Texte écrit suite au colloque sur l'enseignement de la conception d'un artefct à la Haute Ecole Pédagogique du canton de Vaud à Lausanne, tenu le 6 et 7 octobre 2016

Comment fabriquer à peu près tout et n'importe quoi...

Auteur : Michael Lew

Mots-clés :
innovation, fabrication numérique, laboratoire de fabrication, science de la conception, enseigner la conception, Conception Assistée par Ordinateur (CAO), Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), société de consommation

Introduction

A l'enfant d'aujourd'hui qui voit le jour dans un monde artificiel peuplé d'objets techniques

Depuis une quinzaine d'années, de nouveaux espaces collaboratifs, associatifs et auto-gérés sont apparus sur notre planète, qui permettent à toutes et à tous de s'initier à la fabrication d'artefacts, et ainsi de se confronter à la matière et à sa mise en forme, en-dehors de toute logique commerciale ou productiviste. Qu'on appelle ces tiers-lieux *makespaces*, *hackerspaces* ou *Fab Labs* (Bosqué, 2016 ; Capdevila, 2015), ils rassemblent, à travers le nouveau mouvement des *makers*, des créateurs curieux qui souhaitent construire eux-mêmes des objets pas seulement virtuels mais bien réels, pas forcément dans le cadre de leur profession, mais tous animés par la même passion commune de coder et de décoder, de construire et de déconstruire, contribuant collectivement à démystifier le fonctionnement des objets techniques qui nous entourent, quelle que soit leur origine.

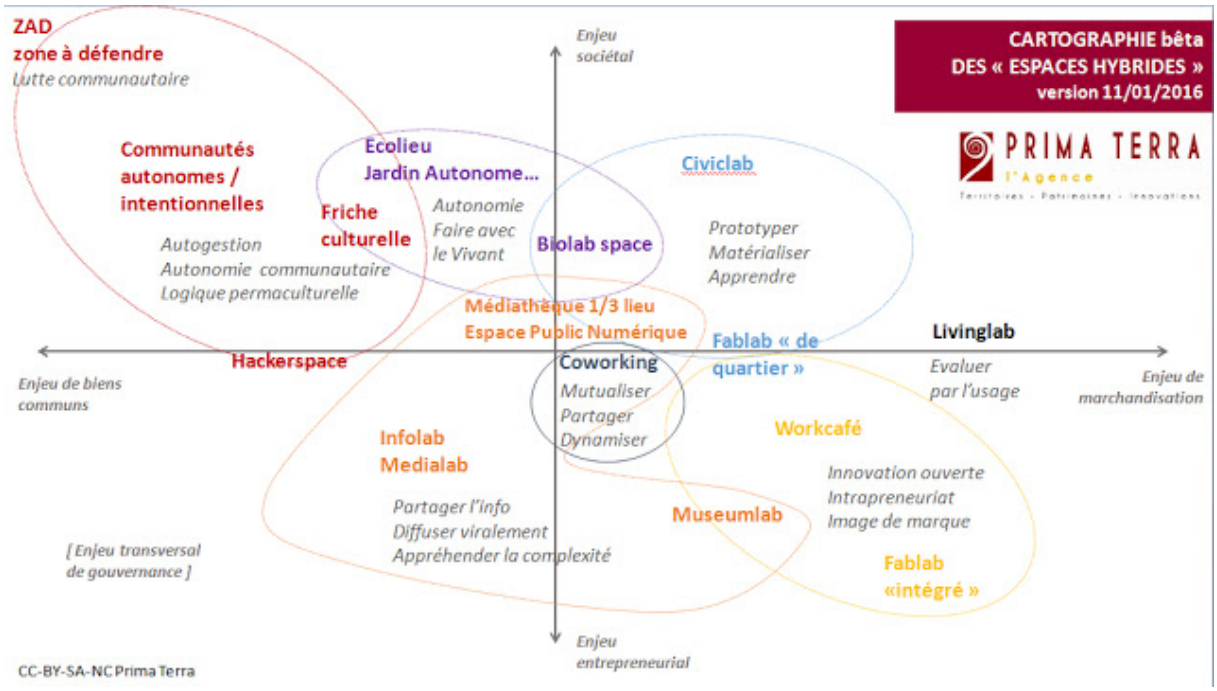


Fig. 1 : Cartographie des tiers-lieux

Luttant contre le conditionnement induit par la société de consommation, ces nouveaux artisans, sans être nécessairement ingénieurs ou ouvriers, partagent sur internet leurs

découvertes, leurs trouvailles, les résultats de leurs expériences et les plans de leurs constructions, afin de contribuer de manière ouverte et libre à une base de données globale de connaissances, d'outils, de savoir-faire. Aux antipodes de ce mouvement œuvrent des entités à but purement lucratif qui protègent précieusement leurs secrets de fabrication, maintenant leurs usagers dans un état de «culte du cargo» (Holmquist, 2012) comme le fait un magicien qui ne veut pas révéler le secret de son tour...

Comment adapter les méthodes d'enseignement d'aujourd'hui pour construire le monde de demain ? Comment encourager et stimuler la créativité, l'inventivité, la curiosité et la prise de risque (Cottraux, 2010) ? Comment donner accès à tous à des espaces de réparation et de prototypage rapide, ainsi qu'aux informations et aux forums nécessaires pour leur permettre de réaliser leurs artefacts de rêve ?

Un des objectifs de ce chapitre est de contribuer à la création d'un cadre pédagogique et didactique propice à la réconciliation entre art, science et technologie, notamment par des réformes curriculaires (Findeli, 2001) mais aussi par la favorisation de la création et du maintien de ces tiers-lieux comme espaces de rencontres et d'échanges de savoirs.

Dans ce chapitre, après quelques rappels philosophiques, nous définissons la conception par l'exemple pour nous concentrer sur celle des artefacts matériels. Nous abordons ensuite la distinction entre logique artisanale et industrielle qui affectent les méthodes de fabrication et de production, en insistant sur l'importance du prototypage. Après une discussion sur les changements de paradigmes dûs à de nouvelles technologies, nous décrivons les laboratoires de fabrication et certaines méthodes pédagogiques que nous proposons comme solution aux problèmes évoqués plus haut. Enfin, après une brève discussion des problématiques industrielles qui se posent au concepteur souhaitant commercialiser son idée, nous évoquons la notion de conception centrée sur l'utilisateur et la recherche sur l'intelligence artificielle dans le domaine de la conception.

Homo faber

Si, en introduction de L'Homme et la Matière, le paléontologue André Leroi-Gourhan utilise l'expression *Homo Faber* en tant que stade d'évolution de l'être humain antérieur à l'*Homo Sapiens*, ce n'est pas le cas des philosophes Henri Bergson et Hanna Arendt ou même de l'écrivain Max Frisch, qui utilisent la même expression provenant de la Renaissance italienne pour désigner une personne qui fabrique des artefacts par opposition au penseur contemplatif.

Dans l'Evolution Créatrice (Bergson, 1941), Henri Bergson va jusqu'à définir la notion même d'intelligence comme "*la faculté de fabriquer des objets artificiels, en particulier des outils à faire des outils, et d'en varier indéfiniment la fabrication.*" Au chapitre IV de la Condition de l'homme moderne (Arendt, 1958), Hannah Arendt fait la distinction entre l'homme qui travaille avec sa tête, celui qui travaille avec ses mains (*homo faber*) ou encore celui qui travaille avec la force de son corps (*animal laborans*). Elle conclut en plaçant à la tête de sa hiérarchie le sociologue ou le sémiologue, ou tout simplement l'usager, qui va donner du sens aux objets reçus, achetés ou trouvés, qu'ils soient à but esthétique, décoratif ou utilitaire, œuvre ou produit (Deforge, 1990), et, s'il les accepte, leur donner une place au sein de son propre système de valeurs. Ces objets artificiels,

mais aussi les outils, les machines, les techniques et les infrastructures qui rendent possible leur existence même, contribuent à définir un mode et un style de vie.

Notre postulat est que l'être humain est fait pour fabriquer, bricoler, construire, déconstruire, c'est un être créateur par nature.

La construction d'un monde artificiel
Exemples de processus de conception

Dans le cadre de l'enseignement de la conception, il peut être utile de donner des exemples sur ce que l'on souhaite enseigner à concevoir aujourd'hui :
- une chorégraphie, une mise en scène (mouvements et déplacements du corps humain)
- un médicament, un parfum (manipulations moléculaires)
- un évènement, un plan de classification, l'architecture d'une base de données (ontologies)
- une expérience scientifique, une méthode d'évaluation
- un site web, un livre, un film, un jeu vidéo, un logiciel
- un microprocesseur, un ordinateur
- un OGM, une nouvelle plante, un nouvel organisme vivant (hybridation, croisement, manipulation génétique), un fromage, un saucisson
- un personnage de fiction, un nouveau mot (néologisme)
- un monde virtuel, une ville (urbanisme)
- un système politique, une idéologie, un nouvel état
- une association, une entreprise
- un avion, un bateau, une voiture, une bicyclette
- une maison, un immeuble, une cathédrale
- une chaise, une table, un bureau, une commode, une armoire
- un couteau, un porte-avions, un jouet, une ogive nucléaire (?)

