



Stratégies et modèles d'affaires des constructeurs d'imprimantes 3D *open source*

Robert Viseur*

Nicolas Jullien**

* FWEG, Université de Mons, Belgique

** IMT Atlantique, Brest, France

Résumé :

La pandémie de la COVID-19 aura notamment mis en évidence, au travers de l'activité de production locale des *makers*, le potentiel des imprimantes 3D de bureau. Parmi celles-ci, de nombreux modèles *open source*, apparus dans la première décennie deux mille après l'expiration des brevets, existent sur le marché sous les marques RepRap, Makerbot, Prusa Research, Ultimaker ou encore Dagoma. Dans cette recherche exploratoire, basée sur 5 études de cas longitudinales, nous étudions le modèle d'affaires des constructeurs d'imprimantes 3D *open source* ainsi que les stratégies dans lesquelles ces modèles s'insèrent. Pour ce faire, nous mobilisons notamment les concepts de Business Model Canvas (BMC), d'innovation de modèle d'affaires et d'actifs spécifiques. Après avoir analysé les particularités des projets et des entreprises associées, nous discutons deux stratégies d'ouverture particulières, la première basée sur l'exploitation provisoire de la communauté *open hardware* comme complément de ressources, la seconde basée sur la construction d'une activité collaborative durable en vue d'entretenir des capacités dynamiques difficilement imitables.

Mots clés :

open innovation, maker, open source, open hardware, impression 3D.

1. Introduction

Dans son livre *Makers*, Anderson (2012) analyse l'impact du développement de la technologie d'impression 3D, ainsi que des services de fabrication à la demande, ce qu'il appelle la production manufacturière en tant que service *cloud*. Si le concept de *maker* est aujourd'hui relativement ancien, sa popularité récente doit beaucoup à la pandémie de la COVID-19. Les pénuries d'équipements de protection individuelle (EPI), mais aussi les craintes liées aux appareils médicaux (p. ex. pompes-seringues et respirateurs) et à leurs accessoires, ont conduit ces *makers* à se mobiliser pour rétablir un approvisionnement d'urgence en s'appuyant sur les machines d'impression 3D mises à disposition par les *fablabs* ou qu'ils possédaient à leur domicile (Viseur et Charleux, 2021b). Pour ce faire, ils ont partagé librement les designs de ces objets, au sens plans et processus de construction, sous la forme de fichiers, ce qui permet leur réutilisation et leur adaptation à des besoins spécifiques, avant la production à l'aide d'outils de fabrication numérique. De la sorte, la variabilité devient partie intégrante de la chaîne de conception et de production. L'activité individuelle du *maker* peut devenir une industrie artisanale capable d'alimenter « un marché de masse pour des produits de niche » (Anderson, 2012 ; p. 95).

Ces *makers* peuvent apparaître comme des utilisateurs de pointe, ou utilisateurs-innovateurs (Von Hippel, 2006) capables d'identifier des besoins émergents et de les satisfaire, en développant des premiers prototypes. La fabrication numérique fournit aujourd'hui à ces *makers* entrepreneurs une agilité et une capacité de passage à l'échelle en petites séries dont ne disposaient pas nécessairement les utilisateurs-innovateurs d'antan. Selon l'analyse Von Hippel, le partage des plans et code source des objets à produire n'est pas très étonnant : bénéficiant directement de l'innovation qu'il produit, l'utilisateur-innovateur est incité à la produire et, comme il peut s'attendre à des retours d'information ou des innovations cumulatives sur sa proposition, il bénéficie également d'effets d'apprentissage individuel (Foray et Zimmermann, 2001).

Cependant, pour produire, il faut bénéficier d'équipement, de matériel : les imprimantes. L'impression 3D, et notamment la technologie de dépôt de fil fondu, s'est développée fin des années quatre-vingt suivant un modèle d'innovation classique : travail de recherche débouchant sur une invention, protégée par un brevet qui est exploité par entreprise créée pour cela, et innovation incrémentale (p. ex. impression en plusieurs couleurs). Le brevet est alors utilisé pour entraver la concurrence, à l'image de l'entreprise *XYZprinting* qui, entre autres brevets¹, possède le brevet *US20180211052A1* intitulé « *Protecting method for accessing material data of printer* » (2020) décrivant un dispositif permettant de bloquer l'utilisation de consommables proposés par des concurrents. Cela permet de déployer des modèles d'affaires classiques, comme le modèle baptisé « *razor-blade* » (Osterwalder et Pigneur, 2011). Exploité par des fabricants d'imprimantes à jet d'encre (cartouches), de matériel photographique (pellicules) ou de machines à café (dosettes), sa rentabilité est basée sur les achats récurrents de consommables. Elle permet aussi de subventionner l'accès aux machines et donc l'équipement, en contrepartie d'un coût variable de production plus élevé.

Plus originaux, sans doute, plus discrets aussi, sont les projets de matériels *libres* tels que RepRap et Makerbot (Anderson, 2012 ; Berchon, 2020 ; Fauchart et al., 2017), qui ont développé des plans et processus de construction libres d'imprimantes. Leur dynamique s'est

1 Cf. <https://patents.justia.com/assignee/xyzprinting-inc>.

appuyée, d'une part, sur le développement d'instruments scientifiques (Pearce, 2013), d'autre part sur des communautés d'utilisateurs (Hausberg et Spaeth, 2018). Les *makers* ont, d'une certaine manière, appliqué leur habitudes d'utilisateur-innovateur aux outils qu'ils utilisaient. Certains de ces projets ont eu un rôle moteur, comme la carte à microcontrôleur Arduino, du fait de son potentiel de réutilisation dans des projets très diversifiés, et notamment d'imprimantes libres, comme RepRap (Anderson, 2012). Des entreprises ont commencé à assembler et à distribuer des matériels selon ces spécifications : Gaisler, Smart Projects (Arduino) ou Makerbot (Viseur, 2012).

Les stratégies de ces entreprises travaillant avec des communautés d'utilisateurs-innovateurs, le fait qu'il s'agit souvent de solutions basées sur l'évolution continue de fichiers de spécification, le fait qu'il s'agit de construire une solution basée sur l'assemblage de différents composants (ici du matériel et du logiciel) semble suggérer des modèles d'affaires inspirés des modèles ouverts du logiciel, que Fitzgerald (2006) appelle les modèles d'affaires « open-sources ». Ces derniers sont des modèles de service, qui permettent d'adapter le logiciel (libre) aux besoins des utilisateurs, mais aussi de garantir, dans la durée son bon fonctionnement. Plus les projets libres sont dynamiques, plus les contributions sont nombreuses, plus il y a des besoins de maintenance, de suivi et de garanties des évolutions de la solution logicielle (Jullien & Viseur, 2021). Autrement dit (ibid), les modèles d'affaires open-sources sont basés sur la gestion de l'évolution, toujours nécessaire d'un logiciel (le logiciel-flux), plus que sur l'accès à une base logicielle figée (logiciel stock), gestion permise par le développement de capacités dynamiques, au sens de Teece (1998).

Cependant, il est toujours compliqué de vouloir transposer a priori des modèles d'une filière à une autre. Ainsi, certaines pratiques semblent endogènes, propres à la production d'objets physiques, tels que le contrôle qualité de leurs productions dès lors qu'elles s'adressent à une clientèle incapable de reproduire les objets depuis les plans publiés en ligne (Viseur, 2012). On peut, par exemple, se demander s'il ne s'agit pas plus d'une production collective de standards, qui sont ensuite implémentés par différents constructeurs qui se concurrencent, à l'image de l'industrie de l'informatique personnelle qui s'est structurée autour de l'IBM PC (voir Haigh, 2012 pour une présentation de ce processus de collectivisation de la production d'un standard, qui échappe à son créateur initial, IBM).

Avant de conclure sur les analogies entre ces différentes industries, il nous semble nécessaire d'étudier, de façon plus précise, ces modèles d'affaires que nous nommerons, par analogie uniquement sémantique pour l'instant, « open-hardwares ». L'article a quatre parties. Dans la première, nous discutons les concepts théoriques qu'interrogent les modèles open-hardwares, mais qui permettent aussi de les étudier : modèles d'affaires, notions d'actifs spécifiques dynamiques. Dans la seconde partie, nous expliquerons notre méthodologie de recherche à base d'étude de cas longitudinales et nous présentons nos terrains. Dans la troisième (résultat), nous présenterons les deux idéaux types de modèles d'affaires open-hardware identifiés, qui sont discutés dans la dernière partie au prisme de la littérature sur les modèles d'affaires et l'innovation.

2. Revue de la littérature

Rappelons d'abord qu'il s'agit bien de réfléchir à des stratégies basées sur la valorisation de propriété intellectuelle. Dans logiciel libre, comme du matériel libre, un acteur développe de la propriété intellectuelle, code source ou texte de spécification, dont il est propriétaire (il a

un droit d'auteur, ou un copyright selon les pays, ou s'il s'agit de procédé industriel, un brevet). Il impose ensuite à ses adoptants, grâce à des licences d'utilisation particulières, la divulgation du code source des programmes concernés et de toute amélioration ultérieure s'ils les diffusent, ainsi que la libre circulation du code à la seule condition de maintenir son caractère « ouvert ».

Ainsi, l'approche du libre ne représente pas un déni de la propriété intellectuelle mais une nouvelle façon de la gérer. Les auteurs ne renoncent pas à leurs droits mais à la seule rente de monopole que ces droits autoriseraient dans un régime de droit de propriété intellectuelle. Cela n'exclut pas une éventuelle commercialisation, mais cela interroge sur les raisons qui ont que des acteurs économiques renoncent à des éléments de contrôle permis par la propriété intellectuelle.

