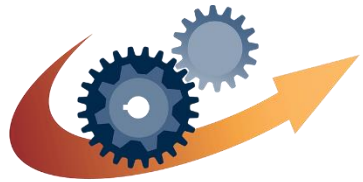


# « La mécanique et le monde du vivant » : De la matière à sa forme ; de sa forme à sa fonction ?

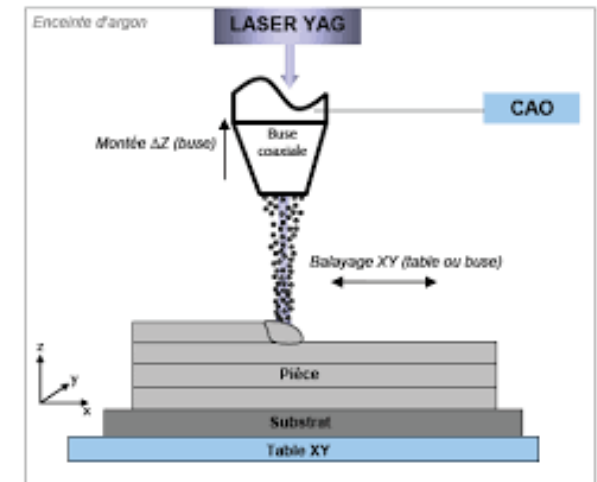
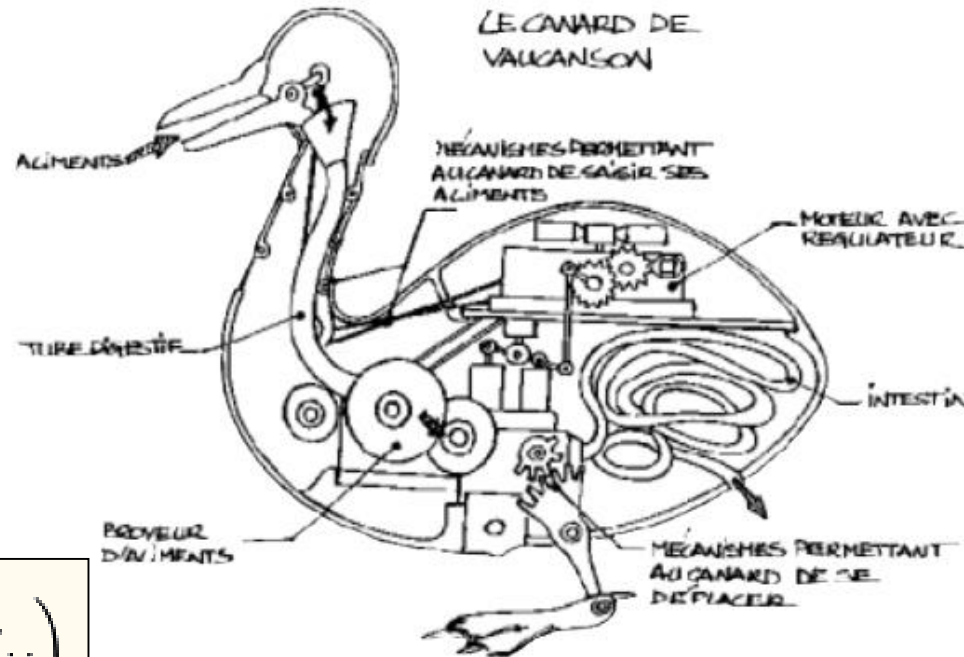


**RDM**  
RÉSEAU DES MÉCANICIENS



Par Jean-Claude André DR CNRS Nancy et RdM CNRS

[Jean-claude.andre@univ-lorraine.fr](mailto:Jean-claude.andre@univ-lorraine.fr)



$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right)$$

# AVERTISSEMENT/Warning

Cette présentation réalisée pour la réunion Progepi/W3P contient certaines figures qui ne sont pas la propriété du conférencier ; parfois l'auteur de l'article d'où la figure a été extraite est cité, mais pas systématiquement. En conséquence, il convient de considérer cette présentation comme interne (et donc comme non exportable) ne servant qu'à illustrer le sujet.

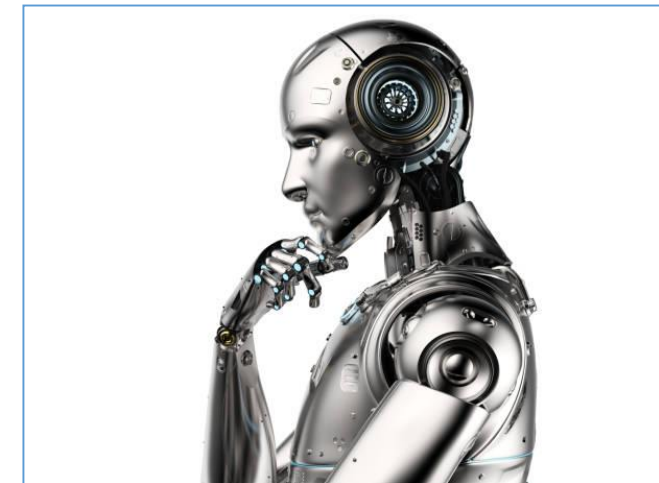
*Warning: this presentation made for the W3P/Progepi Meeting contains some figures that are not the property of the lecturer; sometimes the author of the article from which the figure was extracted is quoted, but not systematically. Consequently, this presentation should be considered as internal (and thus as non-exportable outside the meeting) only proposed to illustrate the subject.*

J.C. André and F. Demoly LRGP/ICB



# Un fil conducteur de l'exposé

Avec un titre très large pour cette ANF, partant de celui-ci je passerai rapidement à la notion d'artifice (artéfact) externe à l'Homme du Neandertal - (l'outil, l'arme, le vêtement,...), à ce qui en a fait un début de civilisation par la technologie avec l'exploitation du triptyque « mécanique, matériaux et leur mise en forme ». Ensuite, après avoir rappelé quelques fondements de la mécanique avec ses lois de base (mécanique du solide, élastomères, liquides), je passerai à une mise en correspondance entre ces concepts et la fabrication additive (3D, 4D et bio-printing) avec des accomplissements déterministes (3D typiquement), incertains (4D), complexes, aléatoires, avec des bifurcations (Bio-Printing)). En plus, avec le bio-printing, la mécanique n'est plus appliquée à l'extérieur de l'humain, mais à l'intérieur, avec des éléments complémentaires à respecter sur des aspects (comme en 4D) de robustesse, de vieillissement, d'imprécision sur la forme, etc.

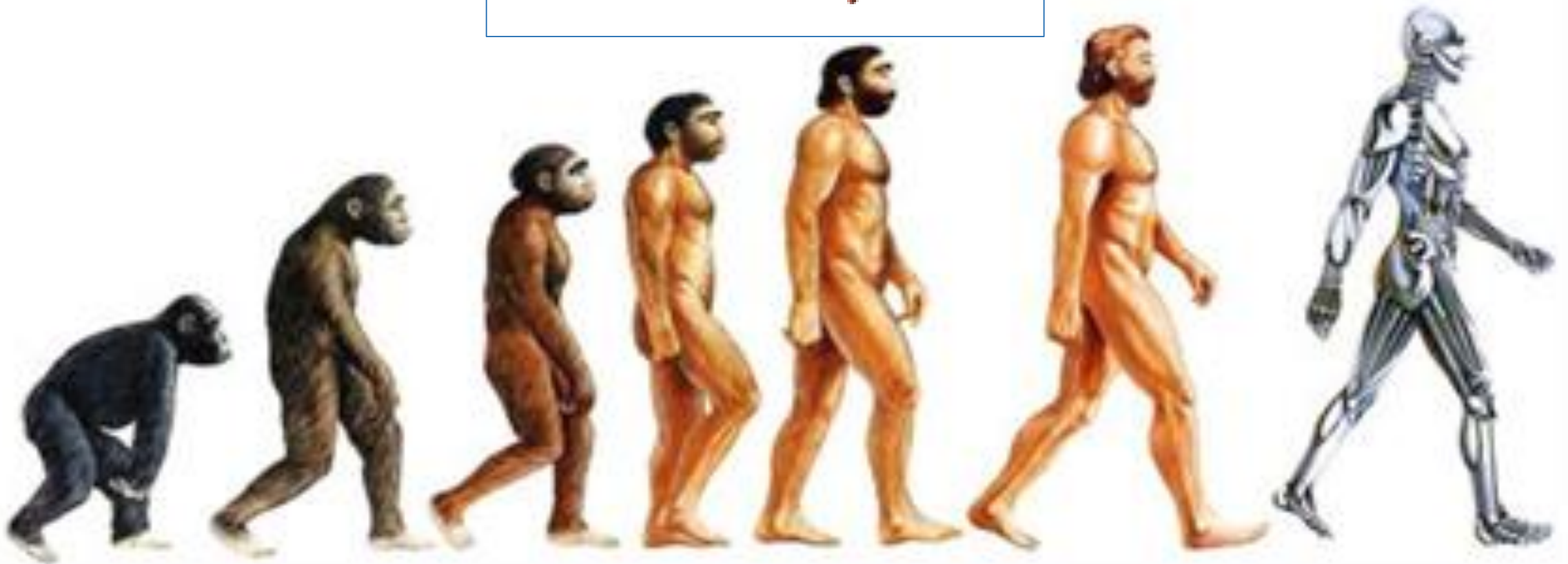
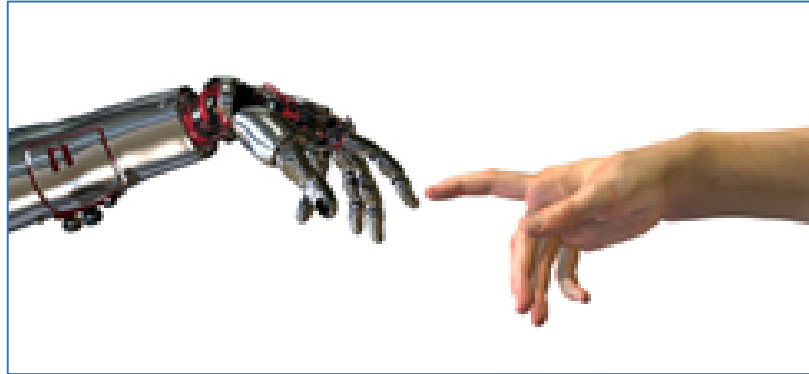




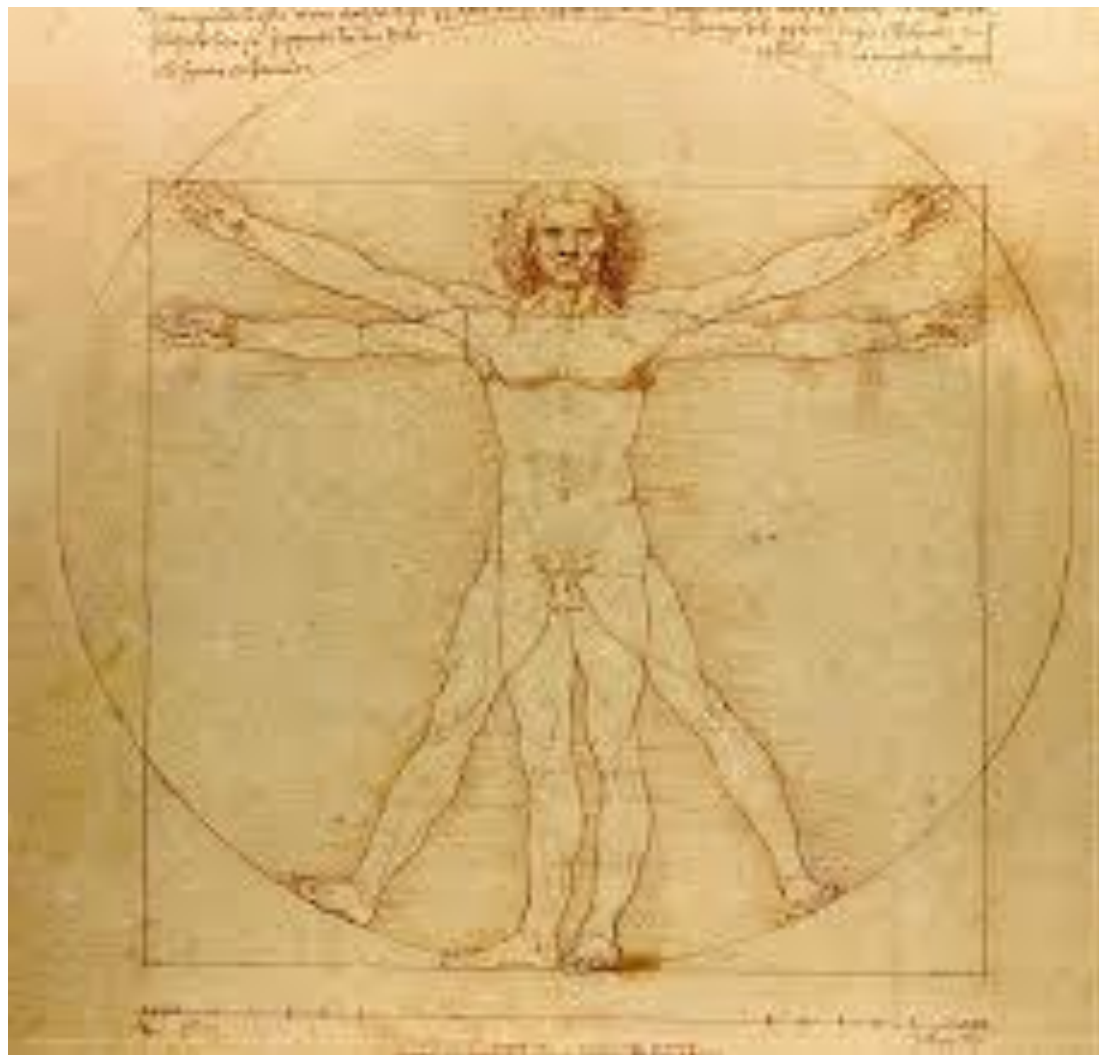
« L'imagination consiste à se représenter des objets absents et à combiner des images de ces objets entre elles. Elle fait virtuellement exister de nouvelles possibilités. En ce sens, elle s'affranchit des cadres et amène à voir le monde sous un autre angle et à sortir de la logique dominante. Elle permet d'expérimenter en pensée de nombreuses possibilités pour aboutir à de nouvelles idées » (Parmentier, 2020).

- Parmentier G. (2020) « Comment la créativité peut aider à surmonter la crise du Covid-19 »  
<https://theconversation.com/comment-la-creativite-peut-aider-a-surmonter-la-crise-du-covid-19-134859>

# La mécanique et le vivant ?

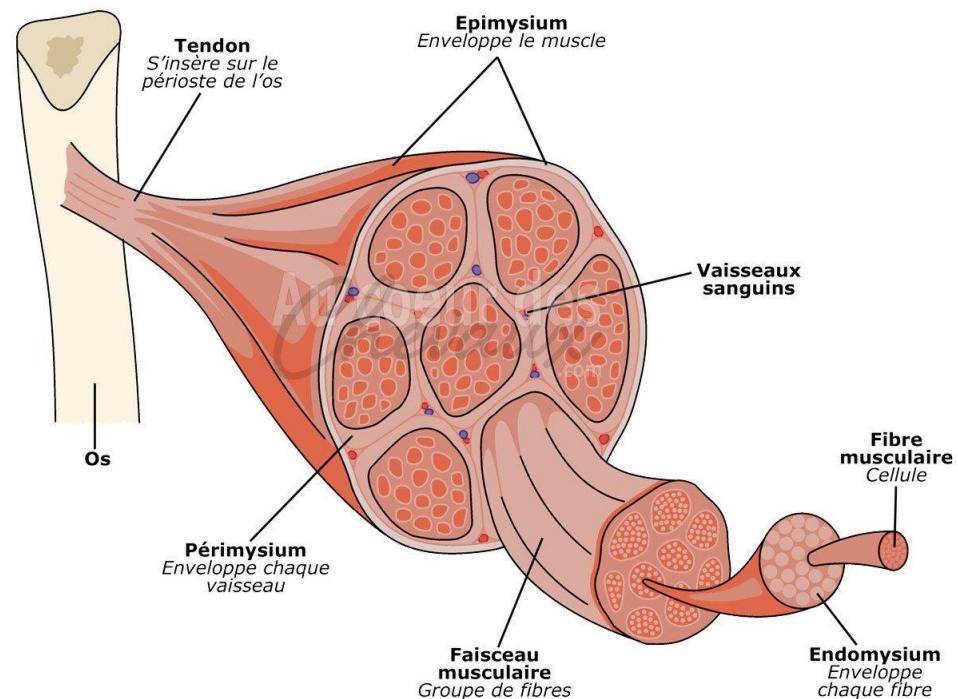
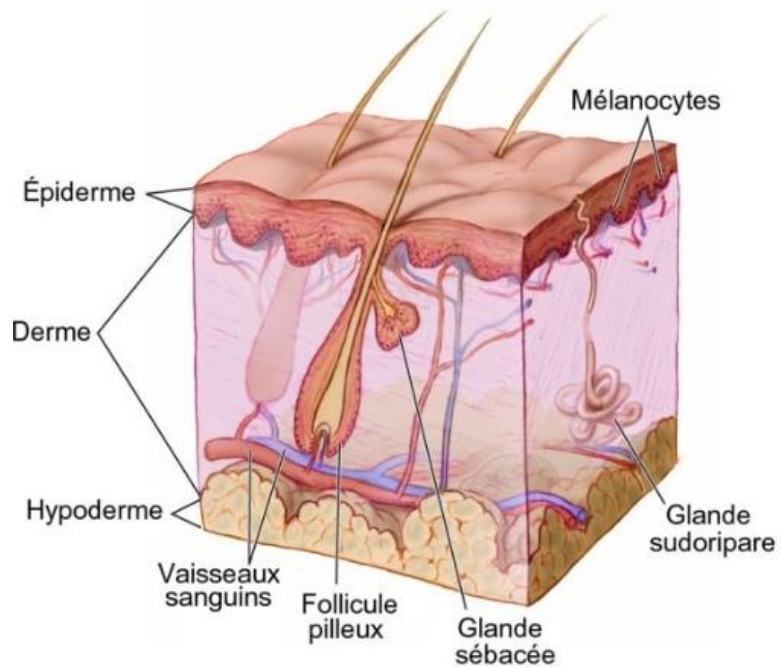
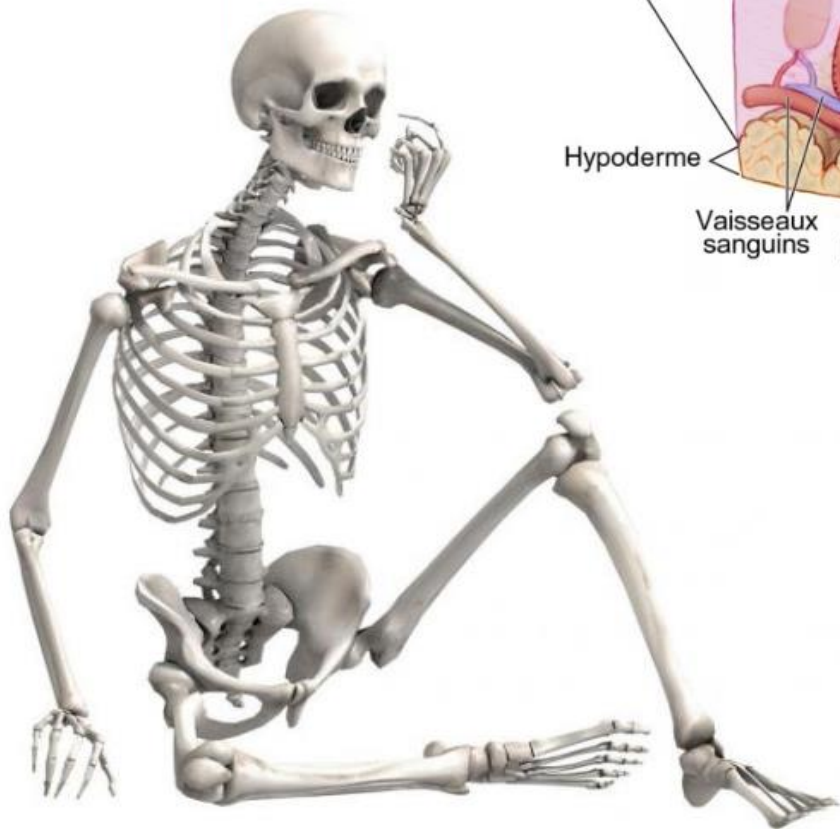


Externe

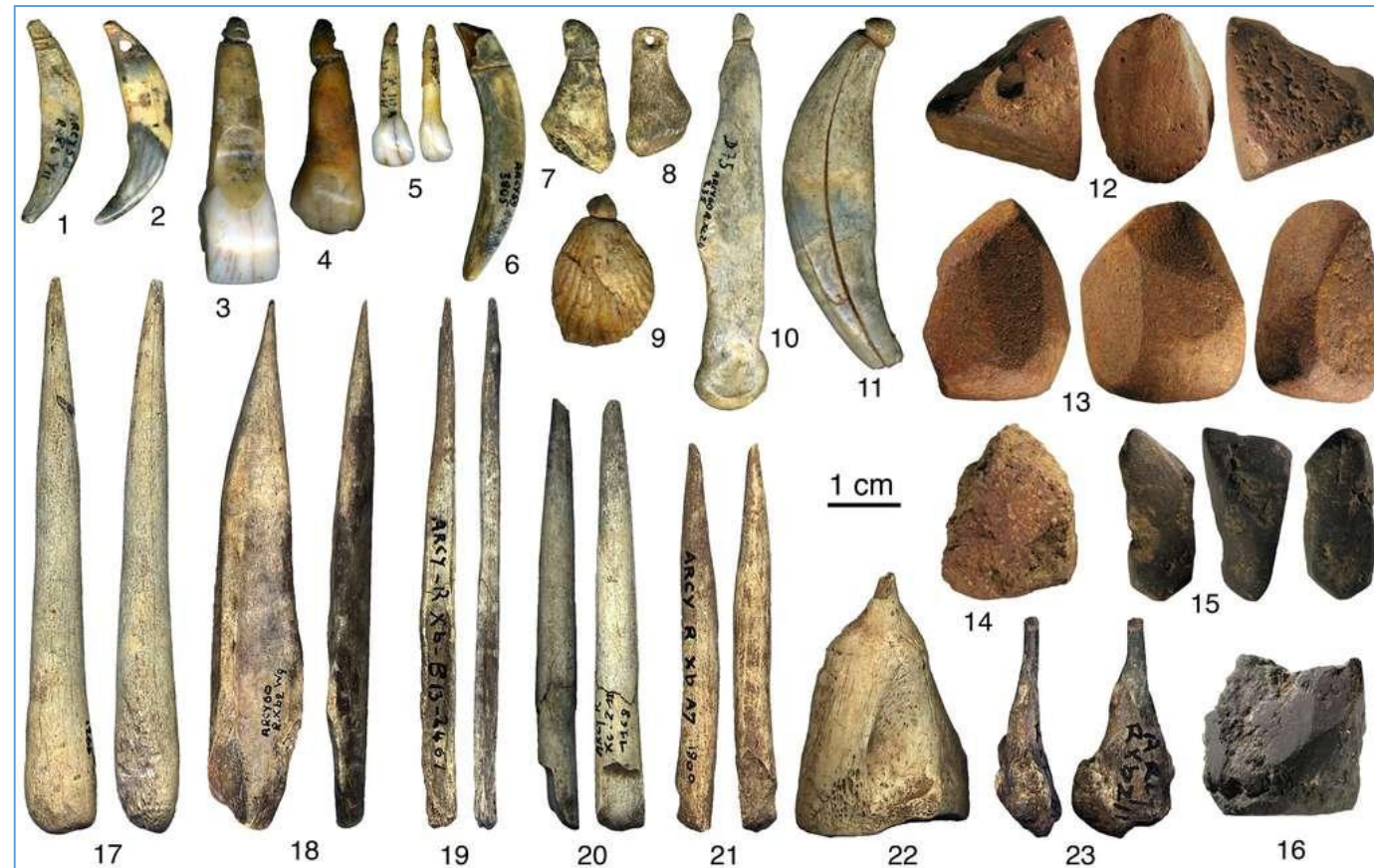


Interne

# En interne

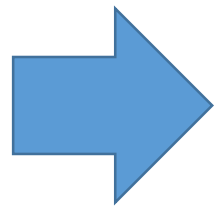
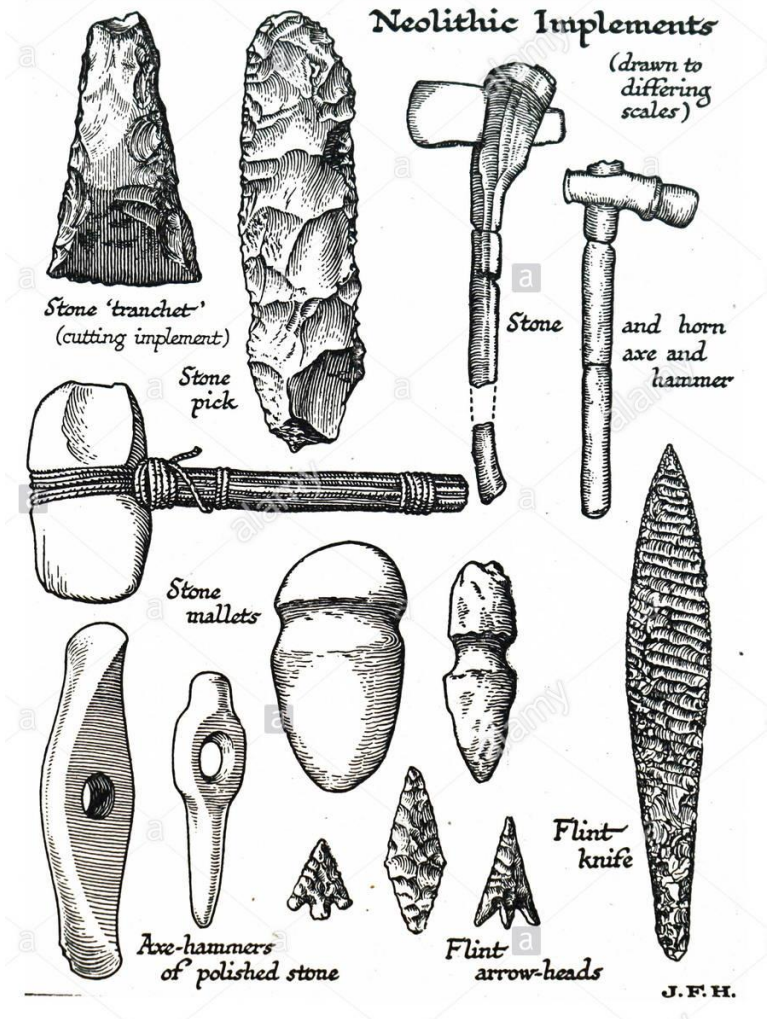


# Outils





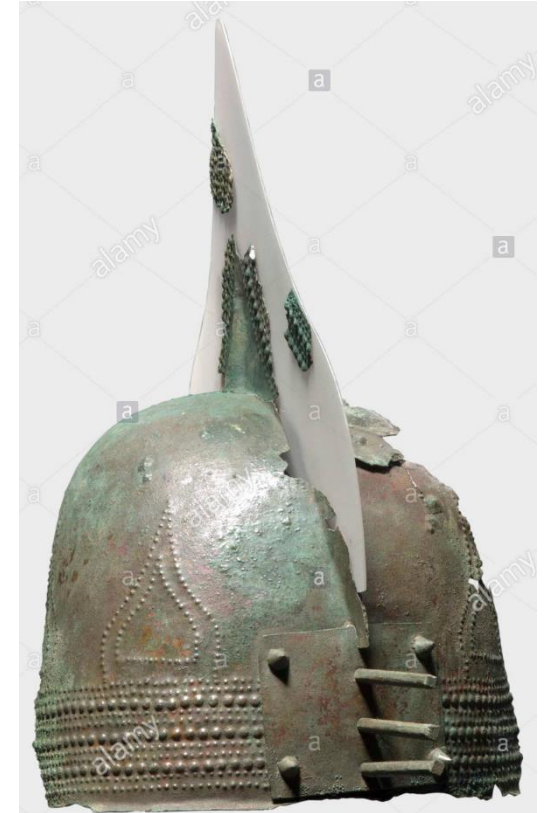
# Outils (suite)



# Outils (suite 2)



# Outils (suite 3)

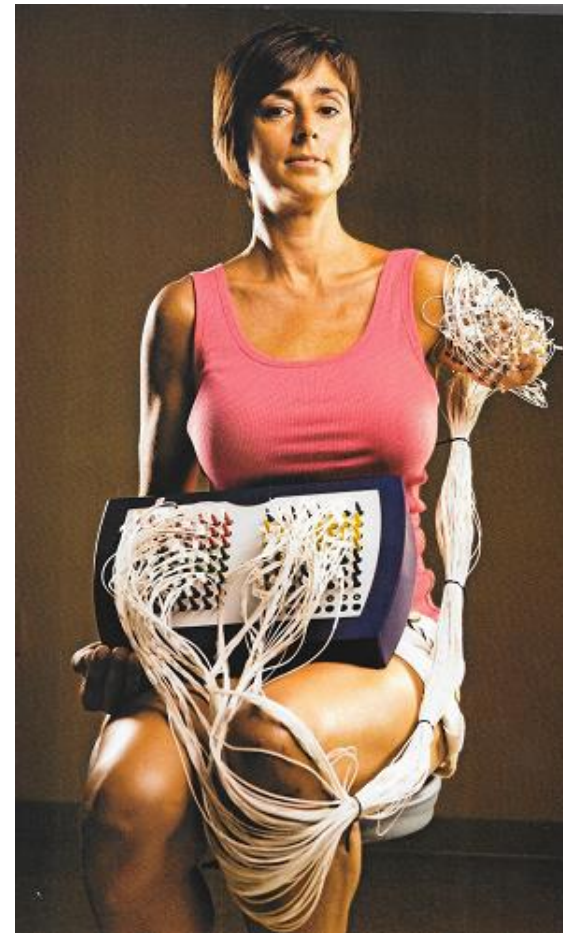
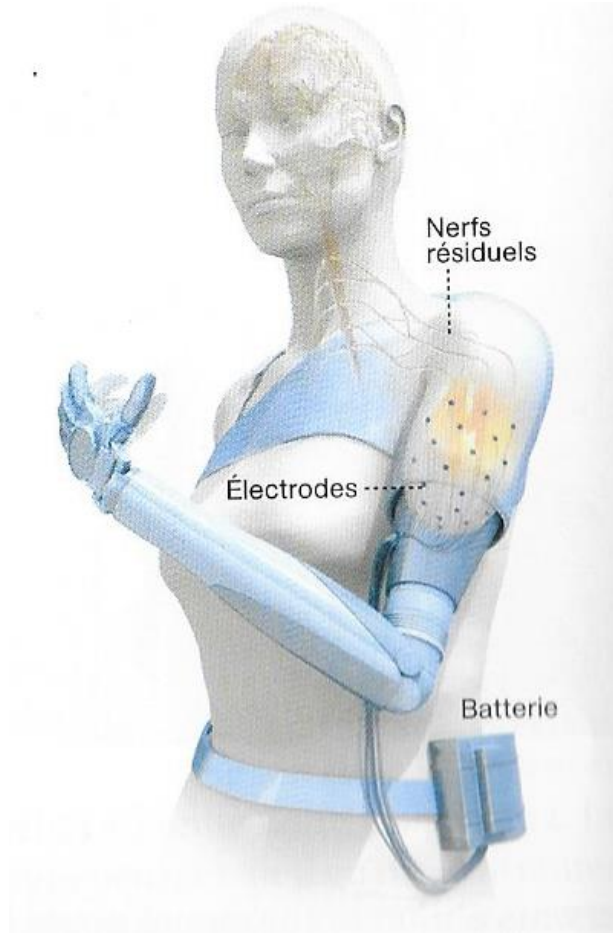


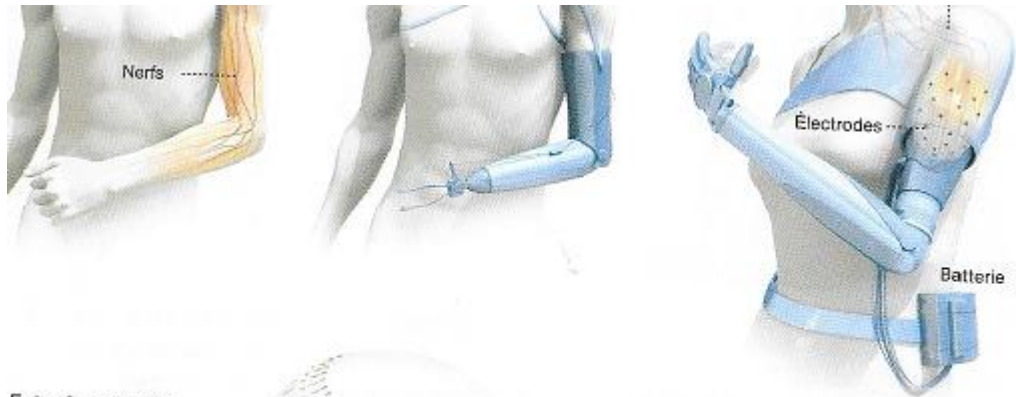
# Balistique



# Médecine







Entre 3,2 et 3,6 kg  
est le poids moyen  
d'un adulte.  
Une main bionique peut  
porter jusqu'à 27 kg.

**CONCEPTION MODULAIRE** Le boîtier  
de commande placé dans la paume  
de la main permet d'utiliser  
la prothèse après une amputation  
totale ou partielle.

**5 SENSORIELLES**  
Les capteurs de l'extrémité  
détection de la pression,  
de la température,  
de la force. Les données  
sont transmises par  
des électrodes, puis renvoyées  
vers le cerveau.

Il y a  
17 positions  
de la main.

