

Apprendre avec l'imprimante 3D : pour une meilleure efficacité de l'activité de conception créative d'objets

YAKHOUB NDIAYE, JEAN-FRANCOIS HEROLD, PATRICE LAISNEY

*Aix-Marseille Université
ENS Lyon, ADEF EA 4671, 13248, Marseille
France
yakhoub.ndiaye@etu.univ-amu.fr
jean-francois.herold@univ-amu.fr
patrice.laisney@univ-amu.fr*

RÉSUMÉ

Depuis la réforme du lycée en 2010, peu de recherches ont été effectuées en France sur l'impact des procédés de prototypage rapide sur l'apprentissage des élèves en enseignement technologique. Avec l'évolution des technologies de fabrication numériques, nous posons la question de l'apport de l'imprimante 3D dans le dispositif enseignement-apprentissage. Nous faisons l'hypothèse que leur usage par les élèves, leur permet de construire une interprétation plus juste de la tâche prescrite dans le cadre d'une activité de conception. A partir des traces écrites, des intermédiaires graphiques, et de prototypes, produits par les élèves, nous réalisons une analyse de l'activité, permettant de décrire le processus de conception mis en œuvre par les élèves. L'étude pourra éclaircir la façon dont ils comprennent et utilisent l'imprimante 3D ; cette compréhension pouvant contribuer à aider l'enseignant dans son suivi de l'apprentissage

MOTS-CLÉS

Imprimante 3D, conception créative, prototypage rapide, fabrication additive, activité

ABSTRACT

Since the reform of the high school in 2010, few researches are made in France on the impact of rapid prototyping processes on the learning of pupils in technological education. So, with the evolution of the digital manufacturing technologies, we ask the question of the contribution of the 3D printer in classroom. We make the hypothesis that their use by pupils, allows them to build a better interpretation of the task prescribed within the framework of a design activity. From written tracks, graphic intermediaries, and prototypes, produced by pupils, we realize an analysis of activity, allowing the description of the design process operated by pupils. Our study can clear up the way pupils understand and use 3D printer; this understanding can contribute to help the teacher in his follow-up of the learning of pupils.

KEYWORDS

3D printer, creative design, rapid prototyping, additive manufacturing, activity

INTRODUCTION

De manière générale, la didactique des sciences et des technologies a pour objets d'études, entre autres l'étude des artefacts numériques et leurs rôles dans le processus enseignement-apprentissage, aussi bien en contexte scolaire que dans le cadre de la formation des enseignants. Initialement annoncée comme étant la « *nouvelle révolution industrielle* » (Anderson, 2012) numérique, une « *technologie disruptive* » (Christensen, 2013), ou une « *technologie à usage générale* » (Helpman, 1998; Jovanovic & Rousseau, 2005) citées par Rumpala (2013, p. 140), l'impression 3D a reçu plusieurs attributs. La rénovation des enseignements technologiques (MEN, 2010a, 2010b) par la mise en place du baccalauréat STI2D mentionne à maintes reprises le terme « *prototypage rapide* ». Or, peu de recherches ont été effectuées à propos de l'enseignement technologique en France sur l'impact des procédés de prototypage rapide sur l'apprentissage des élèves. C'est dans cette perspective de problématisation de ces technologies de fabrication numériques que se situe cet article. Nous nous intéresserons ici, à la technologie de l'« impression 3D » dans le processus enseignement-apprentissages en STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable) au lycée. D'après Dubois, Aoussat et Duchamp (2000), trois éléments essentiels sont souvent notés quand on parle de prototypage rapide : le temps, le coût et la complexité des formes. Cet article a pour enjeu de voir l'apport de cette technologie en STI2D, dans la perspective de favoriser, chez les élèves, la mise en œuvre du processus de conception.