La forme de conception la plus naturelle pour un être humain est celle d'un autre être humain. Si Charles Bonnet pense avoir observé la parthénogenèse chez le puceron, cela reste un sujet controversé quant à sa possibilité chez l'être humain. Dans ce chapitre, nous n'aborderons pas les techniques de fécondation ou de manipulation du vivant ; pour le *bio-hacking* ou la biologie participative, voir (Magrini, 2014). En revanche, nombre de roboticiens espèrent parvenir à construire un jour des machines autoréplicatives ; et à l'intérieur des systèmes informatiques, la vie artificielle existe déjà (Langton, 1984).

Bien que la science de la conception définie par Herbert Simon (Simon, 1996) s'applique à tous les exemples mentionnés ci-dessus, nous allons nous concentrer dans ce chapitre sur les manipulations de la matière physique (Zuppiroli, 2015). En termes de primitives sémantiques telles que celles élaborées en linguistique par Roger Schank, il s'agirait des verbes décrits par PROPEL (appliquer une force à quelque chose) et PTRANS (déplacer un objet physique), et non pas MTRANS (transférer une information) ou ATRANS (modifier une relation abstraite telle que la propriété). En somme, il s'agit des techniques que Leroi-Gourhan appelle les moyens d'action sur la matière.

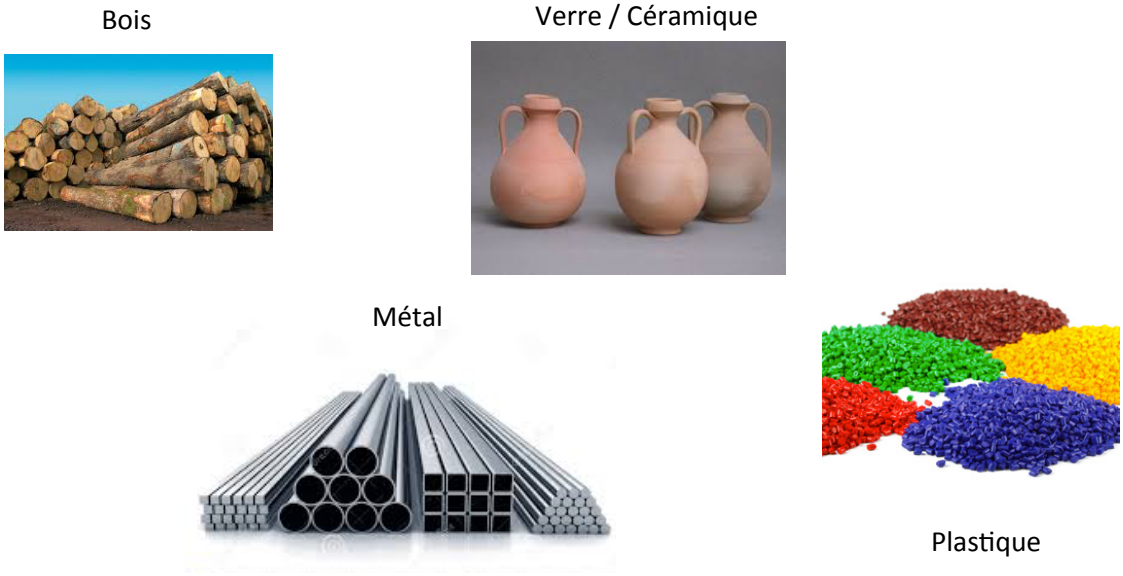


Fig. 2 : Matériaux

Le passage de l'immatériel au matériel, de l'abstrait au concret, du virtuel à l'actuel, du monde virtuel au monde physique, est au coeur de nos préoccupations et nous le désignerons comme le problème du passage de la conception à la fabrication, ou encore de l'idée à sa réalisation.

Vers une praxis de la fabrication
Approche marxiste de la conception

Dans son article paru dans la prestigieuse (Vial, 2015) revue de recherche scientifique internationale *Design Studies*, dans un double numéro spécial consacré au *Computational making*, Dina El-Zanfaly, du Département d'Architecture du MIT, propose de remettre en question la séparation entre le processus de conception (*design*) de celui de la fabrication (*construction*) (El-Zanfaly, 2015). Dans ce chapitre, nous proposons aussi d'examiner la séparation entre le processus de conception de celui de la production.

C'est par un manque de culture technique et une difficulté d'accès aux infrastructures de fabrication que la plupart des gens aujourd'hui ne peuvent réparer eux-mêmes leurs objets cassés, ou réaliser des idées d'invention, même sous forme de prototype. En effet, on sait que le modèle prévalent aujourd'hui dans le domaine de l'innovation (Fig. 3) consiste à présenter à des investisseurs en capital-risque le concept d'une nouvelle affaire. Le système international de protection intellectuelle basé sur les brevets demande à l'inventeur de décrire le plus précisément possible son idée à l'aide de textes et de schémas techniques, même si son invention ne marche pas et même si elle n'a jamais été concrétisée. C'est pourquoi les entrepreneurs préfèrent voir une «demo» fonctionnelle du produit, plutôt qu'un film le présentant.

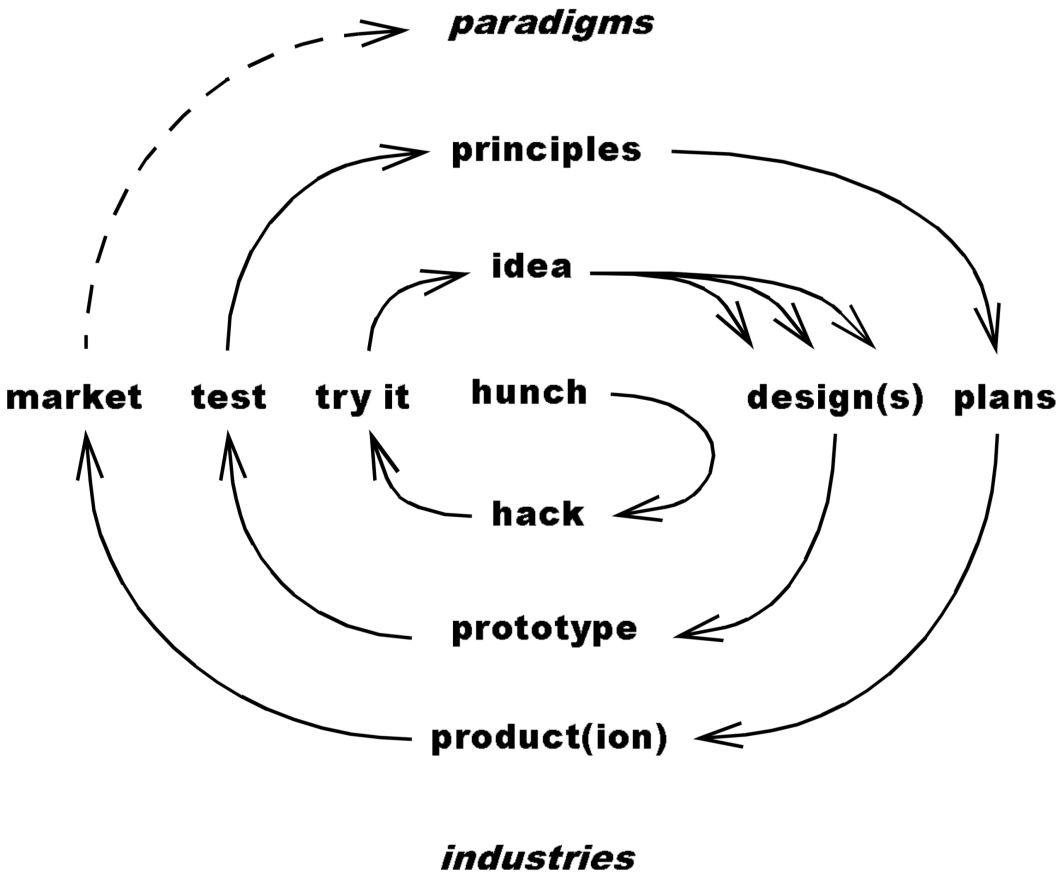


Fig. 3 : Spirale de Verplank

Mais pour estimer les coûts et délais de production d'un artefact, il faut bien connaître la branche, les conventions collectives de travail, les salaires usuels des différents corps de métiers, ainsi que les différents risques qui peuvent survenir et bloquer ou retarder la livraison finale.