ÉQUIPE DU DR. JENNY WANG, ILLUSTRATION DE BRYAN CHRISTIE,  
REHABILITATION INSTITUTE OF CHICAGO; LABORATOIRE DE PHYSIQUE  
À L'UNIVERSITÉ JOHN HOPKINS, UNIVERSITÉ DE L'UTAH

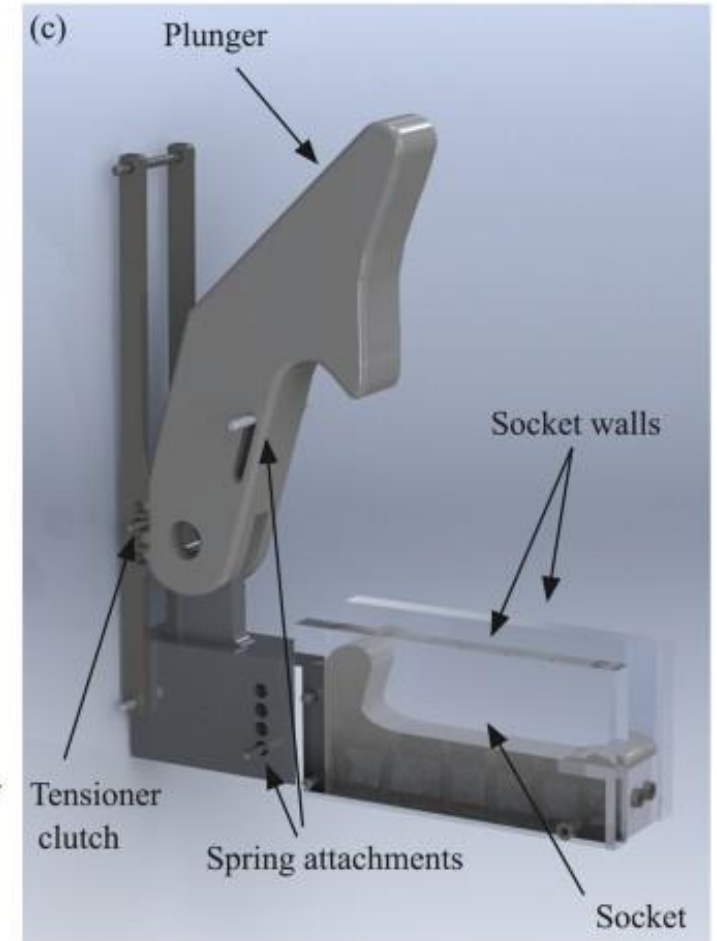
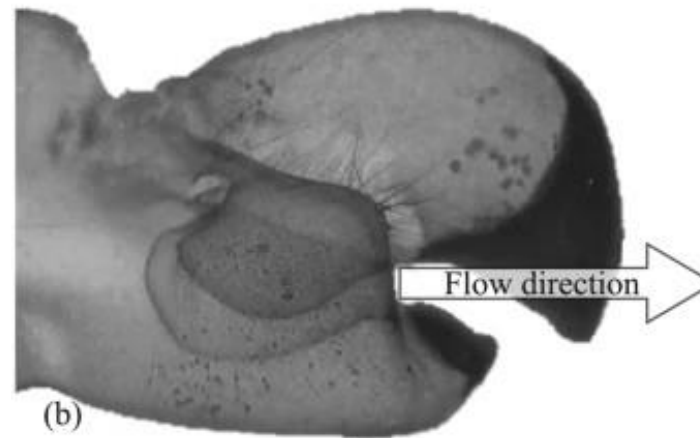
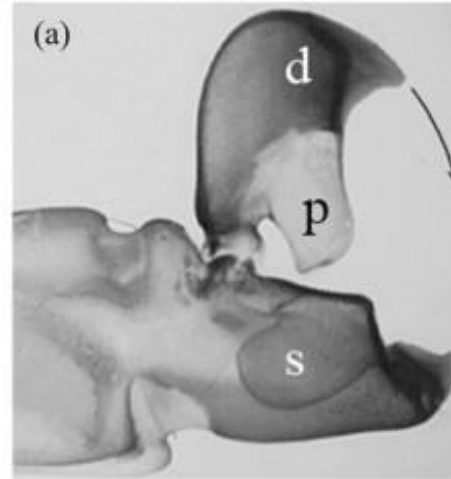


**HARNAIS EN FIBRE DE CARBONE**  
Moulé sur le corps, il constitue  
une coque dure mais légère.

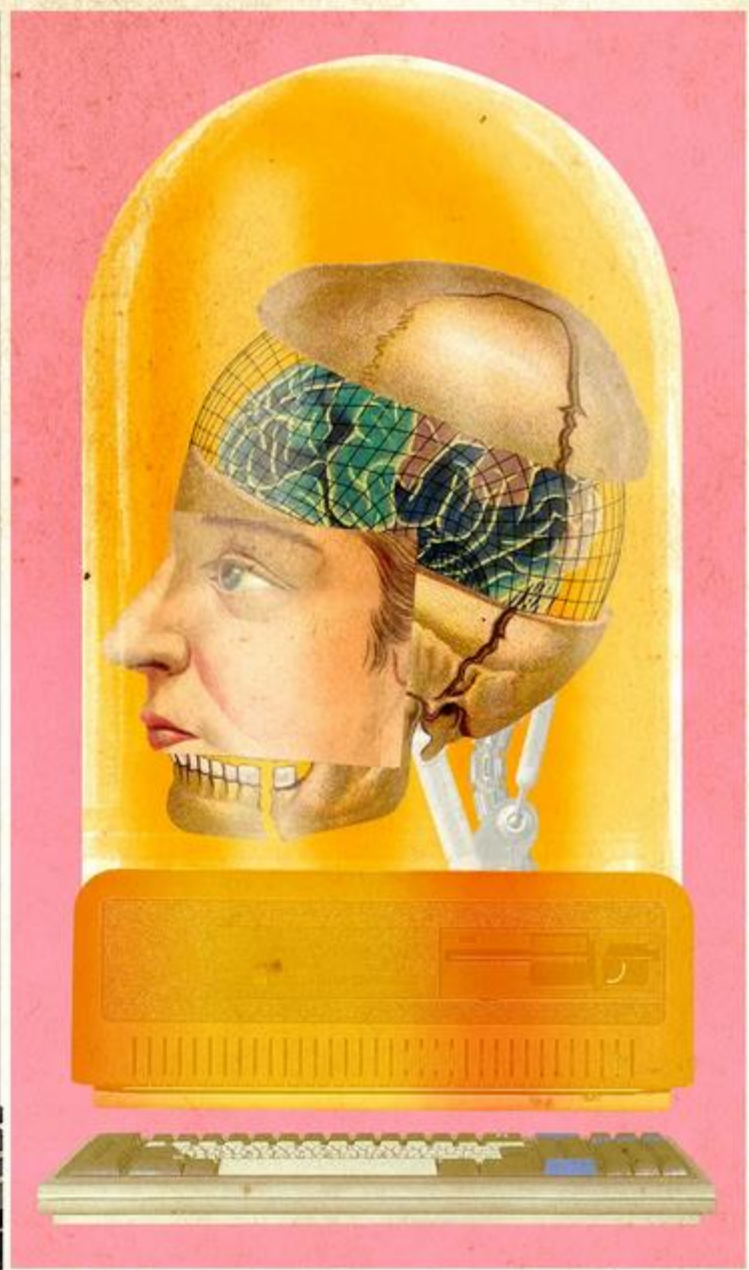
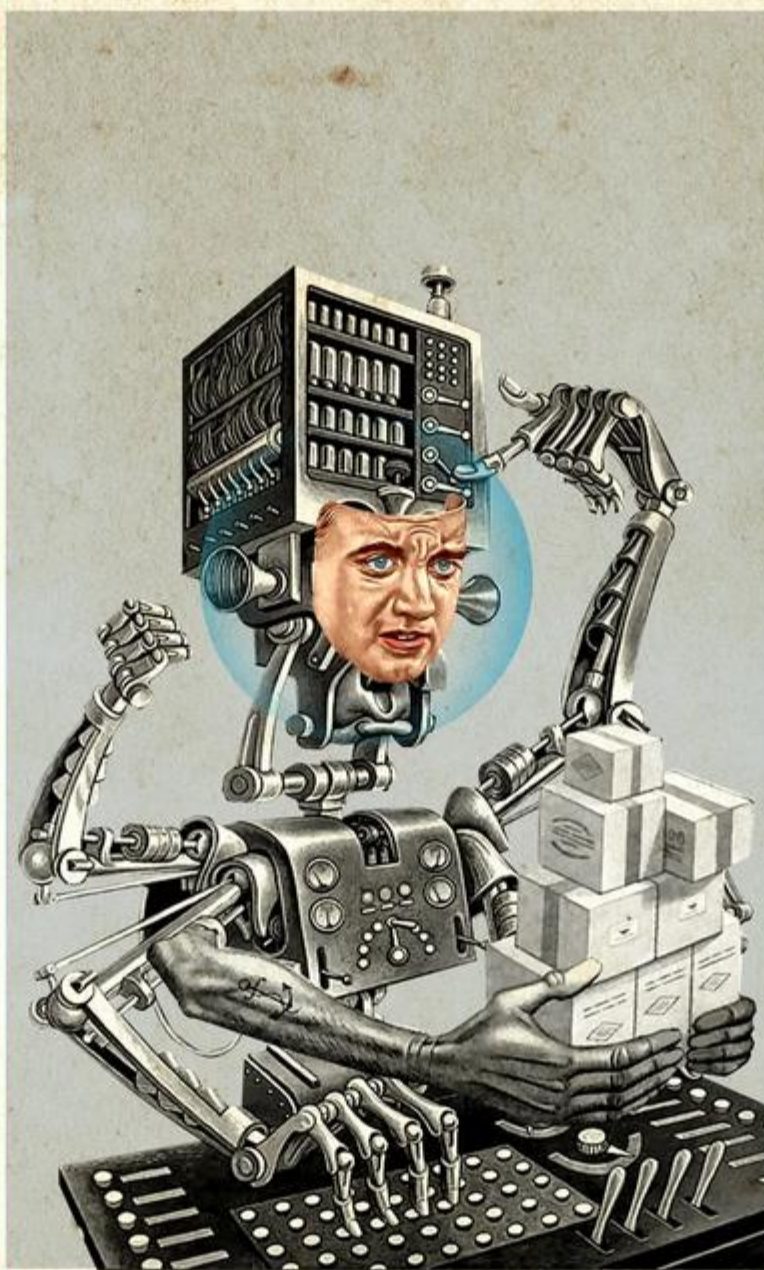
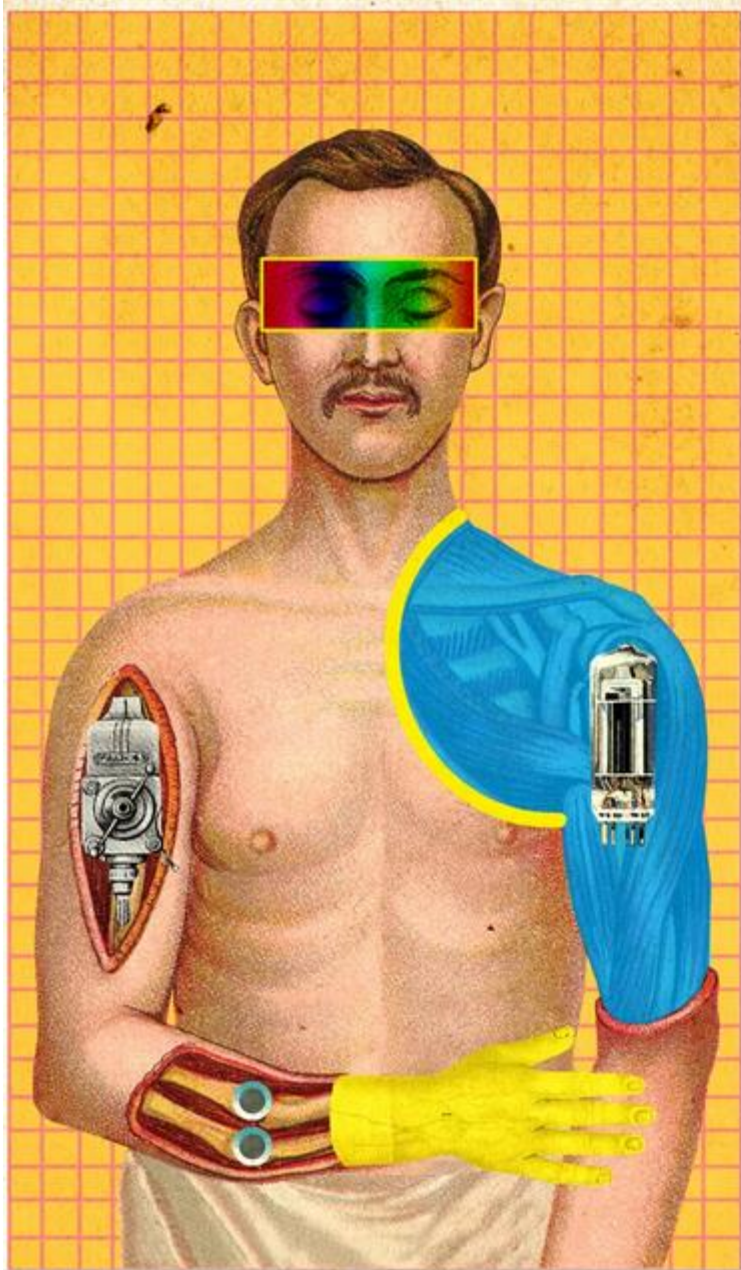
**BATTERIES AU LITHIUM**  
On peut les retirer chaque  
jour pour les recharger.

Chez les amputés,  
les nerfs résiduels  
peuvent être  
gravement endommagés,  
des électrodes  
pourraient être  
implantées dans le cerveau.  
Des capteurs, placés  
dans une capsule,  
recevraient les données  
et les dirigeraient  
vers le bras par un  
médiaire de fibres.

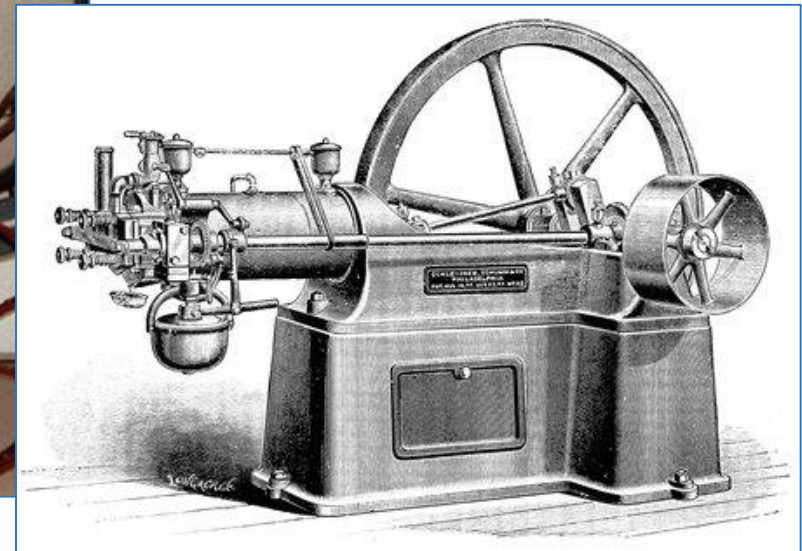
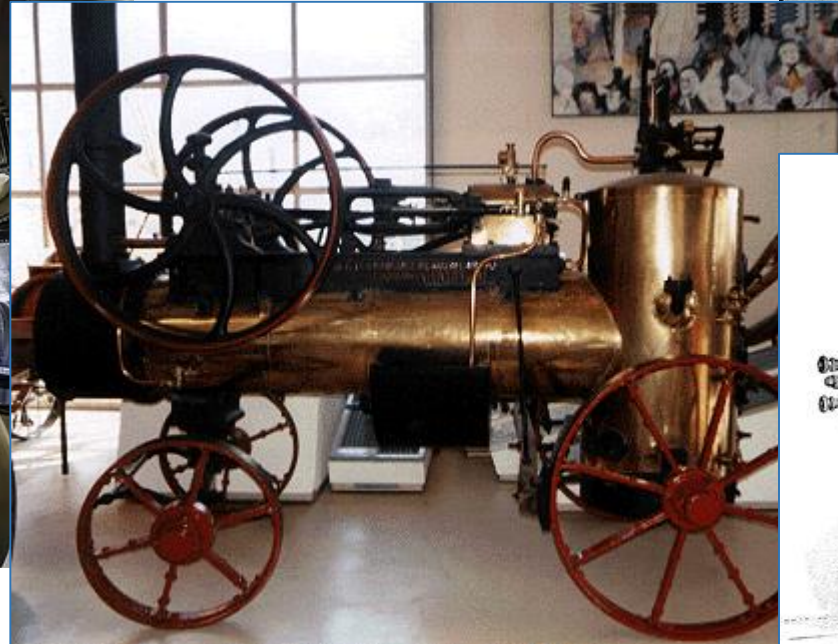
# Bio-mimétisme : ex : crevette pistolet



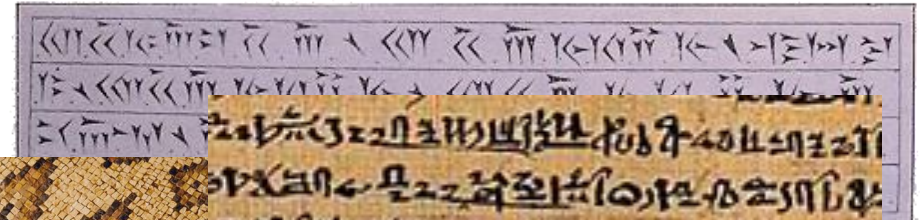
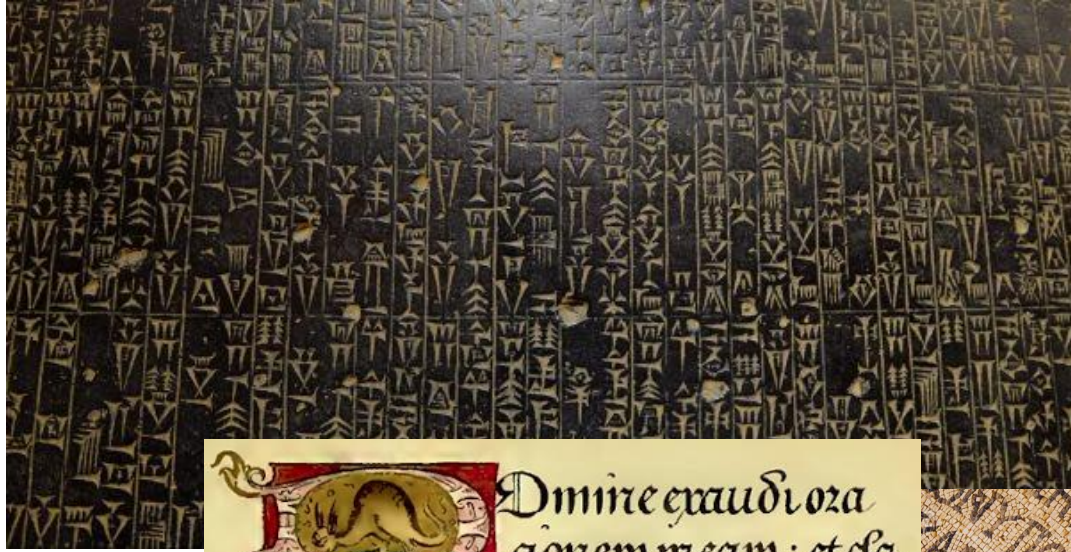




# Energies



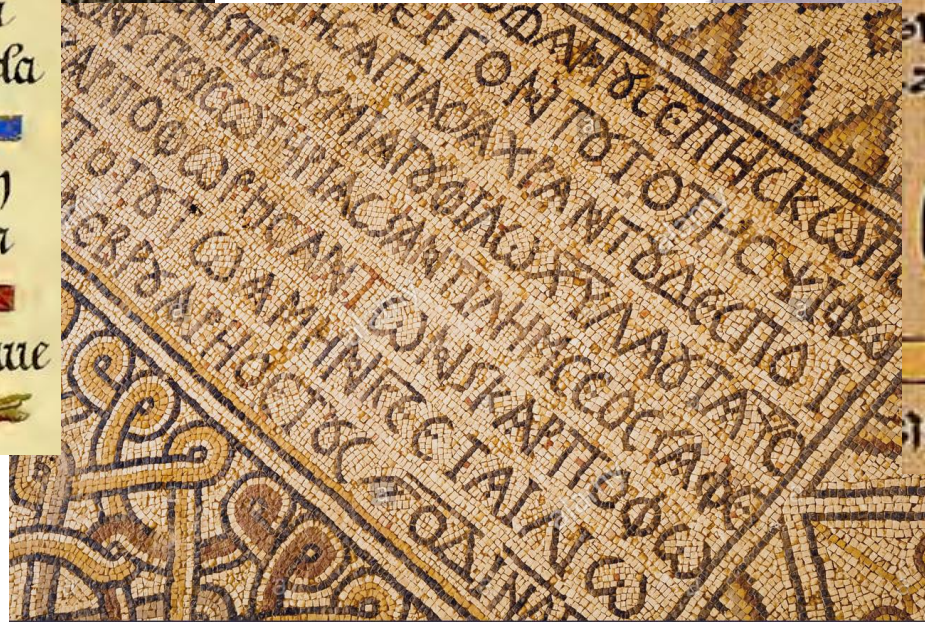
# Ecritures



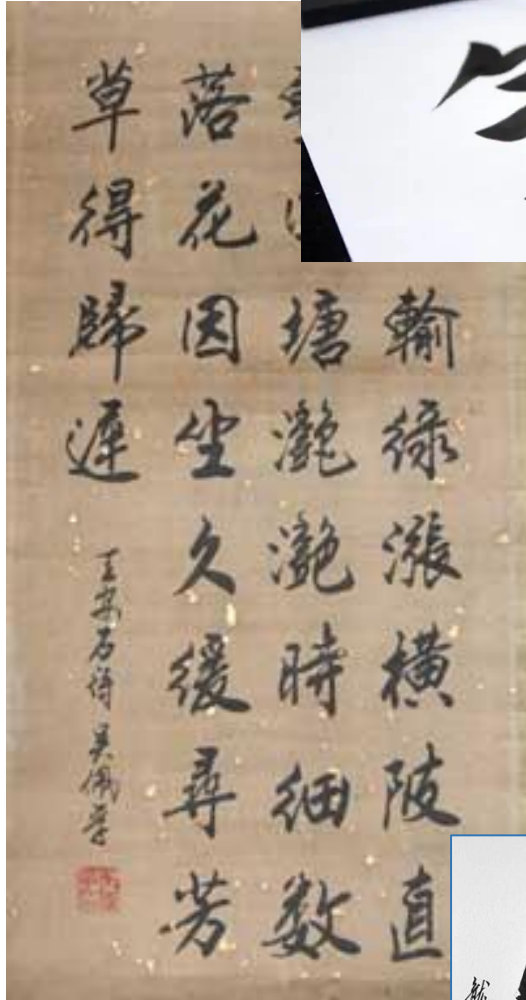
**D**omine exaudi orationem meam: et clamor meus ad te veniat.

**N**on auertas faciem tuam a me in quacunque die tribulor. Inclina ad me aurem tuam.

**I**n quacunque die Inuoca ueritate. Veloceiter exaudi me.

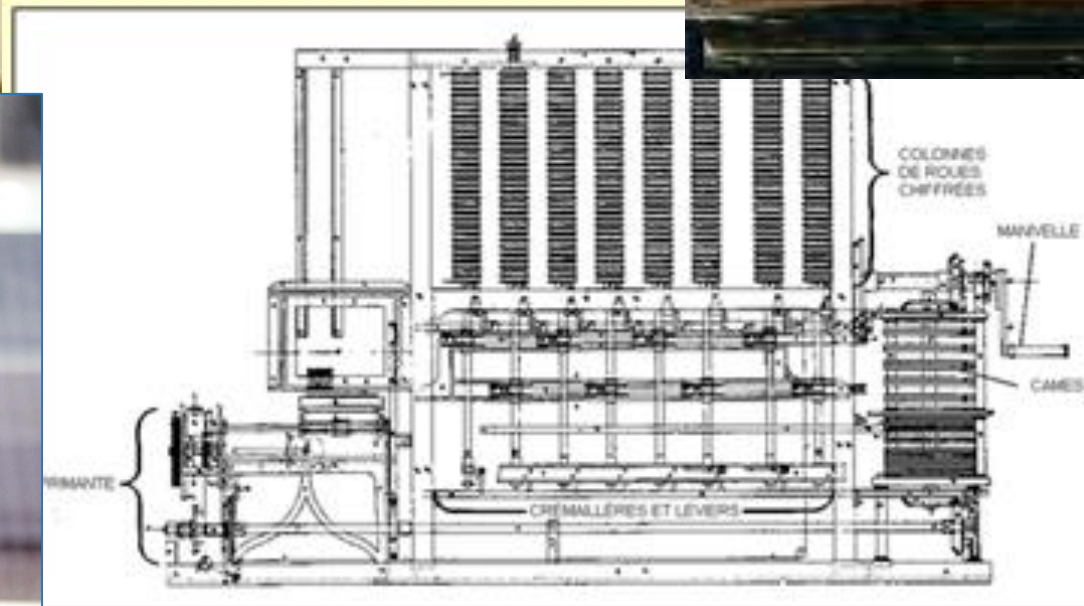
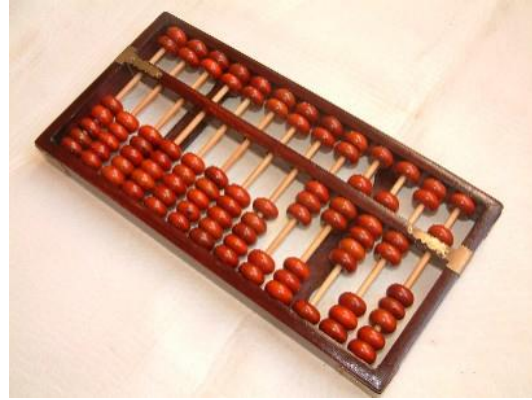
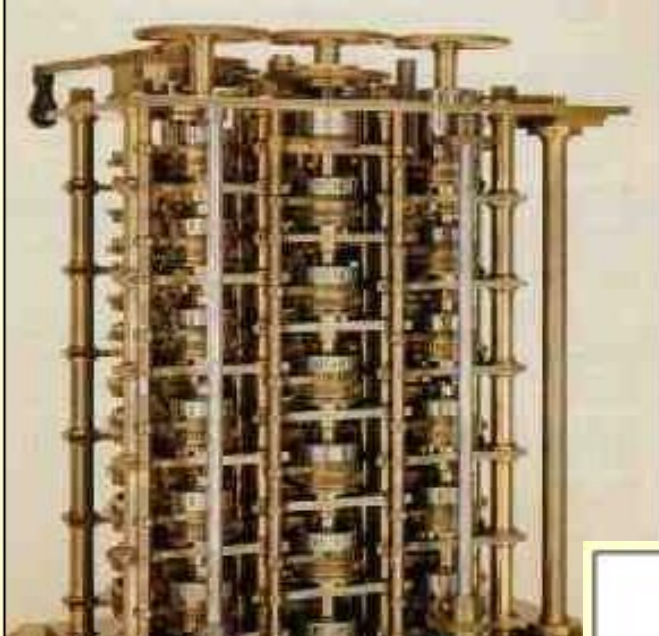


# Écritures (suite 2)

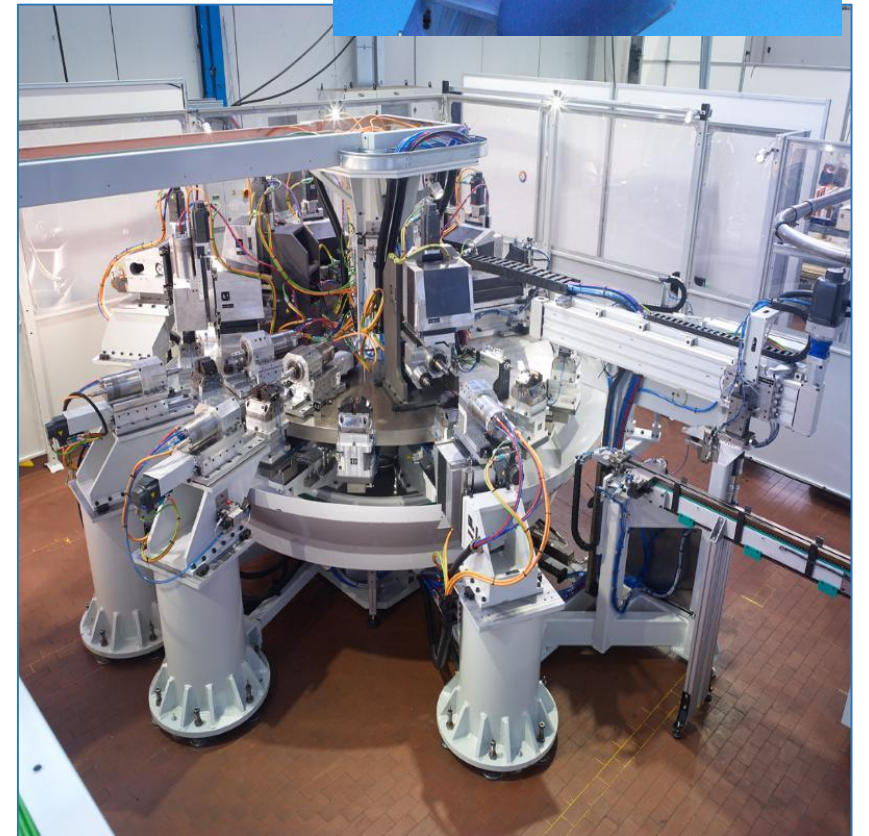
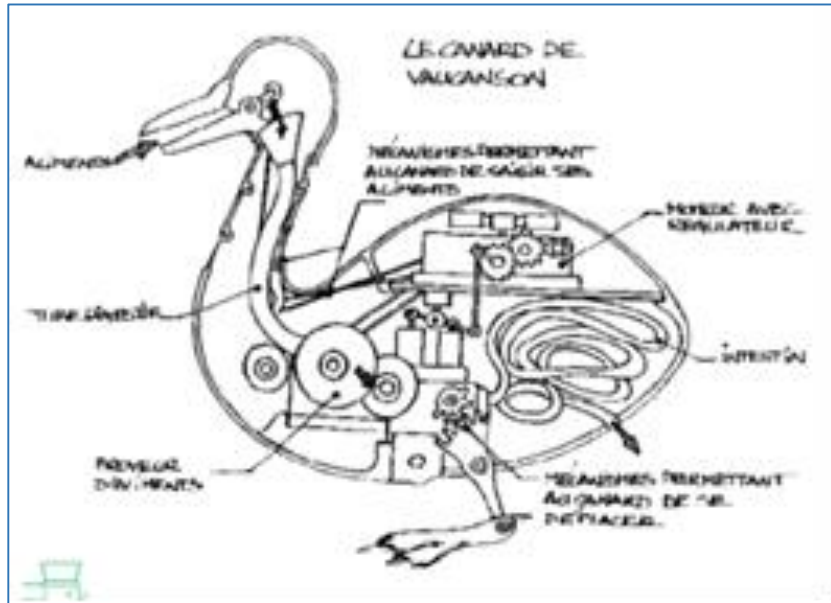


INITIUM SANCTI EUANGELI SECUNDANDUM IOHANNIS CAPITULUM I  
n principio : erat uerbum **E**t uerbum erat  
apud dOMINUM & dOMINUM erat uerbum, **B**oc erat in prin  
cipio apud dOMINUM : omnia per ipsum facta sunt :  
& sine ipSO factum est nihil **Q**uod factum  
est : in ipSO uita erat. **E**t uita erat lux homi  
num : & lux in tenebris lucet : & tenebrae  
eam non conpraehenderunt.

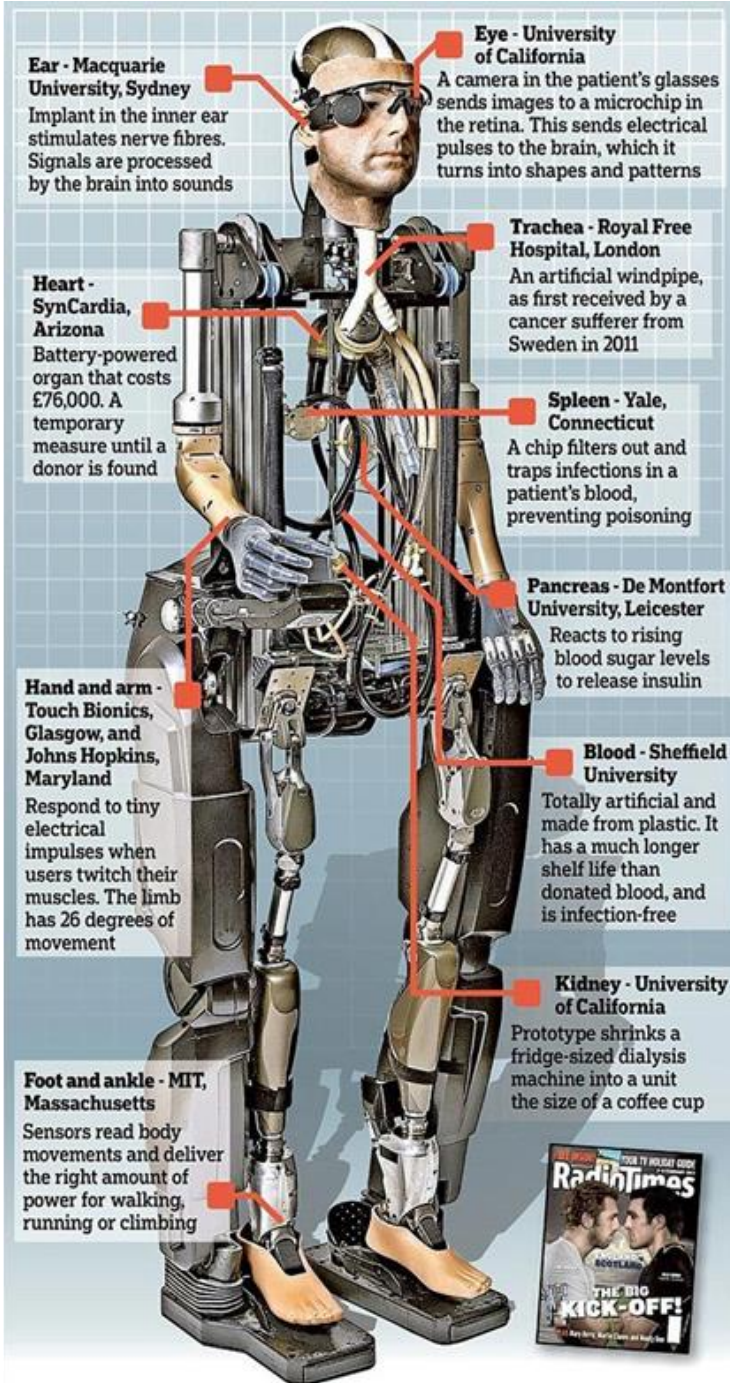
# Numérique



# Automatique, robotique



# Robotique (suite)



**Ear - Macquarie University, Sydney**  
Implant in the inner ear stimulates nerve fibres. Signals are processed by the brain into sounds

**Eye - University of California**  
A camera in the patient's glasses sends images to a microchip in the retina. This sends electrical pulses to the brain, which it turns into shapes and patterns

**Heart - SynCardia, Arizona**  
Battery-powered organ that costs £76,000. A temporary measure until a donor is found

**Trachea - Royal Free Hospital, London**  
An artificial windpipe, as first received by a cancer sufferer from Sweden in 2011

**Spleen - Yale, Connecticut**  
A chip filters out and traps infections in a patient's blood, preventing poisoning

**Pancreas - De Montfort University, Leicester**  
Reacts to rising blood sugar levels to release insulin

**Blood - Sheffield University**  
Totally artificial and made from plastic. It has a much longer shelf life than donated blood, and is infection-free

**Kidney - University of California**  
Prototype shrinks a fridge-sized dialysis machine into a unit the size of a coffee cup

**Hand and arm - Touch Bionics, Glasgow, and Johns Hopkins, Maryland**  
Respond to tiny electrical impulses when users twitch their muscles. The limb has 26 degrees of movement