Le prototypage rapide et la fabrication additive

Le prototypage rapide englobe l'ensemble des procédés d'ajout, d'enlèvement et de transformation de la matière (Dolenc et al., 1994; ADIT, 1995; Barlier et al., 1995; Bernard & Taillandier, 1998). Il « *regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des objets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les modèles numériques (au sens géométrie du modèle), les maquettes, les prototypes et les préséries* » (Dubois, Aoussat & Duchamp, 2000, p. 5). On utilisera le terme « *fabrication additive (FA)* » de l'anglais « *Additive Manufacturing (AM)* » communément appelé « *impression 3D* », pour regrouper les procédés permettant de fabriquer des pièces, par ajout successif de couches de matière, à partir d'un modèle numérique, sans recourir à de l'outillage (AFNOR, 2011). Ainsi par « *additive* », on entend une opposition à la « *fabrication soustractive* » (Guo & Leu, 2013) liée aux principes des méthodes traditionnelles (exemple de l'usinage) qui consistent à enlever de la matière.

Parmi les procédés de la FA, le procédé « *3DP ou impression 3D* » est le plus utilisé en enseignement technologique de par sa simplicité. En effet, il fait parti des catégories du procédé « *Poudre / Solide* » de la classification de Nonnemacher (1993, cité par Dubois, Aoussat & Duchamp, 2000, p. 12). Il repose sur le principe de la projection d'un liant liquide à la surface d'une cuve remplie de poudre. Le processus de création de prototype met en œuvre quatre (4) éléments de base du processus de prototypage rapide d'après Wozny (1997, p. 70) pour passer du modèle numérique à l'artefact physique : (1) *création de données* à travers un logiciel de conception assistée par ordination (CAO) adapté, (2) *format d'échange de données* commun généralement sous le format « *STL* », format de fichier originel du logiciel de CAO associé au procédé de « *STéréoLithographie* » créé par l'entreprise américaine 3D Systems (1988), (3) *validité modèle et réparation*, (4) *compensation (rémunération)* et (5) *structures de support (d'assistance)*. C'est ce processus qui est transposé en STI2D, sous une forme plus simplifiée.

Introduction au prototypage rapide en STI2D

Depuis l'avènement de la réforme, les nouveaux programmes STI2D ont intégré le prototypage comme l'un des aspects nécessaires pour concrétiser l'idée au prototype, en complément au processus de conception d'objets techniques à travers d'activités menées souvent à travers des démarches de projets. En effet d'après le bulletin officiel (BO) du 3 mars 2011 « *il s'agit en effet de faire vivre aux élèves, lors des deux années, tout ou partie d'une démarche de réalisation d'un prototype dans le cadre d'une pédagogie de projet* » (MEN, 2011). L'objectif, de ces nouveaux enseignements technologiques, étant de répondre aux principes de l'enseignement technologique à travers, entre autres, des méthodes pédagogiques inductives appliquées à des objets d'étude concrets, comme alternative aux enseignements purement abstraits de la voie générale. Ainsi, les élèves doivent être capables, pour tout ou partie d'un système ou d'une solution technique de concevoir, dimensionner, réaliser un prototype, une maquette, une étude relativement à une solution technique envisagée et de la communiquer. L'enseignement est décrit comme s'appuyant « *sur des études de systèmes qui nécessitent la mise en œuvre d'outils d'analyse, de représentation, de recherche et de validation de modèles ainsi qu'une culture des solutions constructives mises en œuvre* » (*ibid.*). Ainsi, pour passer d'une idée à un prototype, les imprimantes 3D sont parmi les outils de prototypage rapide les plus utilisés en lycée technologique, particulièrement en STI2D dans le cadre des activités de conception d'objets techniques. Dans le cadre de notre travail de recherche, nous faisons l'hypothèse qu'elles peuvent être un outil efficace pour permettre aux élèves de construire une interprétation plus efficace de la tâche prescrite par l'enseignant dans le cadre d'une activité de conception.

