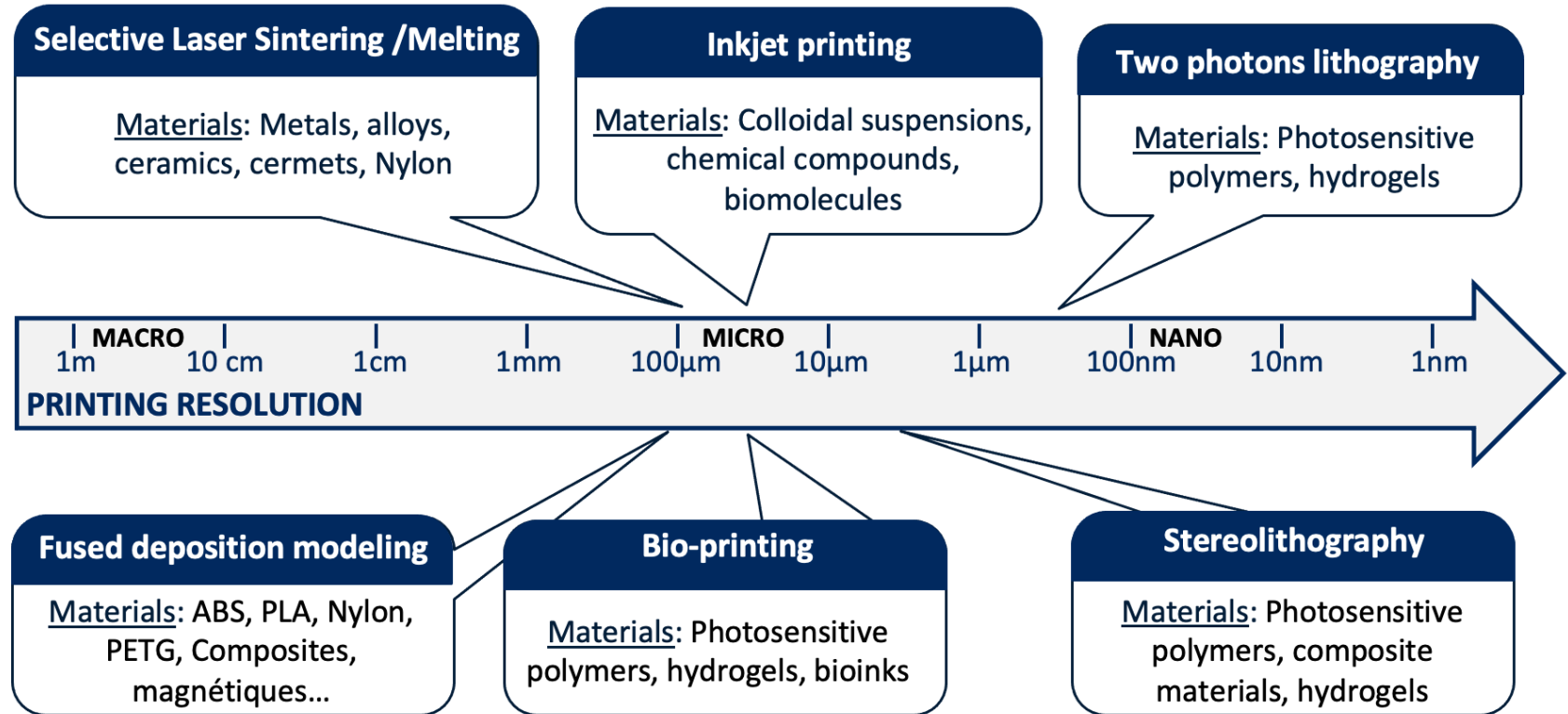
- **Inconvénients :**

- multimatériaux possible via l'extrusion (double)
- volume d'impression limité
- ...



<https://www.youtube.com/watch?v=GotdoAneWck>

Ce qu'il faut retenir





Laurent L.

Arnaud E.

Peut-on jouer* dehors avec l'impression 3D ?

Exemples de déploiements in-situ

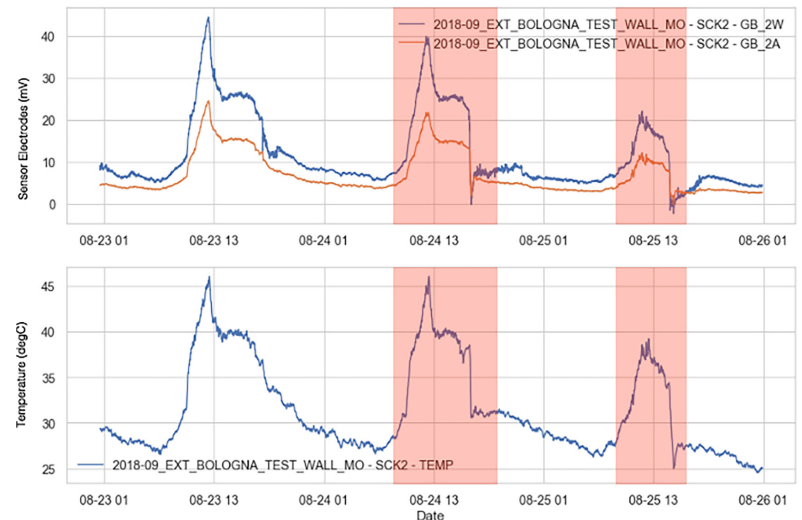
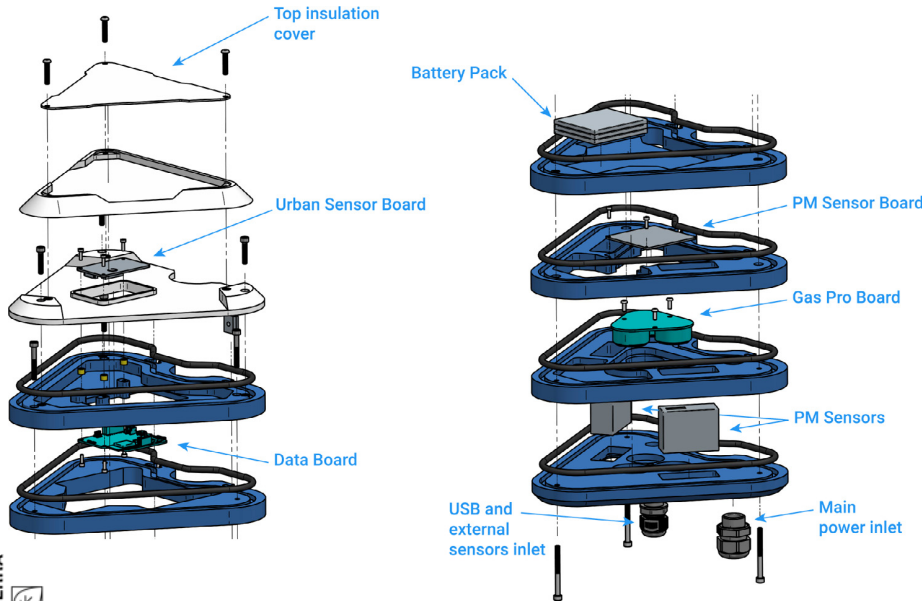
- **Sciences participatives :**
 - Projet Smart Citizen
 - Projet KOSMOS
 - Sonde Multi-paramètres
- **Analyseurs chimiques en flux :**
 - Exemple de DCU
 - Exemple de Tellabs
 - Exemple du CHEMINI à l'Ifremer
- **Capteurs IR et EC**
- **Échantillonneur eDNA**