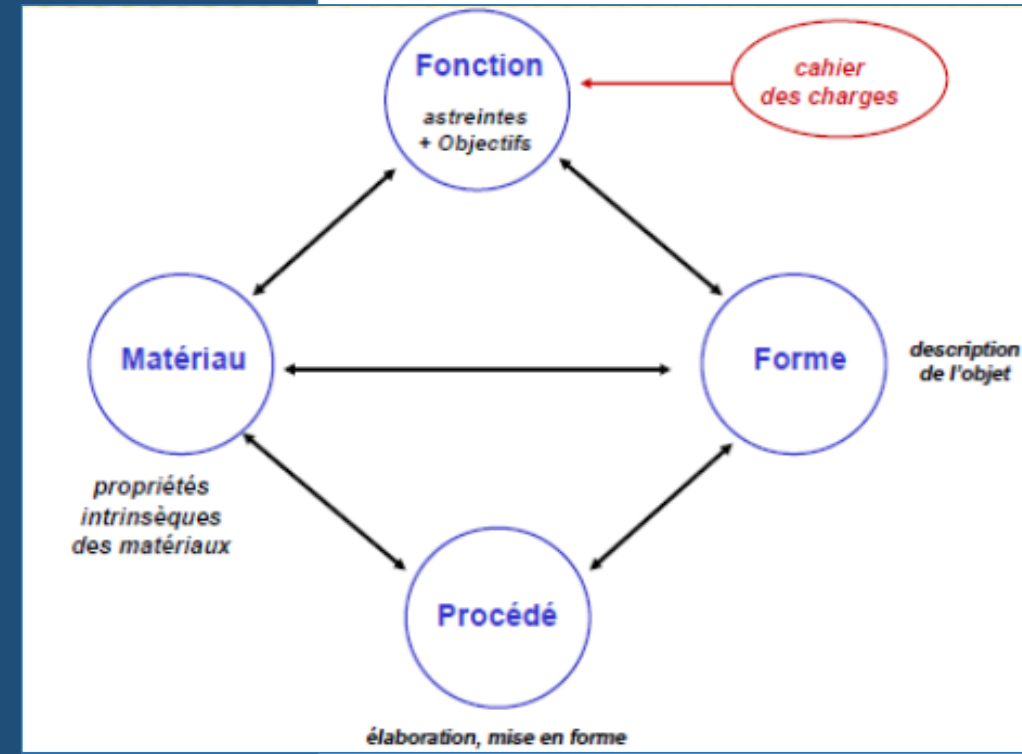
**Foot and ankle - MIT, Massachusetts**  
Sensors read body movements and deliver the right amount of power for walking, running or climbing

**RadinTimes**  
THE BIG KICK-OFF!



# Conclusions sommaires

- Accès à la matière (bois, os, pierre, métal, etc.)
- Propriétés mécaniques liées à la fonctionnalité attendue
- Facilité de fabrication
- Performance (armes par exemple)
- Facilité d'usage
- Vieillesse, rupture, récupération
- Relation entre outils et culture (exemple de l'écriture)
- Qualité de vie (technologique)





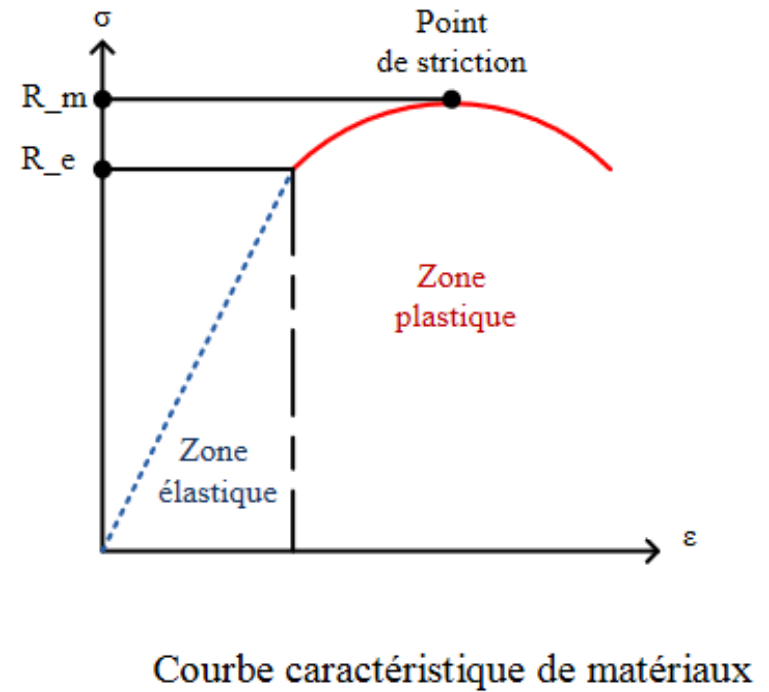
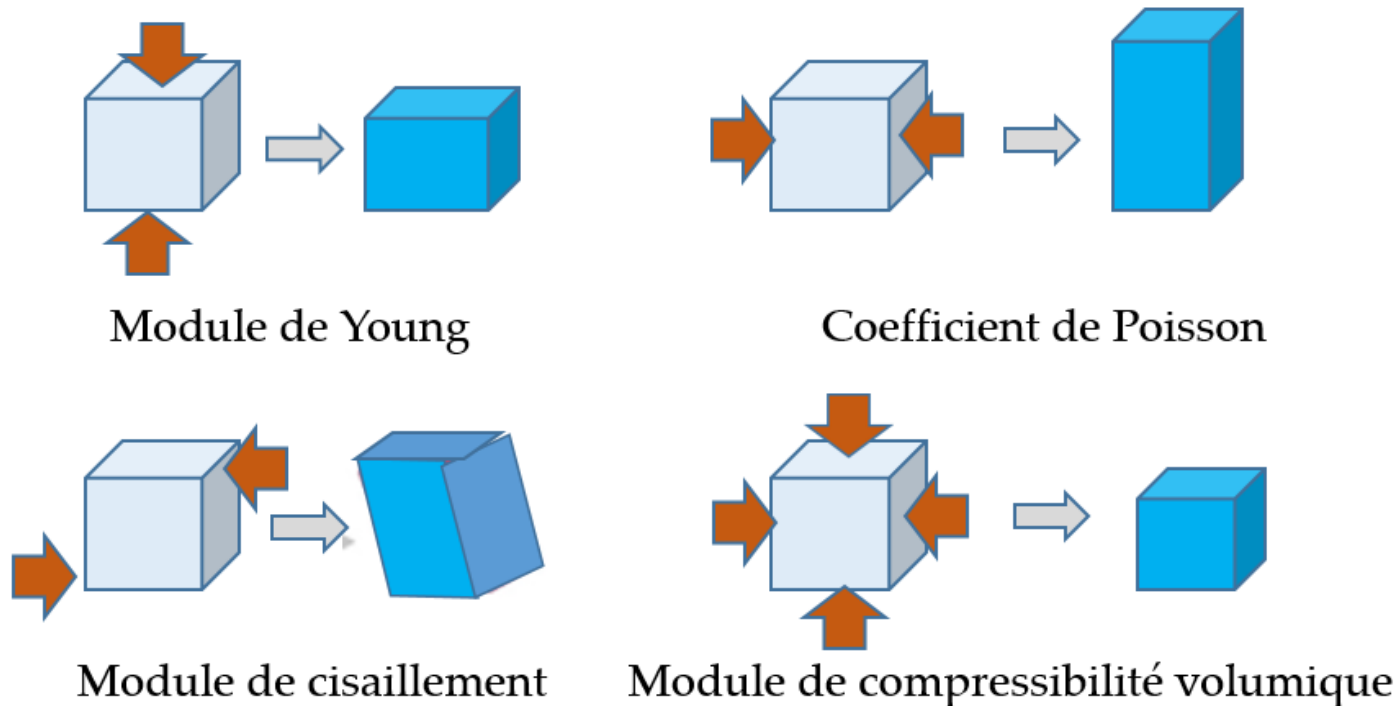
# Propriétés des matériaux dans les artefacts

- Module d'Young : Rigidité, capacité d'un matériau
- Masse volumique
- Limite d'élasticité, résistance aux efforts
- Déformation permanente ou réversible sous effort
- Déformation à la rupture (capacité à se déformer avant de rompre)
- Résistance à la fatigue (solicitations mécaniques)
- Ténacité : Résistance à la propagation de fissure
- Dureté (Vickers) : Résistance à l'enfoncement d'un pénétrateur
- Chaleur spécifique ; Conductivité thermique ; Coefficient de dilatation thermique ; Résistivité
- Corrosion; inhomogénéités

# Des concepts de la mécanique...

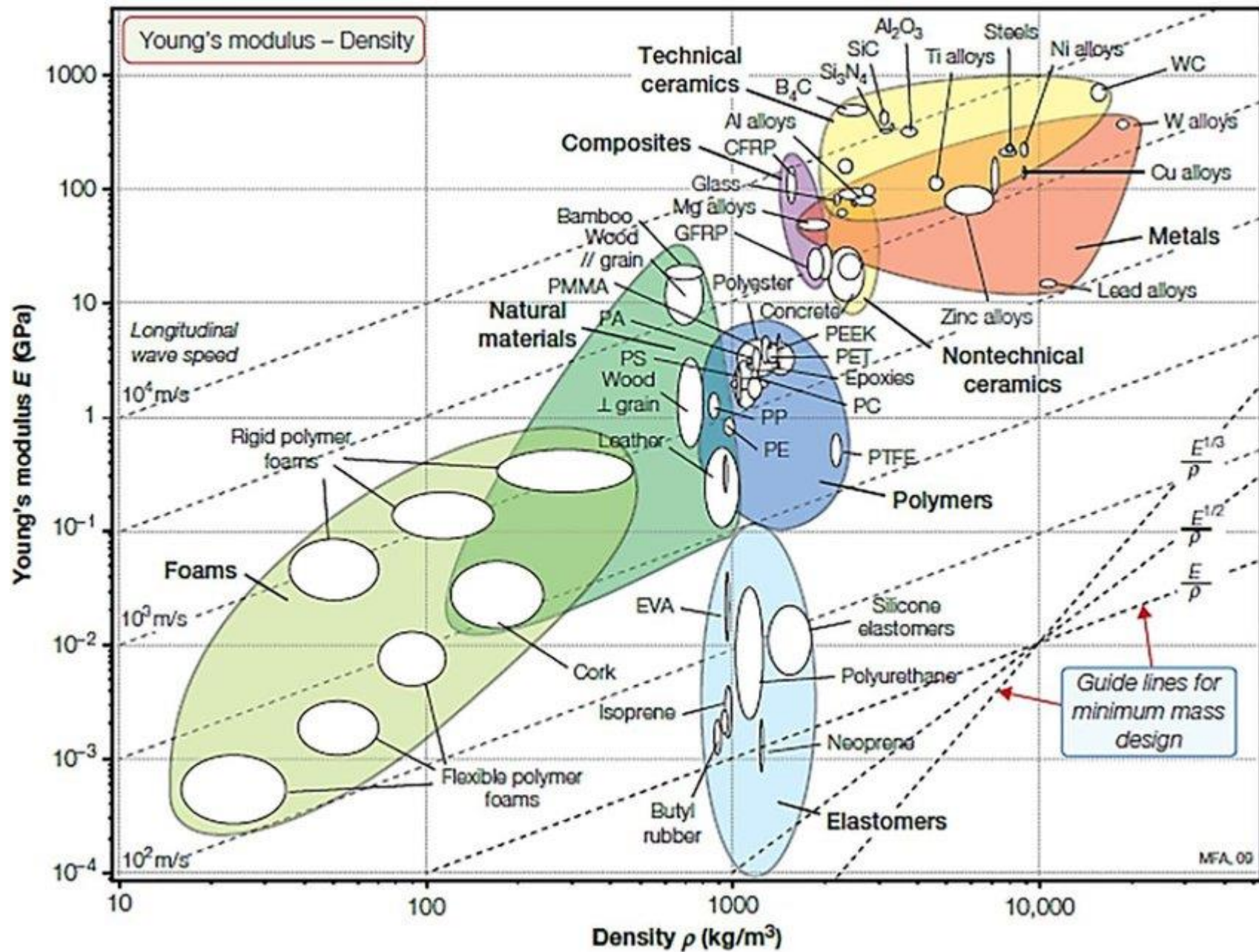
- Densité
- Dilatation et conductivités
- Module de Young
- Coefficient de Poisson
- Contrainte à la rupture/fracture
- Fatigue ; rupture ; dislocations
- Dureté
- Contraintes de cisaillement et pelage
- Adhérence
- Inhomogénéités

- Usinabilité et assemblage dont collage
- Elasticité et effet Mullins
- Résistance à l'impact et au fluage
- Temps de réponse
- Cycles d'utilisation
- Résistance à la corrosion
- Déformation plastique
- Viscoélasticité ; plasticité
- Rhéologie des fluides
- Mouillage

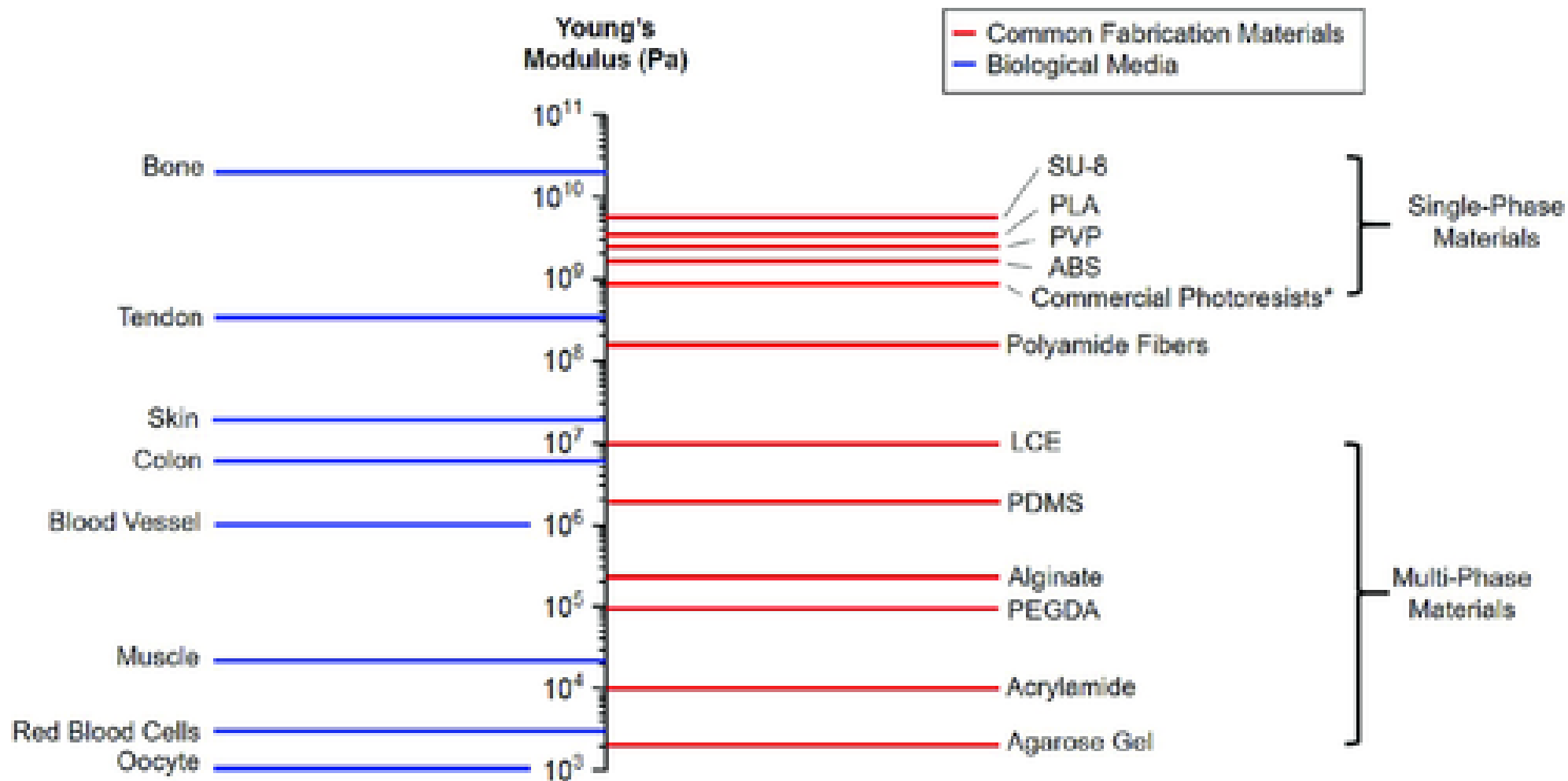


Caractérisation des matériaux (Extension uni-axiale E (Module de Young) ; Coefficient de Poisson ; Cisaillement simple G (Module de cisaillement) ; Compression uniforme K (Module de compressibilité volumique))

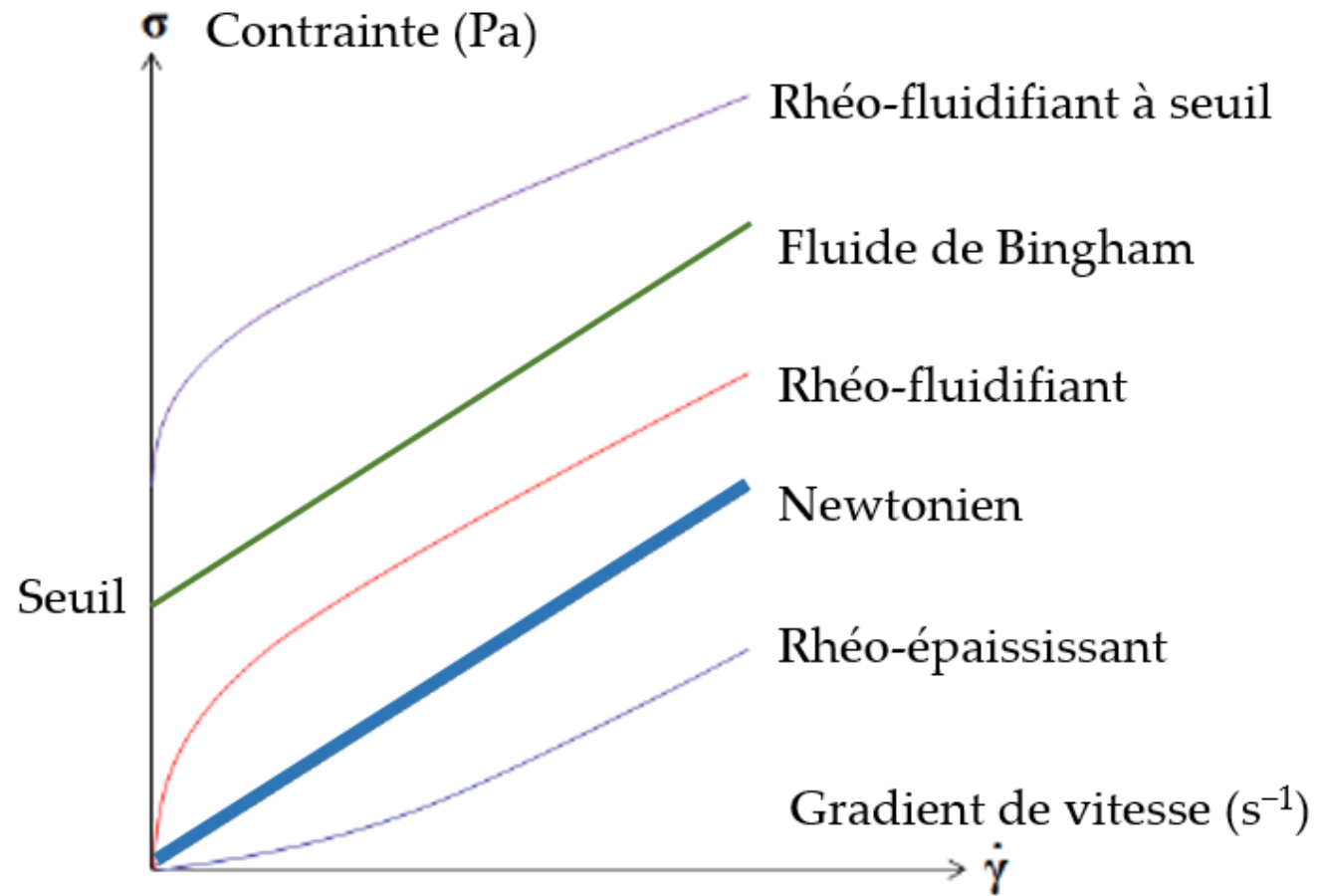
Les 3 modules E, G et K permettent de caractériser le comportement élastique d'un matériau élastique. Ces constantes résultent de la relation existante entre une contrainte et la déformation induite :  
 $\sigma = E \cdot \epsilon$  où  $\sigma$  est la contrainte (en unité de pression), E est le module de Young (en unité de pression), et  $\epsilon$  l'allongement relatif (adimensionnel)  
 $\tau = G \cdot \gamma$  où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement (en unité de pression), G est le module de cisaillement ou de Coulomb (en unité de pression) et  $\gamma$  l'angle de cisaillement (adimensionnel)



# Côté Bio...

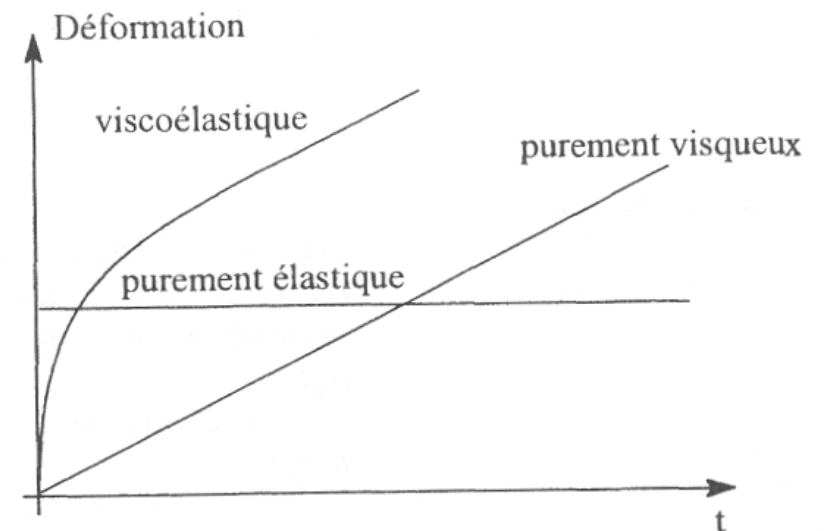
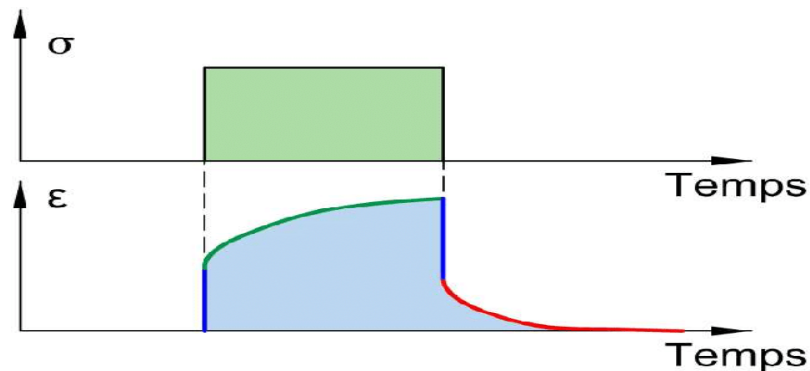
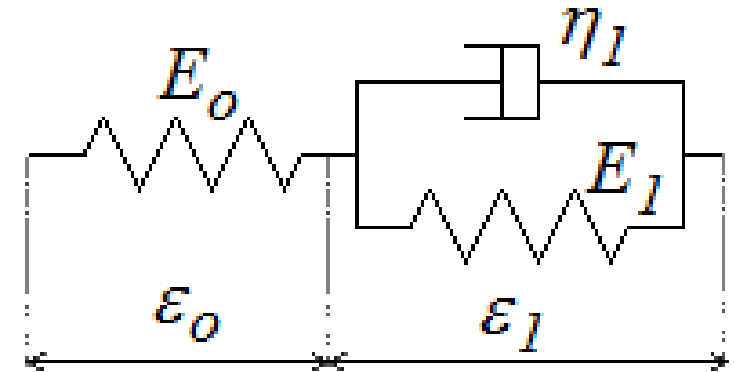


# Rhéologie

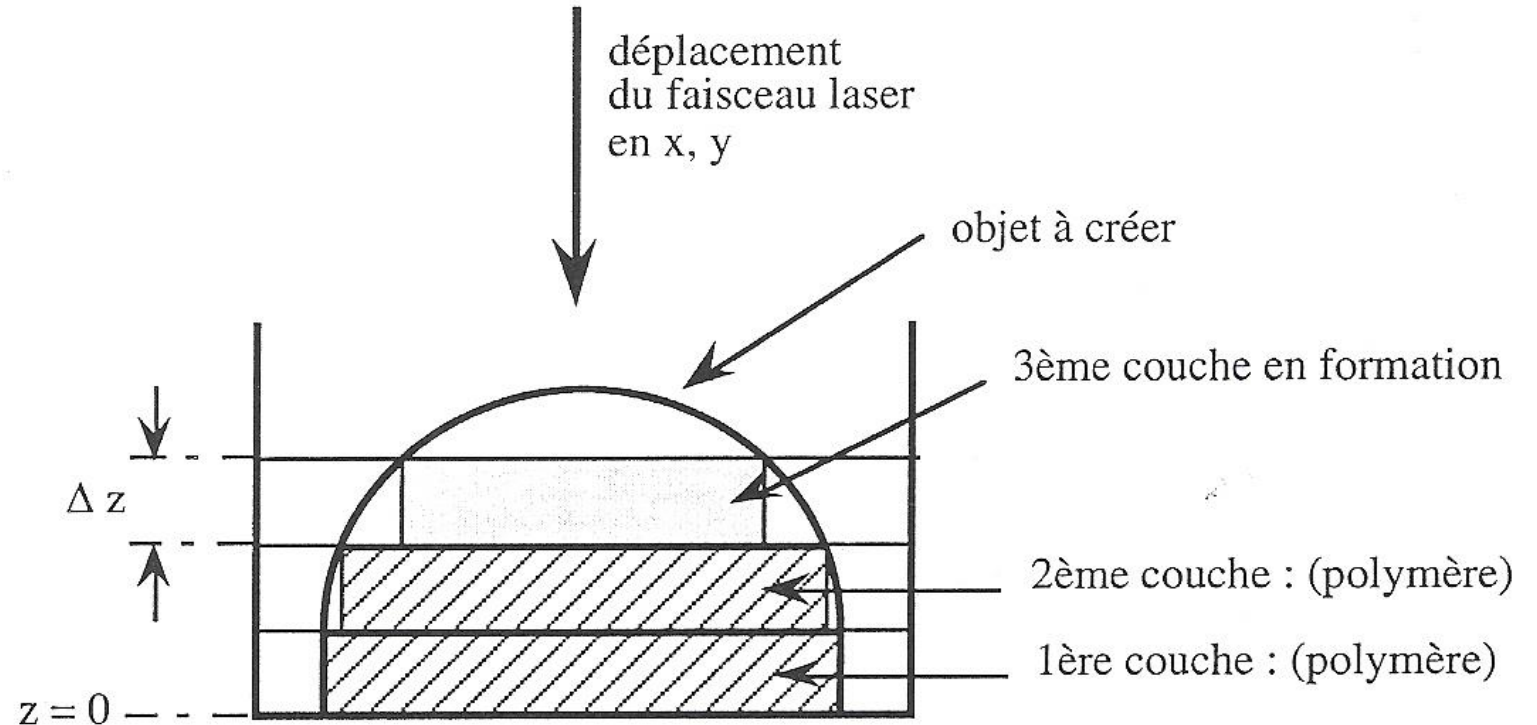
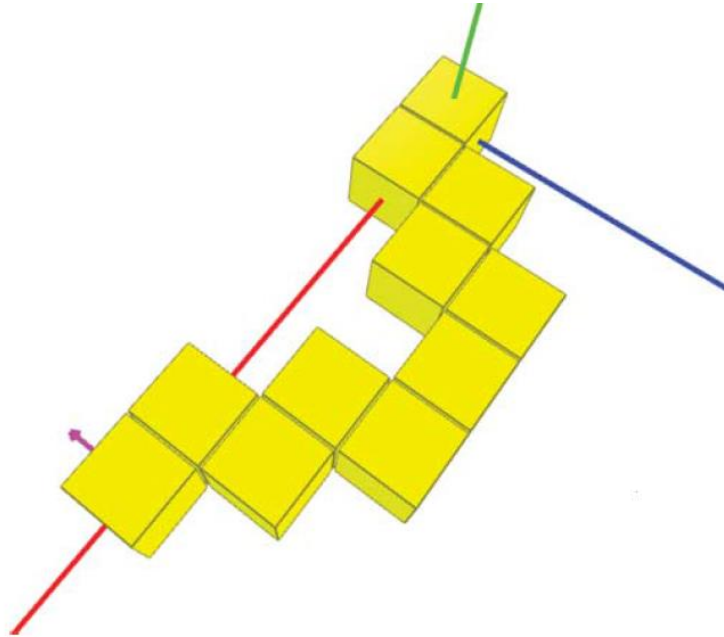


# Viscoélasticité

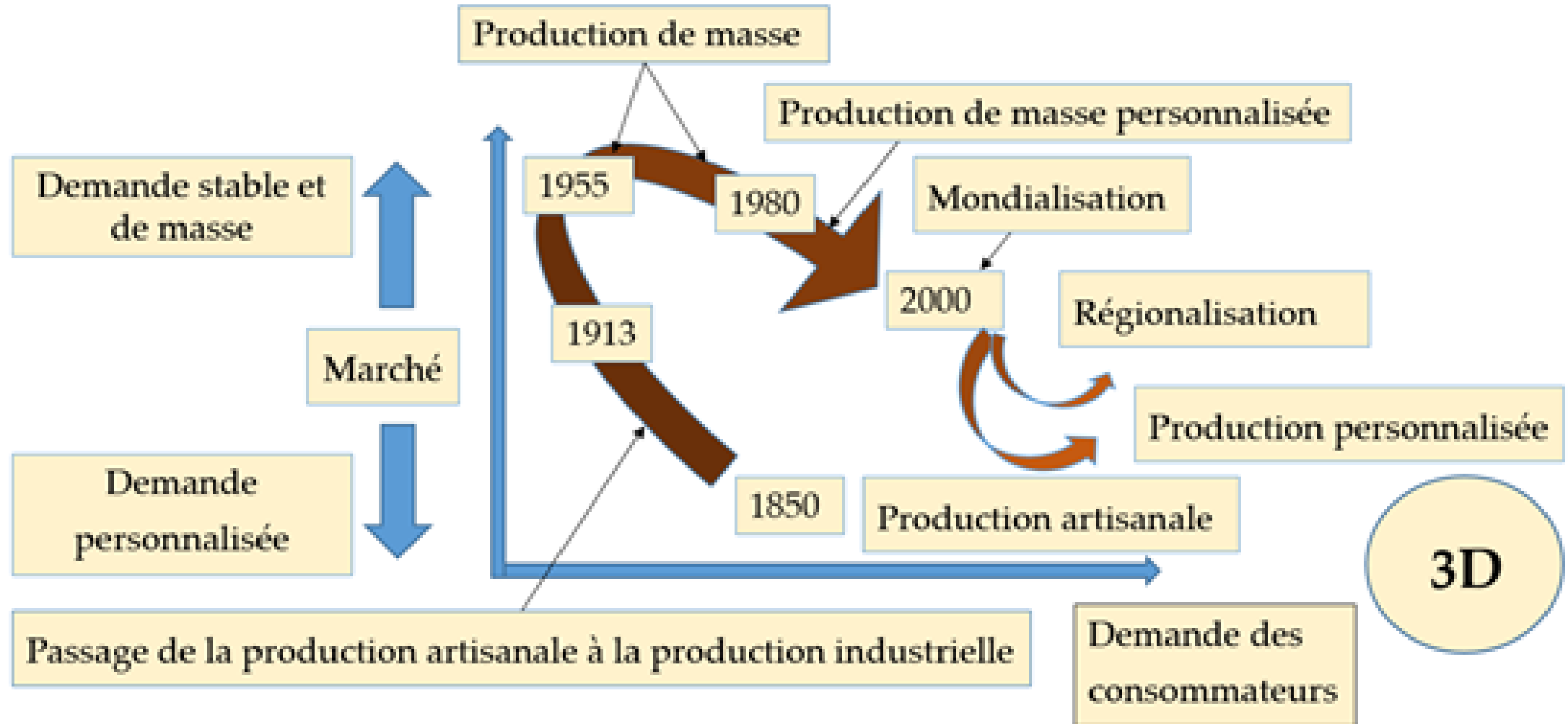
Les fluides viscoélastiques sont caractérisés par leur capacité à présenter un comportement variable en fonction du temps de contrainte auquel le matériau est soumis (cf. gels). La réponse du matériau à une charge (allongement ou cisaillement) a le comportement d'un solide élastique (déformation instantanée avec stockage d'énergie) et d'un fluide visqueux (déformation continue avec dissipation d'énergie). Ces fluides aux comportements visqueux et élastiques sont décrits par le modèle simple du corps de Maxwell, qui combine un ressort élastique de raideur  $k$  et un amortisseur de viscosité de norme  $\eta$ . A l'arrêt de la charge, le matériau reprend partiellement sa forme initiale ou peut se rompre sous des charges trop élevées (cf. mécano-biologie)