Chesbrough et Appleyard (2007) voient ces projets comme des cas emblématiques de l'innovation ouverte, qui peut permettre soit à des acteurs industriels de collaborer sur la production d'actifs nécessaires, mais complémentaires à leur activité, soit, comme déjà expliqué, et dans le cas où les utilisateurs peuvent produire de l'innovation, autrement dit quand le lien entre expression de la demande et réalisation de celle-ci peut, au moins en partie, être pris en charge par le consommateur, d'accélérer le processus d'innovation en améliorant le partage de connaissance (Sawhney et Prandelli, 2000).

Dans tous les cas, ces projets fonctionnent s'ils sont structurés, aussi d'un point de vue technique qu'organisationnel (Chesbrough et Appleyard, 2007), car ce sont des projets de construction de « plateformes technologiques », c'est-à-dire (Gawer, 2014), des organisations ou de méta-organisations qui : (1) fédèrent et coordonnent des agents capables d'innover et de rivaliser autour de la création d'une technologie ou d'un système technologique ; (2) créent de la valeur en générant et en exploitant des économies d'échelle au niveau de l'offre ou/et de la demande ; et (3) impliquent une architecture technologique modulaire composée d'un noyau et d'une périphérie. Et comme l'expliquent Gawer (2014), ou encore Tilson et al. (2010, p. 6), sur la base du concept de dualité (Farjoun 2010), ces plateformes doivent être organisées de manière à être simultanément stables et flexibles, et à offrir à la fois contrôle et autonomie : stables pour assurer la possibilité d'utilisation de la technologie, dans la durée, flexible pour permettre l'innovation ; contrôle pour organiser cette stabilité à coût raisonnable, autonomie (des acteurs et de leur modèle d'affaires) car c'est indispensable à l'innovation. L'exemple de l'IBM-PC illustre que ce contrôle peut être plus ou moins décentralisé,

L'analyse de Zimmermann (1995), inspirées de Lancaster (1966), permet de mieux comprendre les enjeux de ces plates-formes et des filières industrielles qu'elles organisent. Dans ces filières, il s'agit d'articuler des technologies élémentaires dans des produits (ce qu'il appelle des compétences d'architecture), d'abord, puis d'être capable d'identifier quel produit répond le mieux à des besoins (compétences d'utilisation). La partie architecture constitue le cœur de l'activité de la plate-forme (coordination des modules) et l'innovation peut venir d'un nouveau module, qui doit rester compatible avec les autres, ou d'une architecture innovante des modules existants. Cependant, cette innovation doit être au service des besoins. Autrement dit, il est aussi important, dans la création de valeur de la filière, que des acteurs soient capables de mettre en lien une architecture et des besoins, éventuellement avec un accompagnement supplémentaire (développement des usages).

La question qui se pose dans les stratégies open-hardwares est de savoir si ce sont des stratégies d'architecture, ou des stratégies périphériques (sur les compétences d'utilisation).

Hors, la question des stratégies industrielles dans les plateformes libres n'est pas vraiment traitée par la littérature sur les plateformes technologiques : les analyses portent essentiellement sur la partie architecture, d'une part, et elles considèrent toujours, à notre connaissance du point, qu'une plate-forme est portée et contrôlée par une entreprise, qui choisit le degré d'ouverture de cette dernière (c.f. notamment, Boudreau, 2017, ou Gawer, 2021). Ce sur quoi insistent ces analyses (cf. Boudreau, 2017), c'est qu'une plate-forme qui fonctionne permet en même temps une ouverture à des contributeurs extérieurs (à l'entreprise qui la contrôle), tout en maintenant un contrôle sur la coordination de l'ensemble du système. Cela se fait grâce à différents éléments : propriétés intellectuelles sur la technologie directement, ou sur des éléments complémentaires, comme la marque par exemple, valorisées via un portefeuille de stratégies explicitées dans les licences, contrôle de l'infrastructure technique de contribution et d'échange, mais aussi, notamment dans les plate-formes technologiques, contrôle de la dynamique d'innovation : être un gros contributeur dans une plateforme oriente l'innovation dans la direction désirée (voir Jullien et Viseur, 2021 pour une étude des plateformes libres et des stratégies open-sources). Il n'est pas forcément nécessaire, comme semble le sous-entendre la littérature sur les plateformes technologiques que nous venons de citer de posséder l'infrastructure ou la base de l'innovation (propriété intellectuelle) pour capturer de la valeur, même pas pour être un acteur majeur de cette capture.

Il s'agit donc, pour étudier les modèles d'affaires open-hardware, de comprendre comment une entreprise articule sa stratégie de création et captation de valeur dans le cadre d'une plateforme ouverte, qu'elle contrôle parfois (c'est une position particulière), ou à laquelle elle participe, mais aussi, plus généralement, d'étudier l'ensemble des positions possible : sur la partie architecture, mais aussi, éventuellement, sur la partie utilisation, et dans ce cas, comment se fait l'architecture. Nous employons à dessein le terme modèle d'affaires, qui renvoie au cadre analytique du modèle économique (qui est la traduction de « business model »), et qui est très lié la littérature sur les plateformes que nous avons mentionnée. Ce cadre d'analyse insiste sur trois points (Massa et al. 2017) : le fait que la valeur est souvent créée par un réseau ou un écosystème d'acteurs, ce que nous avons déjà discuté ; que création et captation de la valeur sont deux choses différentes ; que ces acteurs construisent des relations en situation d'asymétrie de pouvoir, car ils n'ont pas les mêmes ressources (au sens de la théorie des ressources) pour créer, mais aussi pour capturer cette valeur. Le fait que création et captation de la valeur soient deux choses différentes (Lepak et al., 2007), et que la seconde ne va pas de soi, particulièrement dans le numérique « – même en l'absence d'externalités marchandes – semble tout sauf trivial »*² (Massa et al., 2017, p. 91). Dans l'analyse de von Hippel déjà citée, création et captation de valeur sont liées : les utilisateurs participent au développement libres qu'ils utilisent car cela leur permet de les adapter à leurs besoins, tout en profitant des contributions des autres. Mais si des entreprises sont prêtes à payer pour pouvoir utiliser des développements libres, que ce soient des logiciels ou des composants d'imprimante, ce qui nous occupe ici, cela veut dire soit qu'elles ont besoins d'aide pour accéder à ces éléments, soit qu'elles payent d'autres choses, des valeurs complémentaires. Dans tous les cas, création libre et captation open-hardware ne sont pas

2 Les éléments suivis d'un astérisque sont des traductions. Sauf mention contraire, il s'agit de nos traductions.

équivalentes et il faut mieux comprendre les différents besoins auxquels les imprimantes, libre ou non, répondent.

Bien sûr, cette notion que l'utilité créée par un agent économique est supérieure au profit qu'il en retire (la valeur qu'il capte) est une des bases de la micro-économie et de l'économie industrielle (Tirole, 1989) ou de l'analyse stratégique classique (Porter et al., 1996). La théorie des modèles économiques souligne juste que ce n'est pas forcément celui qui crée la valeur qui en retire un revenu. Elle explique aussi qu'un bien produit sans rémunération puisse générer, en complément d'autres biens ou services, une valeur et, qu'une partie de cette valeur soit captable par une entreprise (voir Massa et al., 2017, p. 89, sur les liens entre modèle économique et stratégie). Est-ce une nouvelle valeur, créée et capturée par une entreprise, ou est-ce que certaines entreprises arrivent à capter une partie de la valeur créée par l'écosystème, et à quelle(s) condition(s) ? Ces questions font écho au travail de Chesbrough et al. (2018) en innovation ouverte, qui est à la base de la théorie des plateformes et des communautés de création.

Le troisième point souligné par Massa et al. (2017, p. 92) permet d'avancer sur ce terrain. Les consommateurs de biens sont dans des situations d'information imparfaite sur la qualité des fournisseurs et des produits ou services proposés (de façon libre ou non), et cela explique en partie la construction des relations d'échange. Les acteurs industriels possèdent de façon différenciées des compétences, des actifs complémentaires permettant de produire, à partir de spécifications ouvertes, des machines et de garantir leur bon fonctionnement.

La littérature sur les ressources (Cohen et Levinthal, 1990 ; Van Den Bosch et al., 1999 ; Zahra et George, 2002) dirait que, pour absorber une ressource, il faut avoir des capacités d'absorption, qui dépendent, entre autre, des compétences de la firme (et de ses employés), ou/et de sa capacité à accéder à des intermédiaires pour palier ce manque de compétence interne (Spithoven et al., 2010 sur les innovations ouvertes dans l'industrie), mais aussi à choisir entre faire, ou faire faire (les machines, leur entretien).