NDLR : *travailler

Déploiement in-natura, sciences participatives, et conception itérative

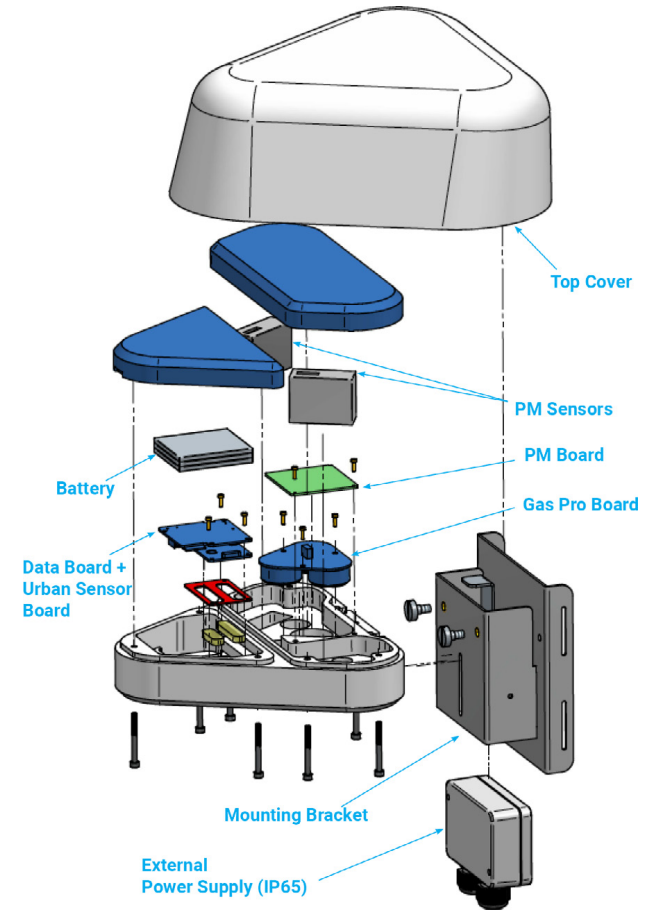
- Pollution sonore, qualité de l'air (CO, NO₂, OX, RH, T°, PM2.5, PM10)
- Problèmes d'autoéchauffement + variations dues au rayonnement solaire (RH, capteurs électrochimiques ...)



Déploiement in-natura, sciences participatives, et conception itérative

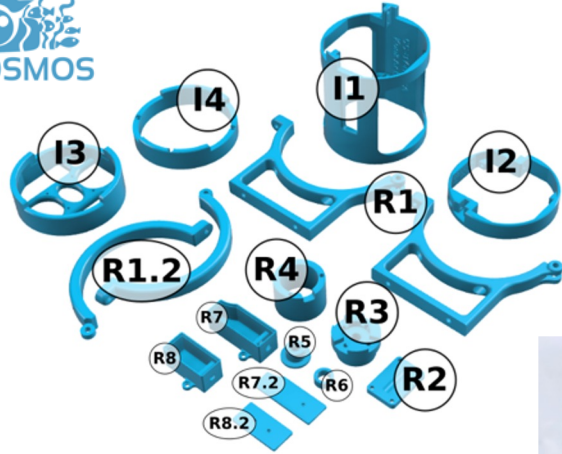
Smart Citizen Station V2.0 :

- Réduction de la masse du boîtier
- Ajout d'un capot thermoformé
- Sonde de T° externe



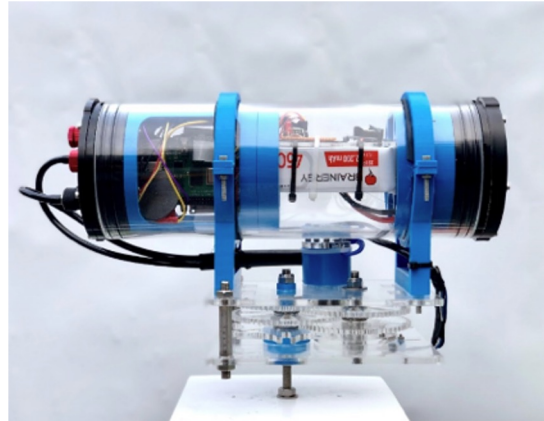
Camprodon et al. (2019) - Smart Citizen Kit and Station: An open environmental monitoring system for citizen participation and scientific experimentation.
<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00070>

KOSMOS : Kit d'Observation Sous-Marine Open Source



Le KOSMOS est une caméra rotative effectuant un panorama de 360° grâce à 6 rotations de 60° sur 30 secondes chacune permettant l'observation, sans lumière artificielle, de la faune benthique à une profondeur de 20 m.

Les côtes et littoraux sont animés par de nombreuses activités humaines : pêches, tourisme, plaisance, aquaculture, extraction, projets éoliens, pollutions, etc. Pour observer l'impact de cette activité sur le paysage benthique, une surveillance non invasive peut être utilisée. Cette observation permet d'évaluer l'état de la biodiversité et des ressources exploitées.