ÉLÉMENTS THÉORIQUES

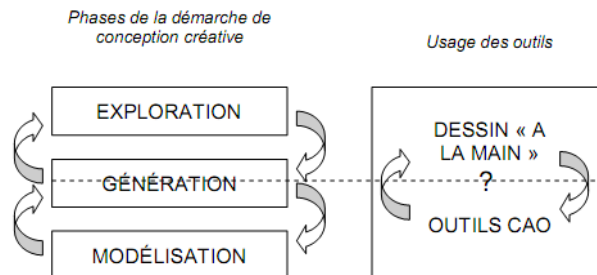
L'activité de conception d'objets techniques en STI2D

Dans une approche pratique en STI2D, la conception est un processus itératif et incrémental complexe. Les élèves travaillent très souvent dans le cadre de projets et répondent à des prescriptions énoncées dans un cahier de charges (CdCF) en validant ou non des solutions (formes, fonctions, résistances) avec les outils de prototypage rapide. Dans l'activité de conception en STI2D, les élèves explorent, analysent des solutions, les modélisent à travers un logiciel de CAO avant de les valider par prototypage. Nous interrogeons l'impact de l'imprimante dans le processus enseignement-apprentissage à travers la modélisation de Laisney (2012) sur les apprentissages d'élèves en éducation technologique au collège (Figure). Sa modélisation s'inspire de celle de Lebahar (1983) de la « *conception créative* » et les travaux de Rabardel & Weill-Fassina (1992) sur les systèmes graphiques. Dans son modèle concevoir revient à mettre en jeu des outils de CAO qui permettent de réaliser des représentations graphiques des solutions envisagées.

En STI2D, l'activité de conception ne porte pas sur la création ex nihilo d'un nouveau produit, déconnecté des réalités des élèves mais plutôt sur un projet d'amélioration d'un produit existant afin de le rendre plus compétitif dans un contexte de développement durable. Selon Visser, elle est « *une activité de construction de représentations* » (2009, p. 70). Elle mobilise des processus complexes, en particulier le processus d'élaboration d'une représentation mentale. Nous considérons l'activité de conception comme une activité de résolution de problèmes mal définis (Simon, 1973; Lebahar, 1983). Certaines recherches (Mayer, 2008), citée par (Hérol, 2012) ont montré que l'interprétation de la situation problème représente l'une des principales difficultés pour les élèves dans leurs activités de résolution de problèmes. En effet, l'obtention du

produit fini, le prototype, passe par plusieurs étapes complexes. Ainsi l'apprentissage passe par la définition d'états intermédiaires (sous-buts) nécessaires pour atteindre les états finaux (buts) (Richard, 1990), et de contraintes explicites et implicites (Chevalier & Cegarra, 2008).

FIGURE



Modèle de la démarche de conception et place des outils CAO (Laisney, 2012)

L'imprimante 3D : un outil de médiation artefactuelle

Les travaux de Rabardel (1995) ont montré qu'il n'était pas possible de comprendre l'activité humaine en dissociant l'homme des outils. Dans cette optique, on pourrait comprendre que les imprimantes 3D ne sont pas que des machines, des objets techniques mais constituent également des moyens techniques, cognitifs et culturels. Les prototypes sont le résultat de plusieurs transformations graphiques et numériques. Ainsi, l'utilisation de l'imprimante 3D impliquerait différents registres, en particulier les registres cognitif et matériel. Les interactions dans le processus de conception permettent de distinguer souvent un ***apprentissage par essais et erreurs***, susceptible de générer des développements cognitifs et de construire des connaissances à travers un processus artefactuel bien défini. Dans ce sens, Ginestié et Tricot (2013) considère que le processus enseignement-apprentissage subit l'articulation entre les activités de l'enseignant à celles des élèves.

ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE

Dans le cas d'apprentissage dit par « résolution de problème », une approche méthodologique pour analyser les apprentissages a été développée en psychologie cognitive : « l'analyse de protocoles individuels ». D'après certains chercheurs (Richard & Poitrenaud, 1988; Clément, 2003; Richard, 2004), elle permet d'inférer des processus cognitifs supposés expliquer la résolution d'une tâche à partir des étapes mentales, non observables, du processus sous-jacent à l'activité. Dans cette recherche, nous choisissons une méthodologie qui s'en inspire. Pour comprendre l'activité de conception, il serait important de voir l'articulation entre la tâche et l'activité. Celle-ci est d'après (Lebahar, 2007; Ginestié, 2009) un excellent analyseur des situations didactiques. Ainsi, « *Comprendre l'activité d'un sujet en cours d'apprentissage repose sur l'élaboration d'une analyse a priori de la tâche qui va lui être confiée (et/ou de la connaissance visée) et d'une analyse a priori de l'activité qu'il va déployer pour la réaliser (et/ou de l'apprentissage qui en découle)* » (Ginestié & Tricot, 2013, p. 13). Ceci étant nous optons pour une triangulation méthodologique qui prend en compte l'***analyse de la tâche et de l'activité des élèves***, à travers les traces écrites, les intermédiaires graphiques et prototypes pour

voir les effets de l'apprentissage avec l'imprimante 3D, suivi d'un *questionnaire post activité* destinés aux élèves et d'un *entretien* avec l'enseignant pour voir l'impact de l'outil sur la pratique professorale. En effet « *le processus d'apprentissage procède d'une double construction : procédurale – comment le sujet fait cela – et sémiotique – pourquoi il le fait et pourquoi il le fait ainsi* » (ibid., p. 11). Cette configuration méthodologique que nous optons tente de répondre à cette construction.

Procédure expérimentale

Le dispositif que nous proposons cible les élèves au lycée technologique (élèves en Première et Terminale Bac STI2D). Ainsi 39 élèves de 3 classes (2 Première et 1 Terminale STI2D) d'un lycée général technologique à Aix-en-Provence ont participé à une expérience d'observation de l'activité de conception prototypage. Elle a été faite sur 3 séances. *L'analyse de l'activité* des élèves porte sur les intermédiaires graphiques, les traces écrites, et les prototypes produits par les élèves. Pour les 2 classes de première, le dispositif expérimental consistait à créer dans chaque classe des groupes de conception et d'autres de prototypage. Pour la classe de terminale, les observations se sont faites lors de la phase de projet des élèves. Pour des soucis de planification dans leur projet de fin d'année, ces derniers avaient tous la possibilité d'imprimer en 3D. Les observations de l'activité ont été réalisées dans les deux salles de conception du lycée équipé d'une imprimante 3D, d'une découpeuse laser, d'une fraiseuse 4 axes et d'ordinateurs de bureau équipés des logiciels spécifiques à la discipline.

Toutes les observations ont été complétées par un *questionnaire post activités* pour comprendre les effets d'apprentissage dans l'activité de conception prototypage. Ce questionnaire a également été proposé à l'ensemble des élèves de STI2D (Première et Terminale) de ce lycée. En tout 74 élèves ont participé au questionnaire. Pour finir, nous avons tenu un *entretien post avec l'enseignant* pour comprendre son approche du prototypage en classe et l'impact de ce procédé dans l'activité des élèves et dans sa pratique professorale.

RÉSULTATS

Les traces écrites et les fichiers numériques sont les productions des élèves dans les 3 séances. L'ensemble des données est identifié avec le nom et la classe de l'élève et de son groupe pour permettre l'analyse de l'évolution de la recherche de solution d'une séance à l'autre et observer pour chacun les choix d'outils de conception et prototypage effectués et leurs effets. Les outils de conception et prototypage ont permis aux élèves de réaliser des représentations graphiques des solutions envisagées. Des représentations à main levée et des croquis des solutions ont également été obtenues. L'analyse des résultats de ce travail de recherche est en cours. Une analyse des traces écrites, des intermédiaires graphiques, et des prototypes donne les répartitions que nous présentons en annexes. Les trois premiers graphiques traduisent la répartition (en %) des élèves conception-prototypage dont les activités n'évoluent pas (*non*), qui évoluent avant et/ou sans prototypage (*oui avant proto*) et après prototypage (*oui après proto*).

Pour les élèves de Première STI2D, nous constatons une évolution modeste de la tâche à la troisième séance, **25%** des élèves suite à chaque réalisation de prototypes (*annexe i*) contre **5%** d'entre eux qui ne réussissent pas. Les groupes d'élèves en conception seule restent pratiquement en difficulté dans l'activité de conception. **60%** d'entre eux n'évolue pas dans l'activité contre seulement **10%** qui arrivent à évoluer sans prototyper (*annexe ii*).