Autrement dit, les modèles d'affaires open-hardwares dépendent de la structure de la plateforme technologique coordonnant la production des différents composants d'une imprimante 3D et leur interfaçage, mais aussi de la structure de gouvernance, qui est en partie, mais en partie seulement, organisée par la gestion des droits de propriété intellectuelle. Les autres éléments étant les autres ressources (en termes de contrôle de la plateforme et de contrôle d'actifs complémentaires) des acteurs qui leur permettent de capturer une partie de la valeur créée par l'écosystème, mais aussi de créer de la valeur complémentaire (et de capturer suffisamment de cette valeur créée). C'est pourquoi, pour comprendre ces modèles il faut partir de l'étude du fonctionnement (du modèle économique) une, ou de plusieurs plateformes technologiques et discuter des modèles d'affaires des entreprises qui y participent, et dans ce cadre là, discuter des stratégies et des ressources que les entreprises open-hardware déploient pour contrôler la ressource libre et capturer une partie la valeur produite par cette ressource. Ainsi, et encore une fois, à ce stade, plus à titre d'illustration que de modèle pour les analyses des stratégies open-hardwares, les stratégies d'*open source* mobilisent des mécanismes parfois subtils de gestion de la propriété intellectuelle (West, 2003 ; de Laat, 2005) : la privatisation d'une partie des développements (approche *open parts*), l'utilisation de licences ouvertes non *open source* (approche *partly open*) ou la détention d'un portefeuille de marques en constituent quelques exemples courants. Deuxièmement, les prestataires déploient différentes stratégies (p. ex. déploiement de ressources, *sponsoring* de développeurs centraux et propriété du nom du projet en tant que marque) pour contrôler les projets qui

constituent des ressources complémentaires nécessaires à la construction de leur propre proposition de valeur (Dahlander et Wallin, 2006 ; Viseur et Charleux, 2019), c'est-à-dire déployer des capacités dynamiques (Teece, 2018) qui permettent de capturer, mais aussi d'orienter le flux d'innovation et qui sont basés sur la construction d'actifs spécifiques. Ces actifs, humains, technologiques, organisationnels, réputationnels et commerciaux (Boissin, 1999 ; Douard et Heitz, 2003 ; Jullien et Viseur, 2021), permettent par exemple au prestataire d'exploiter une meilleure expertise technique ou une plus grande notoriété (de Laat, 2005). Il faudra étudier à quel point on retrouve de telles stratégies dans les modèles d'affaires open-hardwares, étape nécessaire à la construction d'une typologie des modèles d'affaires « opens ».

À plus long terme, parce que la structure du projet libre change, ou parce que les actifs spécifiques construits permettent à l'entreprise de nouvelles stratégies de création et/ou de capture de valeur, son modèle d'affaires peut, lui aussi évoluer (Chesbrough, 2010). Foss et Saebi (2017) parlent d'innovation de modèles d'affaires (BMI, pour *Business Model Innovation*), avec une intensité plus ou moins forte suivant que l'innovation est nouvelle pour le secteur ou seulement pour la firme, qu'elle concerne un composant particulier du modèle d'affaires ou son architecture globale. Laudien et al. (2017) traitent pour leur part la question sous l'angle du cycle de vie des modèles d'affaires.

Au delà de ces différences sémantiques, nous retenons qu'il faut avoir une approche longitudinale des modèles d'affaires, et qui parte de l'évolution des projets libres (et de leur modèle économique). Il s'agit de détecter les différentes étapes des ces projets, et aussi les différents modèles d'affaires open-hardware, et être capables d'expliquer ces évolutions (évolution du fonctionnement du projet, de la stratégie des porteurs du projets, des entreprises open-hardware indépendamment du projet, dont la position en tant que ressource évolue alors).

3. Cas d'étude

3.1 Méthodologie

Notre méthodologie est assez classique, pour une démarche exploratoire et longitudinale (Yin, 2009) : nous avons réalisé une étude de cas du projet de matériel libre RepRap, et de quatre entreprises qui ont participé à ce projet : Makerbot, Prusa Research, Ultimaker et Dagoma. Ces entreprises ont été retenues pour leur popularité sur le marché français mesurée via les tendances fournies par le moteur de recherche Google (cf. Figure 1).

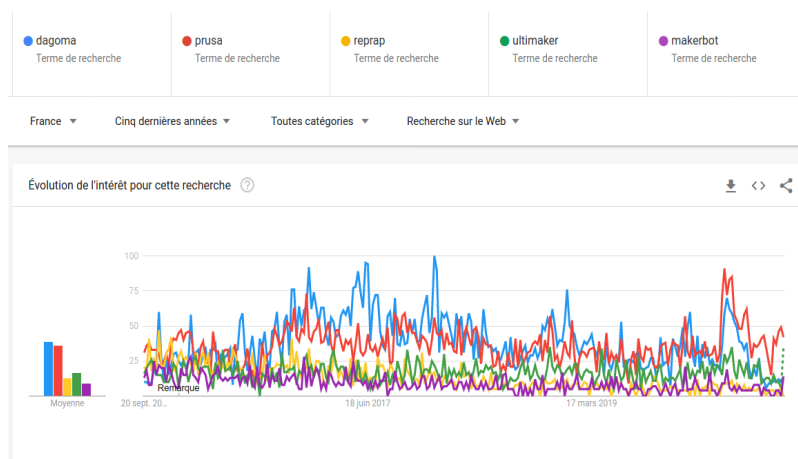


Figure 1: popularité des imprimantes 3D *open source* estimée via Google Trends (France)

Sur le plan des données, l'analyse des projets RepRap et Makerbot s'appuie principalement sur la recherche de Fauchart et al. (2017). Elle est complétée, pour les dernières années d'activités de Makerbot, par une collecte d'études et la consultation du site web du constructeur. Ce même type de données a été utilisé pour Prusa Research, Ultimaker et Dagoma. Dans la cas de Dagoma, les données publiques ont été complétées par deux interviews d'un des fondateurs de Dagoma, d'une part, à propos l'implication de l'entreprise la production de visières lors de la première vague de la pandémie de la COVID-19, d'autre part, à propos le modèle d'affaires de l'entreprise et sa stratégie à long terme. Dans le cas de Prusa Research, deux employés de l'entreprise ont également été interviewés ensemble.

Ces données ont été structurées grâce au BMC (*Business Model Canvas*, Osterwalder & Pigneur, 2011), afin de pouvoir résumer facilement les trois dimensions des modèles d'affaires (création de valeur, actifs spécifiques, et captation de valeur). Au sein des BMC, une même couleur a été appliquée pour souligner les liens existant entre les éléments de la proposition de valeur (offre de service et segments de clientèle ciblés), et la façon dont cette proposition de valeur est facturée, mais aussi associée aux éléments libres produits par le projet (captation de valeur), et les actifs spécifiques qui permettent cette construction de valeur et cette captation.

Avant de présenter les modèles des entreprises, nous faisons un résumé du projet matériel libre RepRap.

3.2. RepRap, le projet matrice du *hardware libre*

Le projet RepRap a démarré en 2005, soit quelques années avant la fin des brevets sur la technologie FDM. Il s'est traduit par un travail en *open hardware* sur une imprimante 3D auto-répliquable basée sur une technologie FDM rebaptisée FFF (*Fused Filament Fabrication*).

Dates	Événements
Fin 1980's	Brevets sur le <i>Fused Deposition Modelling</i> (FDM) déposé par S. Scott Crump.
1989	Création de la société Stratasys par S. Scott Crump.
2005	Création de la communauté RepRap par Dr Adrian Bowyer.
2007	Modèle Darwin (RepRap).
18/10/2008	Création de Thingiverse (partage de fichiers de design créés par les utilisateurs) par Bre Pettis et Zack Smith.
2009	Modèle Mendel (RepRap).
01/2009 ³	Création de Makerbot (machines dérivées des designs de RepRap) par Adam Mayer, Bre Pettis et Zack Smith.
04/2009	Sortie de la Makerbot Cupcake (<i>open hardware</i>).
2010	Modèle Huxley (RepRap).
2010	Modèle Prusa Mendel (RepRap).
09/2010	Sortie de la Makerbot ThingO-Matic (<i>open hardware</i>). Processus de développement fermé (<i>closed development / open release</i>).
2011 ⁴	Création d' Ultimaker (machines dérivées des designs de RepRap).
01/2012	Sortie de la Makerbot Replicator (<i>open hardware</i>). Passage à la licence CC-BY-SA (à la place de la GPL).
09/2012	Sortie de la Makerbot Replicator 2 (propriétaire).
06/2013	Rachat de Makerbot par Stratasys .

Tableau 1 : historique du projet RepRap et des projets / produits associés. Source: Fauchart et al. (2017) + autres sources en notes de bas de page

Ce projet a joué un rôle pionnier dans le développement de l'impression 3D *low cost*. En tant que projet libre, il a en effet servi d'inspiration ou de base technique (cf. le [RepRap Family Tree](#)) à de très nombreuses imprimantes 3D *open hardware* ou propriétaires (p. ex. Makerbot et Ultimaker). Par la suite, et ainsi que le dépôt Github⁵ du projet permet de l'observer, l'activité communautaire s'est sensiblement réduite.

Les imprimantes 3D désignées par RepRap sont publiées sous licence libre GPL. Les droits et devoirs liés à cette licence sont par ailleurs complétés par des normes relatives à la commercialisation. Fauchart et al. (2017) ont ainsi étudié, dès lors qu'une entreprise est active sur un projet de matériel libre, ce qui est acceptable et ce qui ne l'est pas. Ainsi, la commercialisation peut être acceptable si l'entreprise contribue :

- de manière directe avec le partage des détails de la machine commercialisée, le partage des améliorations apportées, incluant la publication des « *Bill of Materials* » (BOM) avec la liste des pièces utilisées, la liste des fournisseurs et la liste des tarifs ;

3 Cf. <https://en.wikipedia.org/wiki/MakerBot>.

4 Cf. <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultimaker>.

5 Cf. <https://github.com/reprap>.

la mise à disposition de ressources pour la communauté, incluant l'hébergement de forums, l'hébergement de plates-formes de partage et le support à la communauté ;

- de manière indirecte avec le développement des compétences et des connaissances (p. ex. support aux clients), l'accès à des ressources moins chères (p. ex. effets de volume et économies d'échelle sur les pièces), la contribution à la croissance du marché et la diffusion de l'innovation.

La commercialisation n'est par contre jamais acceptable si la commercialisation porte sur la machine complète (et pas des extensions ou des pièces spécifiques) ou ralentit l'innovation. Par ailleurs, il n'est pas acceptable pour une entreprise de faire du développement propriétaire si elle publiait auparavant ses travaux sous une licence libre. De même, il n'est pas acceptable de breveter une innovation qui a été co-développée avec la communauté.