# La Fabrication Additive et l'ANF

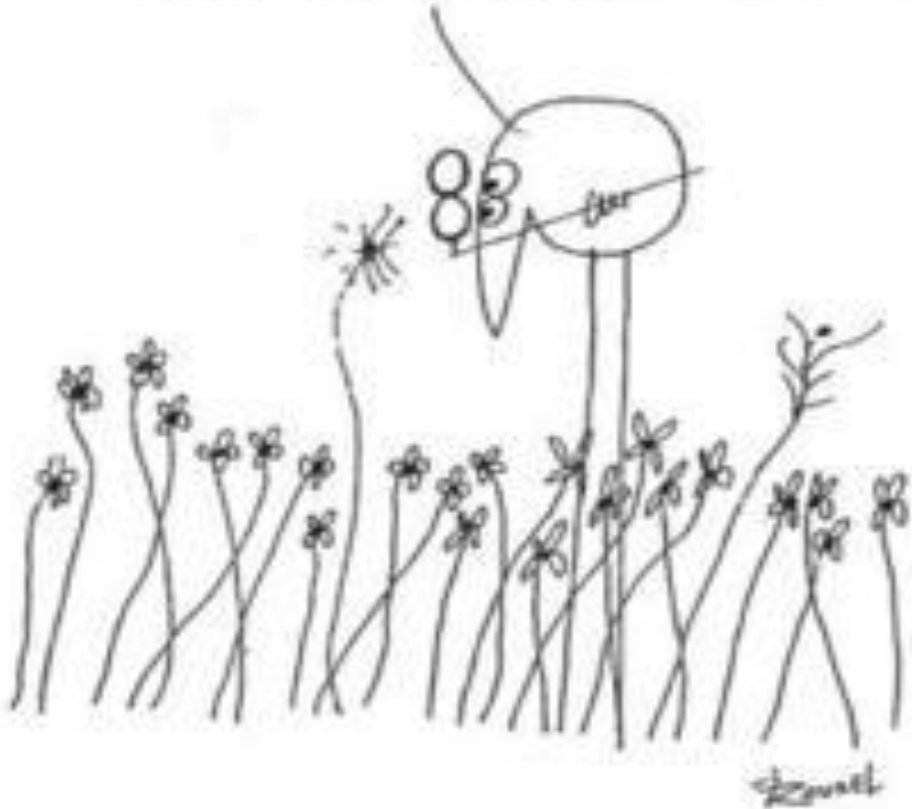




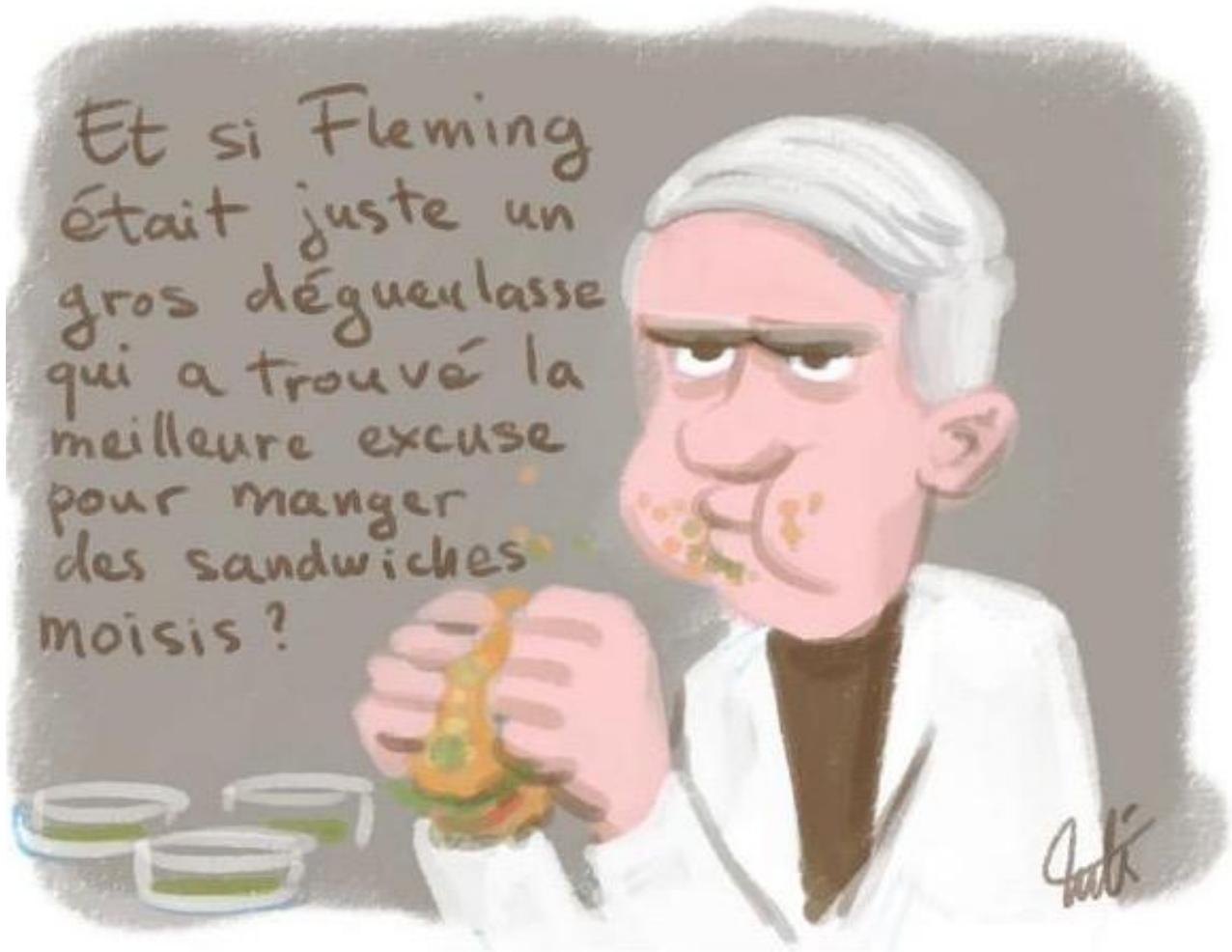


# Idées...

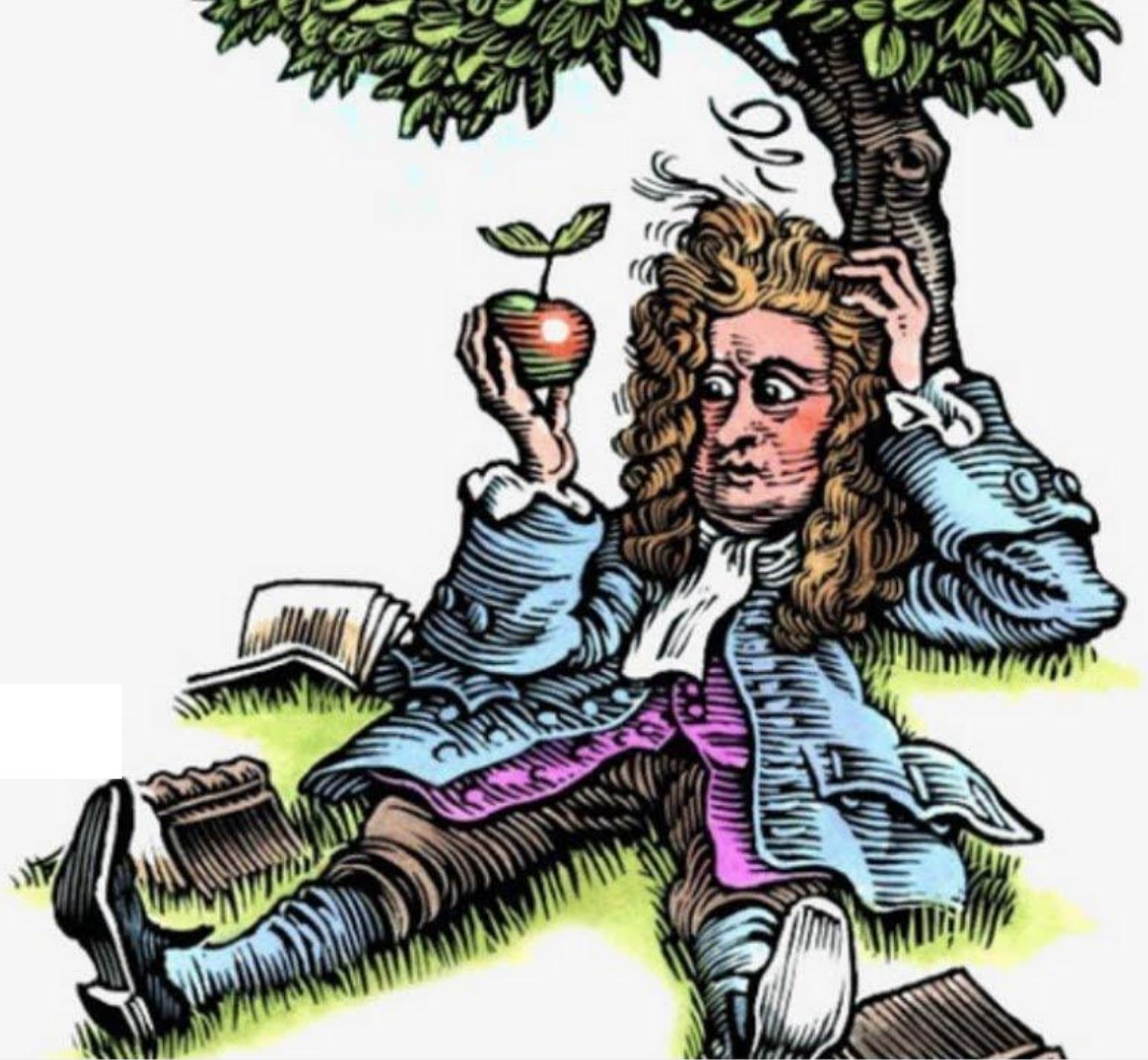
LA VRAIE DIFFICULTÉ, CE N'EST PAS  
TELLEMENT DE TROUVER DES IDÉES...  
C'EST DE SAVOIR RECONNAÎTRE UNE  
BONNE IDÉE QUAND ON EN VOIT UNE.

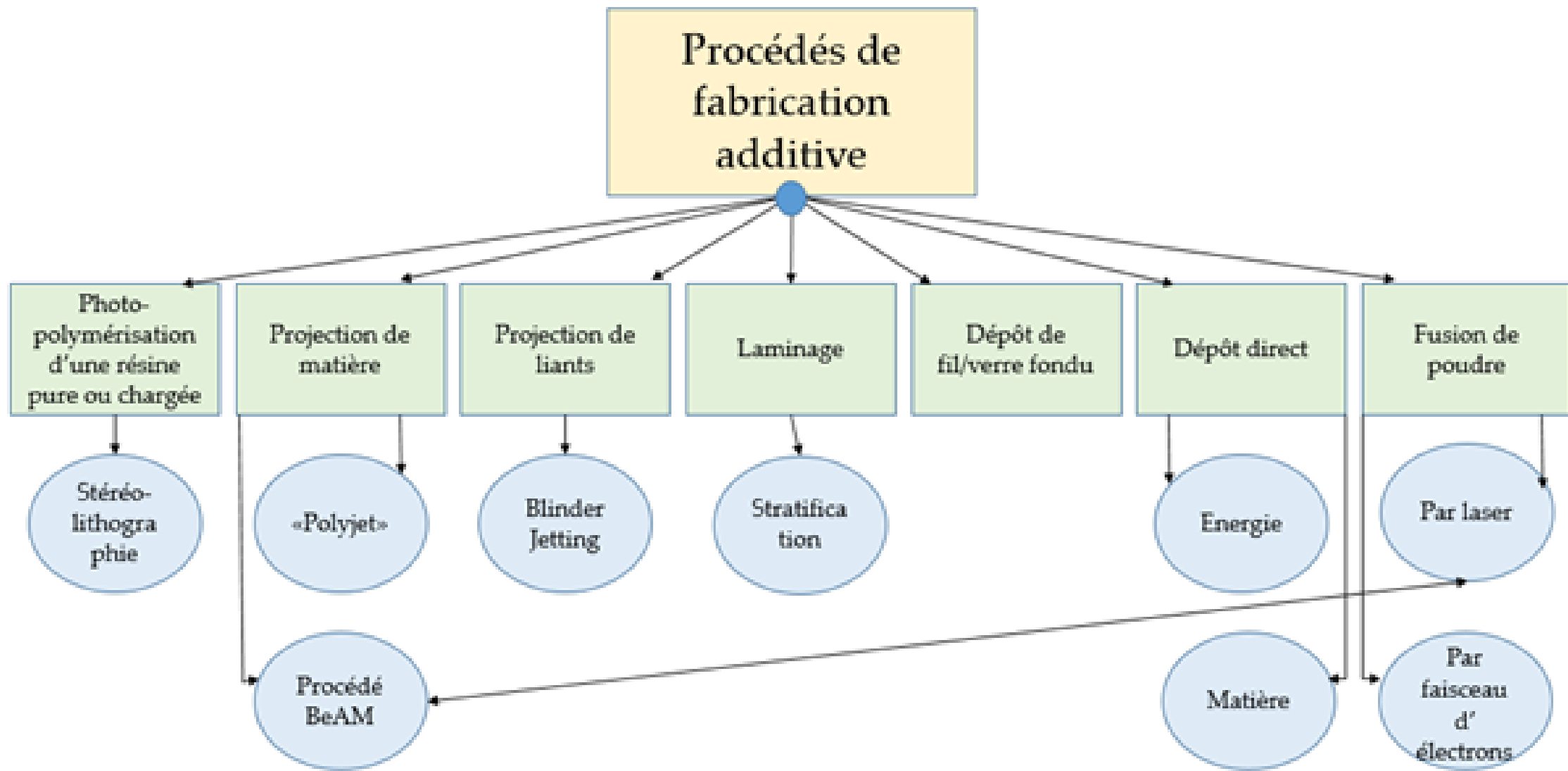


Et si Fleming  
était juste un  
gros dégueulasse  
qui a trouvé la  
meilleure excuse  
pour manger  
des sandwiches  
moisiss ?

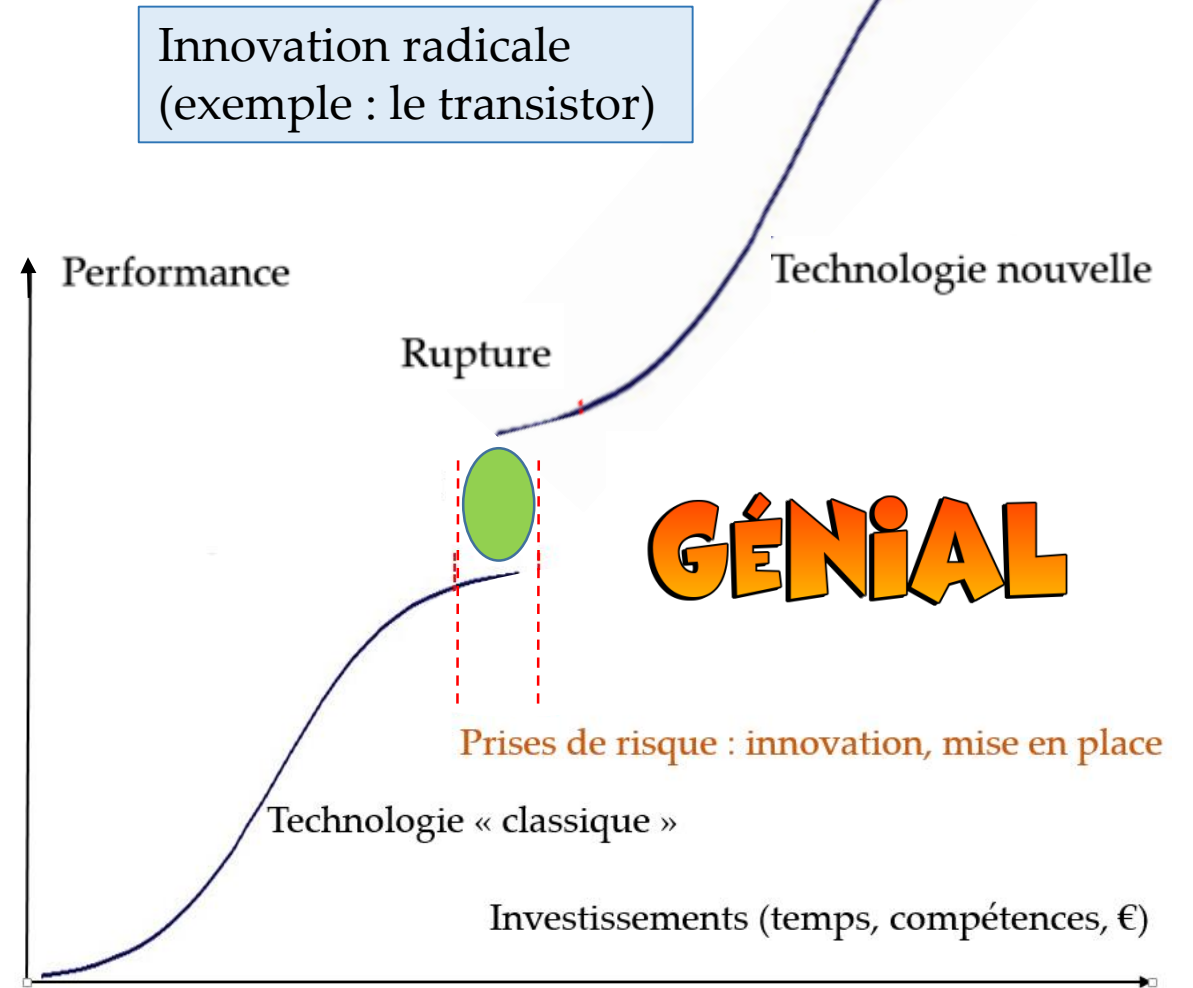
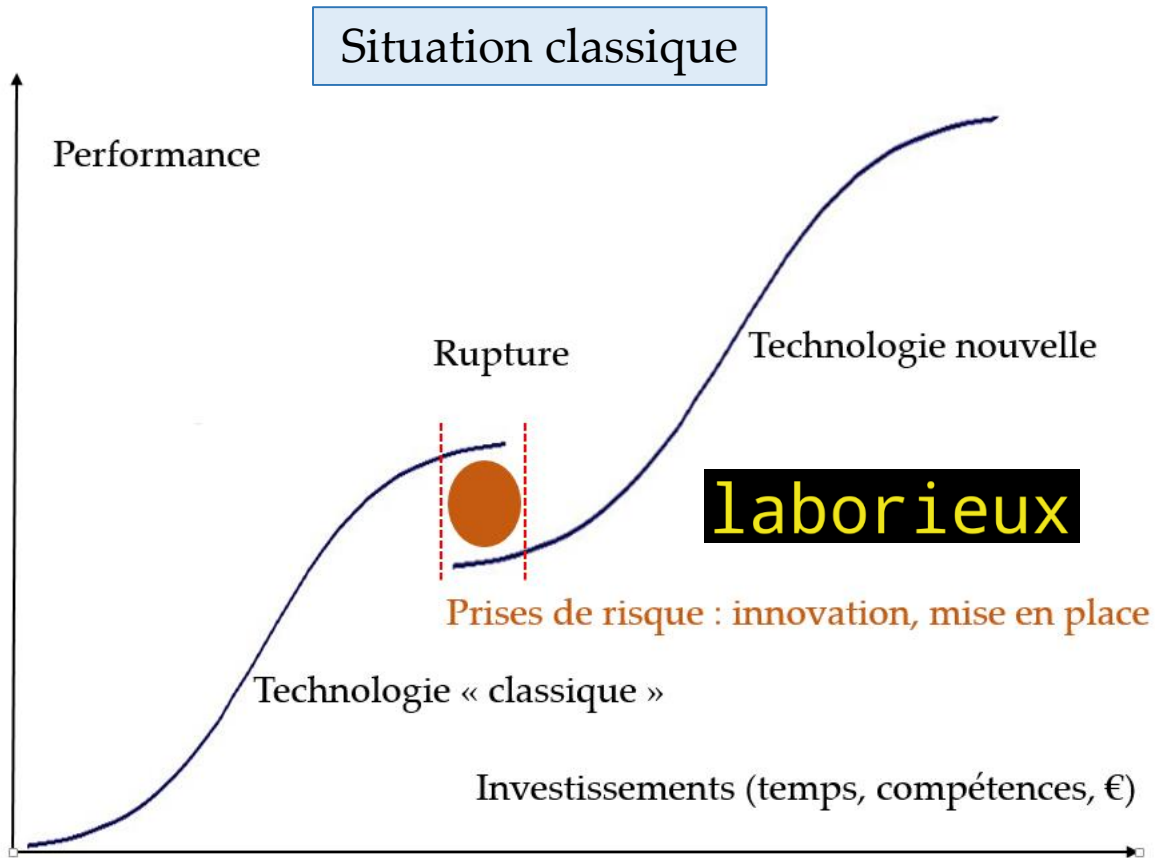


**La sérendipité**  
**défie-t-elle**  
**la décision ?**

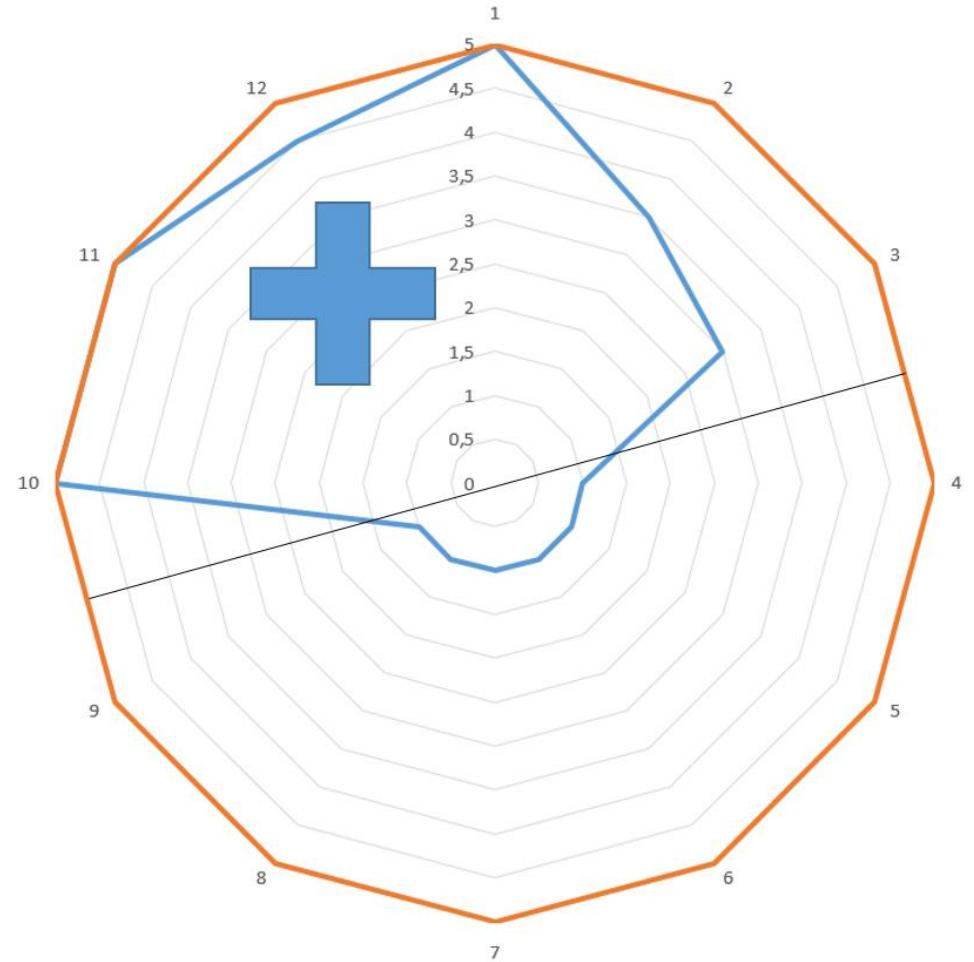
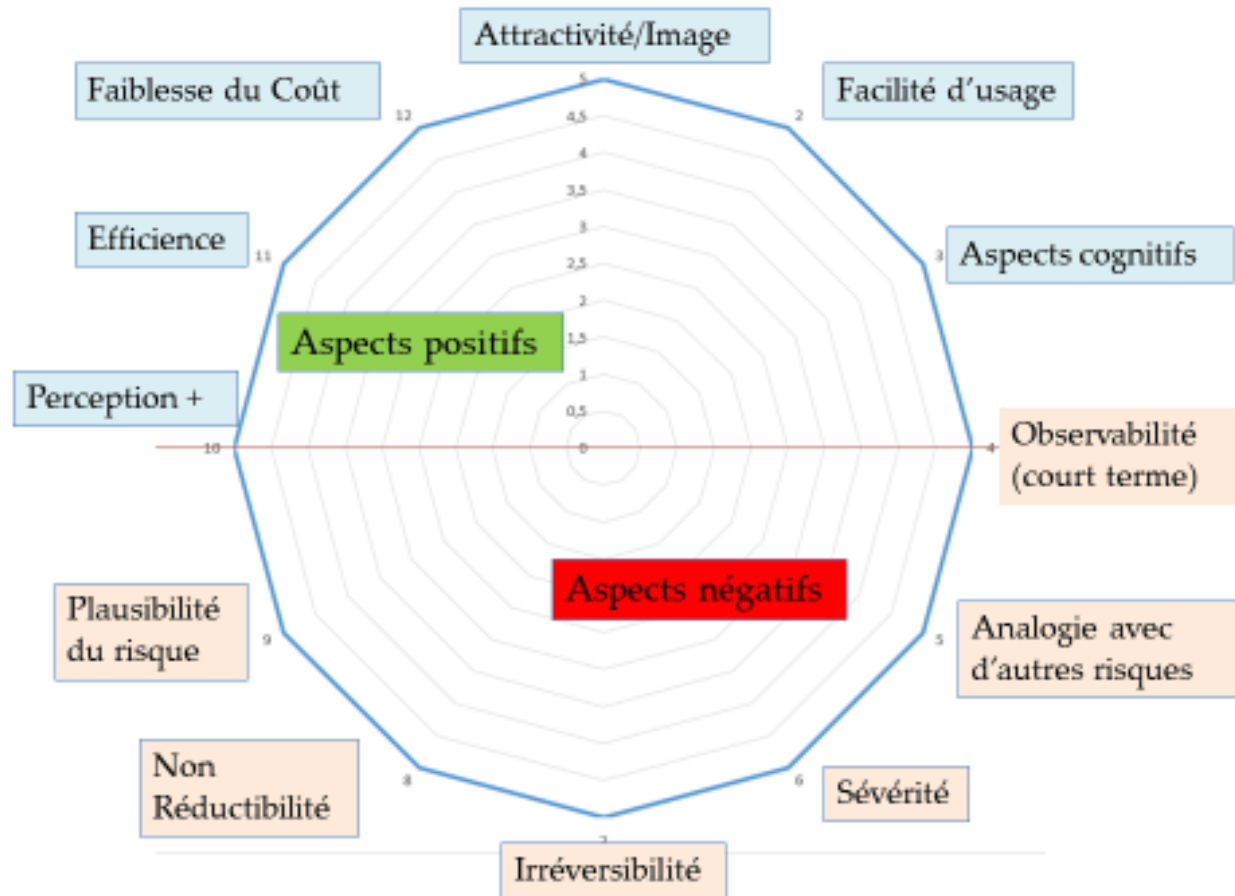




# Innovations



# Impression 3D

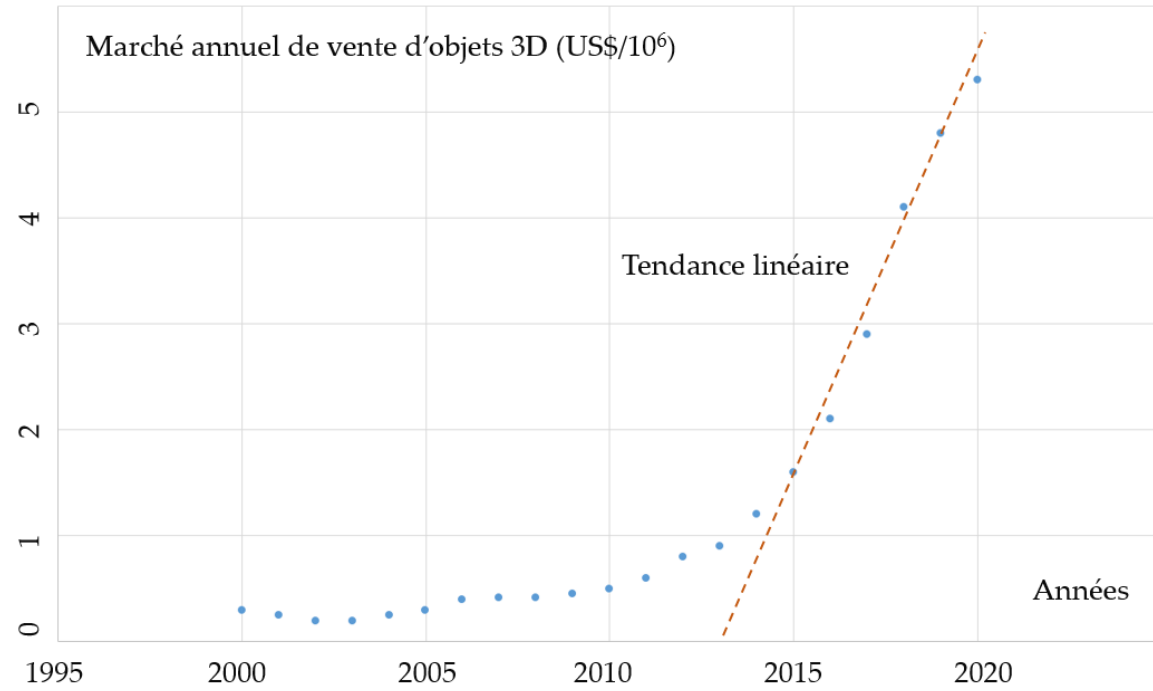
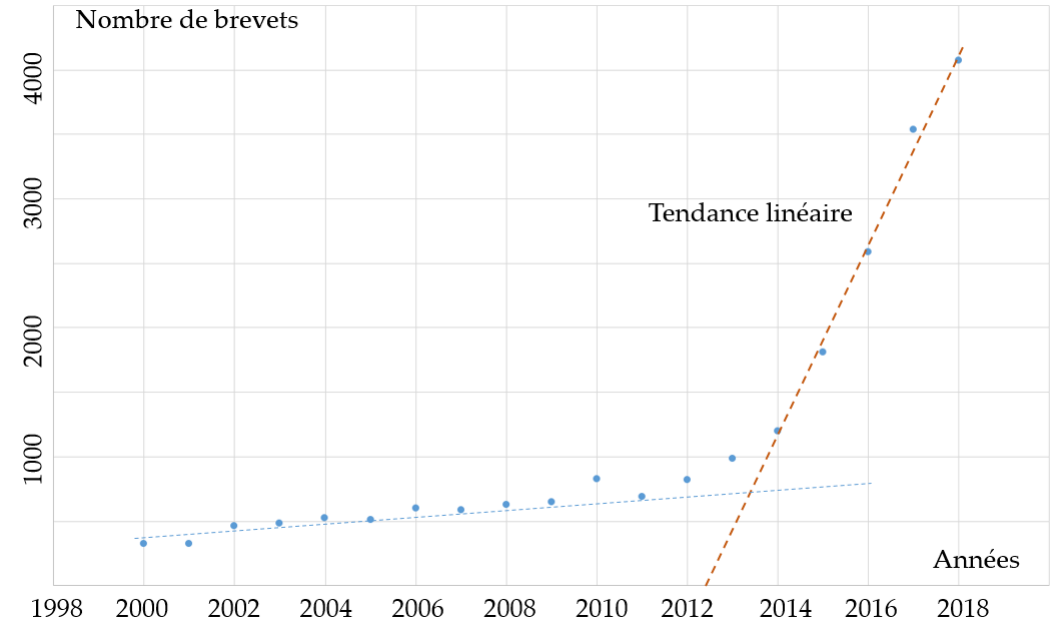
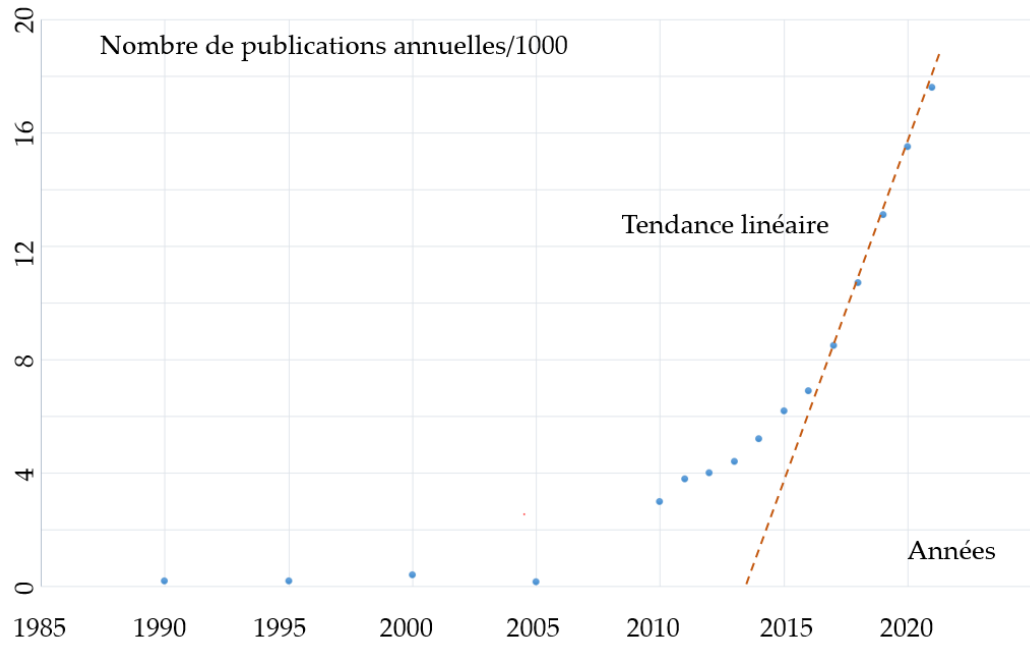


# Atouts



Les arguments d'attractivité sont les suivants :

- Proximité entre POC et industrialisation ; transfert rapide ;
- Idée de « photocopieuse 3D » ;
- Précision et « bonne matière » ; nombreux matériaux et procédés complémentaires ;
- La variété est gratuite » : grâce à l'informatique, il est possible de réaliser facilement des pièces uniques différentes ou de s'intégrer dans une production de masse ;
- « La complexité est gratuite » : c'est l'ensemble des déplacements en 2D qui définit le temps de réalisation d'une pièce dans un procédé à balayage laser, il est encore plus réduit si l'on réalise une irradiation au travers d'un masque ; il l'est encore moins si l'on peut éliminer la mise en place de couches, etc. ;
- « La flexibilité est gratuite » : grande aptitude de l'informatique à modifier un/des paramètre(s) sans que la machine en soit modifiée elle-même.