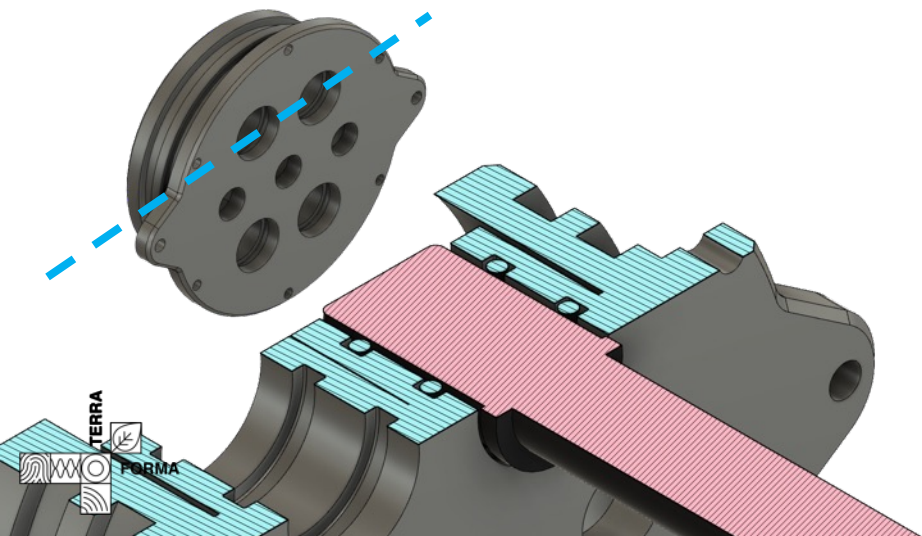
Les données du système sont des vidéos en full HD qui permettent ensuite l'identification et le comptage des poissons présents sur les images.

<https://wikifactory.com/@konkarlab/kosmos30>

Sondes multiparamètres

Marinisation/intégration de capteurs commerciaux :

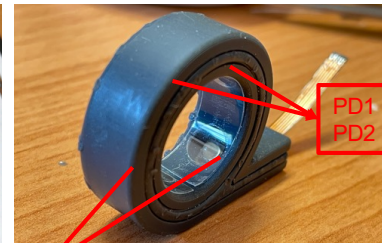
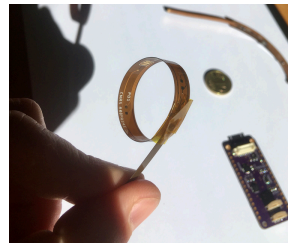
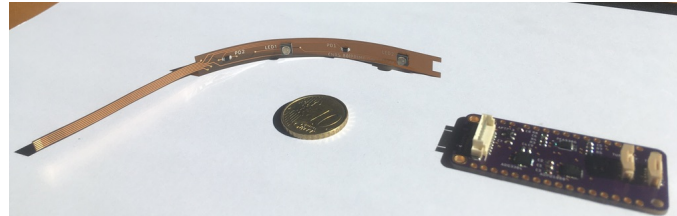
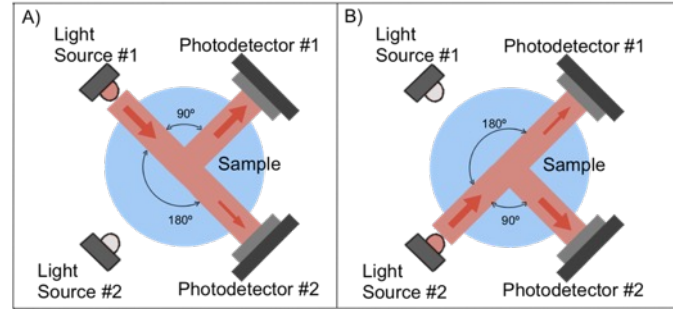
- Atlas Scientific : conductivité, O2 dissous, pH, ORP
- Blue Robotics : pression, température
- Ici adaptable aux boîtiers Blue Robotics



V. Raimbault - Projets CNRS 80|PRIME OpenPROBE et FEDER Econect

Sondes multiparamètres

- Développement de capteurs optiques (ex. capteur de turbidité) :
 - Alignement des composants opto-électroniques (LEDs+PDs)
 - Intégration d'optiques/filtres (si nécessaire)
 - Marinisation
 - Interface « chip-to-world » (ici standard Blue Robotics)

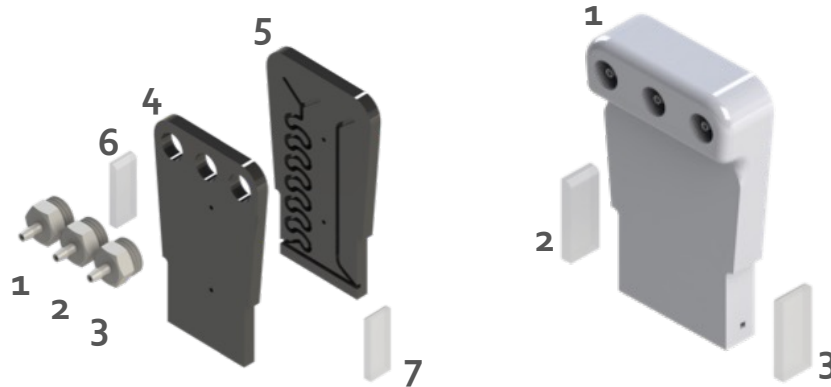
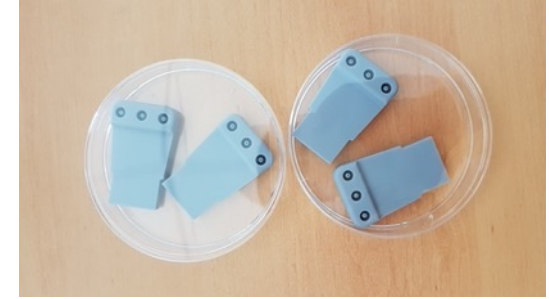
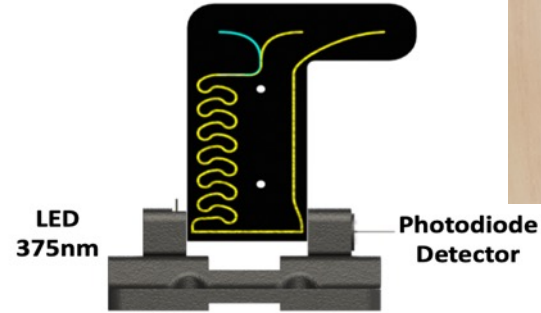
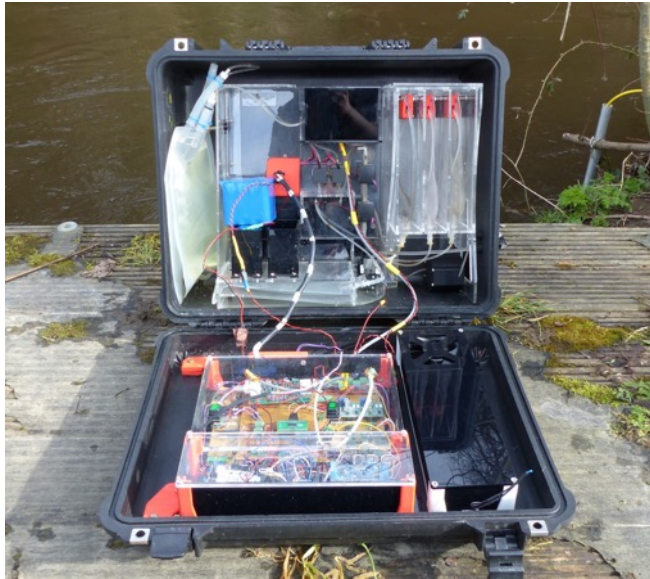