4. Modèles d'affaires open-hardwares et au delà

4.1. La lignée Makerbot

L'entreprise Makerbot est créée en 2009 pour commercialiser des designs ouverts dérivés des RepRap, à l'occasion de l'expiration des brevets sur le procédé FDM (Anderson, 2012 ; Fauchart et al., 2017). Le premier modèle, la Makerbot Cupcake, était étroitement dérivée de la RepRap Mendel, notamment du point de vue de l'électronique. Comme l'explique Anderson (2012), cette machine se présentait comme originale car « *conçue par une communauté, construite par des gens dont vous connaissez le nom et dont vous admirez les idées et dotée d'une personnalité* » (p116). Cependant, très rapidement, l'entreprise s'éloigne de ce modèle : abandon des licences libres, dépôt de brevets et évolution des conditions d'utilisation de Thingiverse⁶ impliquant un transfert de propriété des créateurs d'objets vers Makerbot. En septembre 2012, Makerbot annonce la sortie de la Replicator 2 (sous une licence propriétaire). Parallèlement à l'adoption d'un mode de développement propriétaire, Makerbot a procédé au dépôt de plusieurs brevets dès 2010 (avec accord entre 2012 et 2013). L'entreprise continue à publier les codes sources de certains composants, essentiellement logiciels, sous une licence *libre*. Ce revirement a conduit à différentes sanctions de la part de la communauté : l'appel au boycott, l'arrêt des contributions aux projets et l'appel à la rétro-ingénierie des machines propriétaires.

Cette décision est motivée par l'existence de « cloneurs »⁷. Il est cependant noté par Fauchart et al. (2017) que les modèles propriétaires font également l'objet de copies et de clones. Bre Pettis, un des co-fondateurs, regrette également la vulnérabilité d'une entreprise soumise à des « règles non écrites » et des « règles non dites » proclamées par la communauté, alors que les licences sont supposées clarifier les droits et les devoirs⁸ (Fauchart et al., 2017).

La principale raison semble un problème de captation de valeur, avec des pertes importantes de parts de marché sur les machines d'impression 3D de bureau à bas prix, une conséquence

6 Thingiverse est une plate-forme en ligne dédiée au partage de fichiers de conception numérique créés par les utilisateurs.

7 Parmi les exemples citons le cas de la Tangibot. Cf. <https://www.wired.com/2012/08/tangibot-makerbot-clone/> (analyse) et <https://www.kickstarter.com/projects/mattstrong/the-tangibot-3d-printer-the-affordable-makerbot-re> (échec du financement participatif).

8 Cette appréciation permet de rappeler la distinction entre la licence et la gouvernance (dont la licence est une composante) et l'importance de cette dernière dans le fonctionnement d'un projet et dans sa cohabitation harmonieuse avec la communauté. Cf. Viseur et Charleux (2019) pour plus de détails.

à la fois de cet abandon des normes liées au matériel libre et de problèmes de qualité sur les produits développés de manière fermée, mais aussi de l'augmentation de la concurrence, notamment des constructeurs chinois, alors que le marché des imprimantes domestiques se développait moins qu'espéré (Berchon, 2020).

En conséquence, l'entreprise a entrepris une montée en gamme et s'est réorientée progressivement vers le marché professionnel, avec des machines et un large éventail de matériaux associés. Elle s'appuie notamment sur une technologie qu'elle a brevetée d'extrudeur modulaire, proposée au marché professionnel, compatible avec des matériaux (incluant par exemple l'acier inoxydable) qu'elle développe elle-même.

Types d'actifs spécifiques	Actifs spécifiques
Actifs cognitifs :	référentiels de besoins industriels
Actifs technologiques :	brevets technologiques (convoyeur, extrudeur...)
Actifs organisationnels internes :	experts et processus de R&D sur le développement de technologies industrielles
Actifs organisationnels externes :	communauté d'utilisateurs (incluant Thingiverse), de plus en plus secondaires
Actifs réputationnels :	marque
Actifs commerciaux :	distributeurs

Tableau 2 : actifs spécifiques détenus par Makerbot

Makerbot a donc finalement développé un modèle de type essentiellement propriétaire (si l'on excepte par exemple les logiciels et les *firmwares* toujours publiés, essentiellement pour les anciens modèles, en *open source*) basé sur la propriété intellectuelle d'actifs technologiques répondant à des besoins spécifiques d'entreprises, et permettant un modèle d'affaires classique de type *razor-blade*

4.2. Ultimaker

L'entreprise Ultimaker a été créée en 2011 après une première année d'expérimentation de la RepRap au sein du *fablab* Protospace⁹. Son premier produit est une imprimante *open hardware*, vendue en kit, l'Ultimaker Originals, réputée plus facile à prendre en main que la RepRap. L'entreprise a progressivement refermé ses produits, avec du dépôt de brevets à partir de 2015 et le lancement de services en SaaS permettant de gérer facilement un parc de machines. L'entreprise a également développé des partenariats de manière à supporter sur ses machines un large éventail de matériaux. Elle a cependant préservé le caractère libre du Cura, un logiciel de *slicing*¹⁰ très couramment utilisé par les imprimantes 3D *open hardware*, intégré à l'offre logicielle payante d'Ultimaker.

Le succès d'Ultimaker peut s'expliquer par différents facteurs. Premièrement, l'entreprise a réussi sa montée en gamme sans se heurter à sa communauté, bien qu'elle ait progressivement refermé son processus de développement matériel. Les plans sont ainsi disponibles jusqu'à la version 3 sous licence CC-BY-NC. Deuxièmement, l'entreprise occupe

9 Cf. <https://ultimaker.com/fr/about-ultimaker>.

10 Le *licer* prend (par exemple) un fichier STL en entrée, issu d'un logiciel de création de modèles d'objets en 3D, puis l'exporte sous la forme d'un fichier G-Code compréhensible par l'imprimante 3D.

une position centrale dans le secteur de l'impression 3D *open hardware* avec le *slicer* Cura utilisé dans de nombreux autres produits (p. ex. Dagoma) et dont le principal développeur (David Brahm) a été embauché par l'entreprise. Troisièmement, l'entreprise a construit un réseau de partenaires, non seulement pour la distribution de ses produits, mais aussi pour offrir un large éventail de matériaux reconnus issus de fournisseurs différents (« Material Alliance »). Quatrièmement, l'entreprise a développé un ensemble de services autour de ses machines facilitant la gestion de parcs. Cela lui permet aussi de ponctuellement proposer ses services pour l'installation d'ateliers de fabrication numérique.

Parmi les entreprises analysées, Ultimaker est celle qui a poussé le plus loin, souvent en s'appuyant sur des partenaires commerciaux, mais sans cependant totalement se couper des projets matériels libres, le développement de services ajoutés, à destination des entreprises : formations gratuites en ligne, diversité de fournisseurs pour les matériaux, ouverture aux développeurs de *add-ons* logiciels, développement des services de gestion de parc, mais sur des machines standards, sur une gamme de modèles complétée par un écosystème riche, parfois basé sur des productions sous licences libres, des produits complémentaires (modèles, matériaux d'impression)...

Types d'actifs spécifiques	Actifs spécifiques
Actifs humains :	développeurs (matériel et logiciel) intégrateurs d' <i>add-ons</i>
Actifs cognitifs :	spécifications et qualité des matériaux référentiels de besoins
Actifs technologiques :	brevets extensions logicielles propriétaires (dont SaaS)
Actifs organisationnels internes :	capacités de test du matériel chaîne de production logicielle
Actifs organisationnels externes :	plate-forme de co-développement (GitHub)
Actifs réputationnels :	marque
Actifs commerciaux :	partenariats (<i>add-ons</i> , «Material Alliance»)

Tableau 3 : actifs spécifiques détenus par Ultimaker

4.3. Prusa Research

Joseph Prusa a fondé en 2012 Prusa Research, une startup tchèque active dans l'impression 3D¹¹. Sa première imprimante, la Prusa i3, a été conçue en 2012. Elle constituait une évolution de designs antérieurs développés au sein du projet RepRap. La Prusa i3 a fait l'objet d'une commercialisation en 2015 sous le nom d'« *Original Prusa i3* »¹², qui suscite un fort engouement. L'Original Prusa 3i Mk2 pointait ainsi à près de 5 % de parts de marché en 2017¹³, très loin devant la Makerbot Replicator 2x.

Prusa Research semble avoir conservé une stratégie *open hardware* beaucoup plus forte que Makerbot. Le code source des machines est ainsi disponible, sous une licence libre, sur un

11 Cf. <https://www.prusa3d.fr/compagnie/>.

12 Cf. https://en.wikipedia.org/wiki/Prusa_i3.

13 Cf. <https://www.statista.com/statistics/756617/worldwide-3d-printer-model-market-distribution/>.

GitHub dédié¹⁴, dans lequel des utilisateurs contribuent. L'entreprise, a aussi organisé la partie partage de designs (programme d'impression de pièce utilisant ses imprimantes) entre les utilisateurs (via Prusa Printers¹⁵) Elle fournit aussi des designs sous des licences libres. Ainsi, son design de visière sous licence Creative Commons¹⁶ fut ainsi largement réutilisé lors de la première vague de la pandémie de la COVID-19 (Viseur et Charleux, 2021b).

En effet, bien qu'il s'agisse de matériel, le logiciel demeure important pour contrôler l'évolution et la qualité de la solution d'impression 3D. Prusa Research a ainsi développé son propre *slicer*, [PrusaSlicer](#), basé sur le *slicer libre* [Slic3r](#), qui a été démarré en 2011 à l'intérieur de la communauté RepRap (son principal concurrent, Cura, a été initié en 2014 par David Braam puis intégré à l'écosystème Ultimaker. cf. Dhore et al., 2021 ; Šljivic et al., 2019). Prusa Research fait ainsi le choix, cohérent avec sa stratégie globale, de s'appuyer sur une ressource plus communautaire¹⁷ que commerciale.