Après les horreurs vécues au XXème siècle, tel que le travail obligatoire imposé à des centaines de milliers de Français[1] exploités commes des *animalia laborantia* pour réaliser les rêves d'Hitler les moins pires tel que la Volkswagen, ou encore l'utilisation abusive du concept de science par Taylor pour optimiser le rendement des chaînes de production de masse, il est impératif d'aborder la question des conditions de travail des ouvriers, sous peine de recréer des formes d'aliénation ou d'esclavage dissimulées. Si les machines ont pu remplacer les animaux de trait, on essaie aujourd'hui d'éviter aux êtres vivants toutes les tâches ingrates ou rébarbatives en les faisant exécuter par des robots ou des ordinateurs. Pour éviter les nouvelles formes de psychopathologie du travail, une nouvelle science, l'ergonomie, se préoccupe du bien-être du travailleur.

Idéalement, un concepteur devrait pouvoir fabriquer lui-même entièrement un prototype de son invention. Cette approche pragmatique va de pair avec la revalorisation de l'artisanat, tel que l'a voulu en Allemagne le Bauhaus, et tel qu'il

[1] On estime le nombre de travailleurs forcés français en Allemagne durant la deuxième guerre mondiale à une fourchette comprise entre 600'000 et 700'000, dont environ 40'000 femmes (Arnaud, 2010).

persiste en Suisse à travers l'apprentissage (Certificat Fédéral de Capacité) ou en France à travers le compagnonnage. Une autre solution est de faire participer l'élève ou l'étudiant en conception aux travaux manuels et physiques, de le confronter à la réalité d'un chantier ou d'une usine pour en prendre conscience.

La problématique de la dichotomie entre planification et exécution a été abordée par Yves Deforge (Deforge, 1990 ; Deforge, 1985). Elle est avant tout une question d'échelle. Selon lui, cette dichotomie s'impose pour les ouvrages de grande taille (cathédrale, paquebot, immeuble, pont suspendu) ou de grande série, où la division du travail est indispensable, sans pour autant appliquer les méthodologies dites d'organisation «scientifique» du travail (OST) comme le fordisme, le taylorisme ou le toyotisme.

Le mouvement des «makers» que l'on décrit ici (Anderson, 2012) s'inscrit en compromis entre savoir et pratique, entre conception et production, pour une nouvelle forme d'artisanat et de fabrication personnelle à échelle humaine (Schumacher, 1973). El-Zanfaly critique les méthodes de création ne laissant pas la moindre place à l'improvisation, à la liberté d'interprétation, à celle de proposer une innovation ou de suggérer un changement ; les méthodes rigides de gestion de type «top-down» qui ne prennent plus en compte l'être humain mènent inéluctablement à des grèves, des sabotages ou des révoltes (comme celle des canuts à Lyon en réaction au métier Jacquard, ou le luddisme en Angleterre).

Mais El-Zanfaly aborde aussi le problème de l'action située et incarnée (Suchman, 2007). Contrairement au potier, à l'ébéniste ou au sculpteur de pierre qui peuvent toucher de la main leur matériau pour lui donner forme, le dessinateur n'a pas d'interaction directe avec la matière quand il crée sur papier ou sur écran. Les systèmes de réalité augmentée ou mixte peuvent donner l'illusion de retour de force pour «sentir» le métal liquide en fusion, la granularité de structures microscopiques voire nanoscopiques ou encore la résistance d'un matériau à la pression, via une interface haptique.

Changements de paradigmes

"*In the future, there will be universal self-reproducing molecular fabricators.*" - Neil Gershenfeld

Une découverte ou invention dite «révolutionnaire» mène à la création de nouveaux instruments, de nouveaux outils, de nouveaux appareils, de nouvelles machines, de nouveaux usages, de nouveaux besoins, de nouveaux désirs, de nouveaux comportements, de nouvelles manières d'appréhender le monde, puis à de nouveaux métiers (qui se créent, qui disparaissent, qui se transforment), de nouvelles pratiques, et en conséquence il faut sans cesse adapter les enseignements et formations, notamment de type professionnel.

Le concept de révolution industrielle n'étant pas aussi clairement défini que celui de révolution scientifique, nous utilisons ici le concept de changement de paradigme forgé par Thomas Kuhn (Kuhn, 1962).

La première révolution industrielle serait apparue avec l'apparition de la machine à vapeur alimentée par un combustible facilement transportable comme le charbon, le

bois ou le pétrole. On ne dépendait plus des moulins à vent ou à eau pour actionner des moteurs mécaniques. L'industrie des transports et du textile en bénéficièrent grandement. Puis apparurent l'usage de l'électricité et du pétrole, l'essor de la chimie et des télécommunications. On se rend compte alors que certaines de ces ressources fossiles sont limitées et non renouvelables, dont l'énergie nucléaire. Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, on essaie de définir ce que peut être la troisième révolution industrielle, caractérisée par l'électronique, l'ordinateur et internet, mais aussi les nano-technologies et le séquençage de l'ADN. Au niveau du droit international, la Déclaration des Droits de l'Homme, la création de l'ONU ainsi que la Convention relative aux droits de l'enfant de 1989 ont permis d'établir des Objectifs du Millénaire pour le Développement durable (OMD), ce qui affecte tous les éco-concepteurs (Ceschin et al., 2016 ; Papanek, 1971 ; Yannou et al., 2011).

Quels sont les changements de paradigmes qui affectent les processus de conception d'artefacts ?

Tout d'abord, la démocratisation de la puissance computationnelle, avec l'apparition de l'ordinateur personnel. Si l'introduction officielle de l'informatique dans les institutions éducatives tarde encore, notamment au niveau de l'école primaire, la conception assistée par ordinateur (CAO) et la fabrication assistée par ordinateur (FAO) nous rapprochent du «réplicateur universel» imaginé dans la série Star Trek. A l'ère de la fabrication personnelle, il suffit de disposer des fichiers décrivant entièrement l'artefact (son ADN) pour le reconstruire, atome par atome. Les imprimantes 3D représentent un pas dans cette direction, et certaines d'entre elles sont presque capables de se reproduire entièrement toutes seules. Avec internet, on peut transmettre à un autre endroit la description d'un objet pour le produire à la demande. Ceci modifie radicalement la planification de la production au niveau mondial.

Pour prendre l'exemple de la mode, on est habitués aujourd'hui à pouvoir acheter des vêtements prêts-à-porter (production en série), ou à les faire faire sur mesure, puis enfin il y a la haute couture. Mais la customisation et la personnalisation des produits rendues possibles par de nouvelles technologies de fabrication remettent en question les notions de série limitée et d'authenticité. Les normes et standards assurant la compatibilité et l'inter-opérabilité, il est possible de distribuer des kits de production modulaires comme dans le projet OpenStructures (openstructures.net).

Au sein même du processus d'innovation, l'accès à ces technologies permet plus rapidement d'échanger des informations et de créer un prototype de son invention. La vraie révolution est une démocratisation des processus d'invention, de conception, de fabrication et de production, par un accès plus facile aux financements, aux infrastructures de prototypage et aux marchés, grâce à internet qui permet le partage et la diffusion de connaissances et d'objets.

La topologie non hiérarchique d'internet favorise la décentralisation. Les échanges, le troc, la vente et l'achat de pair-à-pair se négocient sur toutes sortes de plate-formes électroniques en ligne. Un concepteur peut vendre à un utilisateur un artefact à l'avance, avant même de l'avoir produit, via un site de financement participatif. Le site Quirky par exemple met en relation différents experts concepteurs, et les aide à finaliser et à commercialiser leurs inventions.

Un autre changement est de pouvoir intégrer facilement à n'importe quel objet une puissance computationnelle, objet méritant alors les épithètes de programmable, connecté, communicant, voire "intelligent". Si ces objets sont connectés à internet, on parle alors d'internet des objets.

Ces changements de paradigmes ont un effet sur le phénomène de la globalisation. Il existe des traditions locales irréductibles tels que des dialectes, des contes, des chants, des danses mais aussi des manières de cuisiner ou de se vêtir. Le climat et le type de terrain ont une influence sur le développement des cultures, et les ressources naturelles varient d'un endroit à un autre. Aujourd'hui, certains produits industriels standardisés (comme par exemple une paire de blue-jeans) sont composés de parties provenant d'au moins 10 pays différents (Abrams & Astill, 2001). Chaque région au niveau du globe s'est spécialisée dans un domaine spécifique de l'industrie (porcelaine de Limoges, horlogerie du Locle..) mais les inégalités provoquent des migrations ou des délocalisations qui répondent à des contraintes économiques. On compte sur des organisations internationales comme l'OMC ou des agences de l'ONU pour pouvoir réguler ces phénomènes, mais l'existence de chaînes de valeur globales suite à ce que Richard Baldwin appelle les «dégroupages» fait que certaines unités de production ne confectionnent qu'une petite partie d'un artefact transnational métissé qui n'est autre qu'un produit «mondial». Baldwin met le doigt sur la tendance récente qu'ont les Occidentaux à concevoir les produits industriels à l'ouest, mais à les faire produire à l'est (Baldwin, 2013). Cette tendance est-elle durable ? Serait-ce que les anciens pays communistes ont plus de facilité à organiser la production en usine ?