LED1
LED2

Ratio turbidity sensor – Raul Sanchez, Michel Groc, Renaud Vuillemin, Mireille Pujo-Pay, Vincent Raimbault – In prep. For MDPI Sensors Special Issue on « Low-Cost Optical Sensors »

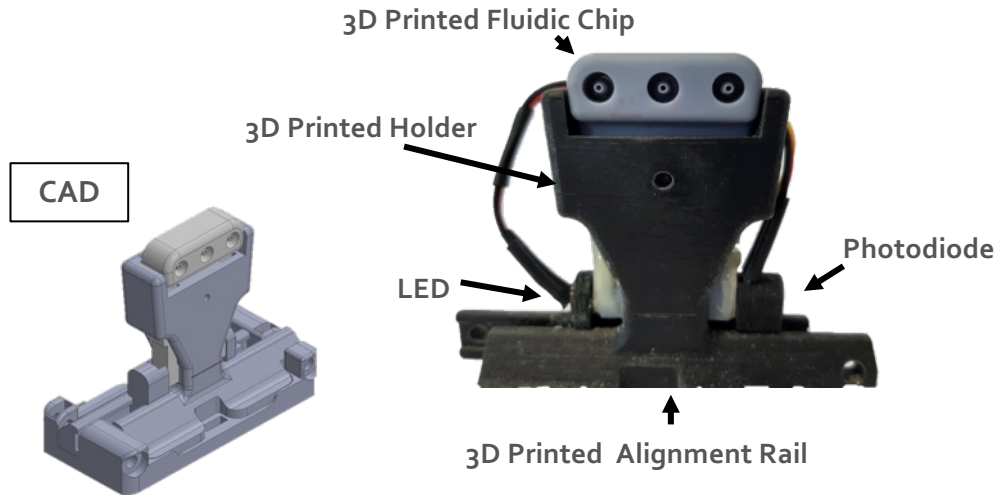
Dispositif Opto-Fluidique

Analyseur colorimétrique de différents nutriments



Microfluidics for environmental analysis

- DISPOSITIF FLUIDIQUE IMPRIMÉ
- DISPOSITIF D'ALIGNEMENT IMPRIMÉ



- Déploiement du
12/09/2019 to 26/10/2019

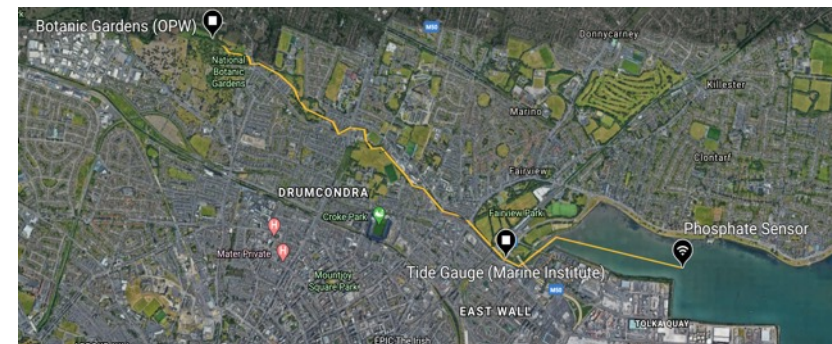
- 44 jours en continu

411 blanc

411 standard (50 μ M)