Si Prusa Research constitue le point focal d'un écosystème d'acteurs collaborant autour des projets libres dont elle est l'initiatrice, elle collabore aussi avec d'autres écosystèmes, en particulier celui de RepRap et celui d'E3D-Online (cf. Figure 3). [E3D-Online](#) est une entreprise active dans la conception et la commercialisation de matériel dédié à l'impression 3D. Elle s'est au départ spécialisée dans les buses pour RepRap. C'est d'ailleurs à partir de la RepRap que les 2 fondateurs ont appris les techniques de la fabrication numérique¹⁸. La buse V6 (HotEnd), créée en 2014, est notamment utilisée par Prusa Research sur ses i3 MK2 et MK3 (2016)¹⁹.

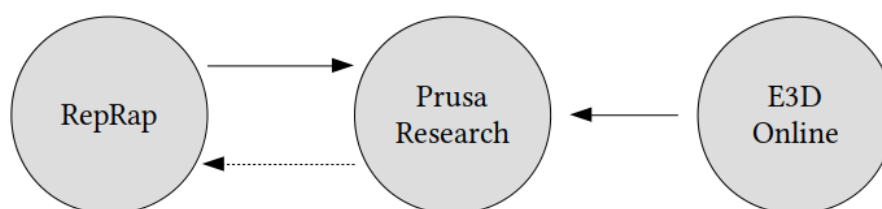


Figure 2 : relation entre projets *open hardware*

La gamme de machines proposées par Prusa Research s'est progressivement étendue, y compris, au delà des classiques machine FDM, avec la machine MSLA « *Original Prusa SL1S* »²⁰. L'entreprise utilise massivement ses propres imprimantes au sein d'une usine de répliation forte, en 2018, de 500 imprimantes (ce qui lui permet d'évoluer vers des services d'installation, de personnalisation et de maintenance d'ateliers de fabrication numérique²¹).

14 Cf. <https://github.com/prusa3d>.

15 Cf. <https://www.prusaprinters.org/>.

16 La licence retenue est la CC-BY-NC, cf. <https://www.prusaprinters.org/prints/32714-prusa-pro-face-shield/files>. La clause NC a été retenue car : « *We share these files under non-commercial licence. It would be great if you donated these shields to those in need for free. If you need to cover your production costs, we are ok with you selling the shields for production cost. However, we do not want to see these shields on eBay for \$50.* »

17 Le projet Slic3r n'est en effet pas associé à une entreprise particulière. Il collabore notamment avec les projets OpenSCAD, LibreCAD, BRL-CAD et FreeCAD dans le cadre de la [Google Summer of Code](#), cf. https://brlcad.org/w/index.php?title=Google_Summer_of_Code/Project_Ideas.

18 Cf. <https://e3d-online.com/pages/about> & <https://e3d-online.com/blogs/news/history-of-reprap>.

19 Cf. <https://e3d-online.com/pages/about> & <https://e3d-online.com/products/prusa-v6-hotend>.

20 Cf. <https://www.prusa3d.com/original-prusa-sl1/>.

21 Cf. https://blog.prusaprinters.org/fr/lavenir-de-la-fabrication-a-dubai-le-premier-apercu-de-notre-systeme-de-ferme-automatisee_55993/.

Cela lui a permis de développer une forte expertise en matière de fabrication numérique en petite et moyenne série à partir de ses propres machines. Il s'agit d'une sorte de *dogfooding*²² (Harrison, 2006), qui lui permet d'obtenir un niveau élevé de maîtrise de la qualité de ses productions. Enfin, Prusa Research a diversifié ses sources de revenus via sa boutique en ligne²³ et ses produits dérivés, notamment les filaments (achats récurrents)²⁴.

Prusa Research a donc développé un modèle de type *open hardware*, très ouvert tant aux contributeurs qu'aux utilisateurs avancés de l'impression 3D, ouvert également aux autres projets libres (RepRap, E3D-Online...) avec un contrôle fort des marques, une diversification importante des sources de revenus et une compétence forte en fabrication de moyennes séries grâce à l'autoproduction. Autrement dit, la préservation d'un lien fort avec les communautés permet de sous-traiter une partie de la R&D, sur les technologies (test utilisateur) mais aussi sur les besoins, qui sont valorisés (sur le plan de la captation de valeur) sur le marché professionnel, dans le développement de machines complètes, qui sont construites grâce à la capacité de l'entreprise à aller chercher les meilleures technologies et à les architecturer de façon efficace. La ferme est alors un actif clé, car elle permet de tester ces architectures, tout en proposant un service (d'impression à la demande), test qui permet de garantir la qualité des assemblages effectués. L'investissement en R&D n'est pas sur le développement de technologies, mais sur les capacités d'absorption de celles produites par un écosystème d'innovation qui est entretenu.

Types d'actifs spécifiques	Actifs spécifiques
Actifs humains :	développeurs (matériels et logiciels)
Actifs cognitifs :	référentiels de besoins configuration de moyennes séries industrialisation et allongement des cycles de vie
Actifs technologiques :	technologie SLA ferme de machines
Actifs organisationnels internes :	capacités d'autoproduction logistique mondiale
Actifs organisationnels externes :	plate-forme de co-développement (Github) plate-forme de partage (Prusa Printers) coopération intra-projets <i>open hardware</i>
Actifs réputationnels :	marques (cf. EUIPO)
Actifs commerciaux :	boutique en ligne

Tableau 4 : actifs spécifiques détenus par Prusa Research

22 Le *dogfooding* est une pratique consistant à utiliser au sein de l'entreprise les prototypes développés de manière à anticiper les problèmes de qualité avant leur expositions aux testeurs externes et aux clients.

23 Cf. <https://shop.prusa3d.com/>.

24 Cf. <https://prusament.com/>.

4.4. Dagoma

L'entreprise roubaisienne Dagoma s'est lancée en 2014²⁵ dans la commercialisation de machines « grand public » avec comme élément différenciant la facilité d'utilisation (concept de « *click and print* »). Plusieurs modèles se sont succédés : Discovery 200 (2014), Disco Easy 200 (2016), Neva (2017), Magis (2018) et Disco Ultimate (2018). La Discovery 200 se présentait comme l'imprimante 3D la moins chère du marché, qui a, comme pour Makerbot, trouvé ses limites avec l'augmentation de la concurrence chinoise et du moindre développement qu'espéré du marché des imprimantes domestiques. Dagoma a fait l'objet d'une procédure de reprise de l'activité en 2020 et s'est ré-orientée vers le marché professionnel²⁶, avec l'imprimante Pro 430, orientée petites et moyennes séries. L'entreprise cherche ainsi à se positionner en alternative à Ultimaker sur le segment des machines tarifées au delà des 2.500€.

Sur le plan de la propriété intellectuelle, Dagoma est sur une approche « *partly open* » de West (2003), puisque le GitHub²⁷ du constructeur voit coexister des éléments sous licence libre et des éléments sous licence [Creative Commons](#) avec clause Non Commercial (NC). Sur le plan de la co-création, l'entreprise a dans un premier temps ouvert le catalogue d'extensions aux contributions de la communauté. Cette approche n'a cependant pas pu être industrialisée (difficultés à maîtriser de façon compétitive les compétences d'architecture). Elle a également ouvert un club²⁸ permettant de valoriser les créations des utilisateurs. Pendant la première vague de la pandémie de la COVID-19, Dagoma, qui dispose d'une ferme d'imprimantes 3D, s'est distingué par la production de visières (250.000 visières produites en mai 2021). Elle a ainsi développé une compétence forte en fabrication à la demande de petites et moyennes séries²⁹.

25 Cf. https://www.dagoma3d.com/en_US/decouvrir-dagoma & <https://pro.dagoma3d.com/apropos/>.

26 Cf. <https://www.lesechos.fr/pme-regions/hauts-de-france/dagoma-lance-une-imprimante-3d-pour-les-professionnels-1327128>.

27 Cf. <https://github.com/dagoma3d>.

28 Cf. <https://clubdagoma.popsell.com/>.

29 Si cette stratégie ne lui a pas suffi pour pleinement faire face aux constructeurs asiatiques à bas prix, elle a en tout cas permis à l'entreprise de conserver une réputation intacte et de rebondir avec un produit davantage orienté vers le marché professionnel.

Types d'actifs spécifiques	Actifs spécifiques
Actifs humains :	développeurs
Actifs cognitifs :	référentiels de besoins
Actifs technologiques :	compétences en impression 3D (« <i>click & print</i> »)
Actifs organisationnels internes :	capacité de prototypage et de production en petites séries
Actifs organisationnels externes :	compréhension des besoins (club ³⁰)
Actifs réputationnels :	marque
Actifs commerciaux :	distributeurs

Tableau 5 : actifs spécifiques détenus par Dagoma

On voit que ces entreprises sont toutes issues d'un écosystème technologique libre, RepPrap, sur lequel elles se sont appuyées pour construire des offres d'imprimantes, plus faciles à utiliser, plus pérennes pour les utilisateurs que celles à monter à partir de plans partagés, en se fournissant en pièces auprès de différents fournisseurs. Il n'est alors pas étonnant qu'elles partagent toutes certains actifs spécifiques, comme les experts capables d'architecturer des machines. Cependant, on voit que les stratégies ont dévié sur la relation avec les projets ouverts en particulier, et sur la façon dont l'innovation est gérée en général.

C'est ce que nous proposons d'analyser maintenant.