En terminale (*annexe iii*), nous constatons beaucoup plus de réussite. La validation par prototypage donne **43,75%** des élèves qui avancent dans l'activité les 2 premières séances et **31,25%** la séance 3 arrivent à évoluer après prototypage, contre **25%** qui avancent dans l'activité avant/sans le prototypage et seulement **6,25%** qui ne réussissent pas.

DISCUSSIONS

Les avancées réalisées par les élèves de Première groupe prototypage restent modestes. Ce faible taux d'évolution s'explique en grande partie par le manque de maîtrise de ces élèves de l'ensemble des outils en conception. L'articulation entre la conception et le prototypage dans le processus de création d'objet technique n'est pas assez maîtrisée. De plus, les élèves s'intéressent plus souvent du résultat obtenu que des questions relatives à l'outil lui-même. D'ailleurs, une grande partie d'entre eux (**35,53%**, *annexe v*) pense à une approche d'utilisation dans la conception, de type *impression directe*, qui se focalise davantage sur le prototype obtenu. Cette approche d'impression directe renvoie bien à une répartition d'usage de type *conception-production-validation* pour **39,47%** des élèves (*annexe iv*). Or, en situation de classe, cette approche ne traduit pas la fonction réelle (validation de solutions) de l'imprimante. Etant donné la complexité, voire pour certains la variété des solutions possibles, les groupe en conception peinent à évoluer. Cela s'explique aussi par le fait qu'ils passent plus de temps à concevoir, à remodifier l'objet ou le système technique. Ces élèves, pour la plus part, peinent à qualifier le produit de leur résultat malgré les simulations mécaniques effectuées.

Par contre, en Terminale, l'évolution de l'activité des élèves s'explique en partie à la maîtrise des outils de conception et de prototypage d'une part, du processus de conception et organisationnelle d'autre part. Même si les élèves (Première et Terminale) ne valident pas leurs solutions, le constat qui est fait est que l'obtention des prototypes leur permet de voir les résultats effectués en vrai. Ils peuvent observer les résultats de leur création, en mesurer le comportement (comparer le modèle du prototype) et le fonctionnement sur des pièces « réelles » dans un matériau de résistance suffisante. Ces premiers résultats soutiennent notre hypothèse. Ils permettent de conclure que la validation « physique » de conception ou le passage de la conception numérique au prototypage a induit un effet positif sur l'apprentissage.

CONCLUSION

Le processus de conception prototypage est complexe. C'est un processus itératif et incrémental mis en œuvre à travers des outils numériques adaptés, y compris par l'usage des outils de prototypage par impression 3D. Bien que l'imprimante 3D soit un outil de validation de fonction (**43,42%**, *annexe iv*) pour les élèves, une grande partie d'entre eux (**35,53%**, *annexe v*) ont une approche *d'impression directe* négligeant souvent la simulation de l'impression (prétraitement) susceptible de renseigner sur le prototype à obtenir (temps de réalisation, quantité de matière support, ...). Malgré ces positions, notre hypothèse qui postule que l'usage par les élèves des imprimantes 3D leur permettrait une interprétation plus juste de la tâche prescrite par l'enseignant dans le cadre d'une activité de conception, est soutenue. En attendant l'analyse complète des données, nous verrons à travers le questionnaire post activités des élèves et l'entretien avec l'enseignant, des éléments qui vont ou pas la renforcer. Nous pourrions éventuellement faire un croisement entre ces données. Les spécificités qui caractérisent les élèves, les contraintes liées à

l'apprentissage, les contraintes organisationnelles, sont d'autres éléments à ne pas négliger quant à l'efficacité de certains groupes pendant l'activité.

Cette étude sur l'impact de l'imprimante 3D est en cours. Un entretien post avec l'enseignant est mené pour comprendre son approche du prototypage rapide en classe et l'impact de ce procédé dans l'activité des élèves et dans sa pratique professorale.