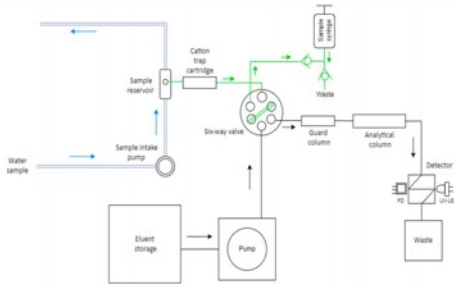
411 échantillons

Total sur la période : 1233 mesures

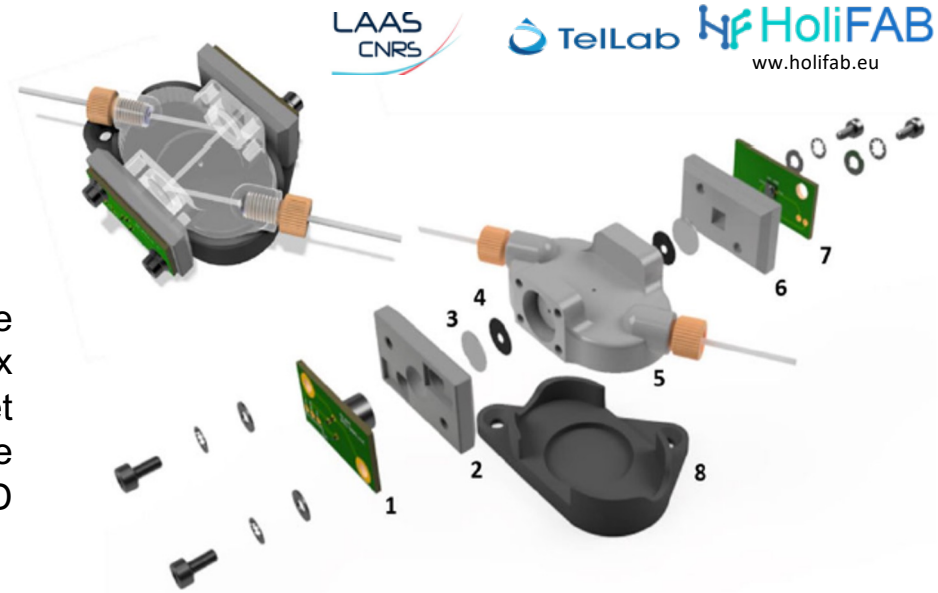


Dispositif Opto-Fluidique

Plateforme de Chromatographie ionique



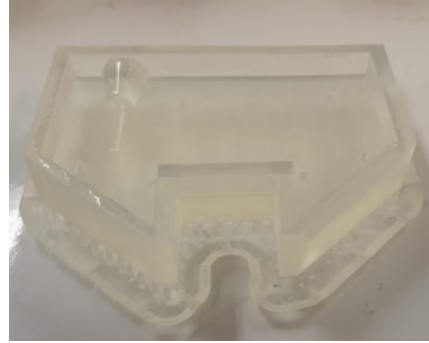
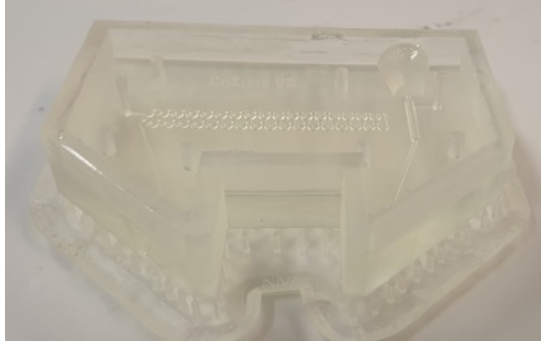
Détection de phosphate dans les eaux environnementales et industriels par mesure UV indirect via une LED à 255nm



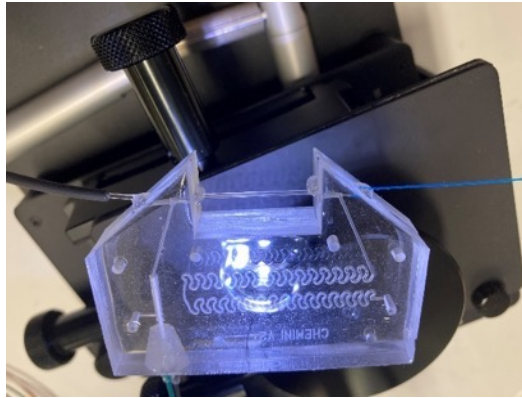
- 1^{er} génération de puce fluide faite en PMMA avec usinage et collage : taux d'échec important sur la fabrication des puces...
- 2^{ème} génération en SLA (5) : zéro perte + impression de support pour les LED (6) et le photodétecteur (2) facilitant l'alignement entre les deux.
- Collage (par adhésif double face) de fenêtres en quartz pour sceller le canal fluide (hybridation des procédés)

Chemini : CHEMical MINIaturised analyser

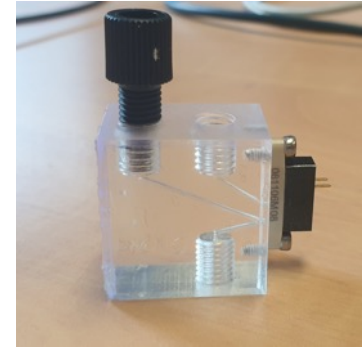
Nouvelle génération d'analyseur colorimétrique : miniaturisation en vue d'un déploiement sur Profileur (diminution des réactifs embarqués, de la consommation énergétique (actionneurs, carte électronique...))...



Moules imprimés via SLA



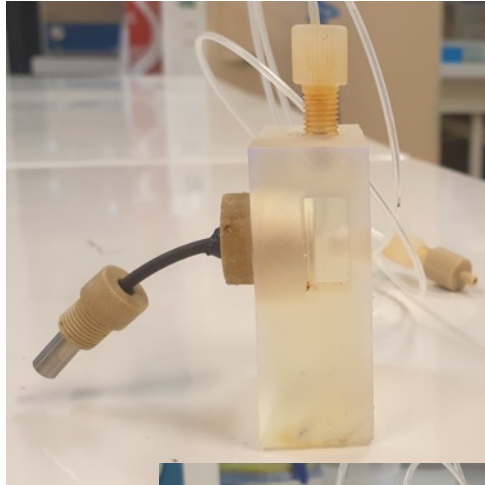
*Dispositif
fluidique
en PDMS*



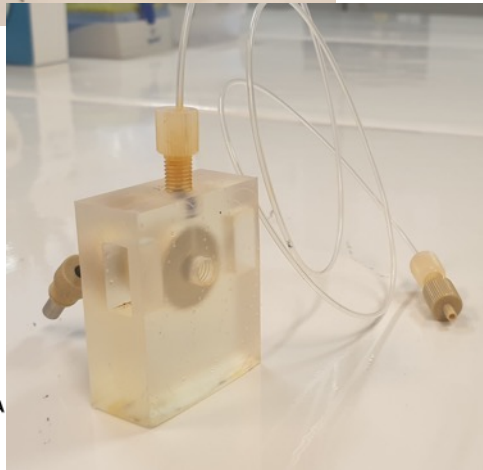
Manifold imprimé via SLA :

- Microcanaux de 800µm
- Pas de vis 1-4/28
- M2,5 taraudé

Chemini : CHEmical MINIaturised analyser



Support
optofluidique
imprimé par SLA



Découpe par
xurography d'une
membrane de
PDMS (élastomère
souple) pour assurer
l'étanchéité entre la
pièce imprimée et la
fibre optique

Test d'une nouvelle cellule optique sur un analyseur Chemini en vue de diminuer la LOD pour la détection du Fer.