5. Analyse des résultats

Nous proposons d'analyser trois aspects : la façon dont les actifs spécifiques sont construits, pour permettre une position originale, une offre de valeur difficilement contestable, qui semble relatif ; le fait que cette construction amène à trois modèles qui illustrent les modèles proposés par Gawer (2014).

5.1. Construction d'actifs spécifiques

Soulignons d'abord que toutes les entreprises ont la même stratégie sur les éléments périphériques de la plateforme technologique (les compétences d'utilisation), au moins sur les éléments standards, incarnés dans le logiciel : favoriser la production des systèmes de contrôle des machines, qui permettent de les utiliser, et les instructions d'impression de modèles qui développent les usages. Ces éléments sont des actifs complémentaires à la proposition de valeur centrée sur les compétences d'architecture (de technologies élémentaires dans des machines, ou, de plus en plus de machines dans des fermes), et de façon complémentaire, sur certaines technologies élémentaires ou sur des services à façon sur des compétences, avancées, d'utilisation.

Elles ont eu un parcours assez similaire dans la construction de l'offre et des actifs et capacités spécifiques leur permettant de développer leurs compétences d'architecture.

30 Club « Dagoma » depuis 2018. Cf. <https://clubdagoma.popsell.com/brand/landing>.

Elles ont été créées pour commercialiser de machines *open hardware*, modifiées plus ou moins en profondeur, proposées en kit. Le coût d'entrée était relativement faible car nécessitant peu d'investissements : les capacités clefs sont les créateurs, et leur connaissance des composants et leur capacité à les assembler à partir de modèles. Ce modèle d'affaires est proche du développement à façon, ou de l'« Artisanat ». Mais, comme pour l'artisanat pré-industriel (Perrin, 2021), cela n'a duré que le temps de la mise en place de production industrielle de machine, qui s'est faite principalement en Asie (industrialisation *low cost*). Et comme les artisans étudiés par C. Perrin, les entreprises ont du évoluer et se spécialiser.

D'après les exemples étudiés, trois directions, pas forcément antinomiques, semblent possibles.

Soit l'entreprise procède à l'industrialisation d'une machine standard, en la fiabilisant et en recourant à l'innovation de processus, ce qui correspond à un modèle d'affaires qualifié d'« Industrialisation ». C'est ce qu'ont fait les entreprises asiatiques, mais aussi toutes les entreprises de notre exemple. Par contre, elles ont abandonné les séries d'entrée de gamme, où les économies d'échelles n'étaient pas assez importantes, pour se concentrer sur le moyen-haut de gamme, en terme de qualité, ou de capacité de production. Nous verrons par la suite que cela s'est accompagné de différentes stratégies sur la plan de propriété intellectuelle.

Soit l'entreprise renforce son expertise technique pour accompagner la conception de machines sur mesure sur base de technologies disponibles sur le marché, ce qui nous appelons « Intégration FA open-hardware » : il s'agit de renforcer la dimension service, et de proposer des solutions répondant à des besoins très spécifiques.

Soit elle se spécialise dans la production d'équipements spécifiques (p. ex. extrudeurs et buses, ou dans les entreprises étudiées, les matériaux d'impressions), lesquels ont pu faire l'objet d'une amélioration préalable lors de la commercialisation des kits, ce qui correspond à un modèle d'affaires de « Spécialisation technologique » (il s'agit d'intégrer l'amont de la filière, en développant des technologies élémentaires).

Quels que soient les modèles, les entreprises cherchent à monter en gamme, augmenter la qualité et la fiabilité des produits développés, pour augmenter la valeur créée mais aussi captée, auprès d'un public sensible à ces éléments, les entreprises. L'enjeu est alors de trouver le juste équilibre entre standardisation de l'offre, qui permet des économies d'échelle, et flexibilité, qui permet de servir des besoins différents. On retrouve bien entendu la question centrale des plateformes et des compétences d'architecture !

Cela veut dire s'orienter encore davantage vers le marché professionnel et monter en gamme, sur la partie produit (complexité de la solution), ou la partie services (aide à l'utilisation). Soit l'entreprise cherche à satisfaire une diversité de besoins et développe la polyvalence de ses machines (p. ex. diversité des matériaux et des modules logiciels / matériels associés), ce qui amène au modèle d'affaires de type « Plateformisation ». Ensuite, et toujours dans l'idée d'augmenter ces économies d'échelle, les entreprises ont développé des offres logicielle facilitant non plus la gestion d'une machine, mais d'un parc, au sein d'entreprises clientes (modèle d'affaires « Impression 3D as a Service (privé) »), ou en interne (modèle d'affaires « Impression 3D as a Service (public) »), c'est-à-dire de la production manufacturière en tant que service *cloud* (Anderson, 2012), ce qui permet de satisfaire la demande de clients plus petits, au prix cependant d'un investissement important (p. ex. ferme de machines).

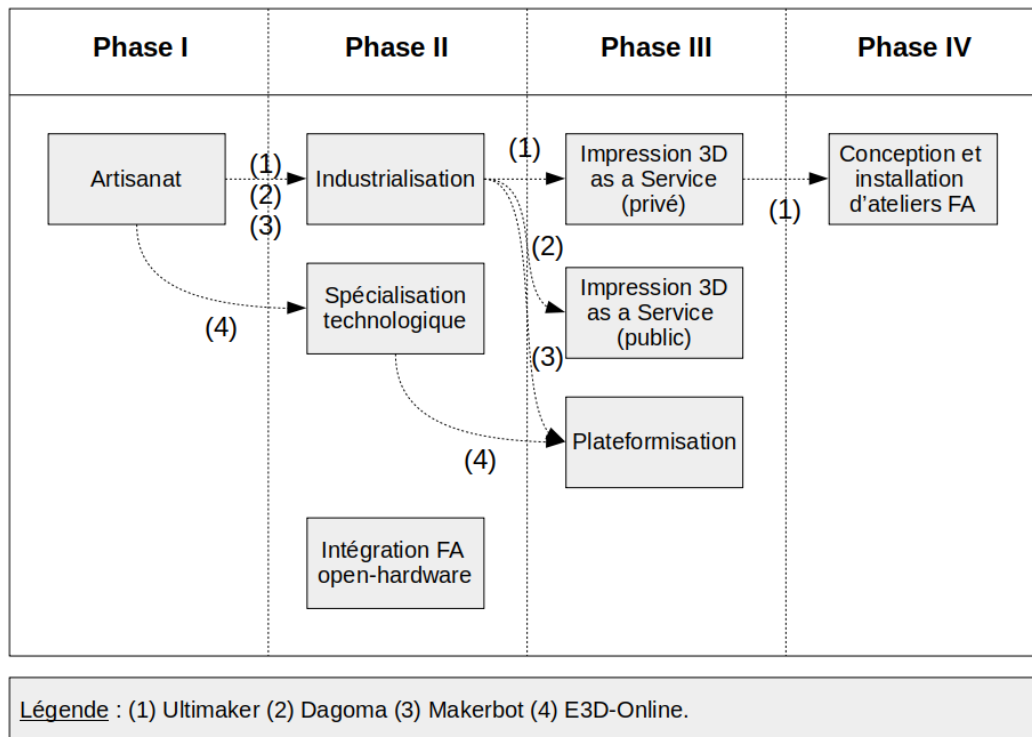


Figure 3: cycle de vie des modèles d'affaires des producteurs d'imprimantes 3D en *open hardware*

Pour résumer, la focalisation sur la qualité, l'assurance nécessaire pour répondre aux besoins professionnels nécessite d'investir dans des ressources pour améliorer, d'une part, la partie matérielle, d'autre part, la partie logicielle de son produit. Autrement dit, il faut innover sur les éléments des technologies unitaires, ou sur leur assemblage, ou sur l'adéquation avec les besoins des utilisateurs. Ce qui est plus remarquable, c'est que l'étude illustre que différentes stratégies, différents modèles existent pour développer et valoriser les compétences d'architecture, avec au cœur la gestion – le contrôle – de la plate-forme technologique et de l'innovation.

5.2. Trois types de stratégies open-hardwares

Il nous semble qu'on peut dégager trois types de stratégies, dont deux davantage polarisées, qui illustrent trois façons de gérer une plateforme technologique, mais aussi la façon dont un modèle d'affaire se construit au cours du temps.

Supply-chain platform : Makerbot

Le premier type de stratégie est celui de Makerbot.

Makerbot cherche à contrôler l'ensemble des composants pour maîtriser ses architectures, dans une stratégie de qualité, donc privilégier une approche fermée de l'innovation pour garantir la cohérence technologique de sa plateforme,

C'est cohérent avec la stratégie de montée en gamme permettant de toucher le marché professionnel et la structuration d'un modèle d'affaires de type *razor-blade business model* faisant la part belle à la vente de matières premières, mais qui nécessite de contrôler fortement la qualité globale des solutions proposées (l'assemblage des composants), et aussi

les compatibilités entre les différents éléments du matériel (toujours pour garantir la qualité globale, mais aussi pour contrôler l'apparition de clones moins chers de la partie « *blade* », les matières premières).

La diffusion de logiciels, permettant de faire fonctionner les machines, ou de créations sont des actifs complémentaires à l'activité cœur (production de machine), car ils renforcent l'attractivité des solutions de Makerbot, donc la création de valeur, sans menacer la captation de valeur pour l'entreprise.

En conséquence, la communauté est exclue des développements matériels, tandis qu'une activité communautaire subsiste pour les logiciels et, sous une marque différente, pour les créations. On peut même souligner, selon un schéma suivant d'assez prêt le modèle hirschmanien d'« *exit, voice, loyalty* » (Hirschman, 2017) adapté déjà au contexte *open source* par Viseur et Charleux (2021a), que cette stratégie d'exclusion est auto-entretenue : la fermeture de certains éléments génère forcément des conflits avec les projets libres et les participants, qui s'impliquent moins, renforçant la nécessité de l'entreprise de faire par elle-même, et diminuant donc l'intérêt des collaborations avec les projets libres.