La division sociale du travail au niveau mondial s'organise selon le monde dans lequel, collectivement, nous souhaitons vivre. Le rapport Brundtland, intitulé "Notre avenir à tous" pose les bases d'une pratique de la conception durable.

Solution : Laboratoires de fabrication
Makespaces, Hackerspaces et Fab Labs

"*Maintenant, fabriquer consiste à tailler dans une matière la forme d'un objet. Ce qui importe avant tout, c'est la forme à obtenir. Quant à la matière, on choisit celle qui convient le mieux ; mais, pour la choisir, c'est-à-dire pour aller la chercher parmi beaucoup d'autres, il faut s'être essayé, au moins en imagination, à doter toute espèce de matière de la forme de l'objet conçu.*" Bergson, l'évolution créatrice

C'est en 2002 que le premier Fab Lab a ouvert, en Inde, dans le petit village de Pabal, dans le Vigyan Ashram fondé et dirigé par Shrinath Kalbag (Mikhak et al., 2002). Au départ, les Fab Labs étaient dédiés avant tout au prototypage rapide et à la fabrication numérique à petite échelle. La charte officielle (The Fab Charter, 2012) décrit ces endroits comme faisant partie d'un réseau mondial, mais gérés localement, pour donner accès aux inventeurs à des outils pour la fabrication numérique.
Certains de ces espaces associatifs fonctionnent grâce à leurs membres qui y partagent leurs outils, et qui paient les charges grâce à des cotisations. Une liste de diffusion (*mailing list*) et des réseaux sociaux assurent une communication entre les membres ou simples curieux. Des activités y sont assurées régulièrement : repas conviviaux, soirées

thématiques, présentations, ateliers, cours, masterclasses. Ceux qui les fréquentent s'entraident et se transmettent mutuellement les savoir-faire, comme par exemple l'utilisation des machines. Des hackers qui jadis devaient se cantonner au cyber-espace ont enfin accès à la matière.

L'article visionnaire de Bakhtiar Mikhak décrit le budget et la liste d'équipement typique d'un Fab Lab (tels qu'ils furent conçus originellement en 2002). A titre d'exemple, nous décrivons ici la structure du Post Tenebras Lab de Genève, qui se présente non pas comme un Fab Lab mais comme un hackerspace (Fig. 4 et 5).

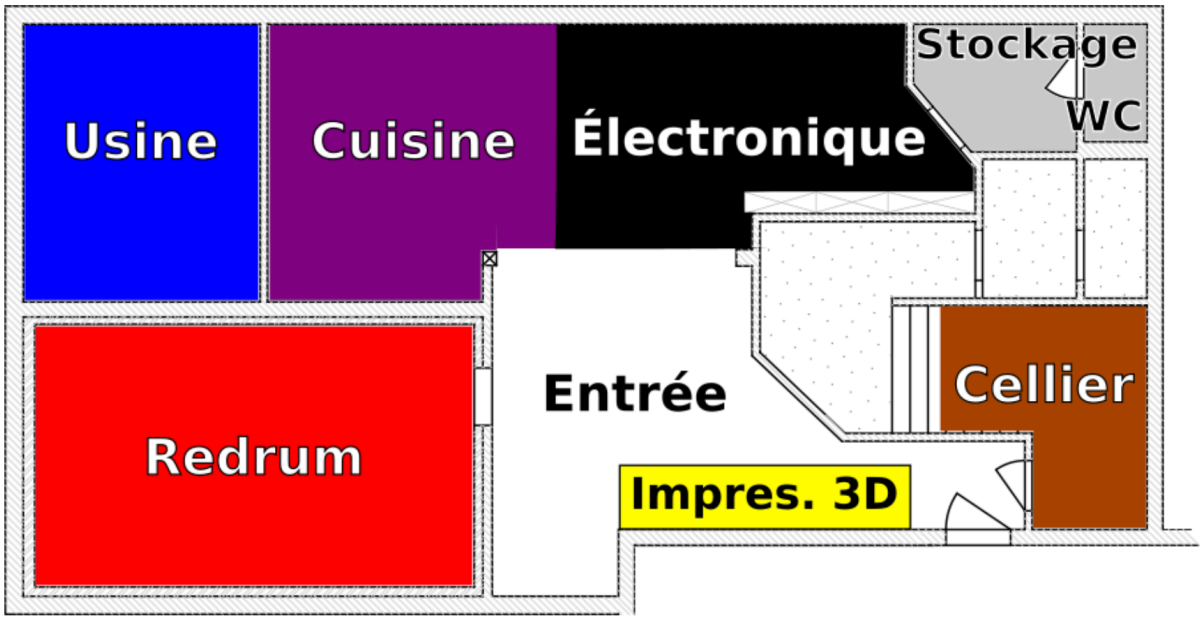


Fig. 4 : plan du hackerspace «Post Tenebras Lab» de Genève en 2017

Imprimantes 3D

Découpeuse à laser

Poste d'électronique

Atelier mécanique

Salle informatique

Cuisine, frigo, bibliothèque

Fig. 5 : Coins typiques d'un tiers-lieu dédié à la fabrication

Pour donner forme à la matière, une partie du local est dédiée à des machines-outils telles que la fraiseuse, le tour et la perceuse. La fraiseuse est à commande numérique (CNC), ce qui signifie qu'elle peut être contrôlée par ordinateur, ainsi que la découpeuse à laser. On y trouve des réserves de bois, de plastique et de métal (acier, aluminium) usinables. En revanche, on n'y fait pas de tissage, de vannerie ou de tannage. La céramique ou le verre non plus n'y sont pas travaillés. Ces méthodes de fabrication par enlèvement de matière génèrent beaucoup de déchets (chutes) souvent inutilisables. Ces bouts de matière sont recyclables, mais rarement sur place, à l'exception de certains polymères tels que l'ABS ou le PLA. Ces plastiques peuvent être fondus et «filés» sous forme de larges bobines, pour ensuite alimenter des imprimantes 3D. Ce procédé, dit de fabrication additive, ne nécessite pas de moule. La forme de l'objet à construire est définie numériquement, dans un fichier de type STL (pour stéréolithographie). L'objet tridimensionnel est découpé virtuellement en tranches par un logiciel dit de *slicing*. C'est l'équivalent bon marché du frittage sélectif par laser. Un fil de plastique en fusion est déposé, couche par couche, sur un plateau, pour constituer l'objet dans tout son volume.

La forme de l'objet à usiner ou à imprimer est généralement définie dans des dessins techniques (Deforge, 1976), mais elle peut aussi être obtenue à partir d'un objet existant qui serait scanné en 3D. Sur internet, les makers partagent des modèles déjà prêts et modifiables sur des sites tels que thingiverse.

Ensuite, pour donner de l'«intelligence» aux objets, on peut les doter de capteurs et d'actuateurs reliés à une carte électronique. Ces dernières peuvent être gravées à l'aide d'un routeur imprimable tel que la Cyclone basée sur une petite fraiseuse Dremel. Une réserve de composants passifs et actifs, neufs et usés, est à disposition des inventeurs. On y trouve aussi une version maison du populaire microcontrôleur Arduino, appelée le PTL-ino, ainsi que des nano-ordinateurs comme le Raspberry Pi.

La salle informatique met des ordinateurs à disposition des usagers, basés sur Linux, avec des logiciels permettant les opérations suivantes :
- conception par dessin vectoriel de pièces mécaniques
- programmation de microcontrôleurs
- prototypage d'applications interactives (p.ex. Processing)
- conception de circuits électroniques (p.ex. Fritzing)
- contrôle de machines-outils à commande numérique
- contrôle d'imprimantes 3D (Cura)
- modélisation 3D (p.ex. Blender)
- modélisation 3D paramétrique (p.ex. openSCAD)

Enfin, on y trouve aussi une cuisine, pour préparer les repas collectifs ouverts au public chaque mardi soir. Et une petite bibliothèque propose des ouvrages à la consultation.
A noter que ce hackerspace est entièrement autonome, constitué en association et financé par les cotisations de ses membres actifs et passifs. Il ne dépend pas de subventions.