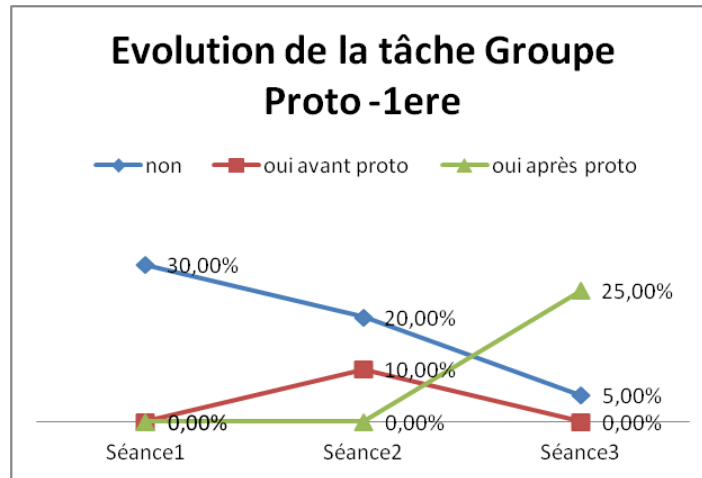
RÉFÉRENCES

- 3D Systems (1988). Stereolithography Interface Specification.
- ADIT - A. pour la D. de l'Information T. (1995). Le Prototypage rapide : pour comprendre et analyser les enjeux. Retrieved from <http://www.adit.fr/>.
- AFNOR (2011). NF E67-001 - Fabrication additive - Vocabulaire. Retrieved from <http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-e67-001/fabrication-additive-vocabulaire/article/788218/fa173165>.
- Anderson, C. (2012). *Makers : La nouvelle révolution industrielle*. Pearson. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=lhESCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=+Makers+++la+nouvelle+r%C3%A9volution+industrielle,+Montreuil,+Pearson,+2012.&ots=GJz-3FbaF5&sig=SoWvG0sgypYdbGSMFskGgG1ETV8>.
- Barlier, C. et al. (1995). *Conception en Mécanique Industrielle. Partie 6: Maîtriser les outils de prototypage rapide*. Malakoff, France: Éditions DUNOD.
- Bernard, A., & Taillandier, G. (1998). *Le prototypage rapide*. Paris: Hermès.
- Chevalier, A., & Cegarra, J. (2008). Une approche psychologique de la notion de contrainte en résolution de problèmes. *Le Travail Humain*, 71(2), 173-198.
- Christensen, C. (2013). *The Innovator's dilemma: when New Technologies cause great firms to fail*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Clément, E. (2003). L'analyse de l'activité dans les situations de résolution de problèmes. *Psychologie et Psychométrie*, 24(4), 25-36.
- Dolenc, A. et al. (1994). An overview of rapid prototyping technologies in manufacturing. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.9496&rep=rep1&type=pdf>.
- Dubois, P., Aoussat, A., & Duchamp, R. (2000). Prototypage rapide, généralités. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique*, 1-10.
- Ginestié, J. (Ed.) (2009). *The cultural transmission of artefacts, skills and knowledge: eleven studies in technology education in France*. Rotterdam: Sense Publisher.
- Ginestié, J., & Tricot, A. (2013). Activité d'élèves, activité d'enseignants en éducation scientifique et technologique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 8, 9-22.
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215-243.
- Helpman, E. (1998). General purpose technologies and economic growth. MIT press. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=TSSePifW9Y4C&oi=fnd&pg=PR9&dq=General+purpose+technologies+and+economic+growth&ots=FAYYq4xt3C&sig=T6kIgetioZOHFfCAVlz8MuTbkgM>