Cette stratégie suit globalement le schéma classique identifié dans le secteur *open source* par Osterloh et Rota (2007), ou le cadre plus général de l'innovation ouverte de Chesbrough et al. (2018), où la communauté est exploitée provisoirement au lancement de l'activité, pour pallier le manque de ressources de l'entreprise, avec un renfermement progressif du processus de développement, parce que l'entreprise n'est plus en mesure de capter la valeur créée par la communauté. L'entreprise développe alors des collaborations (contractuelle) avec des fournisseurs ou des technologies unitaires propres qui lui garantissent un contrôle total sur les solutions innovantes qu'elle propose. C'est ce que Gawer (2014) a appelé la stratégie des plateformes « internes ».

Industry platform : Prusa Research

Le second type de stratégie est celui de Prusa Research.

Prusa Research semble, au contraire, vouloir générer des innovations autour de sa plateforme, via des propositions d'utilisateurs ou de fournisseurs de technologies qu'elle sélectionne ensuite pour construire des machines plus ou moins sur mesure pour des clients particuliers.

En pratique, cela se traduit par le développement d'une forme particulière d'ambidextrie (Lin et al., 2013). D'une part, l'entreprise structure sa communauté d'utilisateurs. Sont ici distingués : 1) les contributeurs à la technologie (Github), tant pour le matériel, que les logiciels associés, même si les sections de l'espace Github dédiées au logiciel (p. ex. *firmware* et *slicer*) sont sensiblement plus actives que les parties plus spécifiquement dédiées au matériel et 2) les créateurs de designs 3D ([Printables](#)). Or, c'est peut-être au sein de cette seconde communauté que la valeur échangée (au sens de Chesbrough et al., 2018) est la plus importante. En particulier, la plate-forme mise à disposition permet de comprendre et stimuler les usages des machines d'impression 3D. Si le *dogfooding* peut aussi être associé à un risque accru d'appauvrissement (dû à une forme de monoculture interne), l'activité communautaire permet ici au fabricant de préserver l'ambidextrie.

En ce sens, les deux propositions de valeur semblent complémentaires : d'une part la ferme de machine qui permet d'industrialiser des configurations, d'autre part les clients professionnels, qui peuvent soit acquérir ces configurations standards, soit demander des services plus spécifiques pour lesquels cette bibliothèque de propositions fournit des

ressources. La publication des spécifications des machines sous une licence libre est nécessaire pour générer des contributions, mais permet aussi de faire tester des configurations par les utilisateurs (remonté de *bugs*). Enfin, et contrairement à Makerbot, cette stratégie ne nuit pas à la captation de valeur, car la principale source de revenus ne vient pas de la vente de machines à ses utilisateurs-développeurs, mais des solutions d'impression (machine, mais aussi garantie de fonctionnement, aide à l'utilisation), pour laquelle l'entreprise possède d'autres actifs spécifiques humains (experts métiers ou experts de la technologie 3D), qui sont aussi coûteux à répliquer.

Si Prusa Research développe aussi ses capacités autour des technologies d'architecture, il semble qu'il s'agisse plus de contrôler un actif dynamique, au sens de Teece (2018) : c'est parce que l'entreprise est au sein d'un écosystème riche et qu'elle est capable de transférer des propositions d'innovation d'utilisateurs-innovateurs à ses clients que la communauté conserve un intérêt pour elle, et qu'elle crée des offres meilleures que ses concurrents. On a là un modèle original de plateforme industrielle (au sens de Gawer, 2014), où le contrôle ne se fait pas essentiellement, uniquement, par la propriété intellectuelle, mais par la capacité à attirer des innovateurs dans son écosystème dans lequel elle garde une position centrale, grâce à la marque et la plateforme qui renvoient aux propositions de l'entreprise, mais aussi grâce à ces actifs humains (expert) et matériel (ferme) qui sont difficilement imitables.

Modèles hybrides : Ultimaker & Dagoma

Ultimaker et Dagoma adoptent pour leur part des stratégies moins polarisées, et par ailleurs initialement basées sur des approches de type *partly open* pour ce qui est de la propriété intellectuelle des machines.

Si Ultimaker a progressivement cessé de publier les designs de ses machines, il entretient par contre le projet libre Cura, ce qui lui permet de profiter d'un flux de contributions (p. ex. codes sources et rapports de *bugs*) sur un logiciel sensible concernant la qualité des impressions (p. ex. finesse). Le logiciel libre Cura est intégré par Ultimaker dans un ensemble de logiciels extensibles déployés en mode SaaS. L'entreprise privilégie ainsi des partenariats technologiques (par exemple en assurant la compatibilité avec des extensions connectant des logiciels tiers), et une industrialisation des capacités d'usage.

Quant à Dagoma, il continue à publier ses designs et codes sources, mais privilégie le développement des usages de sa technologie au travers du club Dagoma. L'entreprise est plus dans une orientation besoin que technologique. Elle aussi développe l'industrialisation des capacités d'usage, où la communauté joue un rôle d'exploration des capacités des machines.

Les machines sont importantes, car elles doivent être distribuées pour que des innovateurs puissent tester les usages, mais le cœur des capacités est du côté des capacités d'utilisation. D'une manière générale, les technologies d'architecture apparaissent moins centrales, ou alors sur les fermes de machines, externes pour Ultimaker, internes pour Dagoma.

5.3. Segmentation des utilisateurs

Dans le premier cas, que nous avons appelé « *supply-chain platform* », il semble que les éléments de contrôle de l'accès à la spécification d'une solution soient dominants alors que, dans le second, que nous avons appelé « *industry platform* », l'accent semble plus mis sur l'évolutivité. Cependant, rappelons que ce que garantit Prusa Research à ses clients, c'est bien la fiabilité des solutions qu'elle fournit, soit dans son parc de machine (solution d'impression), soit dans l'assemblage, plus ou moins sur mesure, de composants issus de son

écosystème. Makerbot, de son côté, favorise toujours une innovation ouverte sur les éléments complémentaires de son offre cœur (la machine), sur les modèles réalisables avec ses machines et les logiciels de gestion des machines.

	RepRap	Makerbot	Prusa	Dagoma	Ultimaker
Proposition de valeur					
machines	-	xxx	xxx	xxx	xxx
accessoires	-	-	xx	x	x
consommables	-	xxx	xx	xx	xx
services	-	-	x	x	xxx
fabrication	-	-	x	xxx	-
Propriété intellectuelle					
<i>open source</i>	xxx	x	xxx	x	xx
hybride	-	-	-	x	x
propriétaire	-	xx	-	-	xx
Cible					
individus innovateurs	(x)	xx	xxx	xxx	xx
industrie (petites séries)	x	xx	x	xx	xx
industrie (moyenne série)		xx	xxx		xxx
Co-création					
contributeurs	xxx	(x)	xx	x	xx
utilisateurs	x	xxx	xxx	xxx	-
Responsabilité sociétale					
environnement	-	-	-	xxx	-
social	-	-	xxx	xxx	-

Tableau 6: synthèse des stratégies commerciales

Ces modèles soulignent que, plutôt que de considérer la communauté des utilisateurs-contributeurs aux imprimantes 3D comme un ensemble homogène, c'est leur segmentation en fonction de leurs apports respectifs à la proposition de valeur des entreprises et leur volonté d'optimiser le flux des connaissances utiles à leurs propositions de valeur respectives (cf. Tableau 6) et l'articulation avec les actifs spécifiques (cf. Tableau 7) développés qui éclairent les différentes stratégies.

	Makerbot	Prusa	Dagoma	Ultimaker
<u>Actifs humains :</u>				
développeurs (matériel)	xxx	xxx	xxx	xxx
développeurs (logiciel)	xxx	xxx	xxx	xxx
développeurs (SaaS)	x	x	x	xxx
<u>Actifs cognitifs :</u>				
référentiels de besoins	xxx	xxx	xxx	xxx
configuration de moyennes séries	-	xxx	xxx	x
<u>Actifs technologiques :</u>				
brevets	xx	-	-	xx
logiciels propriétaires	xx	-	x	xxx
ferme de machines	-	xxx	xxx	x
<u>Actifs organisationnels internes :</u>				
processus de R&D	xxx	xx	xxx	xxx
capacités d'autoproduction	-	xxx	xxx	-
<u>Actifs organisationnels externes :</u>				
communauté <i>open hardware</i>	-	xxx	x	x
communauté <i>open source</i>	x	xxx	x	xxx
communauté <i>makers</i>	xxx	xxx	xxx	-
coopération inter-projets	-	xxx	x	x
<u>Actifs réputationnels :</u>				
marques	xx	xxx	xx	xx
<u>Actifs commerciaux :</u>				
boutique en ligne	-	xxx	xx	-
distributeurs	xxx	x	xx	xxx
partenariats (matériaux)	xx	-	-	xxx
partenariats (technologies)	xx	x	-	xxx

Tableau 7: actifs spécifiques par constructeur (situation actuelle)

Certaines trajectoires, d'un modèle d'affaires à un autre (cf. Figure 3), apparaissent plus probables que d'autres. Le modèle « Artisanat » s'appuie ainsi sur des actifs humains (compétences) et des actifs organisationnels externes (plate-forme collaborative), lesquels permettent de soutenir une montée en gamme conduisant au modèle « Industrialisation ». Ce dernier s'accompagne du développement des actifs technologiques et des actifs organisationnels internes tels que les processus d'assurance qualité et les capacités de

production internes (par exemple les ateliers de tests, l'auto-fabrication et la fabrication à la demande, respectivement comme chez Ultimaker, Prusa Research et Dagoma). Ces dernières permettent dans un second temps de développer l'« Impression 3D as a Service » (en tant que *spinoff* basée sur des actifs technologiques et des actifs organisationnels internes liés à ces capacités de fabrication additive développées en interne) ainsi que les services de conception et d'installation de capacités de production.