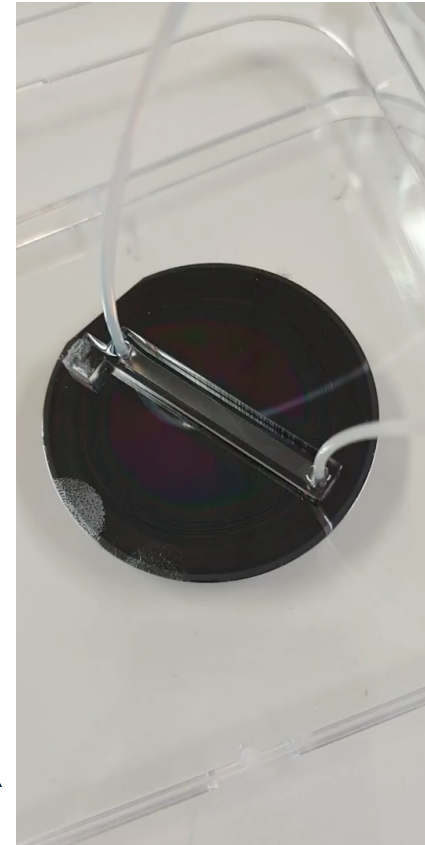
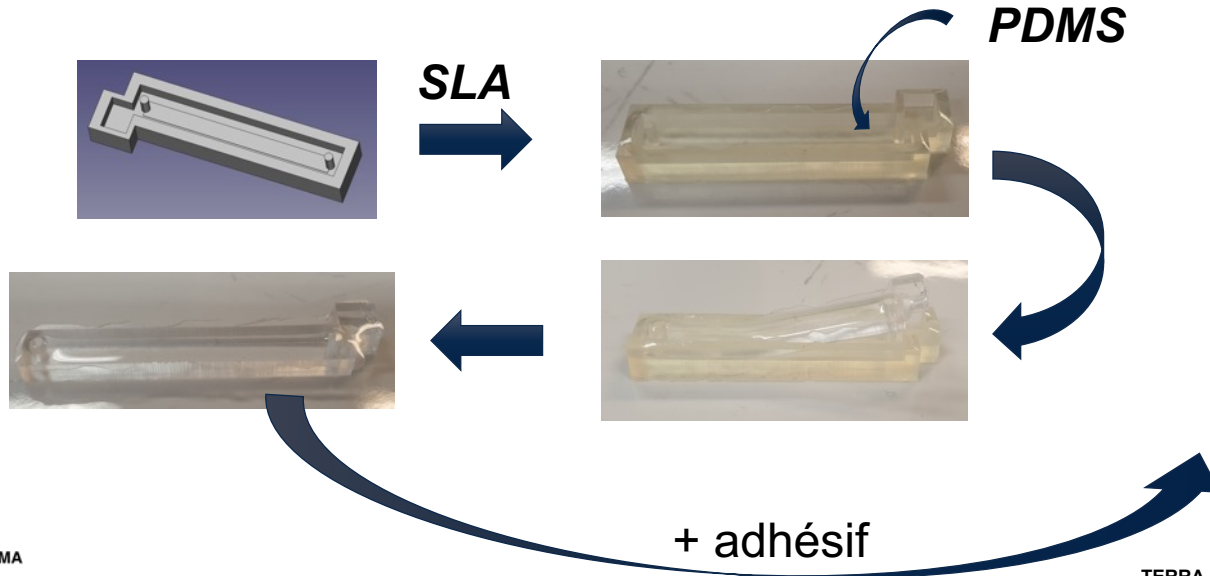
*Test en caisson
hyperbares à
300 bars et 4°C*

LOD ~ 300 nmol
LOD ~ 2,5 nmol

Développement de capteurs combinant la spectroscopie IR et EC

- Surveillance de l'eau naturelle en temps réel
- Analyse multivariable in situ des contaminants dans les stations de traitement des eaux usées

Fabrication d'une cellule fluïdique au-dessus de guide d'onde en verre (IR) de chalcogénures ou des électrodes (EC)



L'impression 3D à l'Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory (NOAA)

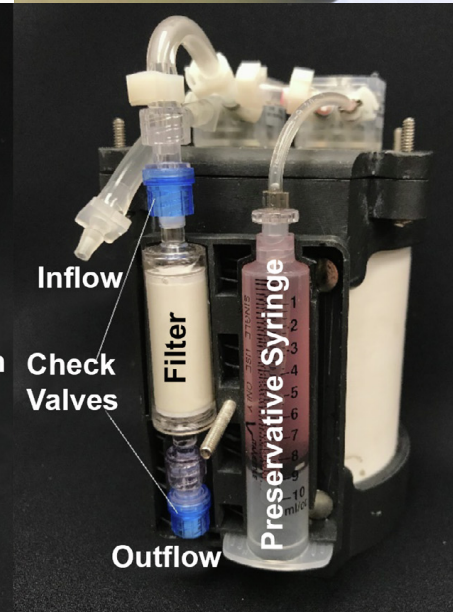
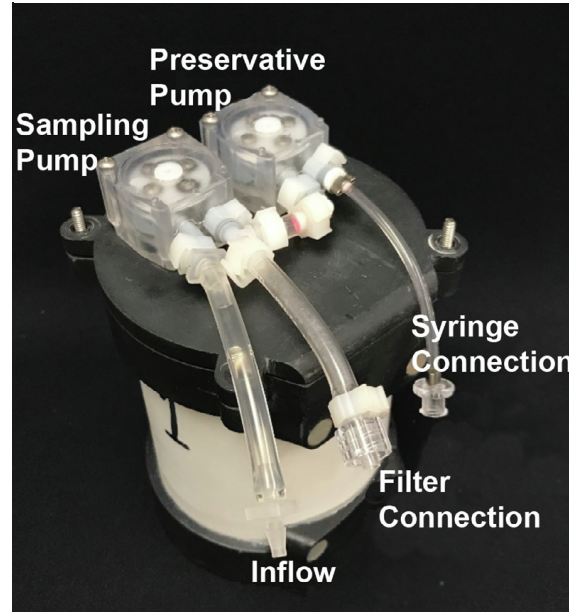
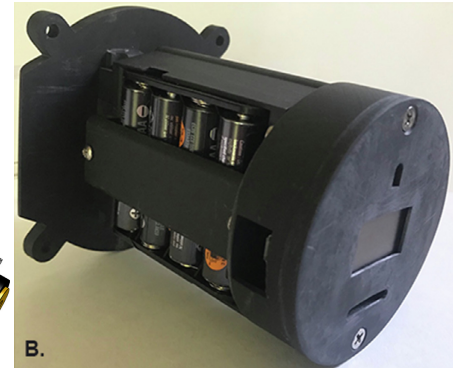
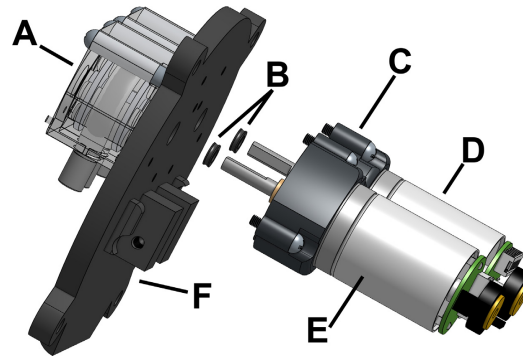
Enjeux :

- Réduction des coûts (1000 \$ → 220 \$)
- Réplication facilitée, démocratisation de la science
- Accessibilité de la technique (vs. Usinage/mécanique traditionnelle)