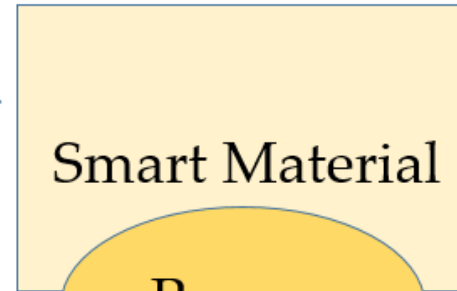
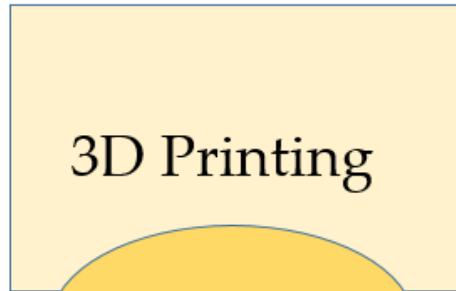
# Avantages >> Inconvénients

- « Magique »
- Autonomie
- Retour à la (bonne) matière
- Complexité
- Précision
- Inclusion dans Industrie 4.0
- FabLab
- Respect du cahier des charges industriel
- Coût (en partie)

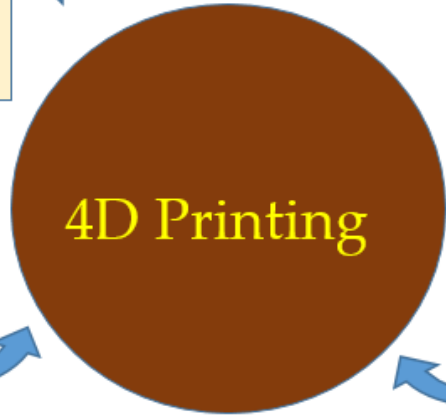
- Retrait volumique
- Effet des couches (mais recuits)
- Supports (intervention manuelle)
- Maîtrise de l'informatique
- Evolution des technologies
- Coût (en partie)

# Impression 4D

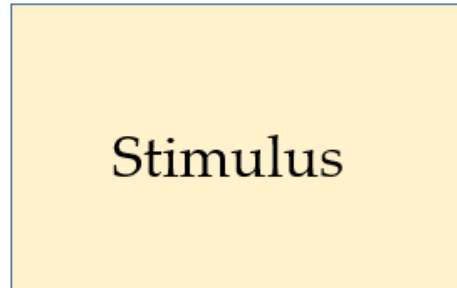
3 Paramètres d'espace



1 Paramètre temporel



4 Paramètres spatio-temporels



ET



Sandwich



Bicouche/bilame



Gradient



Réseau périodique (ou non)

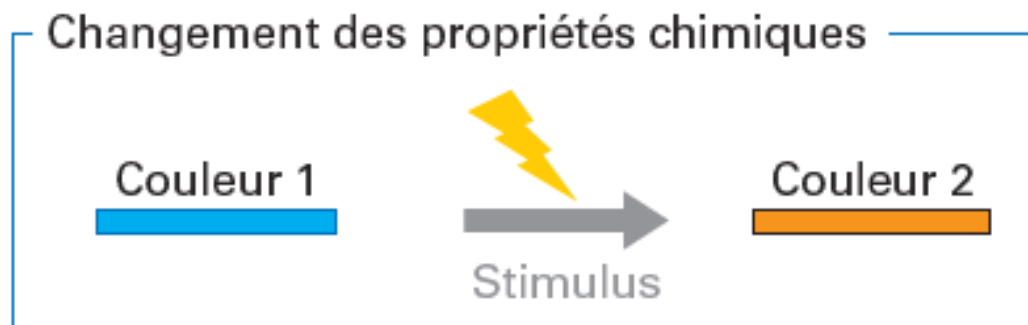
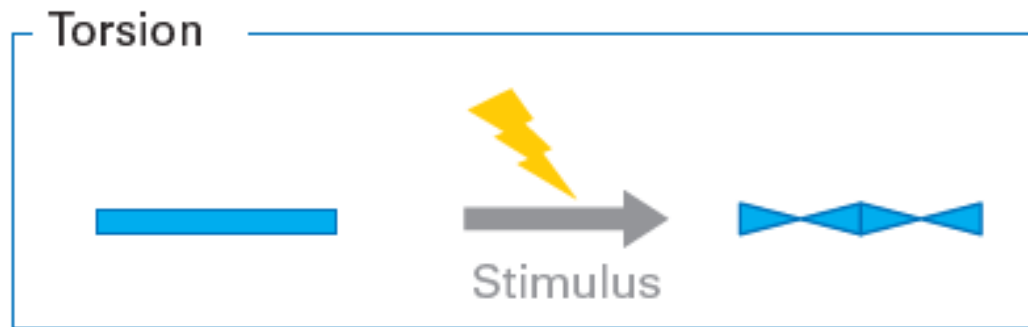
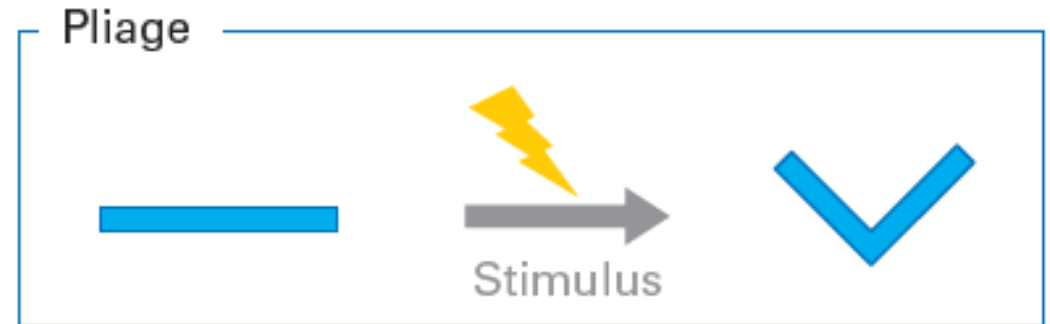
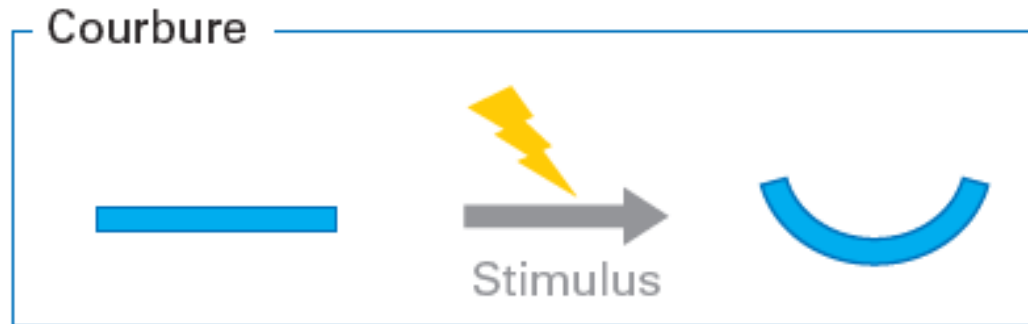


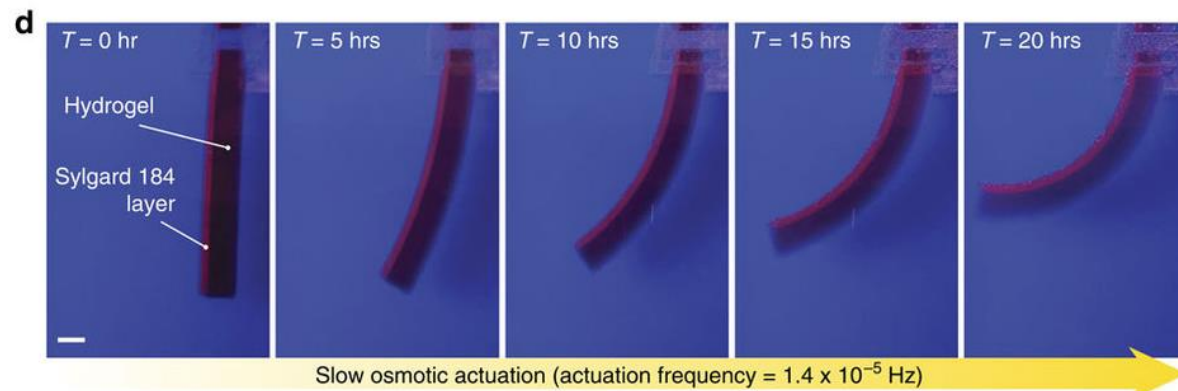
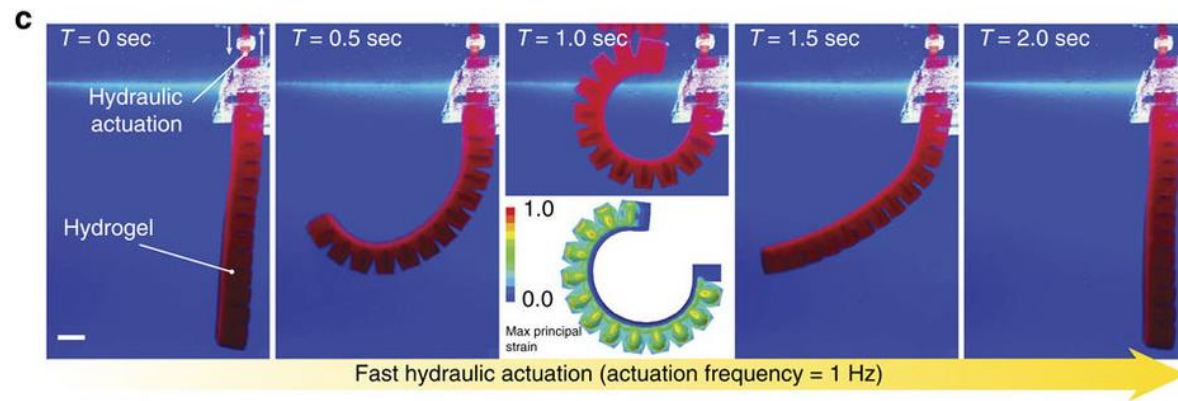
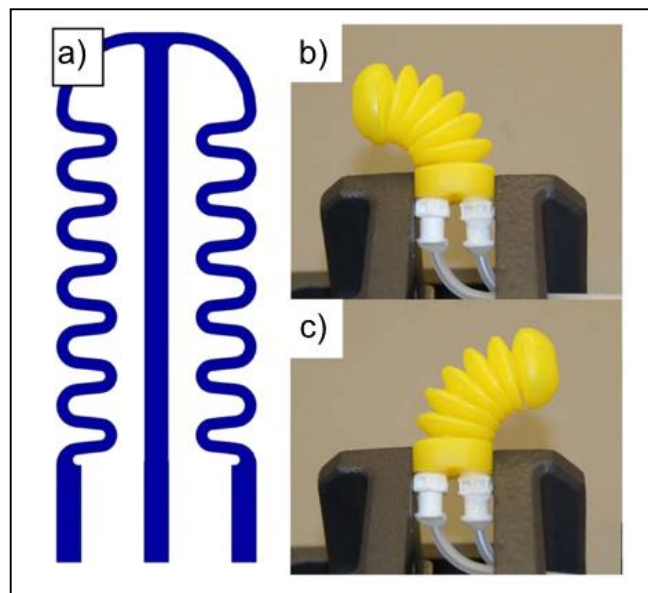
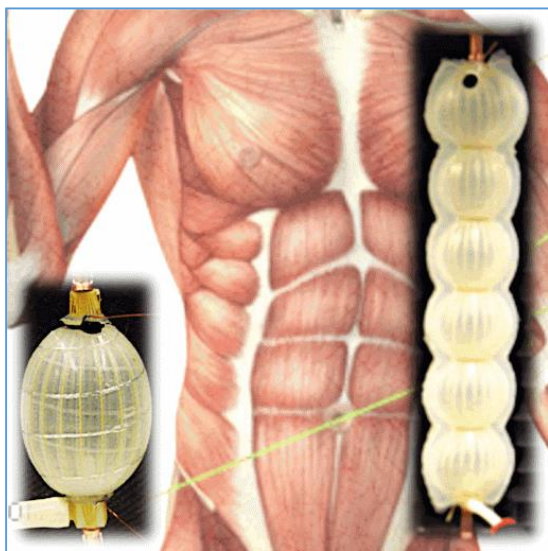
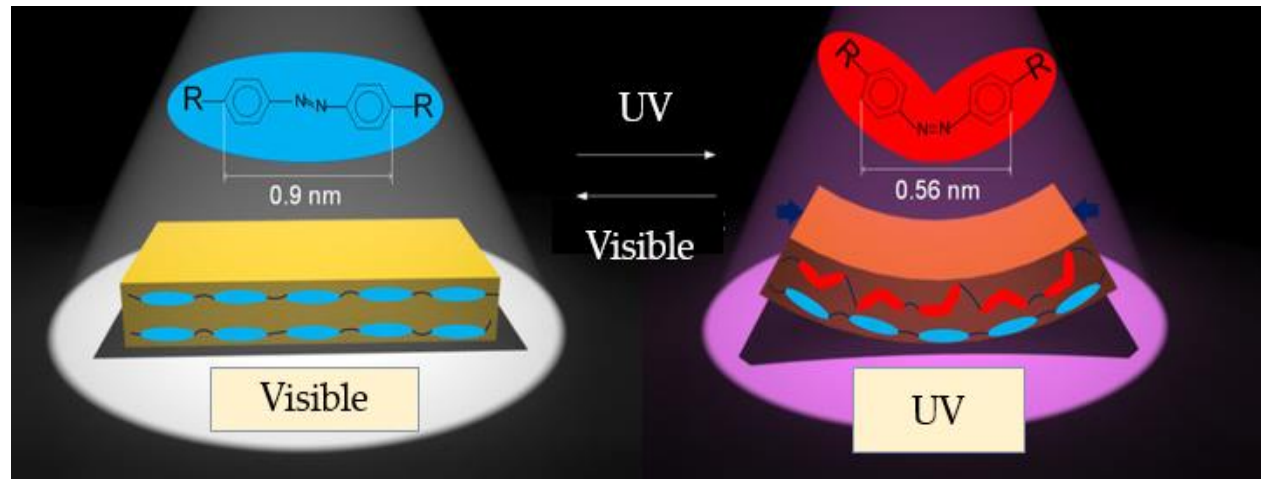
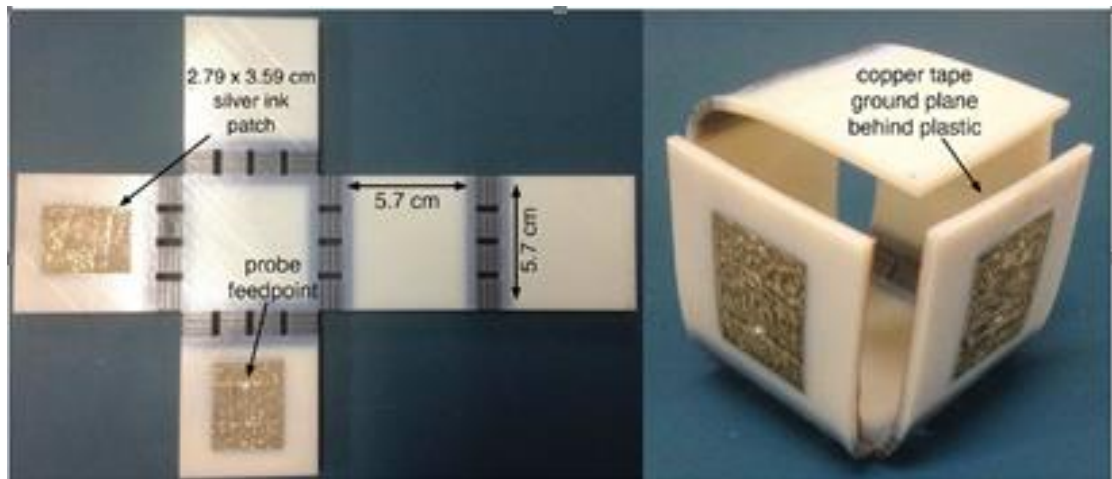
Répartition homogène ou produit pur



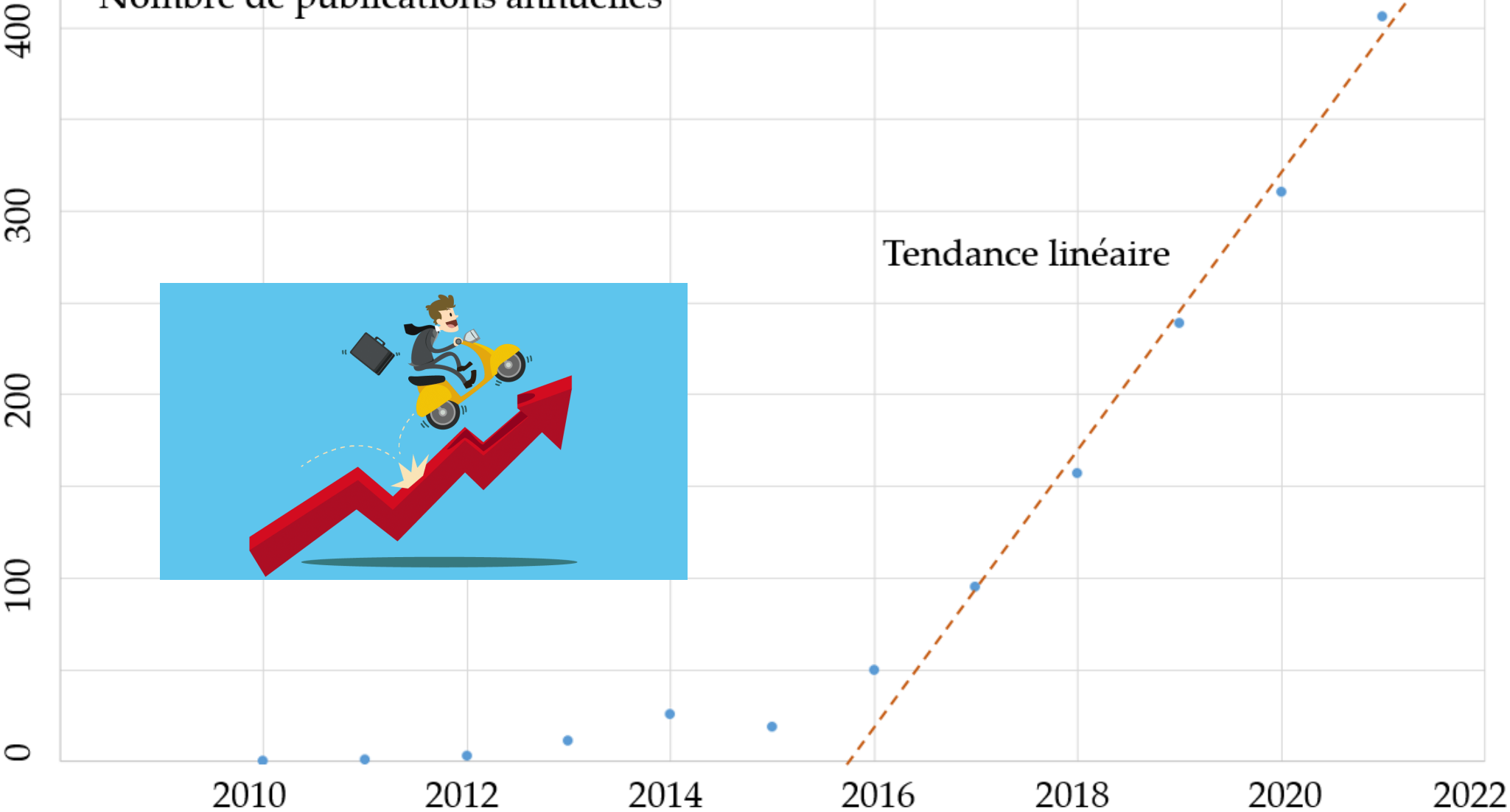
Répartition « numérique »

# Effets possibles



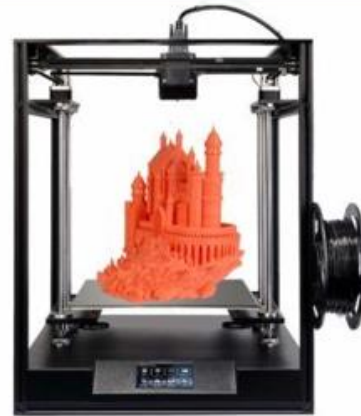
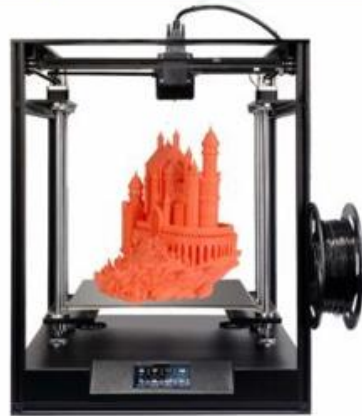
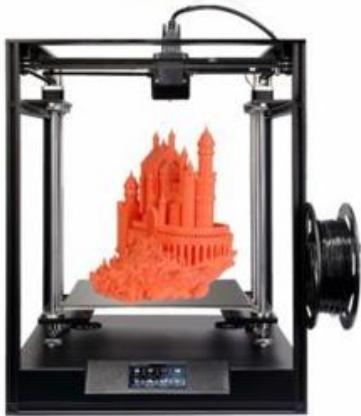


# Nombre de publications annuelles

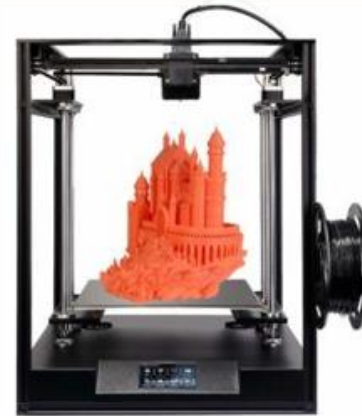


# Méthodes 4D

Homogène (1+1)    Hybride (1+N)    Hétérogène (>1 ; > 1)

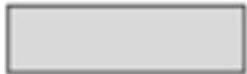


+



+

...



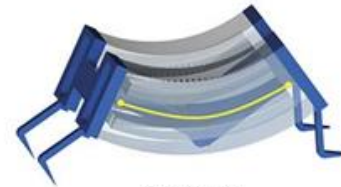
Répartition  
homogène ou  
produit pur



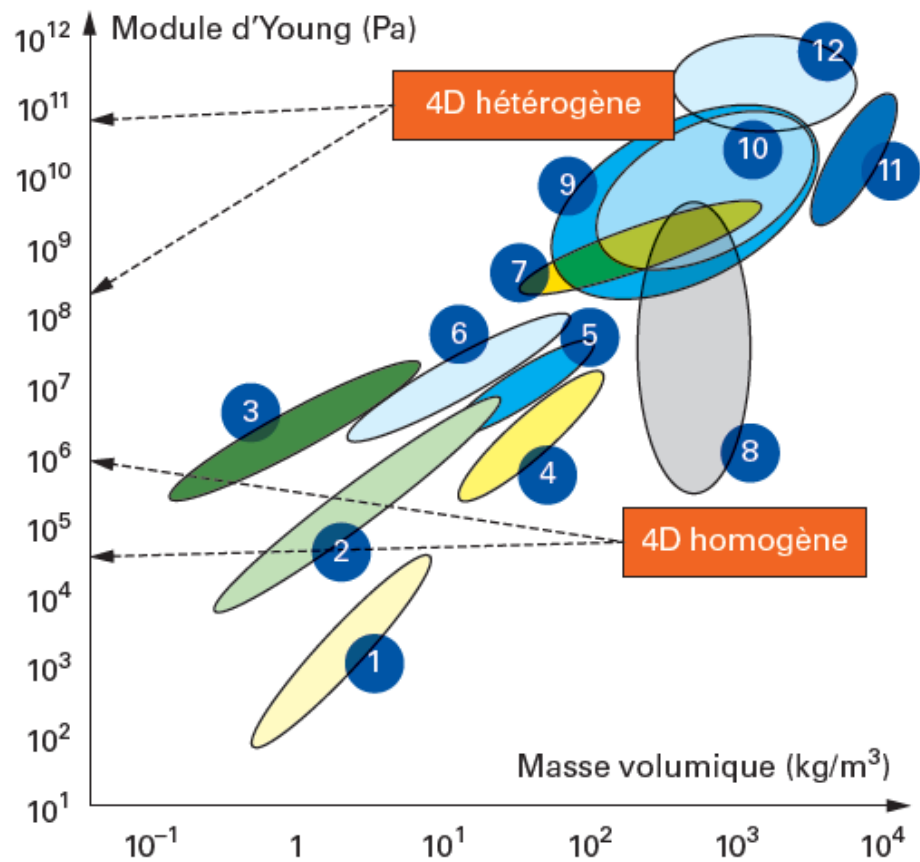
Répartition  
« numérique »



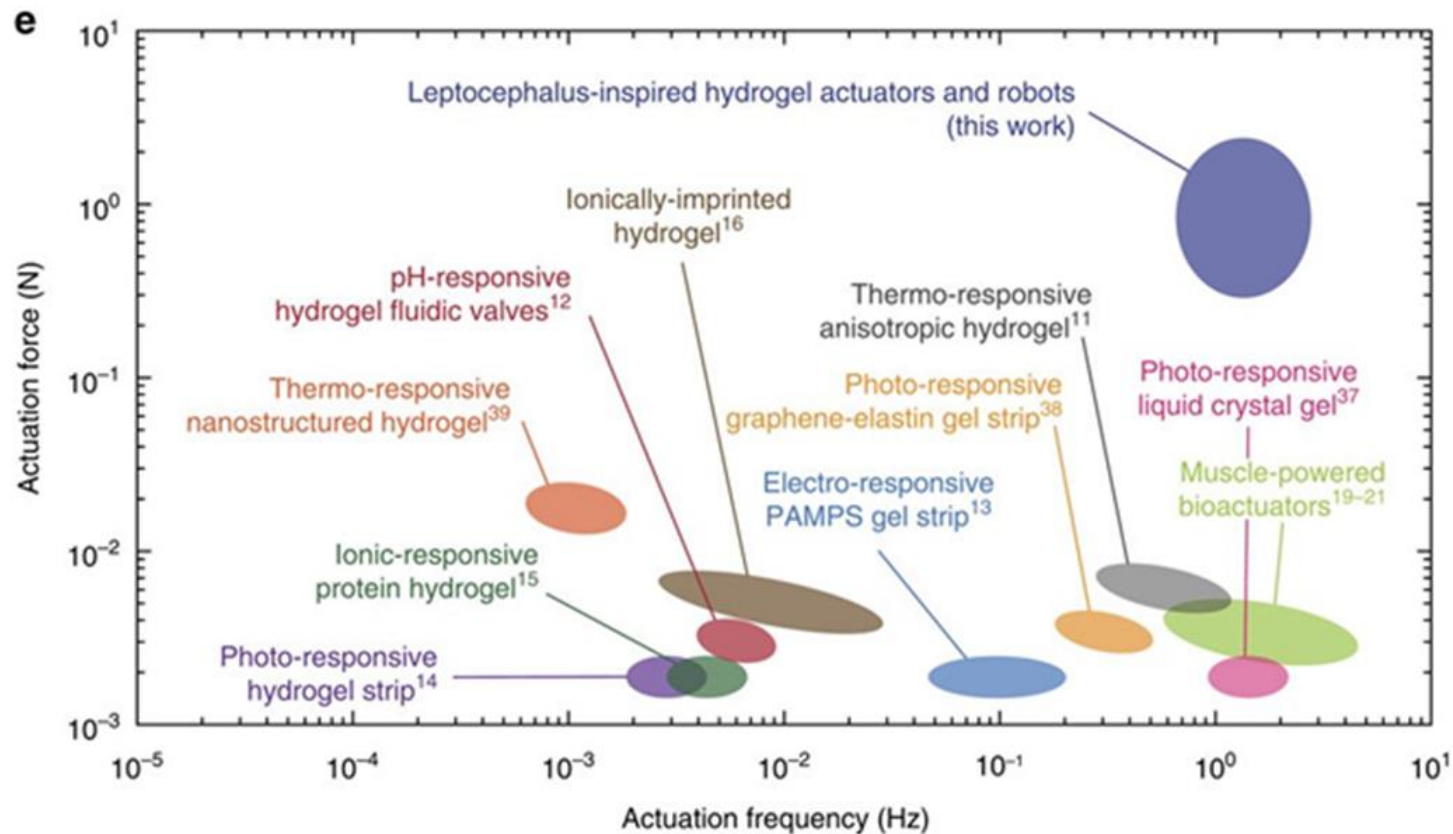
Touch Ground



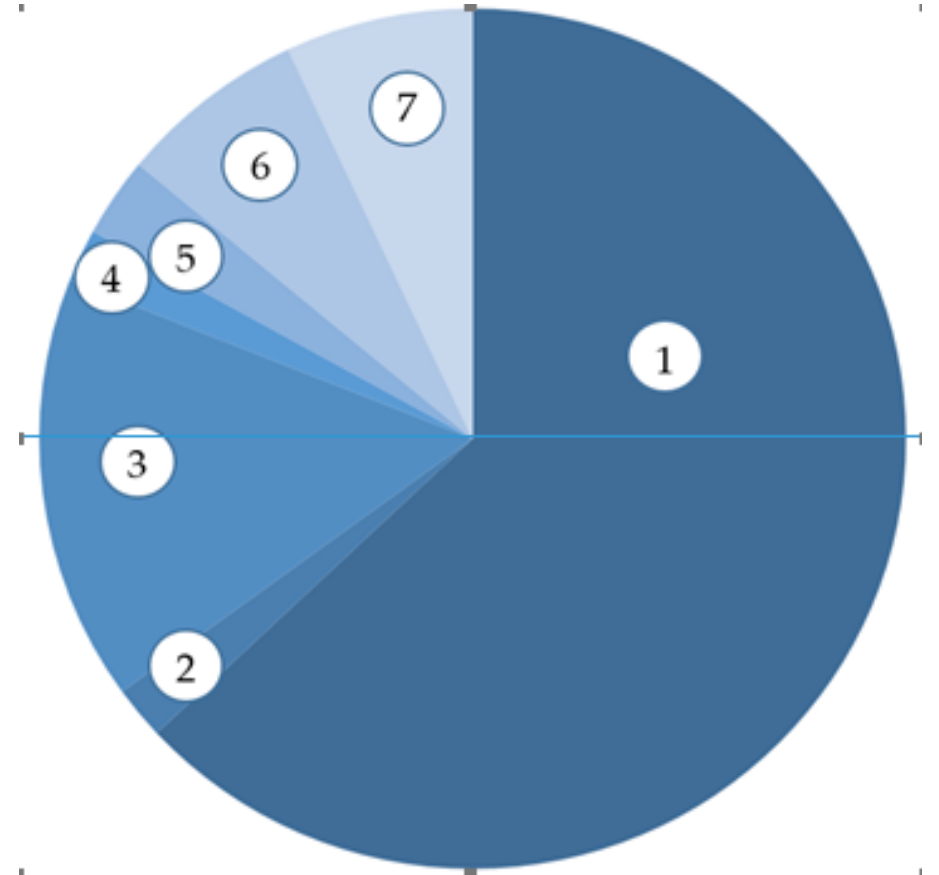
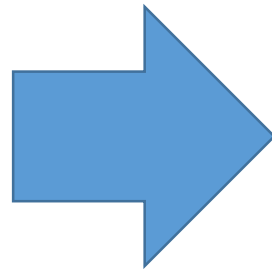
Off Ground



- 1 : Elastomères contenant du graphène ;
- 2 : Micro-treillis métalliques ultra-légers ;
- 3 : Treillis creux à base d'alumine ;
- 4 : Mousse contenant des nano-tubes de carbone ;
- 5 : Mousse acrylique ;
- 6 : Acrylique massif ;
- 7 : Alumine massive ;
- 8 : Elastomères ;
- 9 : Matériaux composites massifs ;
- 10 : Métaux ;
- 11 : Alliages métalliques « durs » ;
- 12 : Céramiques industrielles.



# Centration étonnante (mais imprimabilité)



1- matériaux organiques et leurs stimulations ; 2- Matériaux inorganiques et leurs stimulations ; 3- Articles de synthèse ; 4- Modélisations ; 5- Divers ; 6- Applications et 7- Procédés (dont les origamis 4D).



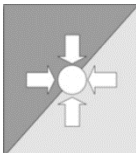
Créativité

Innovation

Publications scientifiques

Brevets Licences

Gains financiers



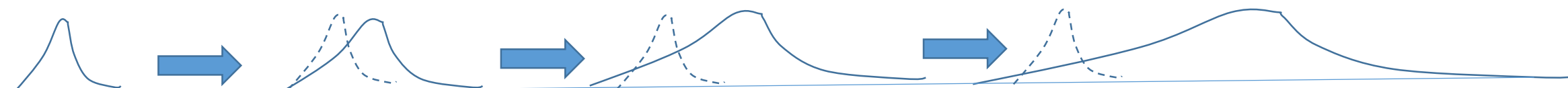
Spectre dédié au  
paradigme de la  
recherche  
académique

Approche  
interdisciplinaire  
- démonstrateur  
académique

Preuve de concept

Paradigme technologique  
- industrialisation

Elargissements



Critères scientifiques

Critères technologiques

Critères autres que technologiques



Application	Commentaires	Références	Accessibilité
Cadre général		<a href="#">Tibbits</a> , 2013 ; 2014 ; <a href="#">Egrène et Yalcun</a> , 2019 ; <a href="#">Staedter</a> , 2019 ; <a href="#">Pinho, Buga et Piedade</a> , 2020 ; <a href="#">Rafiee, Farahani et Therriault</a> , 2020 ; <a href="#">Rander</a> , 2020 ; <a href="#">Sculpteo</a> , 2020 ; <a href="#">Zolfagharian et al</a> , 2020 ; <a href="#">Kalyan, Kumar et Nagdeve</a> , 2021	
Biomédical			
4D Bio-printing	Différents tissus et organes biologiques	<a href="#">Wan et al</a> , 2020 ; <a href="#">Lui et al</a> , 2019 ; <a href="#">Wan et al</a> , 2020 ; <a href="#">Sun et al</a> , 2020 ; <a href="#">Lefevre</a> , 2021 ; <a href="#">Listek</a> , 2021	
Stents 4D	Structures en matériaux adaptatifs introduits dans les vaisseaux sanguins (biocompatibilité)	<a href="#">Duerig, Pelton et Stockel</a> , 1999 ; <a href="#">Wei et al</a> , 2017 ; <a href="#">Zarek et al</a> , 2017 ; <a href="#">Xue et al</a> , 2019 ; <a href="#">Siddharth et al</a> , 2020 ; <a href="#">Yang, Gao et Xu</a> , 2020	
Thérapie	Hydrogel magnéto-thermosensible	<a href="#">Tang et al</a> , 2021	
Implants	Alliages à mémoire de forme	<a href="#">Elahinia et al</a> , 2012	
Protections personnelles	3D d'élastomères	<a href="#">Kumar et Pumera</a> , 2021	
Bio-printing	Echafaudages adaptatifs (biocompatibilité) ; roadmap	<a href="#">Miao et al</a> , 2016 ; <a href="#">André</a> , 2017 ; <a href="#">Sun et al</a> , 2020	
Réparation vasculaire	Utilisation de matériaux adaptatifs pour aider à la réparation de vaisseaux sanguins (biocompatibilité)	<a href="#">Kuang et al</a> , 2018	
Sutures intelligentes	Imitation de la mécanique des tendons	<a href="#">Ma et al</a> , 2021	
Délivrance de médicaments	Délivrance, à temps et au bon endroit, de médicaments administrés par voie orale (biocompatibilité)	<a href="#">Novakovic, Matcham et Scott</a> , 2018 ; <a href="#">Melocchi et al</a> , 2019 ; <a href="#">Lamichhane et al</a> , 2019 ; <a href="#">Lui et al</a> , 2019 ; <a href="#">Shie et al</a> , 2019 ; <a href="#">Municov et al</a> , 2020 ; <a href="#">Li</a> , 2016 ; <a href="#">Inphonlek et al</a> , 2020 ; <a href="#">Jia et al</a> , 2021	
Traitement médical	Robot nageur	<a href="#">Wang et al</a> , 2020a	
Médicaments	Matériaux nanoscopiques sensibles à un potentiel électromagnétique (exemple hyperthermie locale)	<a href="#">Li et Su</a> , 2018 ; <a href="#">Kirillova et Ionov</a> , 2019 ; <a href="#">Lui et al</a> , 2019 ; <a href="#">Bajpai et al</a> , 2020	
Odontologie	Tenue en compte des déplacements des tissus en réparation dentaire	<a href="#">Hamza</a> , 2018	
Orthopédie	Matériaux organiques stimulables	<a href="#">Semba, Mieloch et Rvbka</a> , 2020	
Energie et procédés			
Stockage	Charge par des voies thermomécaniques	<a href="#">Roudbarian et al</a> , 2019	
Production	Piézo-électricité ; thermoélectricité	<a href="#">Cholleti</a> , 2018 ; <a href="#">Chen et al</a> , 2020 ; <a href="#">Rösch et al</a> , 2021	
Solaire	Concentrateurs solaires	<a href="#">Momeni et Ni</a> , 2018 ; <a href="#">Svetozarevic et al</a> , 2016	
Micro-fluidique	Systèmes adaptatifs	<a href="#">Robertson et al</a> , 2016 ; <a href="#">Cesewski et al</a> , 2018 ; <a href="#">Apsite et al</a> , 2020	
Microparticules	Déformation induite par des nanoparticules	<a href="#">Sun et al</a> , 2012	
Méta-matériaux	Design	<a href="#">Fraternali, Daraio et Rimoli</a> , 2019	
Optique adaptative	Optique intégrée et auto-adaptative	<a href="#">Jeong et al</a> , 2020 ; <a href="#">Apsite et al</a> , 2020	