Officiellement, pour porter le nom de «Fab Lab», un tiers-lieu dédié à la fabrication doit adhérer aux principes définis par la charte du MIT. Ce n'est pas le cas des dénominations «makerspace» ou «hackerspace», qui indiquent que le lieu est à disposition des adeptes

du mouvement des makers. Les hackerspaces sont également fédérés via le site hackerspaces.org. Hackerspace fait référence à la notion de *hacker*. Péjorativement traduit par fouineur ou bidouilleur, il vient de l'anglais «hack» (en hindi «jugaad») qui désigne un bricolage au sens de Michel de Certeau (de Certeau, 1980) ou de Claude Lévi-Strauss (Lévi-Strauss, 1969) : une solution souvent provisoire et improvisée mais qui peut sauver la vie ou sortir d'un mauvais pas. En français on appelle ça aussi le système D, pour débrouillardise. Les hackers se targuent souvent de pouvoir contourner les protections les plus avancées, notamment électroniques et informatiques en lien avec la cyber-sécurité et la cryptographie, mais ils enseignent aussi à crocheter de vraies serrures en métal !

Mikhak insiste sur le rôle de ces tiers-lieux pour combler la fracture numérique et revitaliser des quartiers défavorisés ou déclassés, voire même des pays entiers en voie de développement. S'ils se font encore rares dans les zones rurales, il existe des projets comme le Global Village Construction Set (Fig. 6) qui permet de construire les 50 machines de base nécessaires au confort de la civilisation d'aujourd'hui, conformément aux principes du développement durable : four de boulangerie, éolienne, mélangeur de ciment, presse à briques, tracteur, découpeur plasma, etc.

Fig. 6 : Global Village Construction Set

Solution : Education à la culture technique
Comment adapter les méthodes d'enseignement pour construire le monde de demain ?

Dans le tourbillon de la technocratie, face aux mutations de la société dues notamment à l'avènement de l'ordinateur personnel et d'Internet, il est impératif d'introduire la notion d'alphabétisation numérique (*digital literacy*).

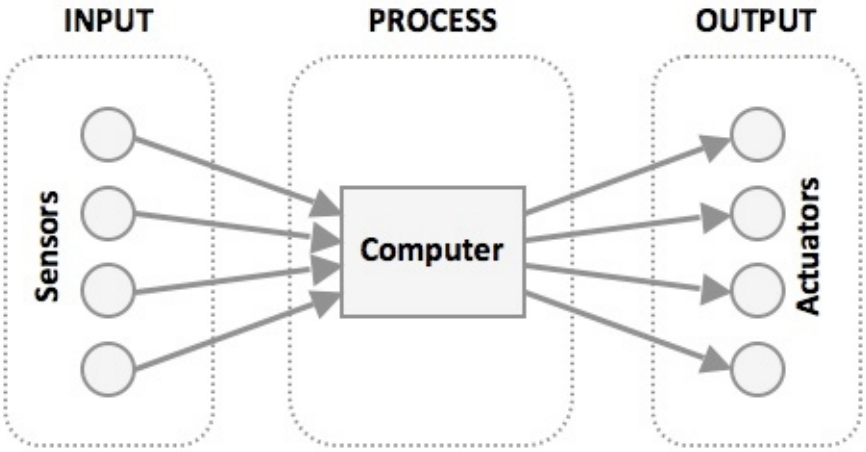
Suivant la logique de Paulo Freire qui consacra sa vie à l'émancipation et l'épanouissement des adultes analphabètes (Freire, 1974), à travers l'enseignement de la lecture et de l'écriture, un travail semblable aujourd'hui est nécessaire afin d'éduquer la population à la culture numérique. Dans notre cas, ceux que Freire appelle les opprimés sont les consommateurs passifs qui ne savent pas encore faire un film, programmer un ordinateur, éditer un wiki, créer un weblog, indexer leur site dans un moteur de recherche, construire une machine ou contrôler un robot. Il s'agit aussi des utilisateurs qui ignorent tout du fonctionnement interne des machines qu'ils emploient quotidiennement ou qu'ils pourraient employer (Schiper, 2016).

Dans le monde entier, des réformes curriculaires sont en cours ; l'organisation non gouvernementale One Laptop Per Child (OLPC wiki, n.d.), qui intervient au niveau des écoles primaires publiques de nombreux pays, s'efforce de combler la fracture du numérique en fournissant des ordinateurs portables aux enfants des pays les moins avancés : le XO. Ce dernier contient des logiciels de conception, de dessin, de modélisation, de calcul, de simulation et de programmation. Mais les expériences virtuelles ne valent pas un contact direct et physique, manuel, avec la matière. De sorte que des pédagogues comme Paulo Blikstein, dans la lignée *constructionniste* (Papert, 1980), encouragent l'enfant à interagir avec le monde physique autant qu'avec le monde virtuel, en intégrant des FabLabs à l'intérieur même des écoles (Blikstein, 2013).

Le constructionnisme prône d'apprendre *en faisant*, de manière pratique et en interaction (*hands-on*) avec l'artefact qui se forme. Aux constructions mentales il préfère les constructions rendues publiques et réalisées. Freire met en garde contre l'approche «bancaire» de certaines formes d'enseignement qui consistent à faire mémoriser des masses de données qu'on récite ensuite machinalement. Des kits de construction et environnements de programmation sont disponibles pour les enfants : Logo, LEGO Mindstorms, Scratch... (Blikstein & Krannich, 2013).

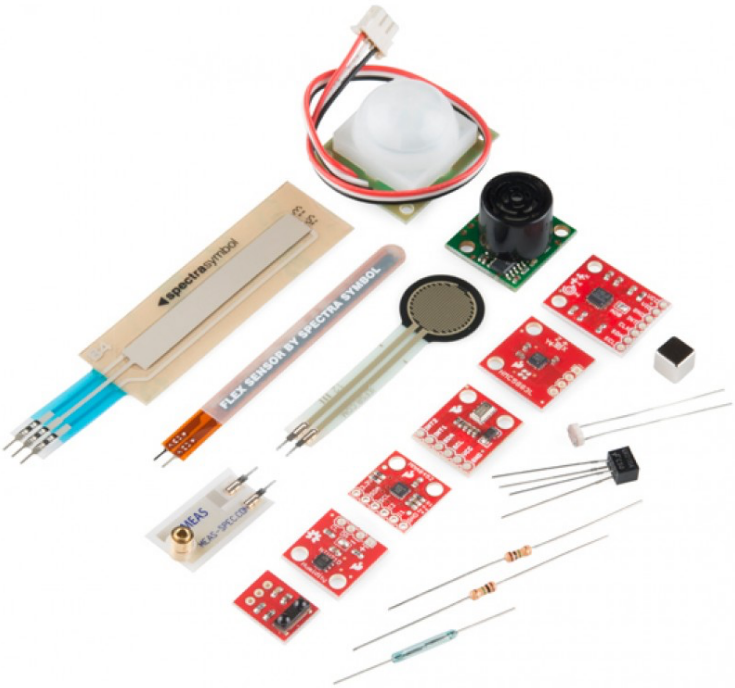
Pour les jeunes adultes qui se forment au design de médias interactifs, l'approche de Tom Igoe à l'Interactive Telecommunications Program (ITP) de l'Université de New York reste exemplaire, à travers son cours «Physical computing». Généralement enseigné sous forme d'ateliers avec des micro-contrôleurs comme l'Arduino ou des nano-ordinateurs comme le Raspberry Pi, il s'agit d'une application du modèle cognitiviste de l'esprit à la création d'objets intelligents (voir Fig. 7), qui permet à l'étudiant de comprendre l'architecture générale de la plupart des appareils électroniques d'aujourd'hui. Ce cours va de pair avec une introduction à l'électronique, à la programmation, mais aussi aux capteurs (microphones, cellules photosensibles, thermistors..) et aux actuateurs (moteurs, haut-parleurs, diodes LED, affichages).