• Ex: Préleveur eDNA automatique sur Sterivex + DNAGuard

• Premiers développements en FDM

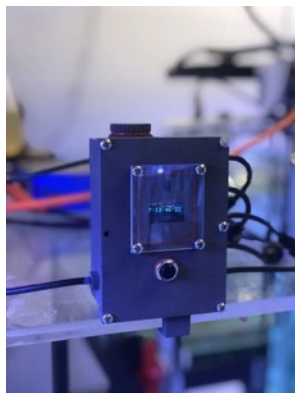
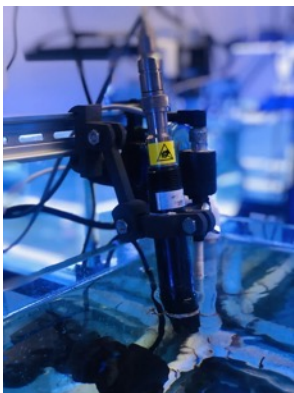
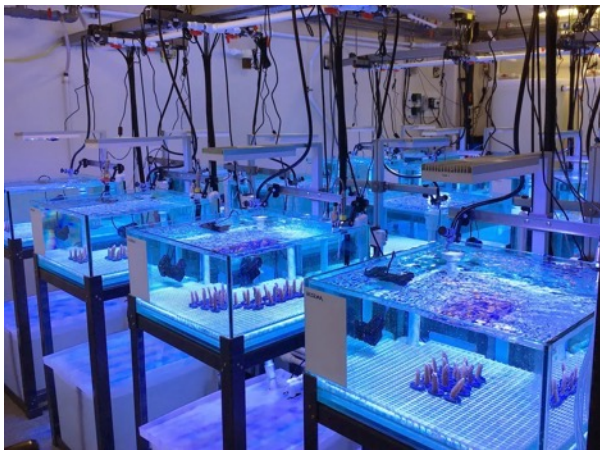
• Passage en SLA pour l'étanchéité (validation sur profondeurs > 55 m)



L'impression 3D à l'Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory (NOAA)



Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory
U.S. Department of Commerce



<https://formlabs.com/blog/how-noaa-uses-sla-sls-3d-printers-for-coral-research/>

Comportement des matériaux imprimés en environnements réels

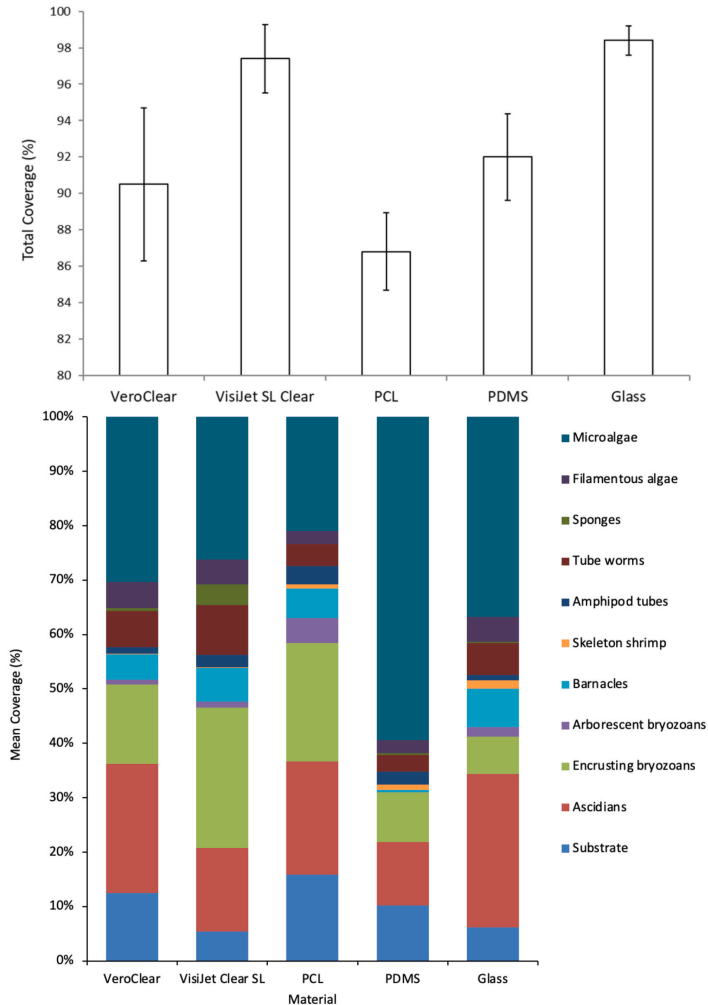


Article

Resistance of 3D-Printed Components, Test Specimens and Products to Work under Environmental Conditions—Review

Marcin Głowacki ^{1,*}, Adam Mazurkiewicz ¹, Małgorzata Stomion ² and Katarzyna Skórczewska ³

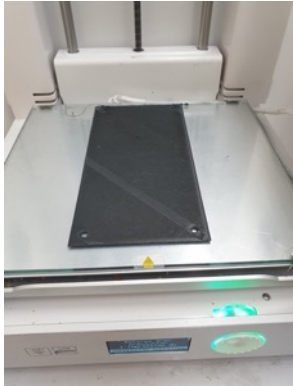
- Matériaux plastiques (exception titane par SLM)
- Modifications induites sur la structure du matériau, et sur ses propriétés mécaniques
- Influence de l'humidité, de la température, des UVs, de la salinité, des biofilms ...
- Publications croissantes sur le sujet (résistance, mécanismes de dégradation, études d'impact ...)
- Manque de standardisation :
 - Banque de matériaux en constante évolution
 - Influence majeure de la rugosité (≠ en fonction de la technique)



Ryley et al. (2021) - Comparison of biofouling on 3D-printing materials in the marine environment
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105293>



Test de matériaux (filaments FDM commercialisés par la société Nanovia) chargés en biocide.