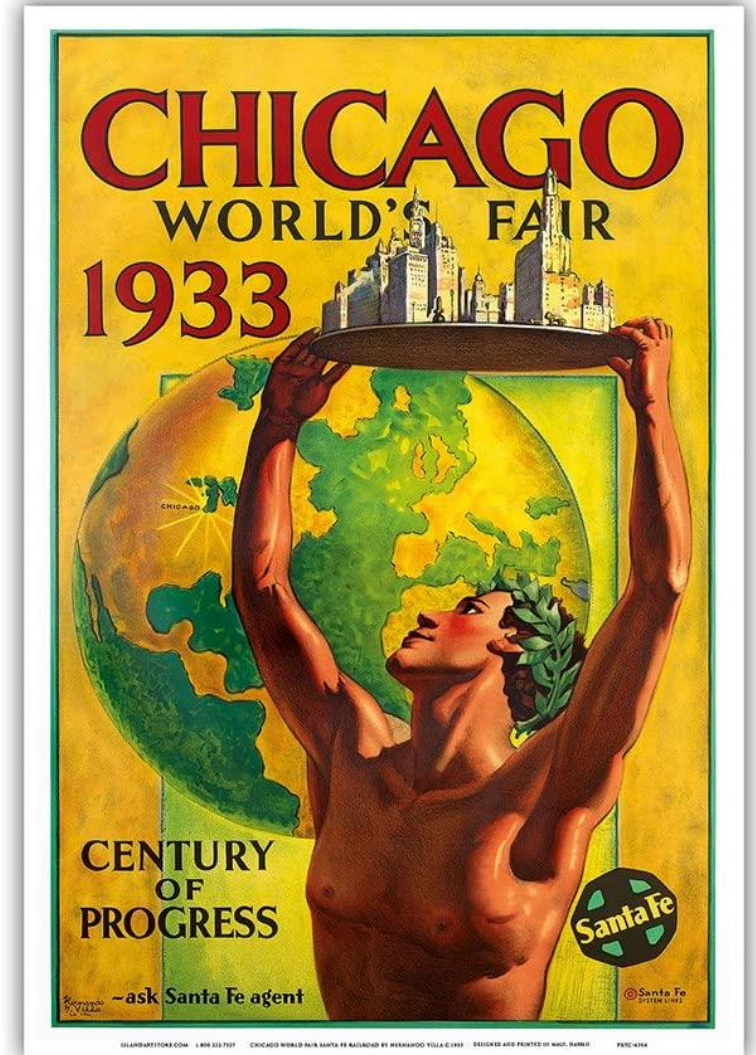
Réacteur électrochimique	Plusieurs matériaux dont métaux	<a href="#">Arenas, Ponce de León et Walsh</a> , 2017	
Catalyse	Méta-matériaux composites et	<a href="#">Papetti et al</a> , 2018 ; <a href="#">Ludwig et al</a> , 2018	
Echelle atomique			
Fabrication	Déplacement d'atomes	IBM, 2012	
Nano-machines			
Nano-machines	Molécules transformables par l'influence d'une stimulation ; caténanes	<a href="#">Sauvage</a> , 2003 ; <a href="#">Medina-Sanchez, Xu et Schmidt</a> , 2018 ; <a href="#">Bandari et al</a> , 2020 ; <a href="#">Novotny, Wang et Pumera</a> , 2020 ; <a href="#">Lemouchi</a> , 2010	
Nano et micromoteurs	idem	<a href="#">Ning et al</a> , 2018 ; <a href="#">Wang et Pumera</a> , 2020	
Transports			
Structures adaptatives	Spoilers en aérodynamique adaptative ; déformations en fonction de la vitesse (mais selon Wiese, Thiede et Herrmann (2020) d'Audi, cette demande n'apparaît pas)	<a href="#">Sellitto et Riccio</a> , 2019 ; <a href="#">Siddharth et al</a> , 2020 ; <a href="#">Das et Dujana</a> , 2020 (mais pas sûr qu'il s'agisse d'impression 4D)	
Morphing	Systèmes adaptatifs	<a href="#">Le Good et al</a> , 2021 ; <a href="#">Papoutsis-Kiachagias et al</a> , 2019 ; <a href="#">Daynes et Weaver</a> , 2013 ; <a href="#">Chillara et Tapino</a> , 2020	
Pneumatiques	Couple roue - bande de roulement	Michelin, 2016 ; <a href="#">Morino</a> , 2017 (mais pas sûr qu'il s'agisse d'impression 4D)	
Avionique	Éléments actifs	<a href="#">Su et al</a> , 2018a ; <a href="#">Daynes et Weaver</a> , 2013	
Isolation mécanique	Structures auxétiques/méta-matériaux Amortissement/méta-matériaux	<a href="#">Liu et al</a> , 2020 ; <a href="#">Xue et al</a> , 2020  <a href="#">Clough et al</a> , 2019	
Architecture			
Design et construction	Structures adaptatives	<a href="#">Thomas, Tibbits et Banning</a> , 2014	
Structures	Structures adaptatives	<a href="#">Beites</a> , 2013 ; <a href="#">Grassi, Sparman et Tibbits</a> , 2020	
Façades auxétiques	Formes reconfigurables adaptées à la chaleur et/ou à la lumière	<a href="#">Abdel-Rahman et Tafrihi</a> , 2018 ; <a href="#">Morteza Hosseini, Mohammadi et Guerra-Santin</a> , 2019	
Robotique, capteurs et actionneurs			
Automatisation et mécatronique	Association d'éléments actifs	<a href="#">Shen et al</a> , 2019 ; <a href="#">Decroly et al</a> , 2020 ; <a href="#">Everett</a> , 2021	
Auto-organisation	Auto-organisation de robots	<a href="#">Ren et al</a> , 2020	
Origamis et Kirigamis mobiles	Développement de structures 3D actives à partir d'une base plane sur laquelle on imprime des matériaux actifs	<a href="#">Modes et Warner</a> , 2016 ; <a href="#">Ge et al</a> , 2014 ; <a href="#">Liu et al</a> , 2018 ; <a href="#">Liu et al</a> , 2020a ; <a href="#">Shen et al</a> , 2020 ; <a href="#">Apsite et al</a> , 2020 ; <a href="#">Lin et al</a> , 2021 ; <a href="#">Alderete et al</a> , 2021	
Robotique souple	Remplacement des structures et des articulations par des éléments déformables (actionneurs)	<a href="#">Schaffner et al</a> , 2018 ; <a href="#">Zolfagharian et al</a> , 2019 ; 2020 ; <a href="#">Zhu et al</a> , 2020 ; <a href="#">Duriez</a> , 2020 ; <a href="#">Shen et al</a> , 2020a ; <a href="#">Scalet</a> , 2020 ; <a href="#">Gul et al</a> , 2018 ; <a href="#">Tyagi, Spinks et Jager</a> , 2021, <a href="#">Schara et al</a> , 2021 ; <a href="#">Ganet</a> , 2018, HCSS, 2021, <a href="#">Murali Babu et al</a> , 2021 ; <a href="#">Adam et al</a> , 2021	

Micro-robots	Co-bots, bio-bots ; auto- <u>organisation</u>	<u>Blackiston</u> et al, 2021 ; <u>André</u> , 2017 ; <u>Bunea</u> et al, 2021	
Robot nageurs	Déplacements à l'échelle submillimétrique	<u>Bumün</u> , 2018 ; <u>Ceylan</u> et al, 2019, <u>Wu</u> et al, 2021 ; <u>Sharan</u> et al, 2021	
Fermetures mécaniques	Réalisation d'un objet 4D sous tension mécanique	<u>Su</u> et al, 2018	
Structures déformables	Formes déformables avec la température et l'humidité ; systèmes à mémoire de forme	<u>Wang</u> et al, 2018a ; <u>André</u> , 2017 ; <u>Lopez-Valdeolivas</u> et al, 2018 ; <u>Mouzakis</u> , 2018 ; <u>Zhang</u> et <u>Xiao</u> , 2018	
Capteurs	Résistance fonction de la déformation ; effets mécaniques	<u>Garces</u> et <u>Avranci</u> , 2020 ; <u>Verpaalen</u> et al, 2020 ; <u>Surjadi</u> et al, 2019	
Moteurs	Formes déformables activées	<u>Peng</u> , <u>Yang</u> et <u>Cavicchi</u> , 2020 ; <u>Rubio</u> et al, 2021	
Pincet et actionneurs	Déformation d'un objet 4D servant d'actionneur grâce à une stimulation extérieure	<u>Lantada</u> , 2017 ; <u>Miriyev</u> , <u>Stack</u> et <u>Lipson</u> , 2017 ; <u>Akbari</u> et al, 2019 ; <u>Liu</u> et al, 2018a ; <u>Chen</u> et <u>Shea</u> , 2018 ; <u>Yuan</u> et al, 2018 ; <u>Schreiber</u> , <u>Manns</u> et <u>Morales</u> (2019) ; <u>Lui</u> et al, 2019 ; <u>Ze</u> et al, 2020 ; <u>Milana</u> et al, 2020 ; <u>Shao</u> et al, 2020 ; <u>Liu</u> et al, 2020 ; <u>Barnes</u> et al, 2020 ; <u>Franco</u> , <u>Casanovas</u> et <u>Donaire</u> , 2021 ; <u>Tawk</u> et <u>Alici</u> , 2021	
Bilames	Changements induits par une stimulation	<u>Hagaman</u> et al, 2018	
Bistables	Alliages à mémoire de forme	<u>Rostaing</u> , 2004 ; <u>Jeong</u> et al, 2019 ; <u>Jiang</u> , <u>Korpas</u> et <u>Raney</u> , 2019 ; <u>Boni</u> et <u>Royer-Carfagni</u> , 2021	
Mémoires de forme	Alliages et polymères	<u>Nicolas</u> et al, 2000 ; <u>Wagg</u> et al, 2007 ; <u>Ould Mousa</u> , 2011 ; <u>Simoneau</u> , 2013 ; <u>Yao</u> et al, 2021	
Optique	Divers éléments	<u>Willis</u> et al, 2012	
Magnétisme	Couplage isolant, matériaux magnétiques	<u>Huber</u> et al, 2016	
Bio-mimétisme	Structure <u>auxétique</u> active	<u>Wang</u> , <u>An</u> et <u>Liu</u> , 2020 ; <u>Lee</u> et al, 2020	
Changement de couleur	Transformation induite par un champ électromagnétique ou la lumière ou la température	<u>Salmon</u> et al, 2019 ; <u>Rai</u> et al, 2017 ; <u>Sertoglou</u> , 2021	
« Auto- organisation » programmée	Assemblages de <u>voxels</u> robotisés ; <u>catomes</u>	<u>Rus</u> et <u>Tolley</u> , 2015 ; <u>Moskvitch</u> , 2015 ; <u>Poty</u> , <u>Lumay</u> et <u>Vandewalle</u> , 2017 ; <u>Su</u> et al, 2020	
Mode et vêtements			
Vêtements et textiles intelligents	Vêtements adaptatifs (couleurs changeantes, perméabilité, taille, etc.)	<u>Chan Vili</u> , 2007 ; <u>Hu</u> et <u>Lu</u> , 2014 ; <u>Zhang</u> et al, 2018 ; <u>Ren</u> et al, 2019 ; <u>Yu</u> , <u>Kim</u> et <u>Mathur</u> , 2020 ; <u>Ravate</u> et <u>Jaemi</u> , 2018 ; <u>Koch</u> , <u>Schmelzeisen</u> et <u>Gries</u> , 2021 ; <u>Biswas</u> et al, 2021 ; <u>Miao</u> et al, 2021	
Applications militaires	Camouflage (changement de couleur)	<u>Puren</u> , 2013 ; <u>Wang</u> et al, 2019a	
Changement de couleur	Couleur change avec la déformation	<u>Vatankhah-Varnosfaderani</u> et al, 2018	
Chaussures	Matériaux adaptatifs	<u>Konakovic</u> et al, 2016 ; <u>Rastogi</u> et <u>Kandasubramanian</u> , 2019	
Joaillerie	Bijoux mobiles	<u>Zarek</u> et al, 2016	
Electronique			
4D et électronique structurelle	Intégration de l'électronique au cœur des objets (4D) dont des actionneurs ;	<u>Espalin</u> et al, 2014 ; <u>Liten-CEA</u> , 2019 ; <u>Wang</u> et al, 2019 ; <u>Lee</u> , <u>An</u> et <u>Chua</u> , 2017 ; <u>Oh</u> et al, 2018 ; <u>Lu</u> , <u>Lan</u> et <u>Liu</u> , 2018 ; <u>McDonald</u> et al, 2014	

	électronique imprimée souple		
Electronique imprimée	Impression avec des encres conductrices (dont contenant des nanoparticules)	<u>Zarek</u> et al, 2016a ; <u>Kwon</u> et al, 2020 ; <u>Deng</u> et al, 2017, <u>Lou</u> et al, 2017, <u>Jasiuk</u> et al, 2018	
Switch	Photo-activation	<u>Gu</u> et al, 2018	
Circuiterie	Photo-déposition	<u>Tabrizi</u> et al, 2017	
Transducteur	Plusieurs opérations successives	<u>Cesewski</u> et al, 2018	
Analyse biochimique	Miniaturisation, intégration, automatisation et parallélisations de procédés biochimiques	<u>Zhang</u> et al, 2018	
Absorption d'ondes	Structure 4D d'absorption des ondes acoustiques	<u>Le</u> et al, 2020	
Numérique			
Synapses	Matériaux adaptatifs	<u>Park</u> , <u>Kim</u> et <u>Lee</u> , 2020 ; <u>Simeral</u> et al, 2021	
Mémoires	idem	<u>Zhang</u> et al, 2019	
Portes NAND	idem	<u>Zhang</u> et al, 2019	
Stockage d'informations	Couches d'indentations microscopiques tridimensionnelles	<u>De Angelis</u> , 2019	
Espace			
Antennes, capteurs solaires, etc.	Structures spatiales que l'on peut déployer	<u>Tofail</u> et al, 2018 ; <u>Ntouanoglou</u> , <u>Stavropoulos</u> et <u>Mourzis</u> , 2018 ; <u>Mitchell</u> et al, 2018	
Divers			
Nourriture	Pâtes alimentaires 4D	<u>Tao</u> et al, 2021	
Autoréparation	Elastomères poly-méthyl- <u>siloxanes</u>	<u>Liu</u> et al, 2020b ; <u>Idumah</u> , <u>Nwuzor</u> et <u>Odera</u> , 2020	
Animation 3D	TV 3D, cinéma 3/4D	<u>Patel</u> , <u>Cao</u> et <u>Lippert</u> (2017)	
Imperméabilisati on	Fonctionnalisation du textile	<u>Puren</u> , 2013 ; <u>Yu</u> , <u>Seipel</u> et <u>Nierstrasz</u> , 2018	
Emballages	Emballages intelligents	<u>Kuang</u> et al, 2019 ;	
Alphabet	Lettres de l'alphabet réalisées en impression 4D	<u>Hoa</u> et <u>Rosca</u> , 2020	
Impression 6D	Le consommateur utilisera son 6 <sup>ème</sup> sens ; les données seront transférées vers l'interface d'impression 6D Autre vision	<u>Moonmoon</u> , 2019 ; <u>Simeral</u> et al, 2021  <u>Georgantzinou</u> , <u>Giannopoulos</u> et <u>Bakalis</u> , 2021	

# Pour tenter de conclure sur 4D

- Beaucoup de promesses (déontologie scientifique ?)
- Essentiellement des mono-matériaux
- Essentiellement des opérations « one-shot » ciblées
- Applications médicales utiles
- Stimulation globales
- Pas de démonstrations exemplaires
- Question de la confiance dans la science pour le transfert : la fin de “*Science Finds, Industry Applies, Man Conforms*”

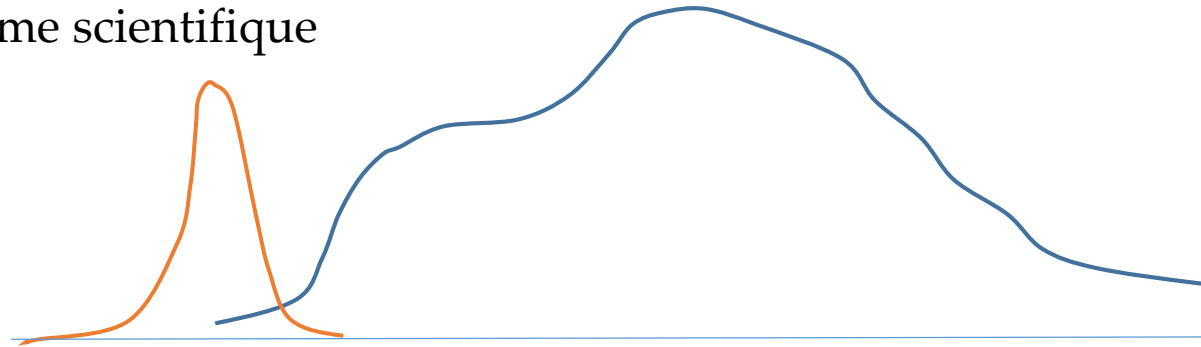
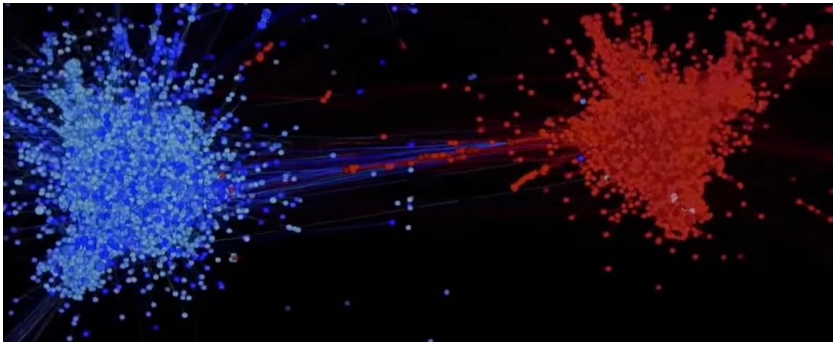


# Où est alors la 4D ?

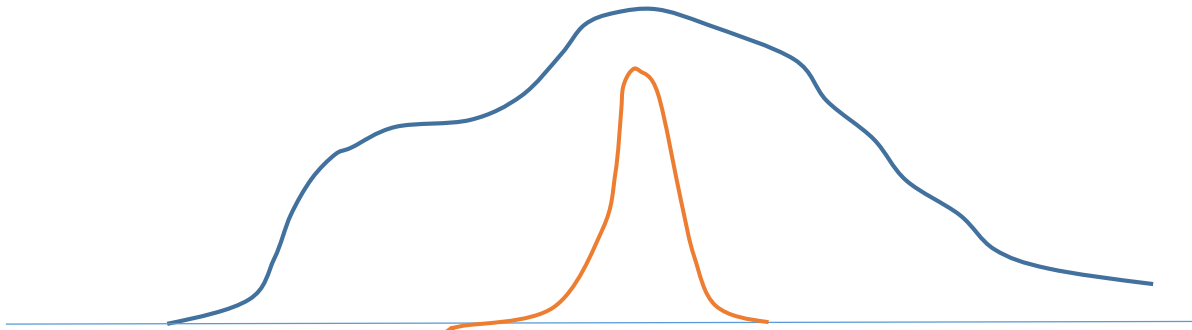
Paradigme technologique et industrialisation

Paradigme scientifique

Disjonction entre buts et résultats



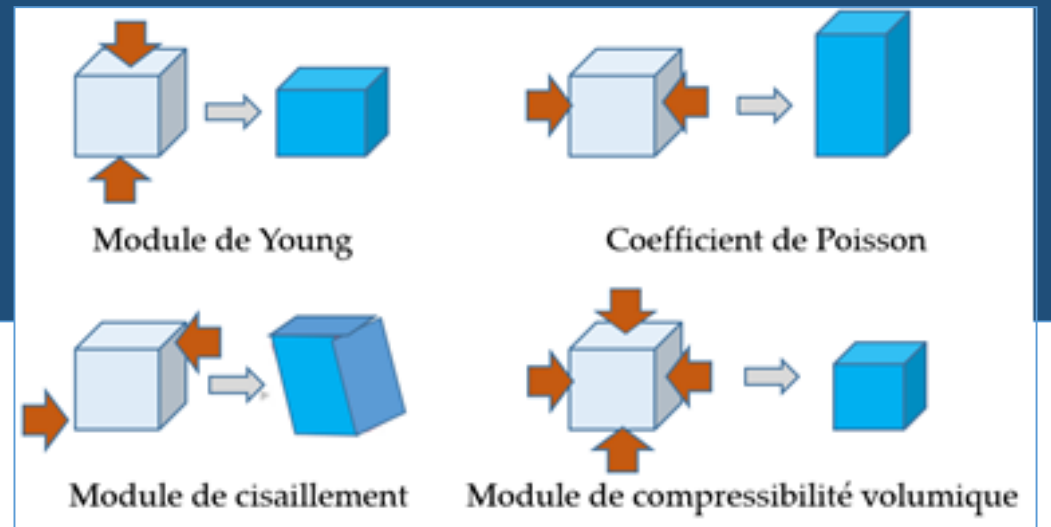
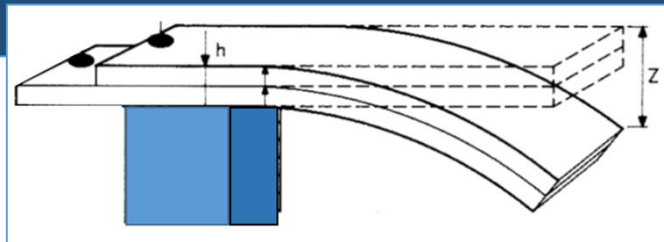
Inadaptation



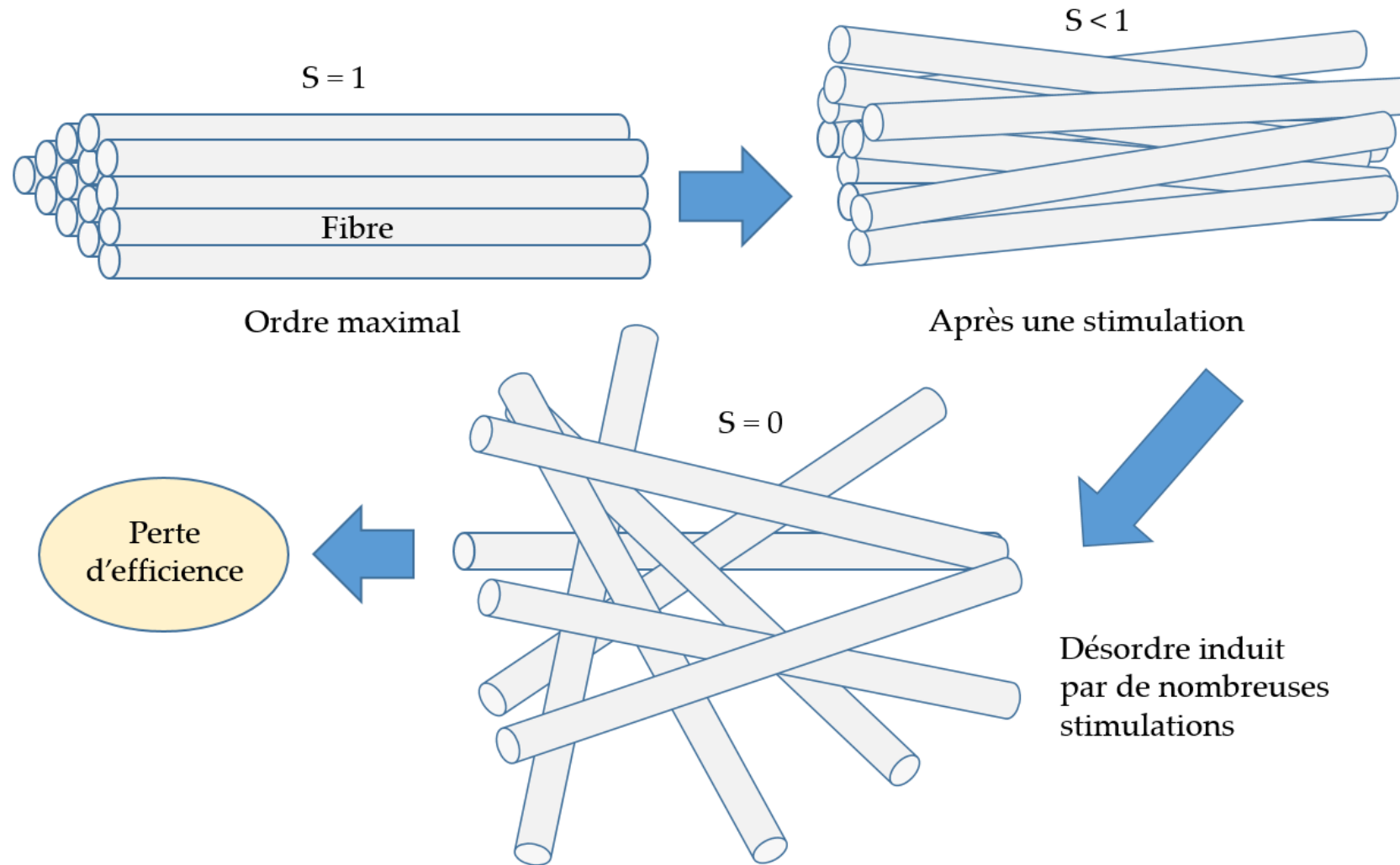
Relation possible entre amont et aval

# Quelques gros problèmes en 4D

- Propriétés mécaniques très médiocres (module d'Young)
- Temps de réponse inacceptables (lois de Fourier, de Fick, etc.)
- Fatigue et perte des propriétés souhaitées
- Rupture (nombre de cycles)
- Méthodes industrialisables de stimulation (rien n'est fait; d'ailleurs est-ce possible ?)
- Incompatibilités de réalisation 3D (exemple de matériaux ayant des modules d'Young très différents imposant des résolutions très différentes)
- Modélisation
- Problème inverse



# Fibres et polymères



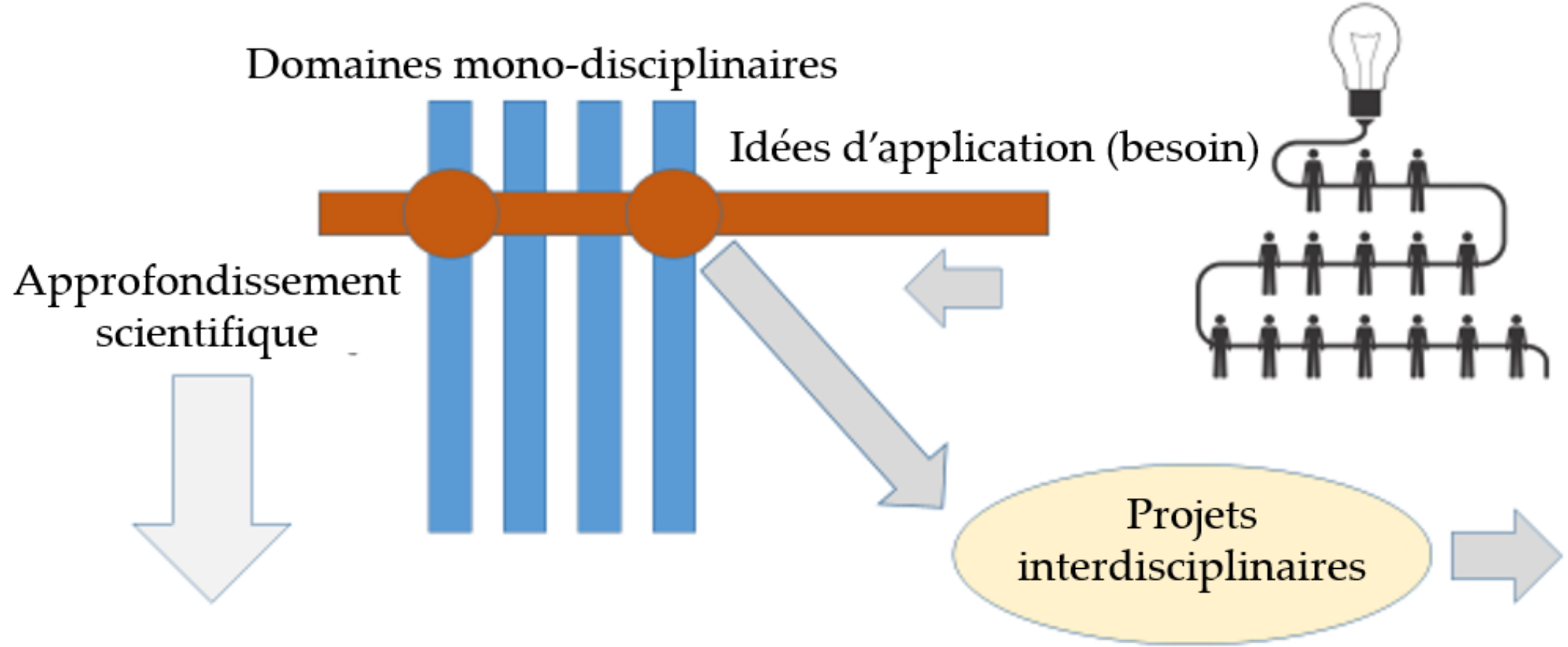
# Avantages << Inconvénients

- Cf. 3D
- Un paramètre de liberté supplémentaire
- Possibilité de travailler avec des méta-matériaux (amélioration des performances mécaniques)
- Niches possibles

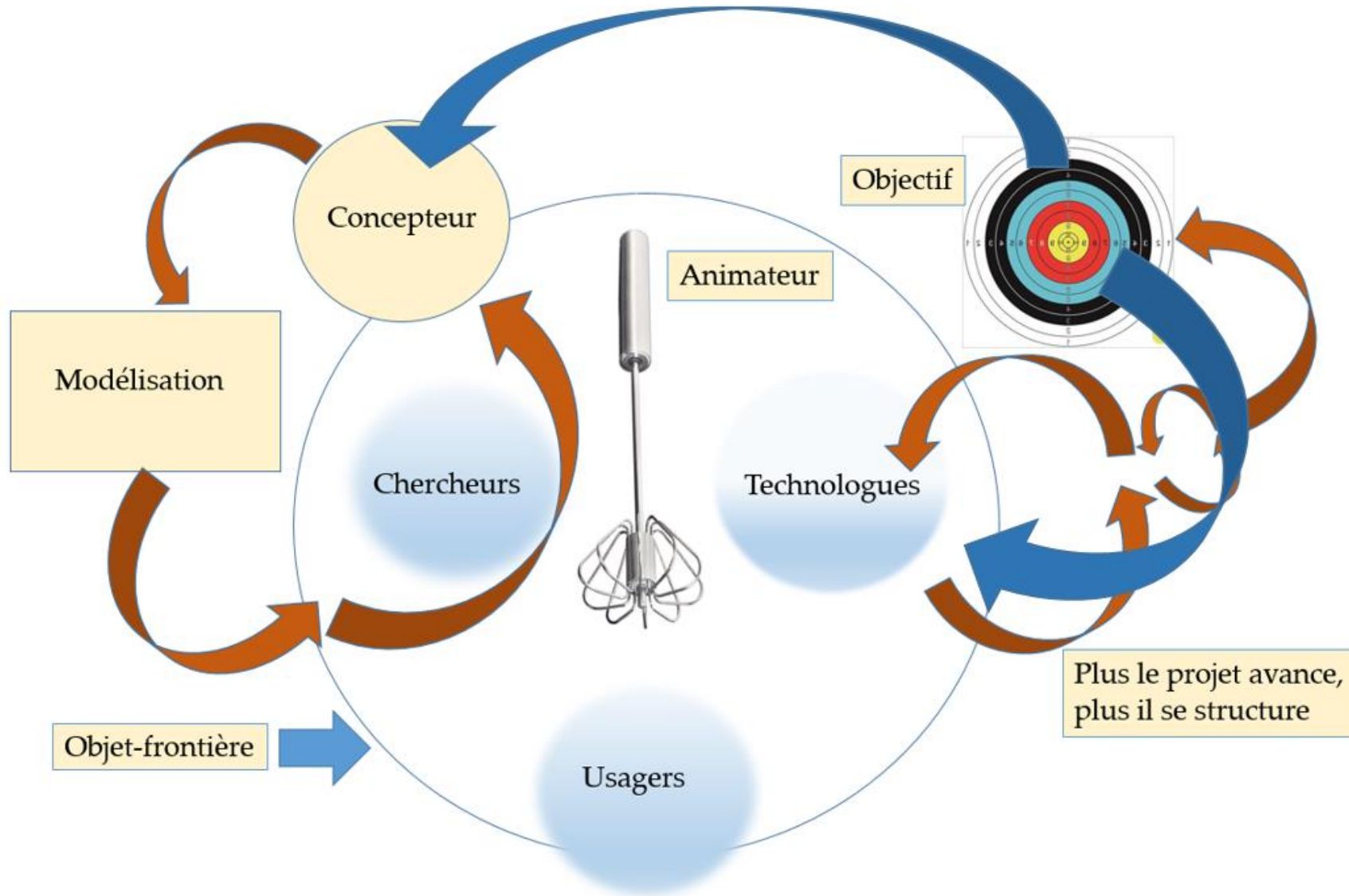
- Cf. 3D
- Non respect du cahier des charges industriel
- Pas de procédé générique
- Matières et matériaux difficilement disponibles
- Pas de méthode de conception (bricolage)
- Trop de paramètres à gérer
- Stimulation ?