Modèle cognitif de l'esprit
appliqué aux objets dits «intelligents»



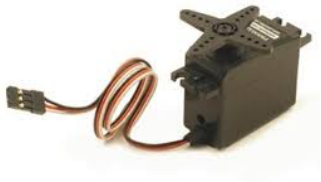
Système sensoriel | Système neuronal | Système musculaire

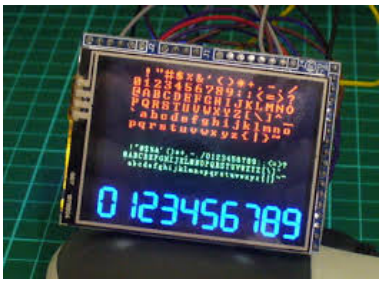
Fig. 7 : Physical computing - architecture générale



Capteurs

Fig. 8 : Capteurs





Actuateurs

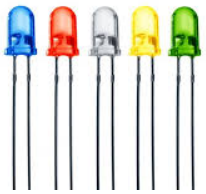
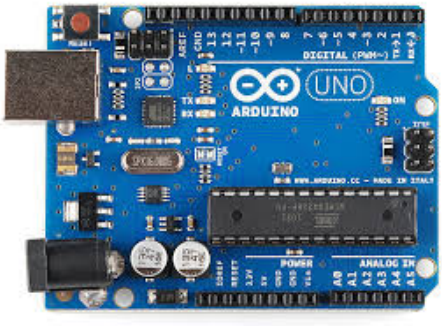


Fig. 9 : Actuateurs



Arduino

Raspberry Pi

Fig. 10 : Microcontrôleur & Nano-ordinateur

Quant au fameux cours de Neil Gershenfeld au MIT, «How To Make (Almost) Anything», il part du principe qu'il est possible de tout comprendre et de tout construire soi-même, car tout le savoir est dans les bibliothèques. En démystifiant les aspects occultes de la technologie, il propose à l'étudiant de construire des prototypes d'inventions originales dans un atelier de construction tel qu'un Fab Lab, et de les présenter au reste de la classe, en un semestre. Encourageant l'open source et l'open access, il invite les étudiants à publier le code source ainsi que les plans de fabrication de leurs projets, pour les rendre accessibles à tous, aisément modifiables et ré-utilisables, selon les principes des Creative Commons (creativecommons.org).

Les cours universitaires n'étant pas accessibles à tous, il existe des ateliers (ou *workshops*) sur 4-5 jours, tel que par exemple le Scrapyard Challenge (Moriwaki & Brucker-Cohen, 2006), un atelier de design d'interaction pour adultes basé sur le

recyclage où l'on doit amener des appareils anciens bons pour la casse. Il ne s'agit pas de les réparer, mais de leur donner un nouvel usage, en y intégrant des technologies électroniques. Les participants sont encouragés à démonter les appareils usagés pour en extraire des composants réutilisables (Fig. 11). Il existe maintenant une version de cet atelier pour les enfants (Moriwaki et al., 2012). L'origine de cet atelier est à trouver dans la pratique de musique électronique dite du *circuit-bending*.

Fig. 11 : Scrapyard challenge workshop

Toutes ces initiatives didactiques visent à diffuser une culture technique au sens de Simondon, pour lutter contre la xénophobie primitive face à l'objet technique (Simondon, 1958), pour une reconnaissance de la culture de «geek» et de «hacker», pour permettre à l'apprenant d'apprivoiser la technologie et de s'en faire le maître mais point l'esclave.

Problématiques industrielles

La révolution industrielle qui a permis de vêtir et de nourrir des populations entières grâce à la production en masse, a été possible grâce à la mécanisation et à l'automatisation. On ne parle plus simplement de la fabrication d'un prototype, mais de production en série. Ce chapitre ne serait pas complet sans inclure une discussion sur les méthodes de production permettant de produire un artefact en série, voire même en masse.

La problématique industrielle, rendue possible par le machinisme, consiste à pouvoir produire en série une invention pour la rendre accessible au plus grand nombre, pour en

démocratiser l'usage. Selon l'échelle, on peut parler de fabrication personnelle (de 1 à 10 exemplaires), de petite série (de 100 à 1000 exemplaires), de grande série, voire même de production de masse (ordre du million d'exemplaires ou plus).

Ici s'impose la distinction entre inventeur et entrepreneur dont parle Chris Anderson (Anderson, 2012). Grâce au système international de protection intellectuelle des inventions qu'on appelle le brevet (PCT), une idée peut être protégée par son auteur. En accordant des droits de licence à un entrepreneur, l'inventeur accepte de faire produire son idée. L'entrepreneur se chargera d'optimiser les coûts et les durées de fabrication (www.wipo.int).
Mais pour des questions d'éthique, tout bon concepteur devrait se soucier du cycle de vie entier de son artefact (Fig. 12) : mode de production, assurance qualité, service après-vente, recyclage, mais aussi de ses conséquences négatives caractéristiques de la société de consommation.

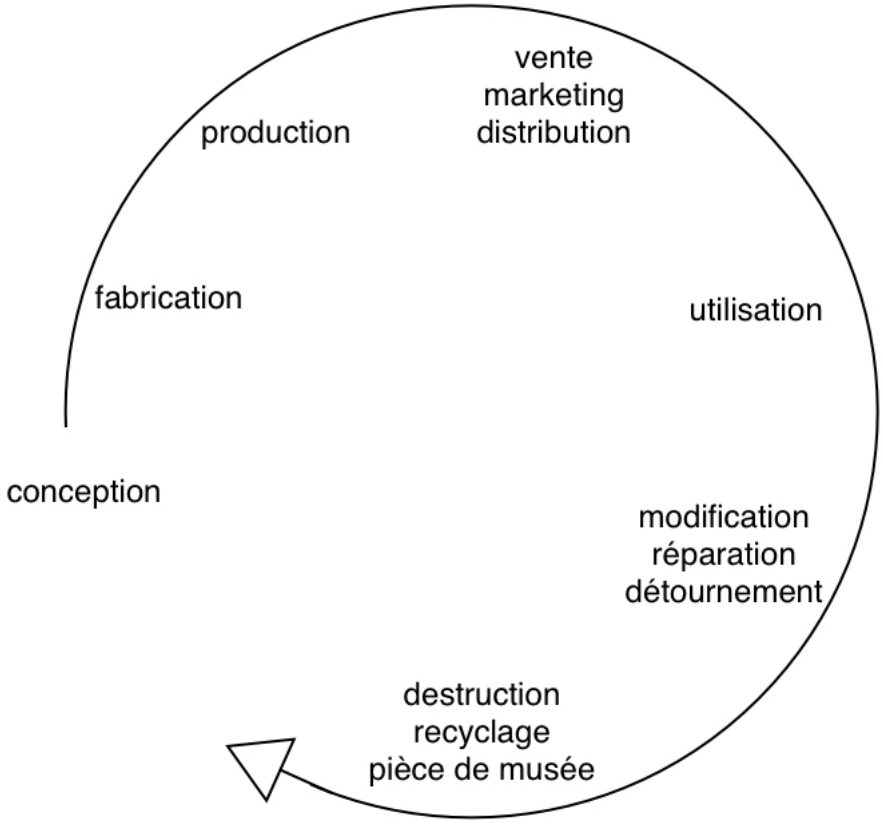


Fig. 12 : Cycle de vie d'un artefact

Bernard Doray, médecin spécialisé en psychopathologie du travail, a inspecté des usines et fait la critique de certaines méthodes d'optimisation de la gestion des processus de production comme le taylorisme (Doray, 1981 ; Doray, 2011). L'étude et la modélisation des gestes des ouvriers est un passage obligé pour construire et programmer des robots

industriels. Si on parle aujourd'hui de taxer les robots, on sait aussi que le salaire n'est pas la seule source de motivation du travailleur, qui doit pouvoir être fier de son employeur et croire au projet global auquel il apporte sa contribution. Des valeurs comme la décence et la dignité sont au coeur de la mission de l'Organisation internationale du travail. La formation continue, l'écoute des besoins et des problèmes des travailleurs par la direction, l'intrapreneuriat sont des stratégies managériales plus salutaires que la délocalisation des usines dans le but d'en rendre l'accès difficile et ainsi d'échapper à des enquêtes, des visites ou des inspections. Si aujourd'hui le travail des enfants est formellement interdit, on sait qu'il existe encore et que les études ethnologiques dans ce domaine font cruellement défaut (www.ilo.org/childlabour).

Les risques de conséquences néfastes de la production de masse sont multiples :
- celui de cantonner le consommateur à un rôle passif limité à son pouvoir d'achat ;
- celui de cacher les secrets de fabrication et de présenter le produit comme une boîte noire ;
- celui de mal communiquer sur les effets secondaires ou collatéraux du produit, ou sur les catastrophes écologiques que sa production, sa mauvaise utilisation ou son non-recyclage a pu ou pourrait causer ;
- celui de garder le consommateur en état de "culte du cargo" ;
- celui d'empêcher l'utilisateur de réparer lui-même ou même de faire réparer ;
- celui de l'encourager à jeter, voire de programmer l'obsolescence du produit ;
- celui de créer des addictions poussant à la consommation irrésistible ;
- celui de créer des situations de monopole et de concurrence déloyale en barrant la route aux nouveaux arrivants.