FDM



Flex

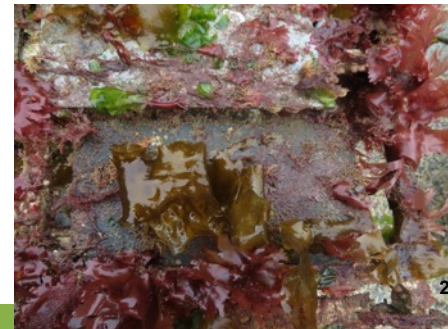
1 mois
d'immersion



Flex VX



6 mois
d'immersion



Impact environnemental de la Fabrication additive

Des avantages :

- Fabrication au plus près de l'utilisation
- Adapté à la petite série
- Modifications/évolutions aisées

Des inconvénients :

- Recyclage difficile selon la technique
- Déchets d'impression (support, erreurs de conception)
- Dégradation en milieu naturel (microplastiques)

Environmental Dimensions of Additive Manufacturing

Mapping Application Domains and Their Environmental Implications

Karel Kellens,¹ Martin Baumanns,² Timothy G. Gutowski,³ William Flanagan,⁴ Reid Lifset,⁵ and Joost R. Duflou¹

¹Life Cycle Engineering Research Group, Department of Mechanical Engineering of the KU Leuven, Leuven, Belgium

²3D Printing Research Group, Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom

³Environmentally Benign Manufacturing (EBM) research group, Laboratory for Manufacturing and Productivity and Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA

⁴Eco-assessment Center of Excellence, General Electric Company, Albany, NY, USA

⁵Center for Industrial Ecology, Yale School of Forestry & Environmental Studies, New Haven, CT, USA

DOI: 10.1111/jiec.13277

Life cycle energy and greenhouse gas emissions implications of polyamide 12 recycling from selective laser sintering for an injection-molded automotive component

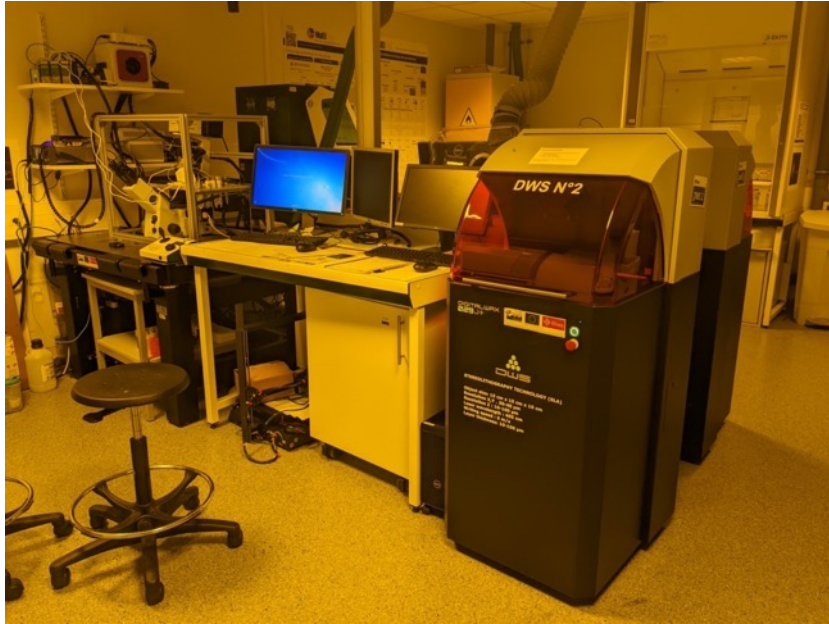
Di He¹ | Hyung Chul Kim² | Robert De Kleine² | Vi Kie Soo^{1,3} | Alper Kiziltas² | Paul Compton¹ | Matthew Doolan^{1,4}

A étudier au cas par cas !

Plateforme MultiFAB (LAAS CNRS)



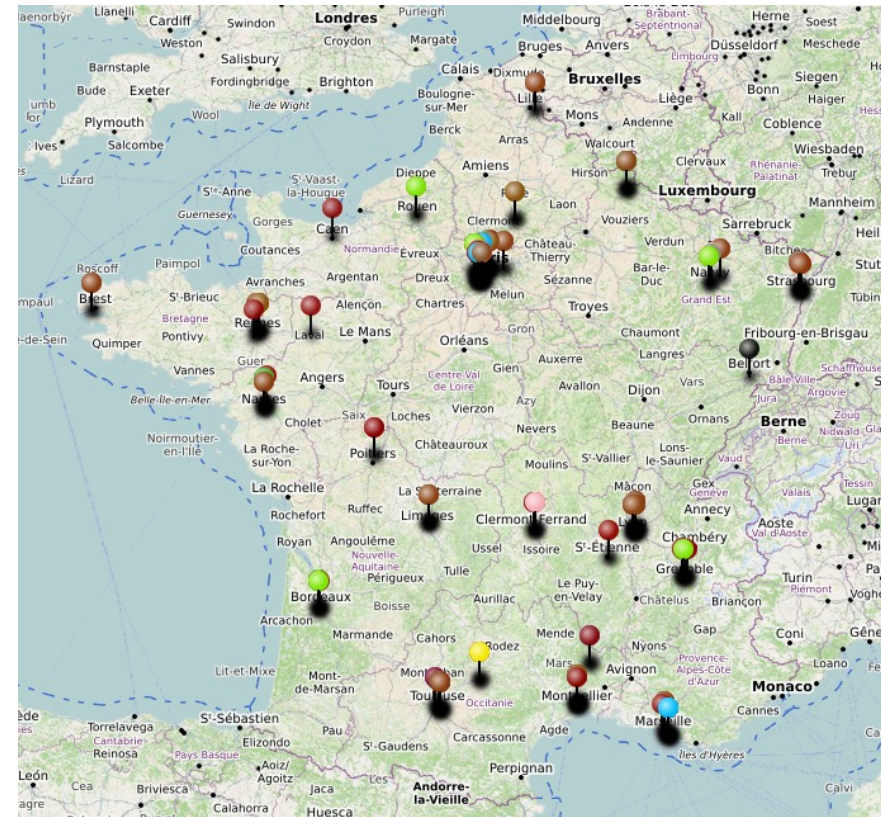
- Multi-scale and multi-material 3D printing project -



Plateforme ouverte aux académiques et aux industriels

<https://www.laas.fr/projects/MultiFAB/>





<https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/>

<https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/cartographie/>

<https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/webinaire-Fabrication-additive-impression-3D.html>

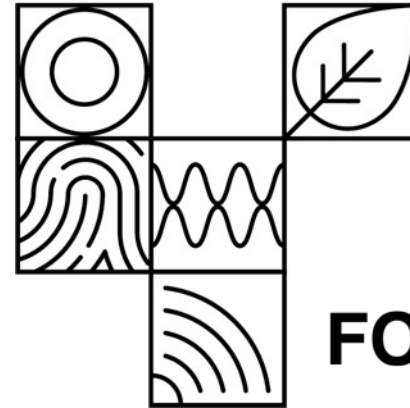


NDLR : on peut aussi ~~jouer~~ *travailler* dedans avec la fabrication additive !

Des Questions ?

<https://terra-forma.cnrs.fr>

TERRA



FORMA