# Pour tenter de s'en sortir ?

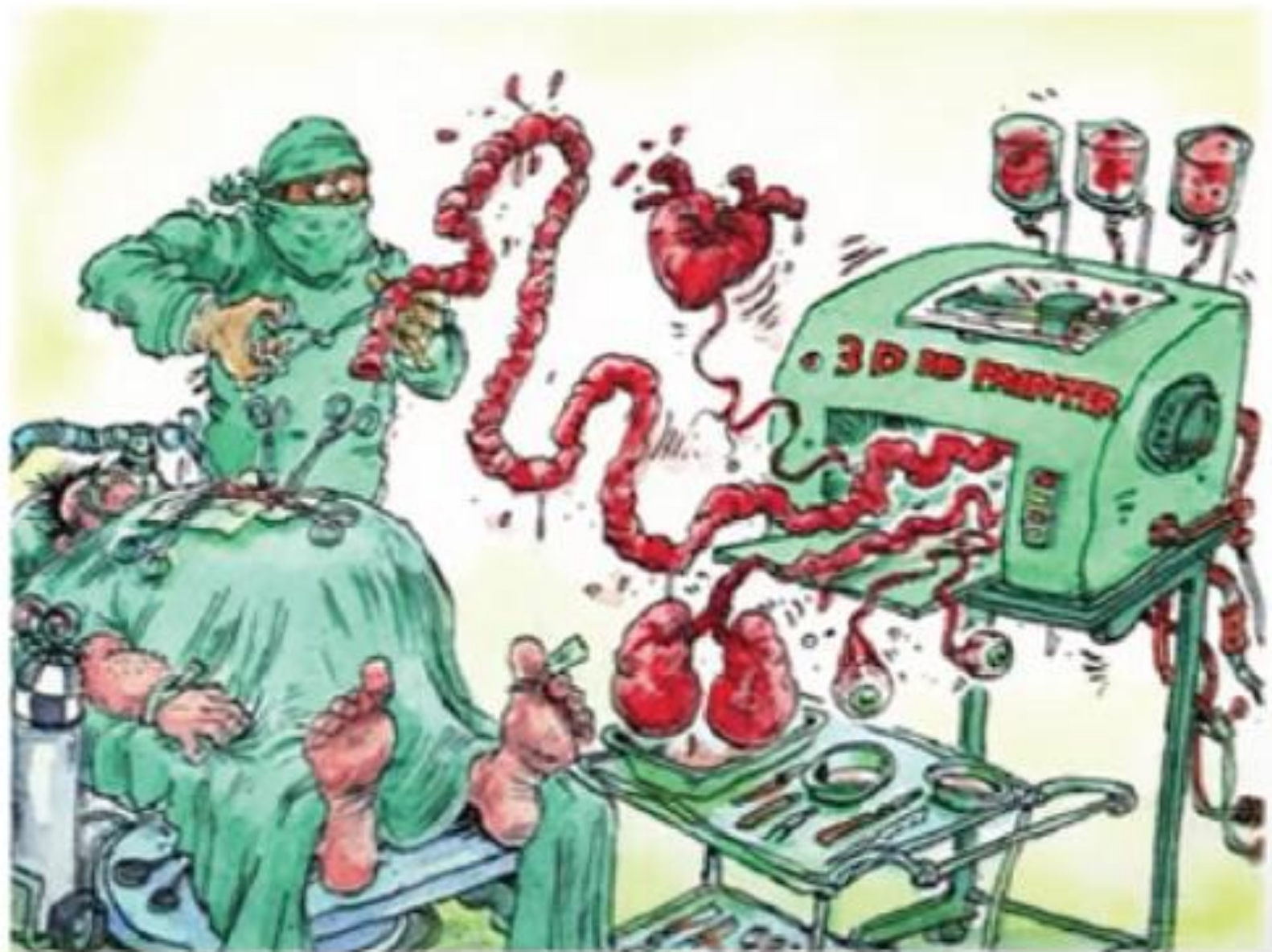


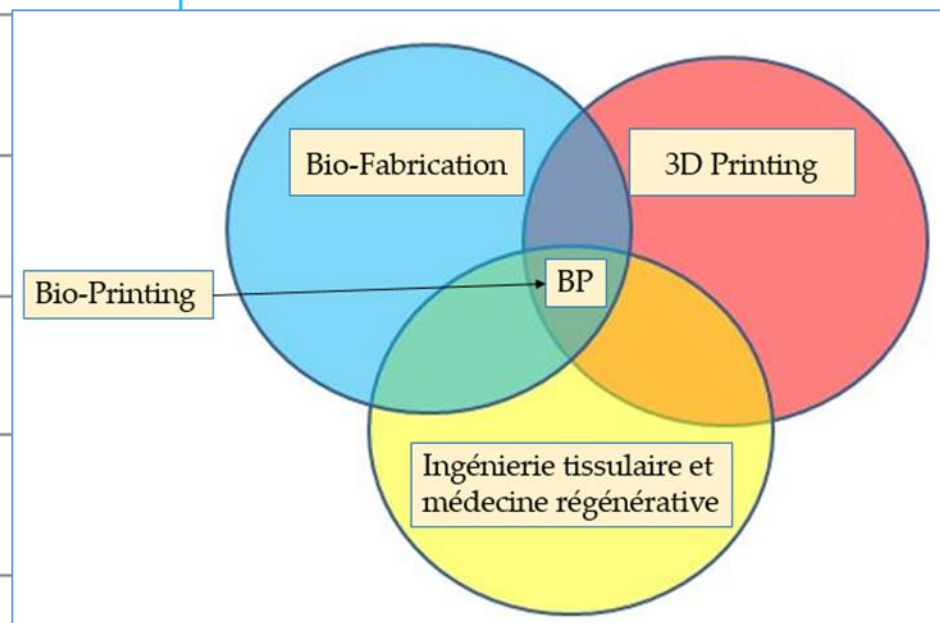
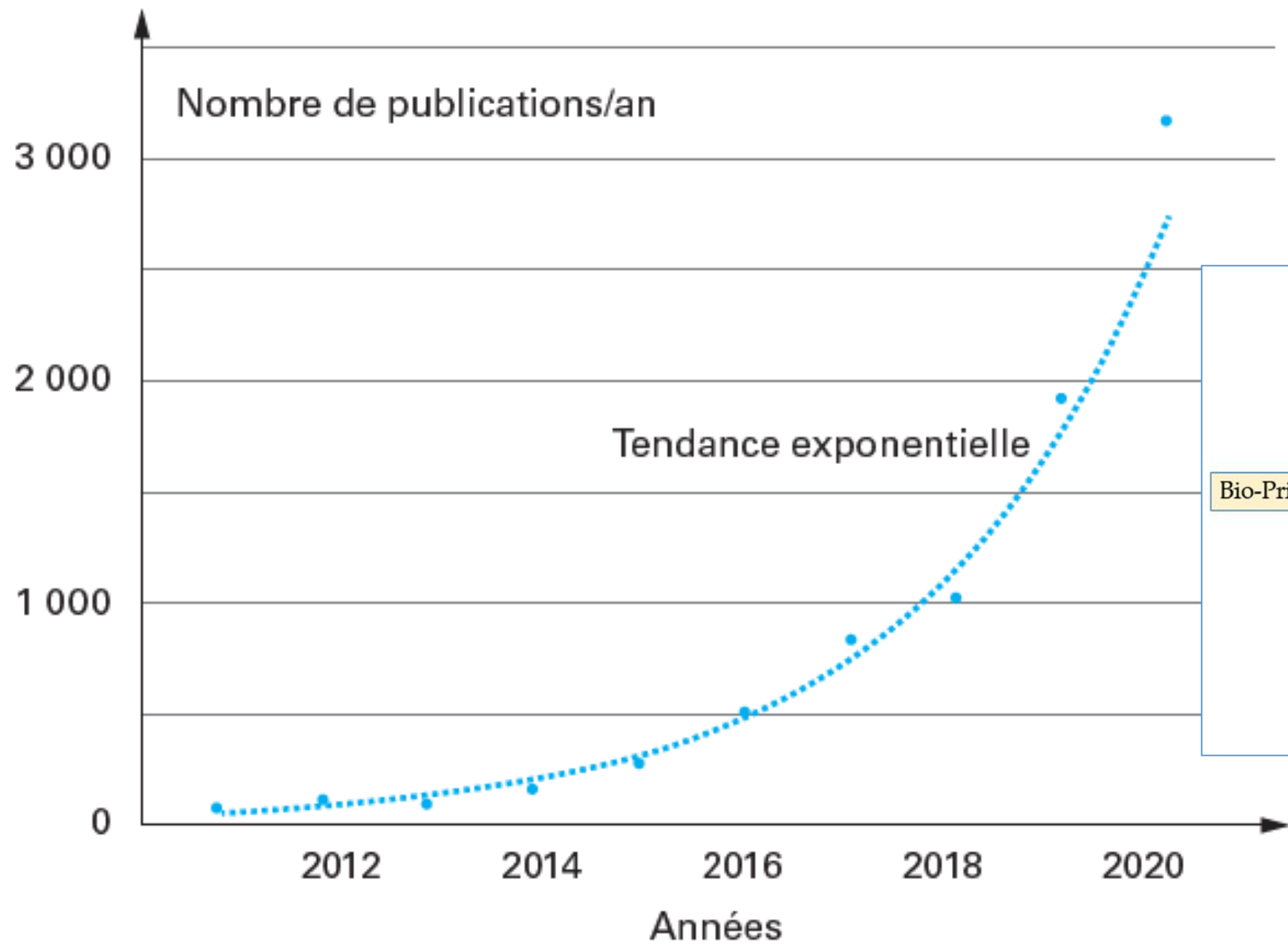
# Convergence

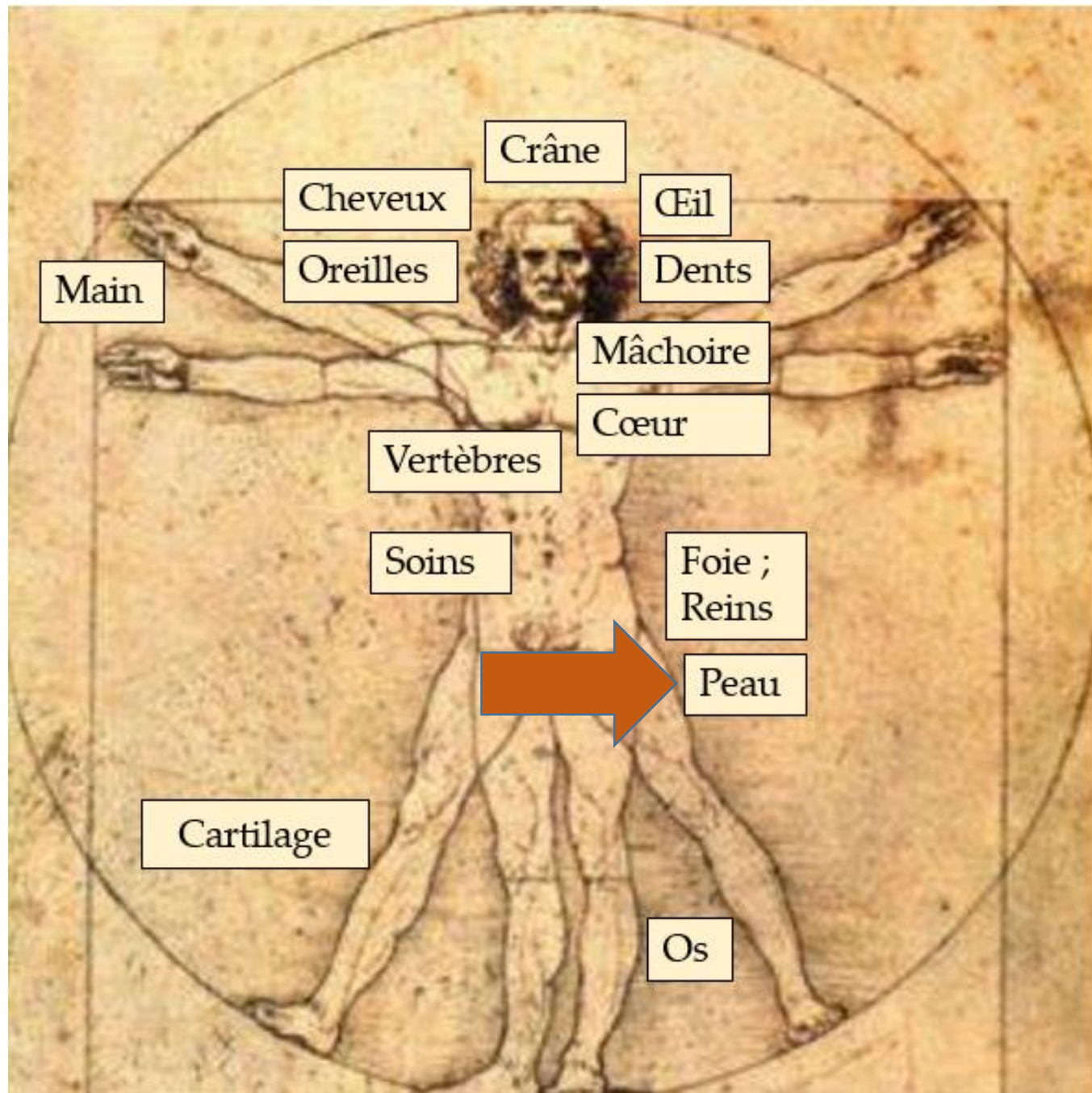


# 4D du vivant : Bio-printing





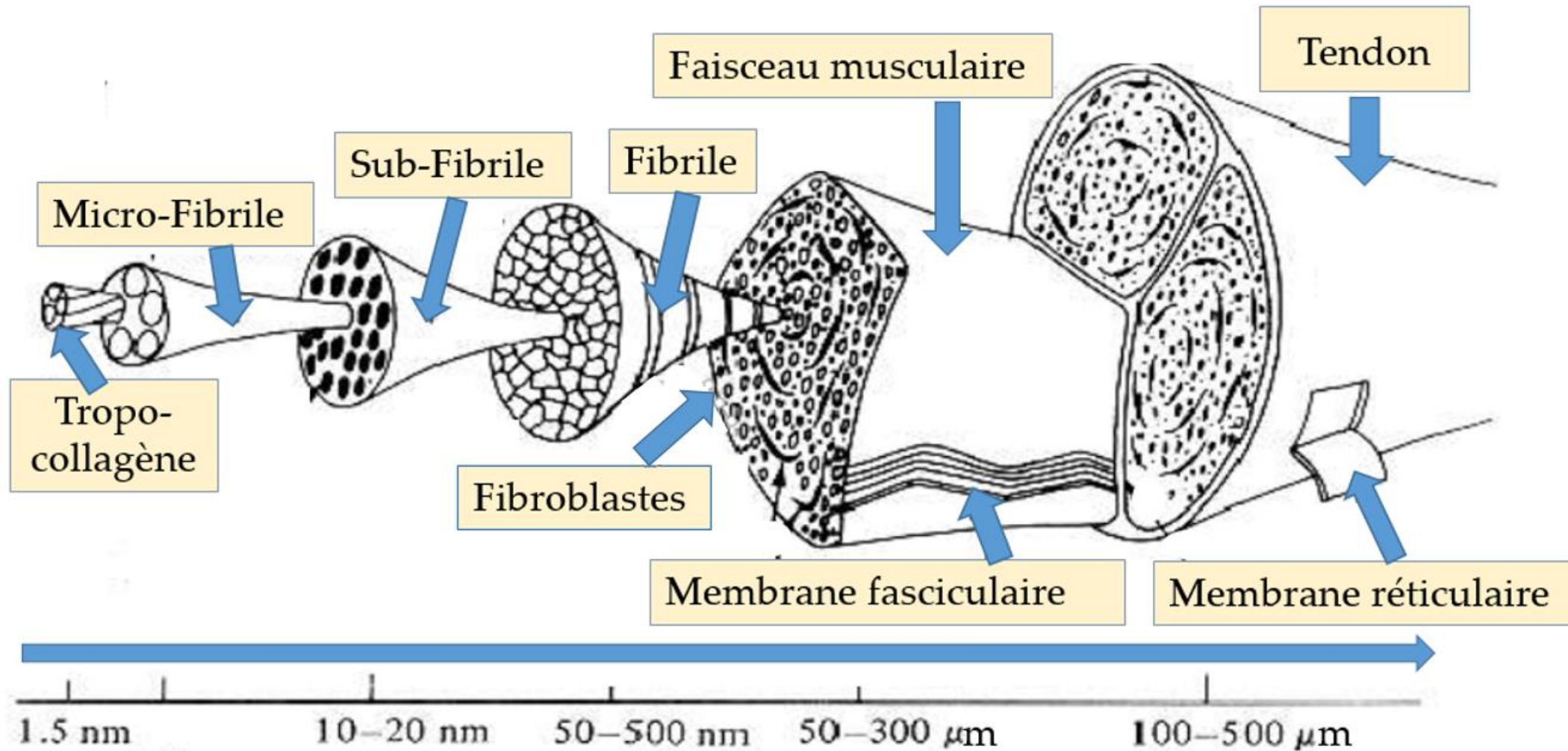


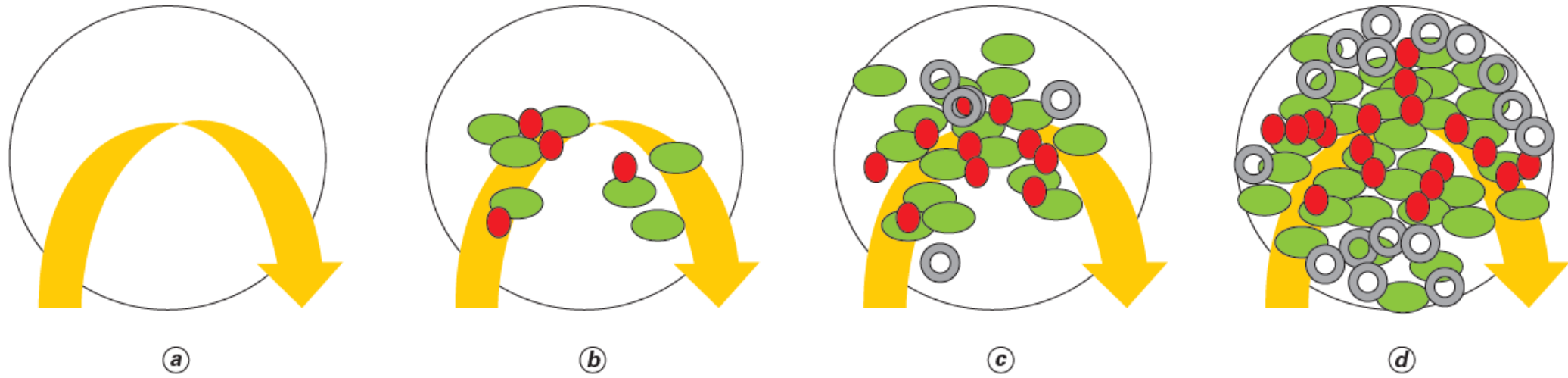





Tuer la mort ?



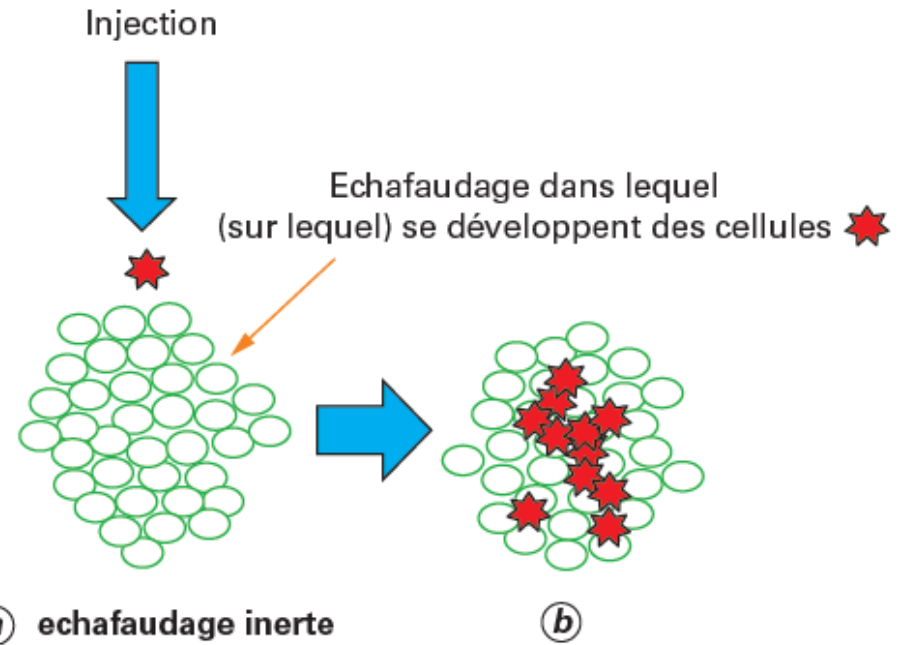
# Eléments d'échelle... cas d'un tendon



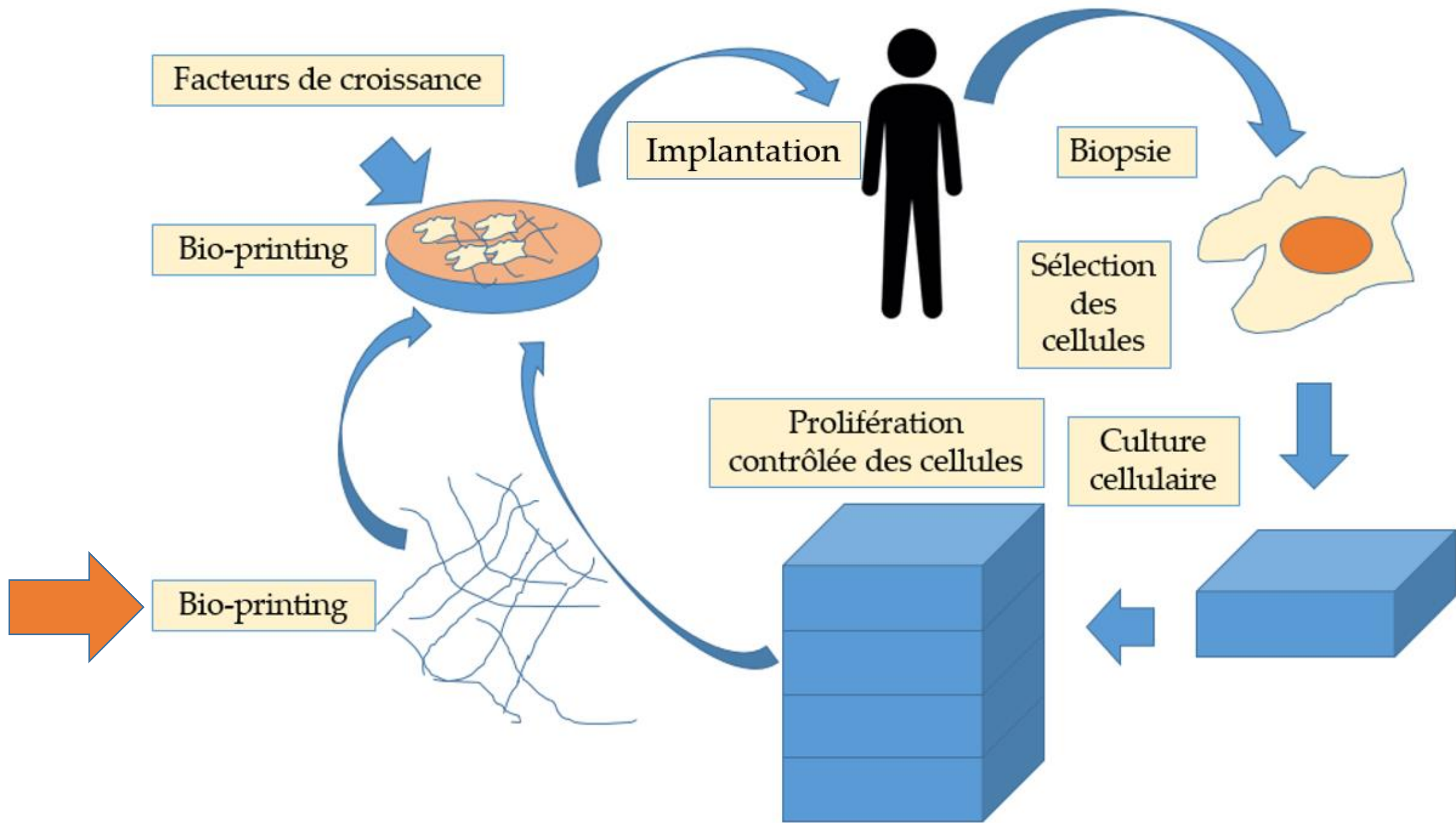


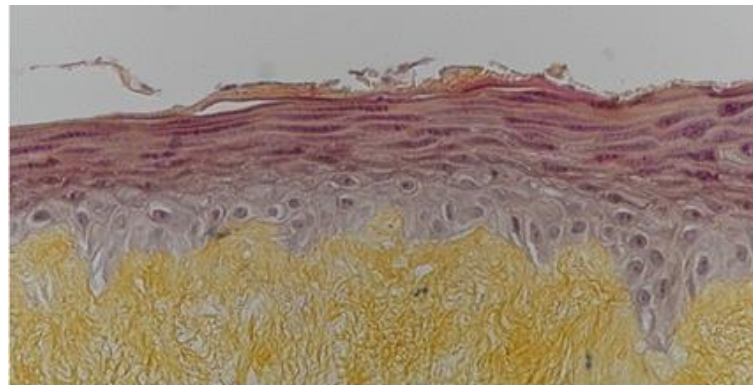
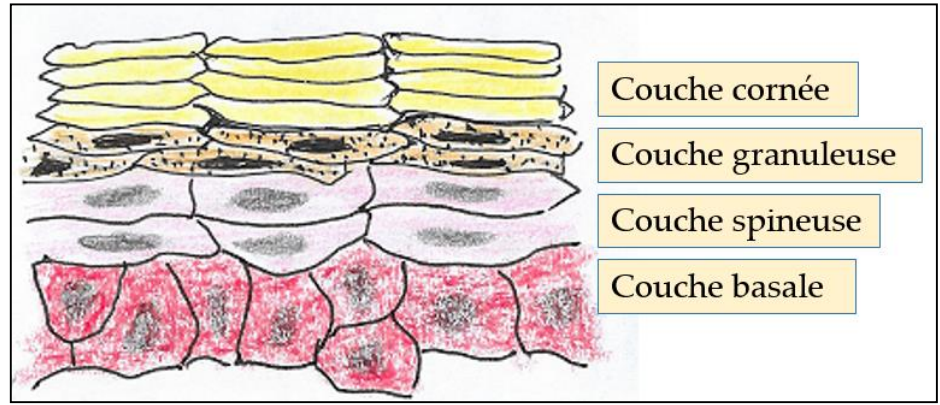
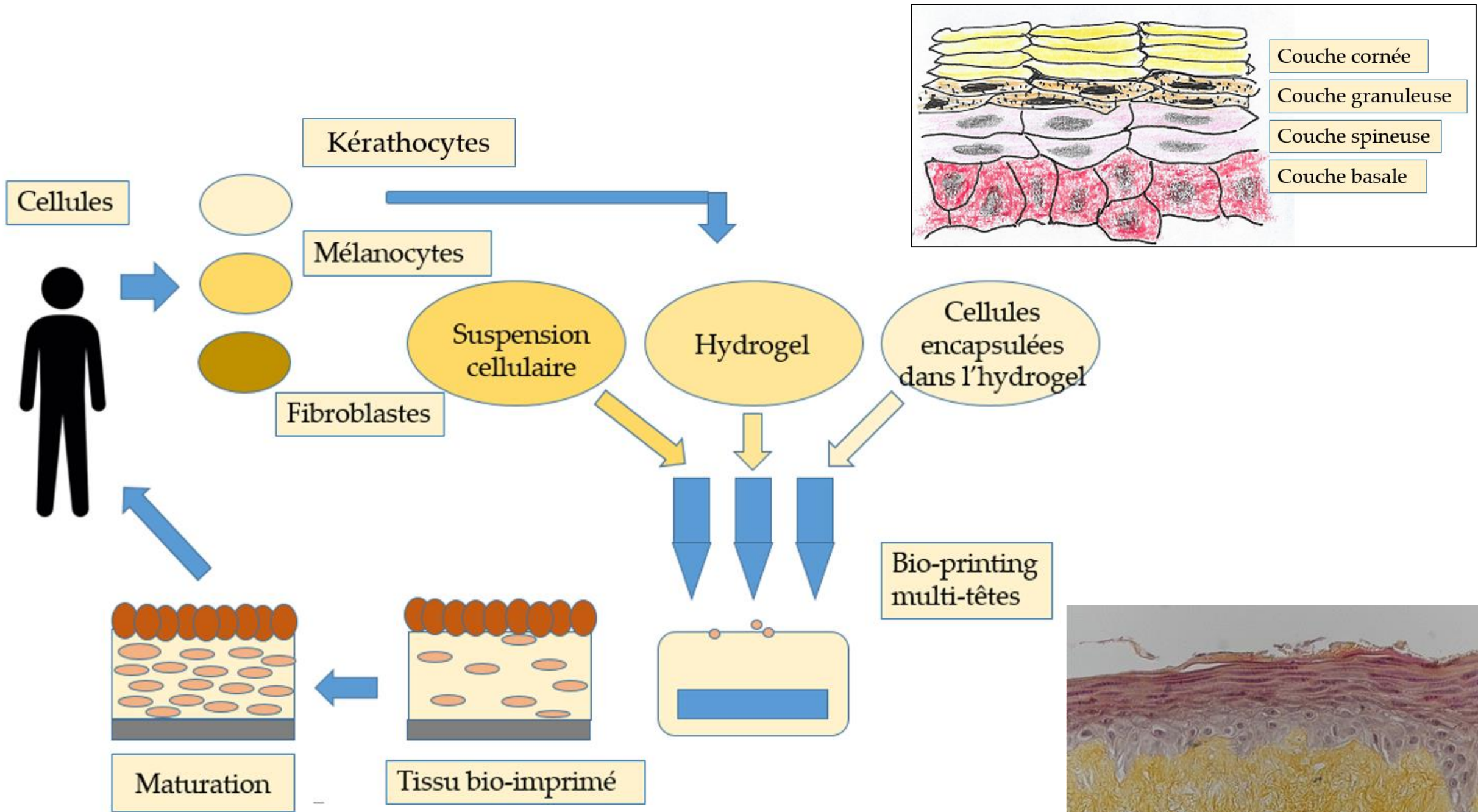
-  Tissu en croissance
-  Vascularisation
-  Cellules mortes

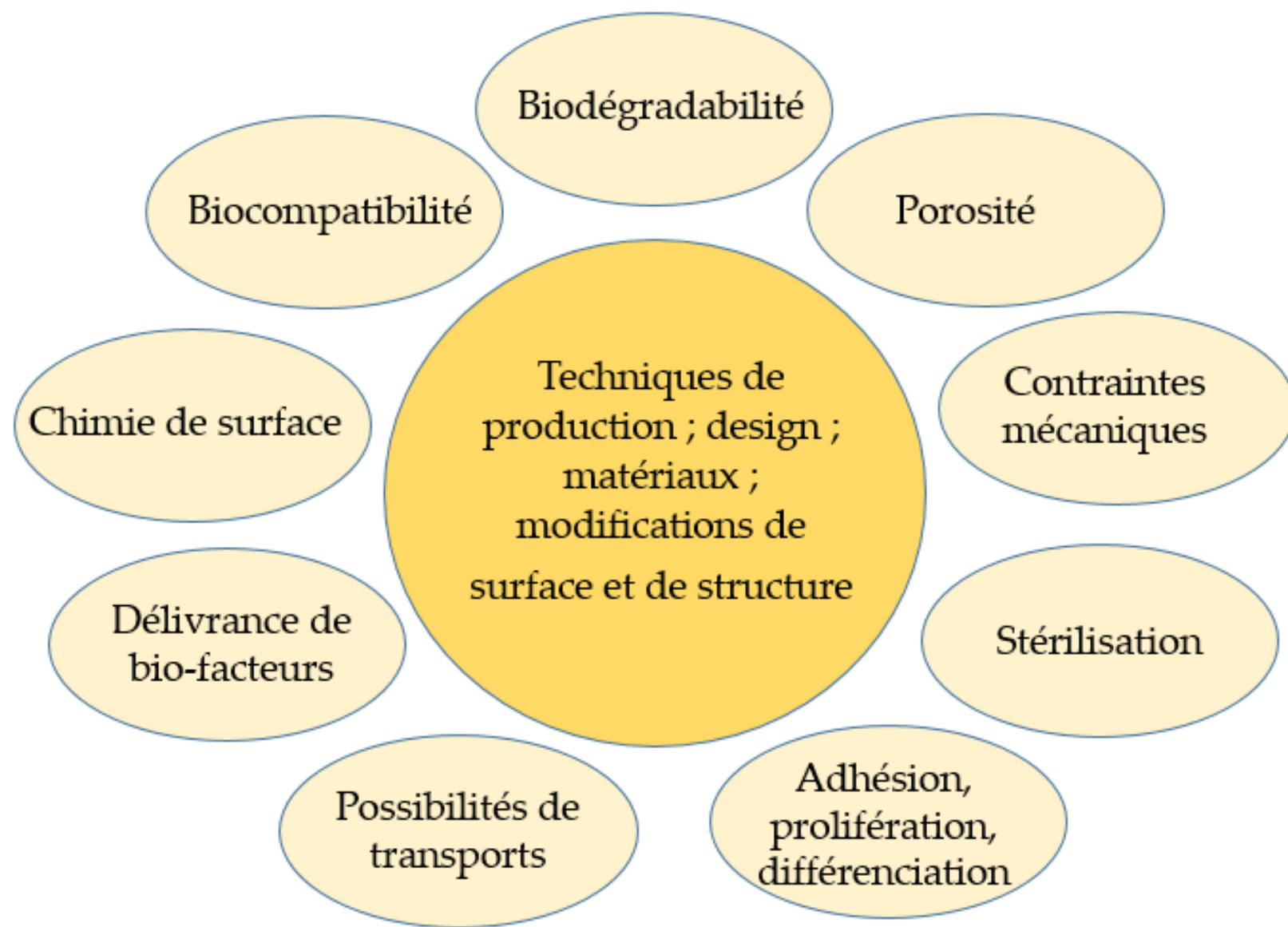
La flèche jaune correspond au transfert de matière (nutriments, élimination des déchets)



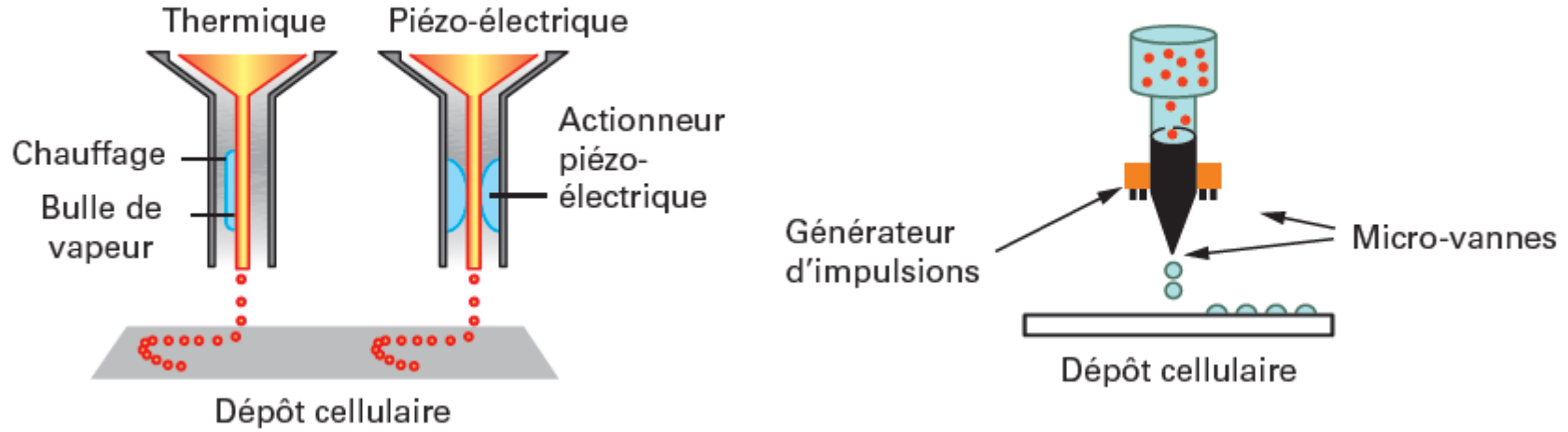




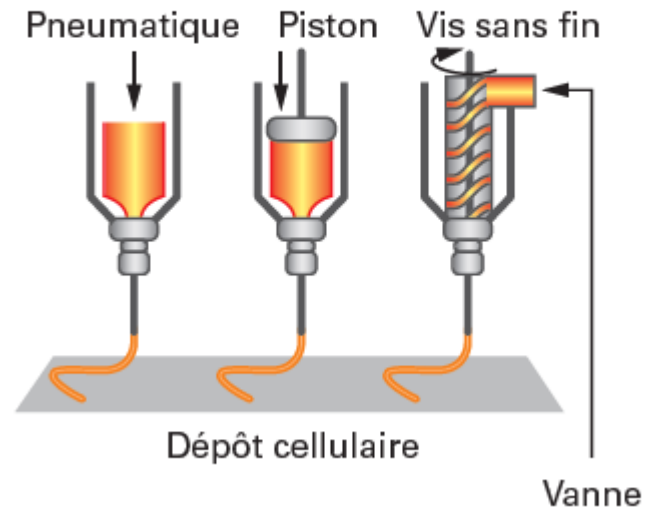




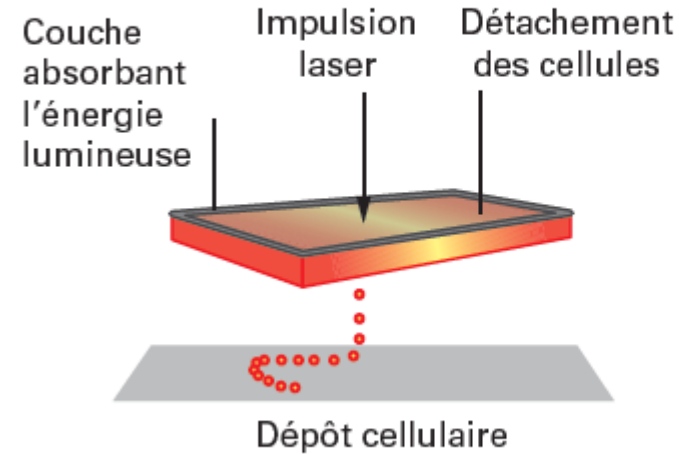
A : Bio-impression par injection de bio-encre