Enfin, la disponibilité, le prix et les méthodes d'approvisionnement voire d'extraction des matières premières doivent être pris en compte. Dans un monde globalisé, une entreprise n'est souvent qu'un maillon dans une chaîne de valeurs globale, elle doit connaître ses fournisseurs et ses clients qui sont souvent d'autres entreprises et pas le client final. Pour maîtriser le processus de production dans sa totalité, il faut bien se renseigner sur tous les sous-traitants.

L'utilisateur
Vues de l'utilisateur, co-créateur ou consommateur passif ?

Durant l'acte de création, et dans un contexte éducatif ou de prototypage, il n'est souvent pas nécessaire de penser à l'utilisateur final. Si c'est une commande ou un cadeau, il y a un destinataire qui est connu. Mais dans un contexte industriel, il faut imaginer le client qui se trouve au bout de la chaîne de valeur, par exemple en le modélisant avec des personas (Cooper, 2004), par des études de marché, voire des études ethnographiques sur les besoins de l'utilisateur potentiel. C'est ce qu'on appelle la conception centrée sur l'utilisateur.

En effet, trop souvent la conception est centrée sur l'esprit tordu du concepteur qui voudrait qu'on le suive dans sa logique de pensée. Don Norman est catégorique à ce propos, surtout quand il s'agit d'une interface homme-machine ou interface utilisateur : ce n'est pas la faute de l'utilisateur, mais toujours celle du concepteur (Norman, 2014). L'artefact n'est pas là pour culpabiliser son propriétaire qui devrait apprendre à mieux s'en servir, c'est l'inverse ! Les Allemands ont formulé ce concept en développant la

théorie de la réception en ce qui concerne la compréhension des textes (Iser, Jauss). Un outil intuitif ne demande pas à son utilisateur la lecture d'un mode d'emploi.

Pour Wendy MacKay (MacKay, 1990), il y a co-adaptation entre d'un côté le produit et son évolution, et de l'autre les communautés d'utilisateurs et leur comportement face au produit. L'évolution du produit peut être dû à :
- une intervention des concepteurs après avoir étudié scientifiquement les usages réels, qui vont modifier et adapter le produit en conséquence, en produire une nouvelle version ;
- une capacité du produit à s'adapter à son utilisateur, soit parce qu'il est modifiable, modulable ou customisable (ce qui est particulièrement facile à faire avec le logiciel), ou qu'il est doté d'une forme d'apprentissage machine.

Dans le cas d'un système mal conçu, les usagers doivent user de stratégies de Sioux pour détourner les produits de leur fonction initiale et les conformer à leurs besoins, ruser dans l'ombre pour trouver satisfaction et pour déjouer les travers de la Raison Technicienne (de Certeau, 1980). Madeleine Akrich s'en est fait la spécialiste et dans (Akrich, 1998), elle distingue quatre formes d'intervention des utilisateurs sur des dispositifs déjà constitués : le déplacement, l'adaptation, l'extension et le détournement.

Plutôt que d'opérer ces modifications de l'artefact dans le dos des concepteurs, aujourd'hui les utilisateurs avant-gardistes postent sur YouTube leur innovation et montrent au reste de la communauté comment ils s'y sont pris. A force, les entreprises sont bien obligées d'admettre leur tort et ont tout intérêt à impliquer leurs utilisateurs dans le processus de conception (von Hippel, 2005), qu'on appelle alors co-conception ou conception participative.

Ce changement de paradigme dit de *l'innovation libre* (von Hippel, 2017) signale la transition d'une société de consommation à une société de participation. En prenant en compte les retours des utilisateurs, en les faisant participer, en étant à leur écoute, en intégrant leur «travail gratuit» qui peut se manifester sous la forme d'une plainte, d'une remarque ou d'un «hack», le concepteur responsable peut améliorer son produit au cours d'un nouveau cycle itératif (Fig. 13).

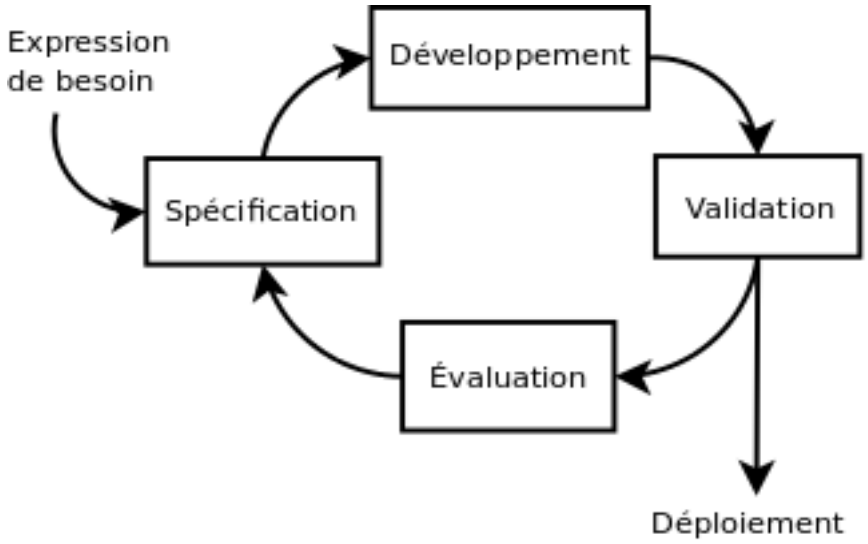


Fig. 13 : Cycles itératifs de conception

Conception computationnelle
Comment enseigner la manière de penser le design d'un artefact en termes de résolution de problèmes basée sur des contraintes grâce à la modélisation informatique

Par conception computationnelle dans le domaine des artefacts matériels, on peut entendre deux choses :
- soit la conception d'un objet computationnel ;
- soit le principe d'utiliser un ordinateur durant le processus de conception.

Dans le premier cas, il s'agit d'intégrer à un artefact de la puissance computationnelle, sous la forme d'électronique, en suivant la méthode de «physical computing» décrite plus haut. C'est le champ du design d'interaction. Il inclut les véhicules autonomes, l'électro-ménager, le mobilier urbain, les smartphones, les bijoux, les habits, le bâtiment... Dunne & Raby, designers conceptuels anglais, ont même créé une table intégrant un capteur GPS, ce qui pourrait être utile dans un train ou dans une résidence mobile. Ces objets pouvant voir et entendre, et agir sur le monde, la méthodologie de leur conception diffère considérablement de celle d'un artefact non computationnel, mais ils présentent l'inconvénient de nécessiter de l'énergie pour fonctionner.

Dans le deuxième cas, on s'intéresse à utiliser la puissance de calcul de l'ordinateur durant le processus de conception numérique (Oxman, 2006). C'est un domaine de recherche influencé par l'intelligence artificielle. Pierre Bézier, ingénieur de chez Renault, en fut un pionnier ; son logiciel Unisurf assistait à la conception des automobiles et les courbes polynomiales paramétriques qui portent son nom sont à la base du dessin vectoriel (Bézier, 1971). Un autre logiciel français, CATIA, a servi à concevoir les avions de chasse de type Mirage et est utilisé par Frank Gehry pour ses créations architecturales. Il a fallu attendre 2003 pour qu'une grande exposition dédiée à la conception algorithmique de structures habitables soit organisée au Centre Pompidou (Migayrou & Mennan, 2003 ; Picon, 2010) - à laquelle l'auteur a participé.

Une autre méthode, dite évolutionniste, consiste à faire générer par l'ordinateur des variantes d'une forme, d'un tracé, d'une structure, dont l'utilisateur peut varier les paramètres sur son écran afin de choisir celui ou celle qu'il préfère. Dans la tradition du bio-inspiré, ceci peut aller jusqu'à définir l'ADN d'un artefact et à faire muter cet ADN sur plusieurs générations. La sélection des «survivants» peut se faire soit par l'homme, soit par l'ordinateur à l'aide d'une fonction de pertinence (dont les critères souvent esthétiques peuvent être très difficiles à formaliser). Cette méthode d'évolution artificielle porte le nom d'algorithmes génétiques (Holland, 1992). Dans la lignée génétique des objets industriels, cette sélection est faite par les consommateurs : les produits impopulaires disparaissent.

Le domaine de la conception générative (Bohnacker, Groß, Laub, & Lazzeroni, 2009) s'intéresse à permettre au concepteur de définir son artefact en termes d'algorithmes et de code informatique. Il peut être avantageux de s'aider d'équations. Pour aider l'élève à penser de cette manière, des environnements pédagogiques ont été développés tel que Processing qui est utilisé en recherche ainsi que dans l'industrie. Il existe même une bibliothèque logicielle pour Processing dédiée à la conception architecturale : ANAR+ (Labelle, Nembrini & Huang, 2009). Les formes et structures générées par l'ordinateur

peuvent alors être bâties par l'homme ou par des robots (Willmann, Gramazio, Kohler, & Langenberg, 2013).