6. Conclusion

Notre recherche nous a permis d'analyser la stratégie de cinq projets *open hardware*, dont quatre portés par une entreprise puis, sur base des BMC, d'en inventorier les actifs spécifiques. Cela nous a permis de dégager trois types de stratégies distinctes, de discuter le rôle de la communauté dans le développement des projets et des prestataires associés, puis de proposer une typologie de modèles d'affaires praticables par les constructeurs d'imprimantes 3D *open hardware*.

Les constructeurs d'imprimantes 3D doivent inclure dans leur proposition de valeur une assurance de la qualité des machines commercialisées. Cela peut passer, soit par une stratégie transitoirement ouverte, où des ressources sont progressivement construites avec la communauté avant privatisation du projet (p. ex. propriété intellectuelle), soit par une stratégie durablement ouverte, basée sur un ensemble de capacités dynamiques incluant en particulier les actifs organisationnels. Comprendre les stratégies associées nécessite de revenir sur l'articulation entre projet libre et constructeur *open hardware* ainsi que sur le rapport à la communauté (cf. Tableau 8), durablement exploitée (p. ex. Prusa Research), parfois pour opérer un pivot entrepreneurial (p. ex. Dagoma), ou progressivement abandonnée (p. ex. Makerbot) en fonction du choix opéré. Prusa Research semble ainsi avoir réussi à exploiter un flux de contributions diversifiées, concernant à la fois le logiciel et le matériel, soit sous la forme de contributions directes (p. ex. code source), soit sous la forme de retours dans les *bug trackers* (p. ex. « Issues » sous Github).

La limitation principale de cette recherche réside dans le nombre limité de cas, même si ces derniers se distinguent par leur importante popularité. De plus, l'analyse s'appuie en partie sur des sources publiques. Parmi les perspectives figurent ainsi la réalisation d'entretiens supplémentaires (p. ex. Josef Prusa), de manière notamment à mieux comprendre les logiques de segmentation des utilisateurs, les flux renforçant les capacités dynamiques ainsi que les relations entre projets *open hardware*.

8. Remerciements

Cette recherche a été réalisée avec le soutien du Fonds Européen de développement régional dans le cadre du projet transfrontalier [FabricAr3v](#).

9. Références

Anderson, C. (2012). *Makers: La nouvelle révolution industrielle*. Pearson.

Baldwin, C., Hienerth, C., & Von Hippel, E. (2006). How user innovations become commercial products: A theoretical investigation and case study. *Research policy*, 35(9), 1291-1313.

- Berchon, M. (2020). *Le grand livre de l'impression 3D*, Eyrolles.
- Boissin, O. (1999). La construction des actifs spécifiques: une analyse critique de la théorie des coûts de transaction. *Revue d'économie industrielle*, 90(1), 7-24.
- Boudreau, K. J. (2017). Platform Boundary Choices & Governance: Opening-Up While Still Coordinating and Orchestrating☆. In *Entrepreneurship, innovation, and platforms*. Emerald Publishing Limited.
- Cabanel, C. (2020). COVID-19 : à Lille et en région Hauts-de-France, des makers en première ligne, *Makery*, 7 juillet 2020.
- Chesbrough, H. W., & Appleyard, M. M. (2007). Open innovation and strategy. *California management review*, 50(1), 57-76.
- Chesbrough, H., Lettl, C., & Ritter, T. (2018). Value creation and value capture in open innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 35(6), 930-938.
- Chesbrough, H. (2010). Business model innovation: opportunities and barriers. *Long range planning*, 43(2-3), 354-363.
- Chesbrough, H. W. (2003). *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology*. Harvard Business Press.
- Dahlander, L., & Wallin, M. W. (2006). A man on the inside: Unlocking communities as complementary assets. *Research policy*, 35(8), 1243-1259.
- De Laat, P. B. (2005). Copyright or copyleft?: An analysis of property regimes for software development. *Research Policy*, 34(10), 1511-1532.
- De Reuver, M., Sørensen, C., & Basole, R. C. (2018). The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*, 33(2), 124-135.
- Demil, B., & Lecocq, X. (2003). Comment exploiter brevets et marques ?; *L'Expansion Management Review*, juin 2003, 88-95.
- Dhore, G., Jagtap, R., Bhakad, S., Yadav, P., Sutar, M. A., & Sawrate, M. S. (2021). Exploring 3D Printing using CURA: A Slicing software. *INTERNATIONAL JOURNAL*, 5(12).
- Douard, J. P., & Heitz, M. (2003). Une lecture des réseaux d'entreprises: prise en compte des formes et des évolutions. *Revue française de gestion*, (5), 23-41.
- Fally, B., Viseur, R. (2021). Mobilisation collective autour des makers pour la production locale de respirateurs open source : nouvelles pratiques à exploiter ?, *Makery*, 27 septembre 2021.
- Fauchart, E., Rayna, T. & Stiukova, L. (2017). Is selling caring? Norms regulating commercialisation and sharing behavior with the open hardware RepRap?, *AIMS*, Lyon, 7-9 juin 2020.

- Fitzgerald, B. (2006). The Transformation of Open Source Software. *Management Information Systems Quarterly*, 30(3), 13.
- Foss, N. J., & Saebi, T. (2017). Fifteen years of research on business model innovation: How far have we come, and where should we go? *Journal of management*, 43(1), 200-227.
- Gawer, A. (2014). Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework. *Research policy*, 43(7), 1239-1249.
- Gawer, A. (2021). Digital platforms and ecosystems: remarks on the dominant organizational forms of the digital age. *Innovation*, 1-15.
- Haigh, T. (2012). The IBM pc: From beige box to industry standard. *Communications of the ACM*, 55(1), 35-37.
- Harrison, W. (2006). Eating your own dog food. *IEEE Software*, 23(3), 5-7.
- Hausberg, J. P., & Spaeth, S. (2020). Why makers make what they make: motivations to contribute to open source hardware development. *R&D Management*, 50(1), 75-95.
- Hirschman, A. O. (2017). Exit, voice, loyalty. Defection et prise de parole. Éditions de l'Université libre de Bruxelles.
- Jullien, N., & Viseur, R. (2021). Une typologie des stratégies open-sources grâce au paradigme des modèles économiques. *Systèmes d'Information et Management*, vol. 26, n°1.
- Lancaster, K. J. (1966). A new approach to consumer theory. *Journal of political economy*, 74(2), 132-157.
- Laudien, S. M., & Daxböck, B. (2017). Understanding the lifecycle of service firm business models: a qualitative empirical analysis. *R&D Management*, 47(3), 473-483.
- Lin, H. E., McDonough III, E. F., Lin, S. J., & Lin, C. Y. Y. (2013). Managing the exploitation/exploration paradox: The role of a learning capability and innovation ambidexterity. *Journal of Product Innovation Management*, 30(2), 262-278.
- Massa, L., Tucci, C. L., & Afuah, A. (2017). A critical assessment of business model research. *Academy of Management Annals*, 11(1), 73-104.
- Mauborgne, R., & Kim, W. C. (2015). *Stratégie Océan Bleu: Comment créer de nouveaux espaces stratégiques*. Pearson.
- Osterloh, M., & Rota, S. (2007). Open source software development - Just another case of collective invention?. *Research Policy*, 36(2), 157-171.
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2011). *Business model nouvelle génération*. Paris: Pearson.
- Pearce, J. M. (2013). *Open-source lab: how to build your own hardware and reduce research costs*. Newnes.
- Perrin, C. « Ce que l'industrialisation a fait aux artisans d'Europe occidentale, années 1830 - années 1930 », *Artefact*, 13 | 2021, 317-334.

Plouin, G. (2016). Cloud computing : Sécurité, gouvernance du SI hybride et panorama du marché. Dunod.

Rogers, E. M. (1983). Diffusion of innovations - Third edition. The Free Press

Sawhney, M., & Prandelli, E. (2000). Communities of creation: managing distributed innovation in turbulent markets. *California management review*, 42(4), 24-54.

Šljivic, M., Pavlovic, A., Krašnik, M., & Ilić, J. (2019). Comparing the accuracy of 3D slicer software in printed enduse parts. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 659, No. 1, p. 012082). IOP Publishing.

Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long range planning*, 51(1), 40-49.

Trott, P. (2021). Innovation Management and New Product Development – Seventh Edition. Pearson.

Viseur, R., & Charleux, A. (2021b). Contributions et coordination des makers face à la crise du Covid-19. *Terminal. Technologie de l'information, culture & société*, (130).

Viseur, R., & Charleux, A. (2021a). Open Source Communities and Forks: A Rereading in the Light of Albert Hirschman's Writings, *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 624, 59-67.

Viseur, R., & Charleux, A. (2019). Changement de gouvernance et communautés open source: le cas du logiciel Claroline. *Innovations*, (1), 71-104.

Viseur, R. (2012). From open source software to open source hardware. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 378, Springer, Berlin, Heidelberg, 286-291.

Von Hippel, E. (2006). Democratizing innovation. the MIT Press.

West, J. (2003). How open is open enough?: Melding proprietary and open source platform strategies. *Research policy*, 32(7), 1259-1285.

Yin, R. K. (2009). Case study research: Design and methods. *Applied Social Research Methods Series*. Vol. 5. Sage.

Zimmermann Jean-Benoît. Le concept de grappes technologiques. Un cadre formel. In: *Revue économique*, volume 46, n°5, 1995. pp. 1263-1295.