B : Bio-impression par micro-extrusion



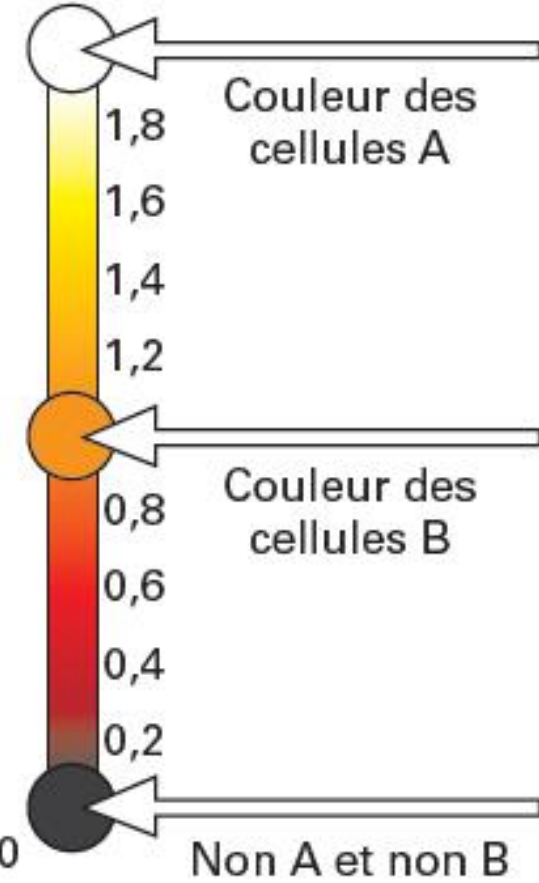
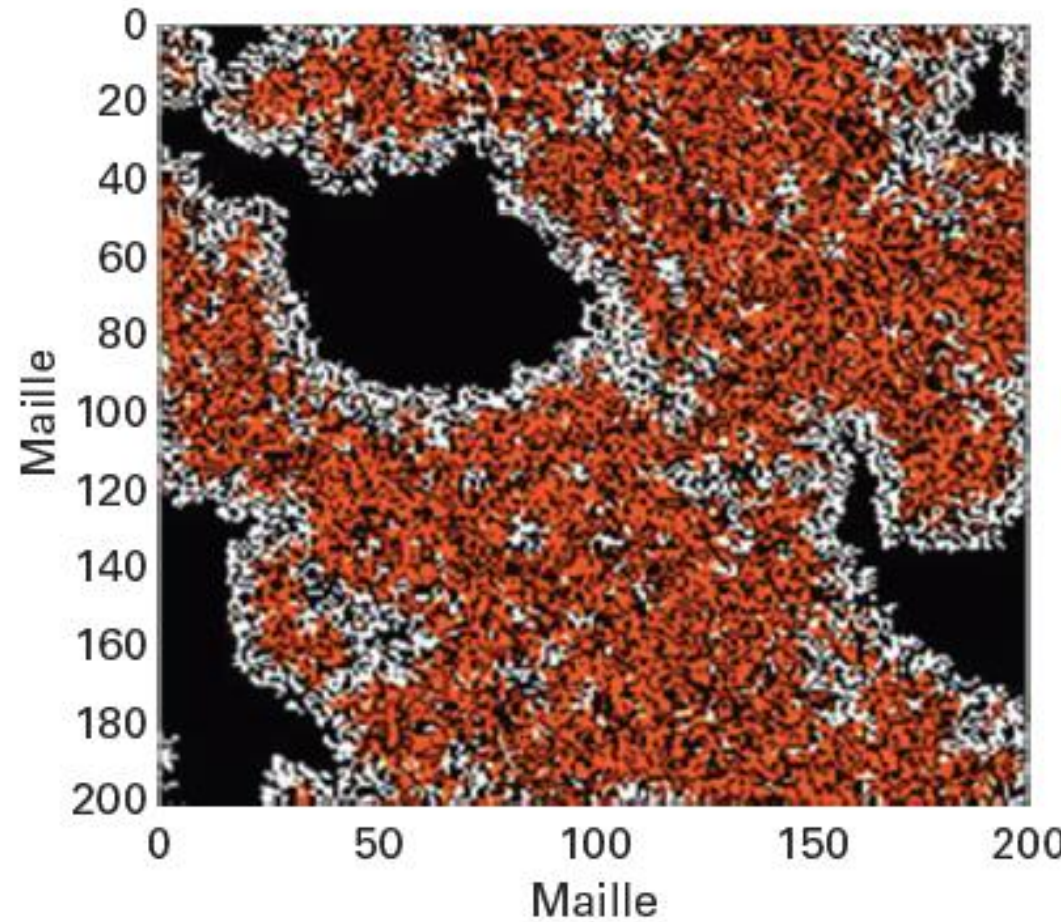
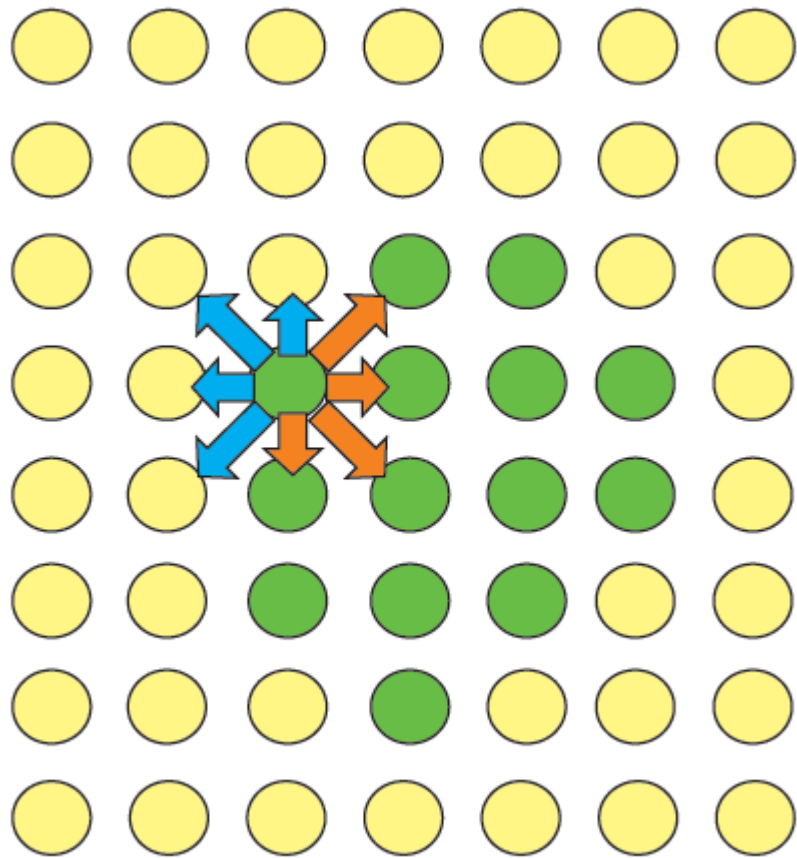
C : Bio-impression assistée par laser



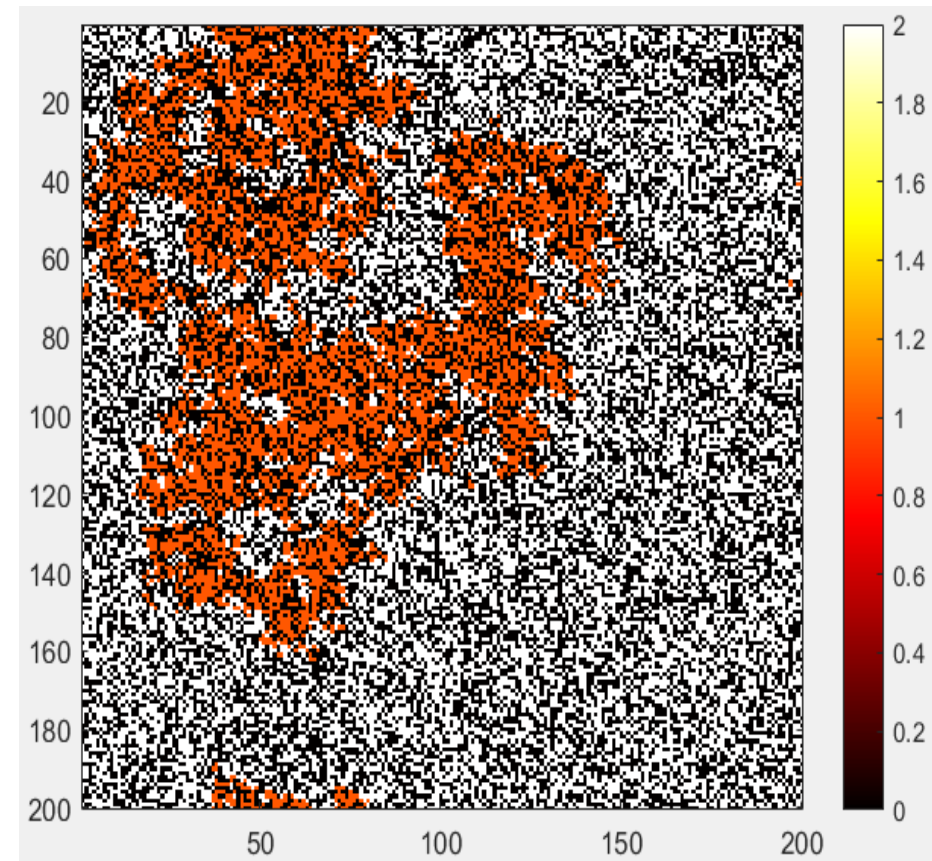
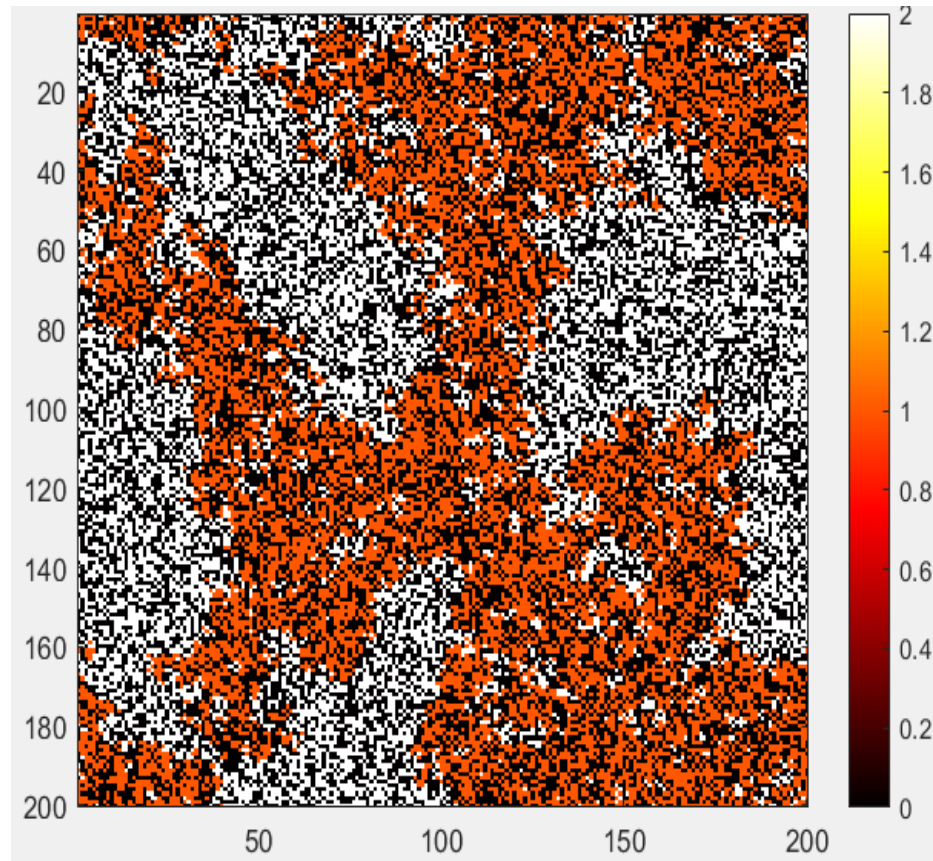
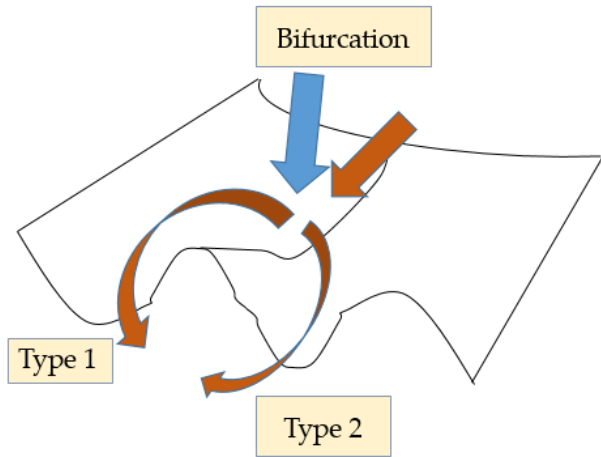
**Tableau 3 – Contraintes spécifiques liées au bio-printing relativement aux technologies 3D classiques**

Contraintes	Fabrication additive classique	Bio-printing
Températures trop élevées ou trop basses	Dépend du procédé, mais ce n'est pas une contrainte majeure	Interdit pour la survie des cellules
Présence d'eau	Généralement interdit	Nécessaire
Stérilité	Non nécessaire	Indispensable
Contaminations croisées	La plupart des technologies n'utilisent qu'un matériau ; ce problème est à prendre en considération avec des procédés multi-matériaux	Fonction de l'application
Énergie fournie	Ne doit pas endommager le matériau, mais ce n'est généralement pas une contrainte majeure	Risque d'endommagement des cellules (en particulier par les UV)
Cisaillements, vitesse d'injection, etc.	Pas critique	Le procédé de mise en place des cellules ne doit pas les endommager

# Modélisation



# Complexité et Bio-printing



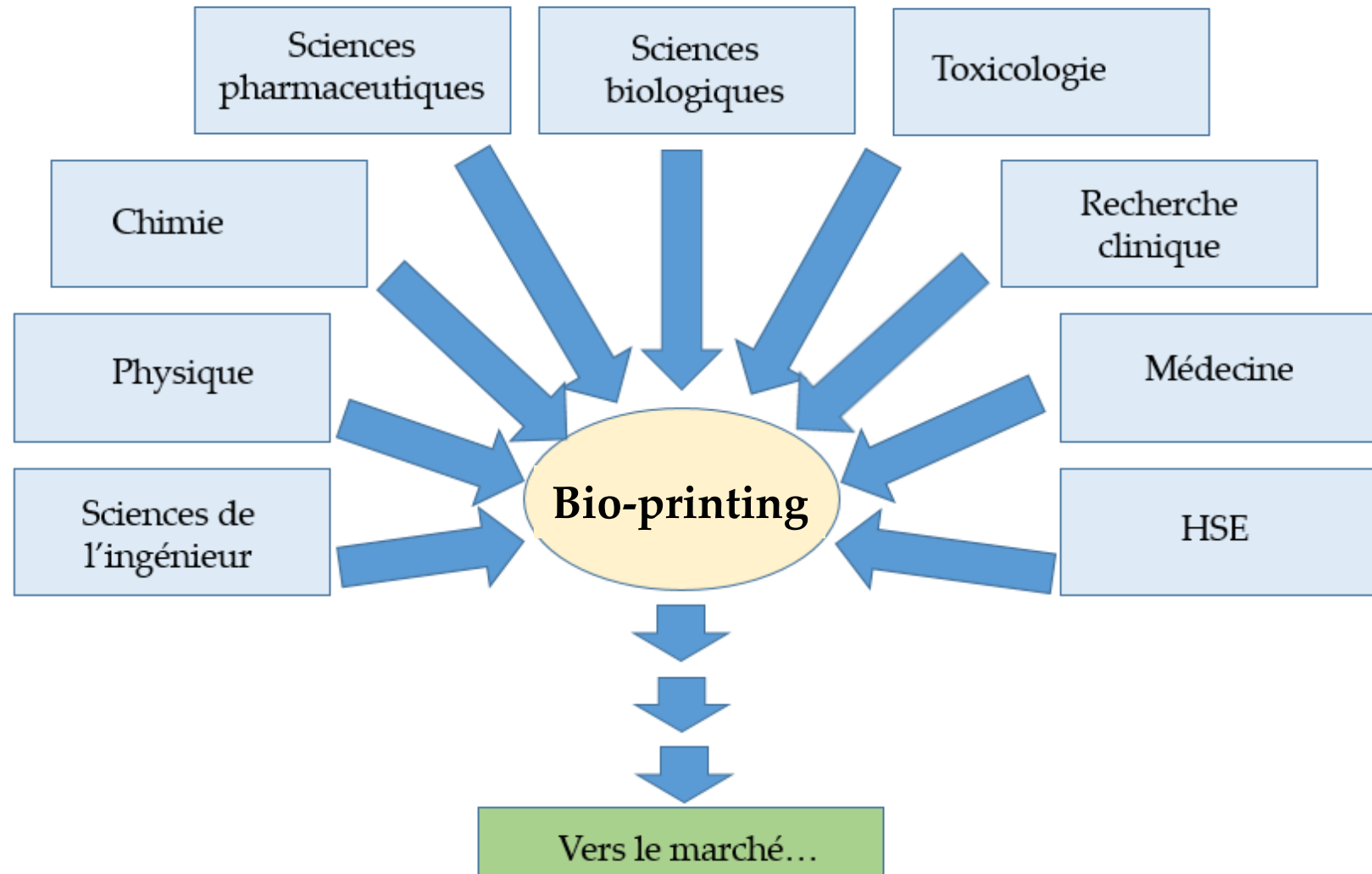
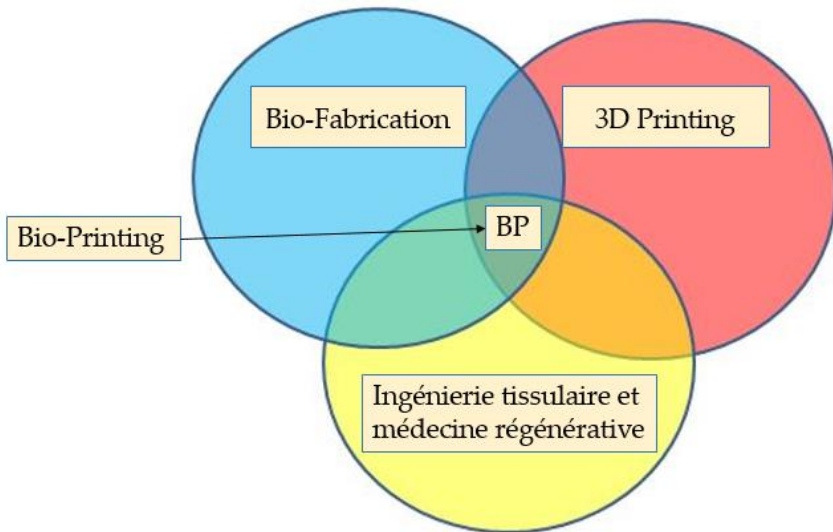
# Avantages << Inconvénients

- Cf. 3D
- Enjeu humanitaire et financier très important
- Possibilité de travailler avec des cellules souches (évitement des rejets)
- Technique 3D au point
- Niches possibles

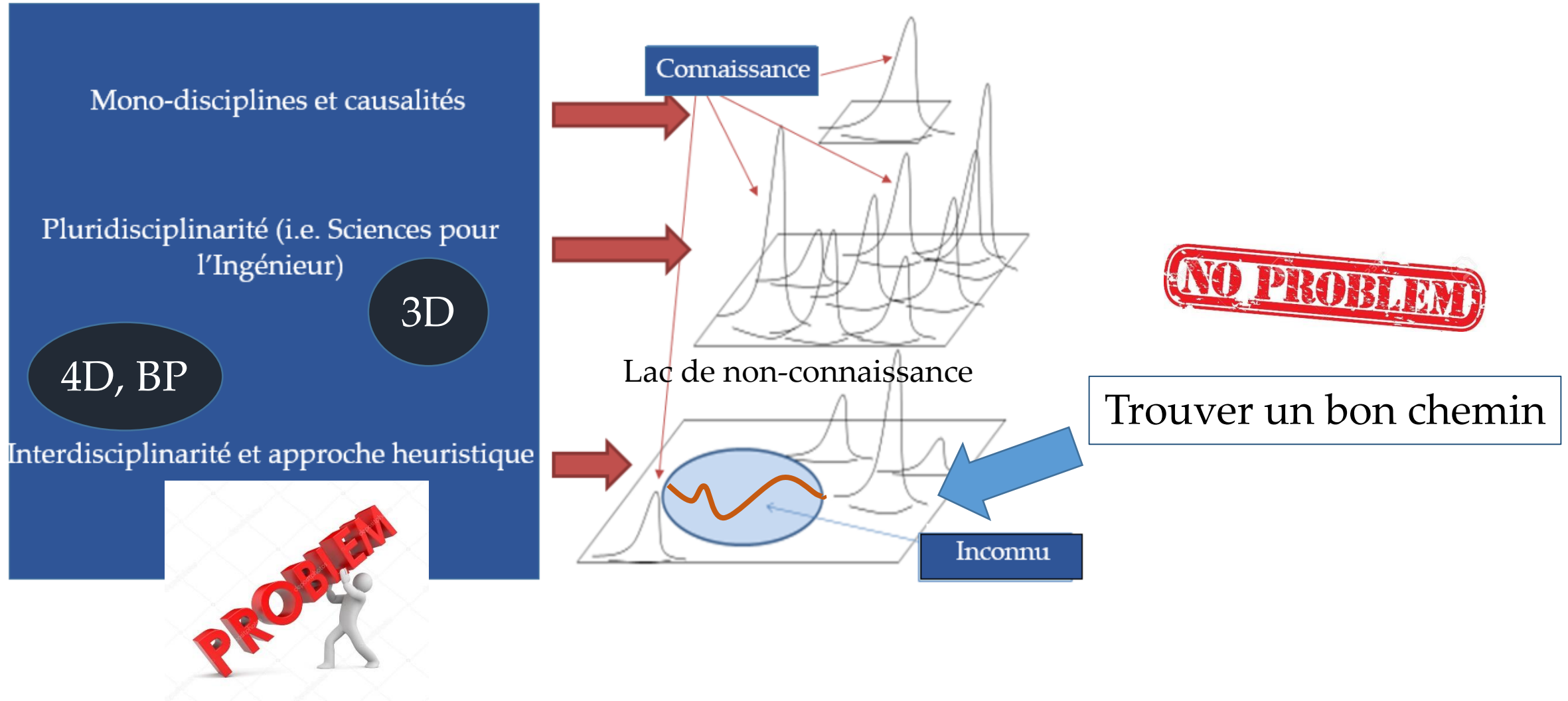
- Cf. 3D
- Besoin de prendre des cellules et de les faire se développer (temps)
- Complexité et déterminisme à traiter en priorité
- Nécessité de supports résorbables
- Maturation avant implantation (forme ?)
- Pas de méthode de conception - Robustesse



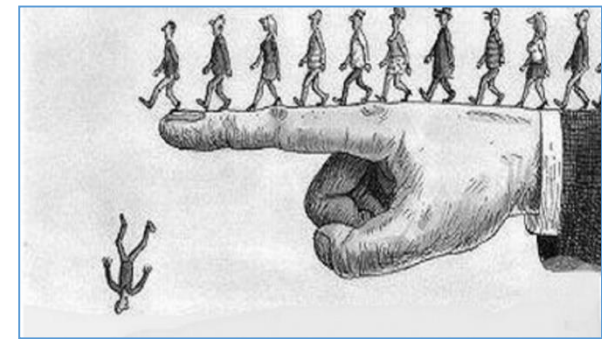
# Convergence... à opérer !!!



# Vers une conclusion...

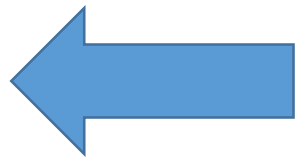
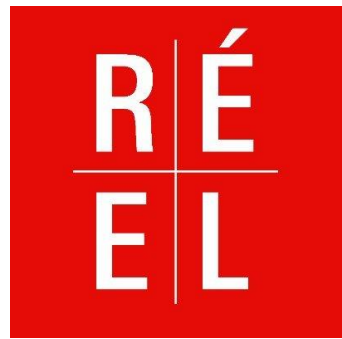
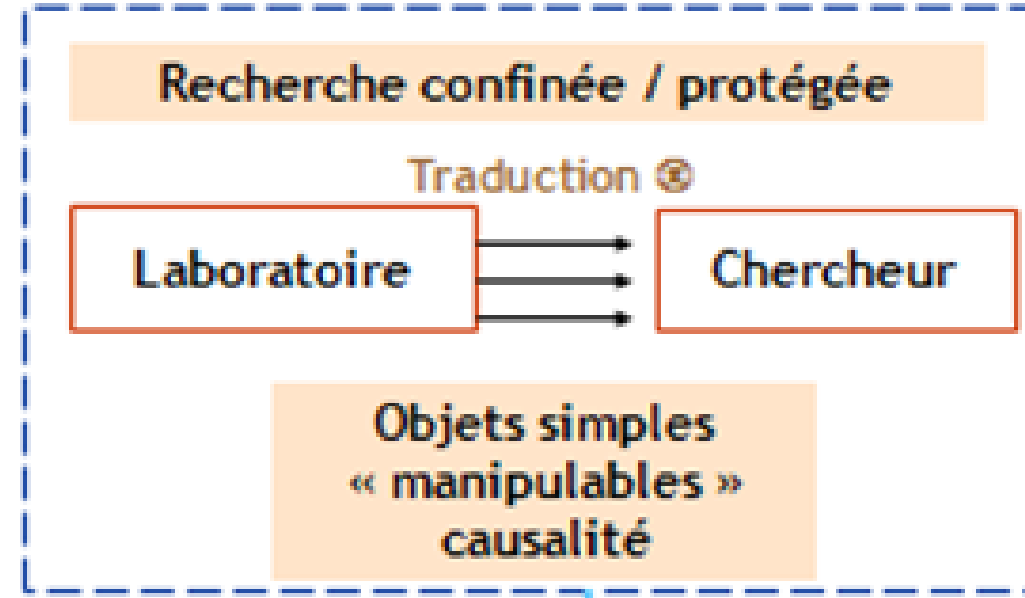


# Ne plus regarder son nombril !!!

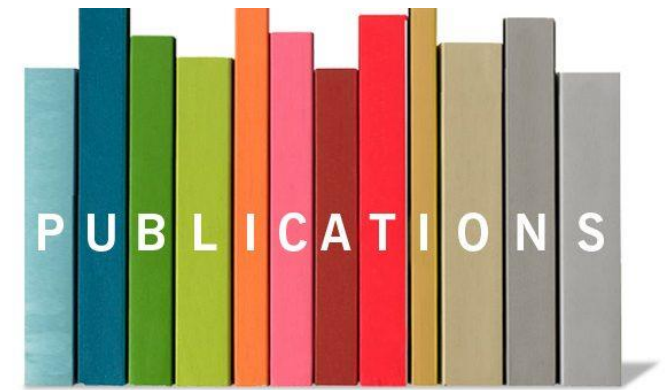


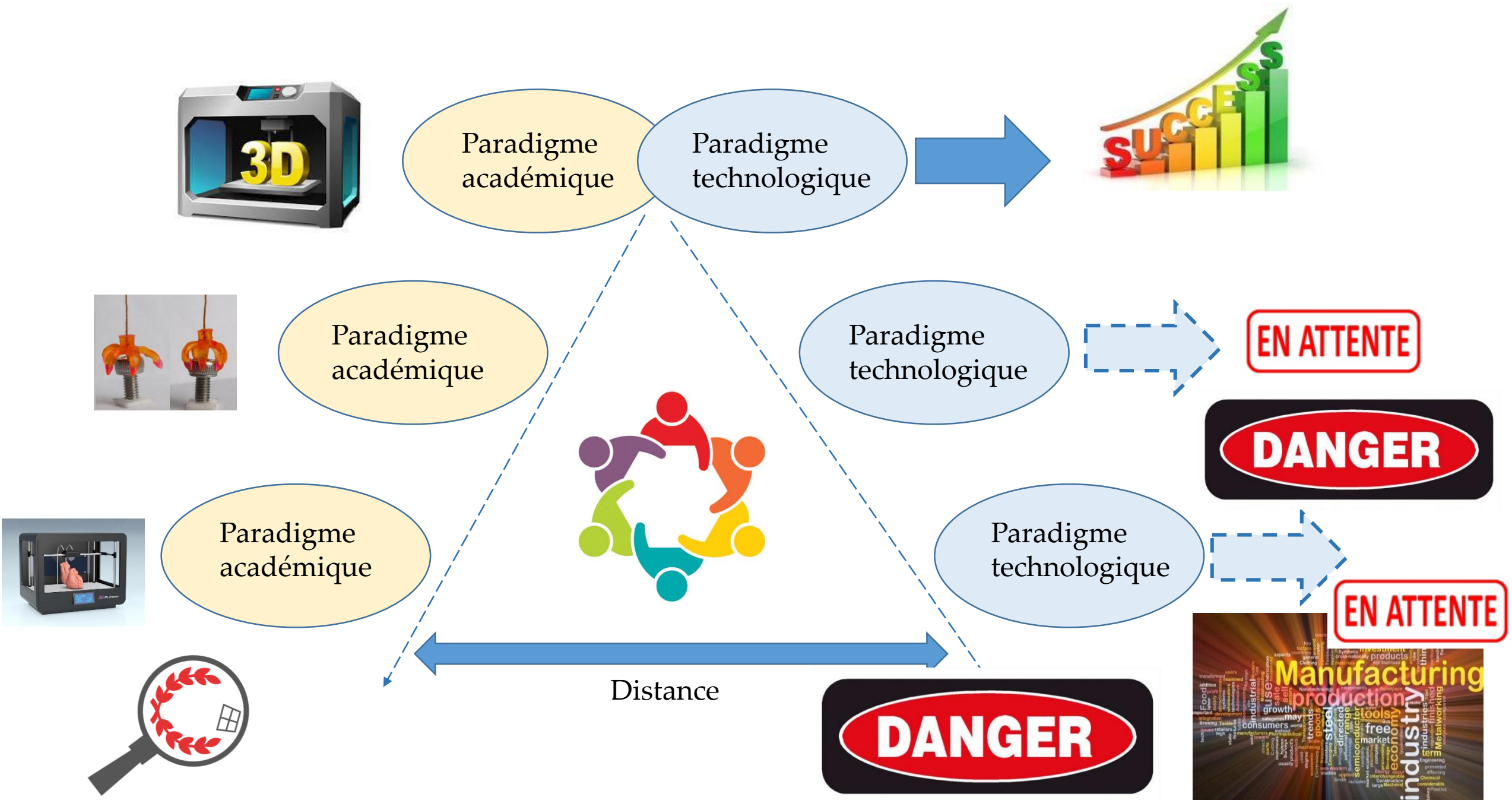
MONDE

Traduction ③



Laboratisation du monde ?



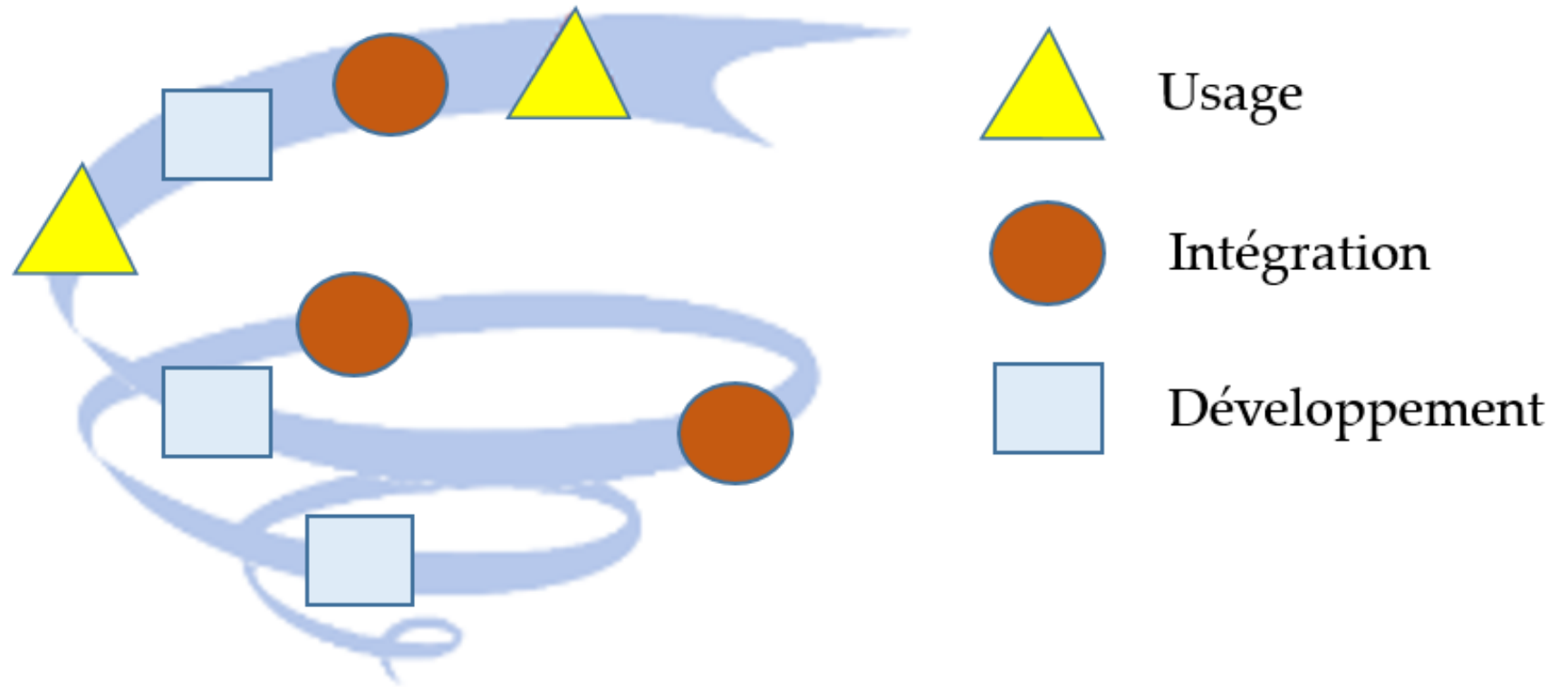


# Pour tenter d'aller plus loin ?



Niches spécifiques

Modèle de développement en spirale



Rapprocher des points de vue par  
l'innovation

# Conclusions générales

- Donner du temps au temps
- Ne pas toujours croire en ce qui est publié... Attention au syndrome de la promesse
- Sortir du facilement publiable et accepter la prise de risque (échec possible)
- Se rapprocher des cibles applicatives et non satisfaire les tenants du paradigme (même si c'est bon pour son évaluation) – Convergence et interdisciplinarité
- Accepter un très faible soutien de la part des hiérarchies et des financeurs
- Alors on pourra être utile, via de la technologie High-Tech à la société et au vivant !

cnrs

Action Nationale de Formation 2021  
DR12 CNRS



# « La Mécanique et le monde du vivant »



Biomimétisme

• Robotique



Bio-impression

• Ergonomie



Mécatronique



rdm.cnrs.fr

Du 19 au 22 octobre 2021  
Village Club Miléade de Carqueiranne

Date limite d'inscription sur [rdm.cnrs.fr](http://rdm.cnrs.fr) : 13 septembre 2021

Contact : [jean-marie.felio@univ-amu.fr](mailto:jean-marie.felio@univ-amu.fr)



- Le rire d'Henri Bergson -



- Le rire de Jean-Marie Félio -

« Du mécanique plaqué sur du vivant » ?