Conclusion

Dans ce texte, nous avons décrit l'émergence tout autour de la planète de nouveaux tiers-lieux donnant accès à des infrastructures de fabrication numérique. Ces laboratoires de fabrication permettent de déconstruire des objets techniques existants pour les réparer ou les modifier, ou encore de réaliser des idées d'invention par le prototypage rapide. Plusieurs pédagogues ont créé des cours universitaires ou des ateliers de création qui font usage de ces lieux, dans le but de démocratiser la culture technique et pour enseigner la conception générale d'objets électroniques interactifs. La fabrication personnelle est une technologie disruptive qui ébranle les fondements de la société de consommation de masse et peut favoriser la transition vers un mode de production à échelle humaine. La conception et la fabrication assistés par ordinateur n'en sont encore qu'à leurs balbutiements et vont avoir un profond impact sur notre mode de vie au XXIème siècle.

Bibliographie

Abrams, F. & Astill, J. (2001). Story of the Blues. The Guardian, 29.

Akrich, M. (1998). Les utilisateurs, acteurs de l'innovation. *Education permanente*, 134(1), 79-90.

Anderson, C. (2012). *Makers, la nouvelle révolution industrielle*. Paris: Pearson France.

Arendt, H. (1958). *Condition de l'homme moderne*. Paris: Calmann-Lévy.

Arnaud, P. (2010). *Les STO: histoire des Français requis en Allemagne nazie*. CNRS éditions.

Baldwin, R. E. (2013). Global supply chains: why they emerged, why they matter, and where they are going. In D. K. Elms & P. Low (Eds.), *Global value chains in a changing world*. Geneva: WTO Publications.

Bergson, H. (1941). *L'évolution créatrice*. Paris: Presses universitaires de France.

Bézier, P. E. (1971). Example of an existing system in the motor industry: the Unisurf system. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 207-218.

Blikstein, P. (2013). Digital Fabrication and 'Making' in Education: The Democratization of Invention. In J. Walter-Herrmann & C. Büching (Eds.), *FabLabs: of Machines, Makers and Inventors*. Bielefeld: Transcript Publishers.

Blikstein, P., Krannich, D. (2013, June). The makers' movement and FabLabs in education : experiences, technologies, and research. In *Proceedings of the 12th international conference on interaction design and children* (pp. 613-616). ACM.

Bohnacker, H., Groß, B., Laub, J., & Lazzeroni, C. (2009). *Generative Gestaltung: entwerfen, programmieren, visualisieren*. Mainz: Schmidt.

Bosqué, C. (2016). *La fabrication numérique personnelle, pratiques et discours d'un design diffus : enquête au cœur des FabLabs, hackerspaces et makerspaces de 2012 à 2015* (Thèse de doctorat). Université Rennes 2.

Capdevila, I. (2015). Les différentes approches entrepreneuriales dans les espaces ouverts d'innovation. *Innovations*, (3), 87-105

Ceschin, F., & Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions. *Design Studies*, 47, 118-163.

Cooper, A. (2004). *The inmates are running the asylum: why high-tech products drive us crazy and how to restore the sanity* (2nd ed.). Indianapolis, IN: Sams.
Cottraux, J. (2010). *A chacun sa créativité: Einstein, Mozart, Picasso... et nous*. Paris: Odile Jacob.
Creative Commons. (n.d.). Retrieved from https://creativecommons.org
de Certeau, M. (1980). *L'Invention du quotidien, tome 1. Arts de faire*. Paris: Gallimard.
Deforge, Y. (1976). *Le graphisme technique* (Thèse de doctorat d'état). Atelier de reproduction des thèses, Université Lille III.
Deforge, Y. (1985). *Technologie et génétique de l'objet industriel*. Paris: Maloine.
Deforge, Y. (1990). Avatars of Design: Design Before Design. *Design Issues*, 6(2), 43-50.
Deforge, Y. (1990). *L'oeuvre et le produit*. Seyssel: Champ Vallon.
Doray, B. (1981). *Le taylorisme, une folie rationnelle ?.* Paris: Bordas.
Doray, B. (2011). *Psychopathologie du travail*. Toulouse: Editions érès.
El-Zanfaly, D. (2015). Imitation, Iteration and Improvisation: Embodied interaction in making and learning. *Design Studies*, 41, 79-109.
Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors* (5th ed.). Basel: Springer.
Freire, P. (1974). *Pédagogie des opprimés*. Paris: Maspero.
Gershenfeld, N. (2005). *Fab: the coming revolution on your desktop - from personal computers to personal fabrication*. New York: Basic Books.
Holland, J. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
Holmquist, L. E. (2012). *Grounded innovation: Strategies for creating digital products*. Elsevier.
Kuhn, T. (1962). The Structure of Scientific Revolutions. Chicago: University of Chicago Press.
LaBelle, G., Nembrini, J., & Huang, J. (2009). Programming framework for architectural design ANAR+ : Object oriented geometry. In T. Tidafi & T. Dorta (Eds.), *Joining Languages, Cultures and Visions: Proceedings of the 13th International CAAD Futures Conference* (pp. 771-785). Montréal: Presses de l'Université de Montréal.
Langton, C. G. (1984). Self-reproduction in cellular automata. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 10(1):135-144.
Leroi-Gourhan, A. (1943). *Evolution et Techniques, L'Homme et la Matière*. Paris: Albin Michel.
Lévi-Strauss, C. (1962). *La Pensée sauvage*. Paris: Plon.
Mackay, W. E. (1990). *Users and customizable software: A co-adaptive phenomenon* (Thèse de doctorat). Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management.
Magrini, B. (2014). Hackteria: an example of neomodern activism. *Leonardo Electronic Almanac*, 20(1).
Migayrou, F. & Mennan, Z. (2003). *Non standard architectures*. Paris: Editions du Centre Pompidou.
Moriwaki, K., & Brucker-Cohen, J. (2006). Lessons from the scrapyard: creative uses of found materials within a workshop setting. *AI & Society: Knowledge, Culture and Communication*, 20(4), 506-525.
Moriwaki, K., Brucker-Cohen, J., Campbell, L., Saavedra, J., Stark, L., & Taylor, L. (2012). Scrapyard Challenge Jr., Adapting an art and design workshop to support STEM to STEAM learning experiences. In *Proceedings of the Integrated STEM Education Conference (ISEC)*. IEEE.
Norman, D. (2014). *The Design of Everyday Things*. Cambridge, MA: MIT Press.

O'Sullivan, D., & Igoe, T. (2004). *Physical computing: sensing and controlling the physical world with computers*. New York: Premier Press.
OLPC wiki. (n.d.). In *The OLPC wiki*. Retrieved from http://wiki.laptop.org
Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229-265.
Papanek, V. (1971). *Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*. New York: Pantheon Books.
Papert, S. (1980). *Mindstorms : children, computers, and powerful ideas*. New York: Basic Books.
Picon, A. (2010). *Culture numérique et architecture: une introduction*. Basel: Birkhaüser.
Scherz, P., & Monk, S. (2016). *Practical electronics for inventors* (4th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
Schiper, A. (2016). *Découvrir le numérique: une introduction à l'informatique et aux systèmes de communication*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
Schumacher, E. F. (1973). *Small is beautiful: Economics as if people mattered*. New York: Harper & Row.
Simon, H. (1996). *The Sciences of the Artificial* (3rd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
Simondon, G. (1958). *Du mode d'existence des objets techniques*. Paris: Aubier.
Suchman, L. (2007). *Human-machine reconfigurations: Plans and situated actions*. Cambridge University Press.
The Fab Charter. (2012). Retrieved from http://fab.cba.mit.edu/about/charter/
Vial, S. (2015). Revue des revues de recherche scientifique en design. *Sciences du Design*, 1(1), 120-127.
von Hippel, E. (2005). Democratizing innovation: The evolving phenomenon of user innovation. *Journal für Betriebswirtschaft*, 55(1), 63-78.
von Hippel, E. (2017). *Free innovation*. Cambridge, MA: MIT Press.
Willmann, J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2013). Digital by material. In S. Brell-Çokcan & J. Braumann (Eds.), *Rob | Arch 2012 : Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design* (pp. 12-27). Vienna : Springer.
Yannou, B., Bertoluci, G., Leroy, Y., Ghaffari, A., & Cluzel, F. (2011). La conception durable (Partie I): enjeux et outils. *Centraliens*, (609), 50-55.
Yannou, B., Bertoluci, G., Leroy, Y., Ghaffari, A., & Cluzel, F. (2011). La conception durable (Partie II): Applications industrielles. *Centraliens*, (611), 30-35.
Zupirolli, L. (2015). *Traité de la matière*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.