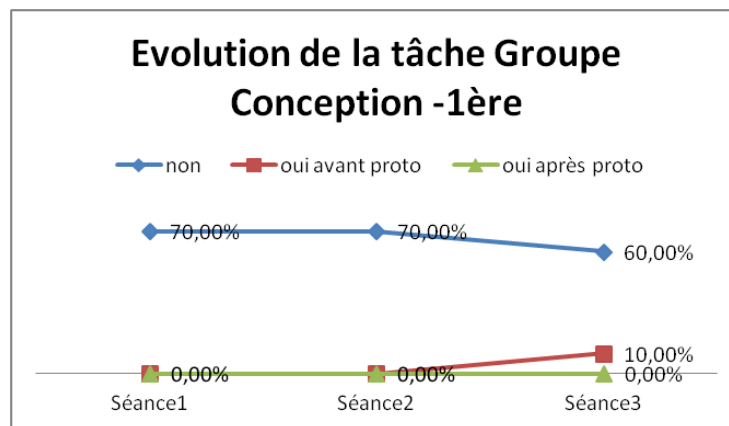
- Héroul, J.-F. (2012). Analyse cognitive de l'activité de l'élève pour une personnalisation d'un environnement numérique d'apprentissage. *Revue STICEF*, 19, 285–307.
- Jovanovic, B., & Rousseau, P. L. (2005). General purpose technologies. In P. Aghion & S. Durlauf (Eds), *Handbook of Economic Growth I* (pp. 1181-1224). Netherlands: Elsevier.
- Laisney, P. (2012). *Intermédiaires graphiques et Conception Assistée par Ordinateur - Étude des processus d'enseignement-apprentissage à l'œuvre en technologie au collège*. Doctoral thesis, Université de Provence - Aix-Marseille I, France.
- Lebahar, J.-C. (1983). *Le dessin d'architecte: simulation graphique et réduction d'incertitude*. Roguevaire, France: Éditions Parenthèses.
- Lebahar, J.-C. (2007). *La conception en design industriel et en architecture. Désir, pertinence, coopération et cognition*. Cachan, France: Lavoisier.
- Mayer, R. E. (2008). *Learning and Instruction*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- MEN (2010a). Bulletin officiel spécial n°6 du 24 juin 2010. Retrieved from <http://www.education.gouv.fr/pid24183/special-n-6-du-24-juin-2010.html>.
- MEN (2010b). Bulletin officiel spécial n° 1 du 4 février 2010. Retrieved from <http://www.education.gouv.fr/pid23791/special-4-fevrier-2010.html>.
- MEN (2011) Enseignements technologiques (transversaux et spécifiques des spécialités architecture et construction, énergies et environnement, innovation technologique et éco-conception, systèmes d'information et numérique) du cycle terminal de la série STI2D. Retrieved from <http://www.education.gouv.fr/cid55415/mene1104262a.html>.
- Nonnenmacher, F. (1993). *La stéréolithographie en question - Rapport sur l'état du prototypage rapide en 1993*. Paris.
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies; approche cognitive des instruments contemporains*. Paris: Armand Colin.
- Rabardel, P., & Weill-Fassina, A. (1992). Fonctionnalités et compétences: dans la mise en œuvre de systèmes graphiques techniques. *Intellectica*, 15, 215-240.
- Richard, J.-F. (1990). *Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris: Armand Colin.
- Richard, J.-F. (2004). *Les activités mentales: de l'interprétation de l'information à l'action*. Paris: Armand Colin.
- Richard, J.-F., & Poitrenaud, S. (1988). Problématique de l'analyse des protocoles individuels d'observations comportementales. In P. Caverni (Ed.), *Psychologie Cognitive : Modèles et Méthodes* (pp. 405-426). Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Rumpala, Y. (2013). L'impression tridimensionnelle comme vecteur de reconfiguration politique. Retrieved from <http://www.cairn.info/revue-cites-2013-3-page-139.htm>.
- Simon, H. A. (1973). The structure of ill structured problems. *Artificial Intelligence*, 4(3), 181-201.
- Visser, W. (2009). La conception: de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le Travail Humain*, 72(1), 61-78.
- Wozny, M. J. (1997). CAD and Interfaces. In *Rapid Prototyping in Europe and Japan* (Final Report, Volume 1, pp. 69-90). Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers.

ANNEXES

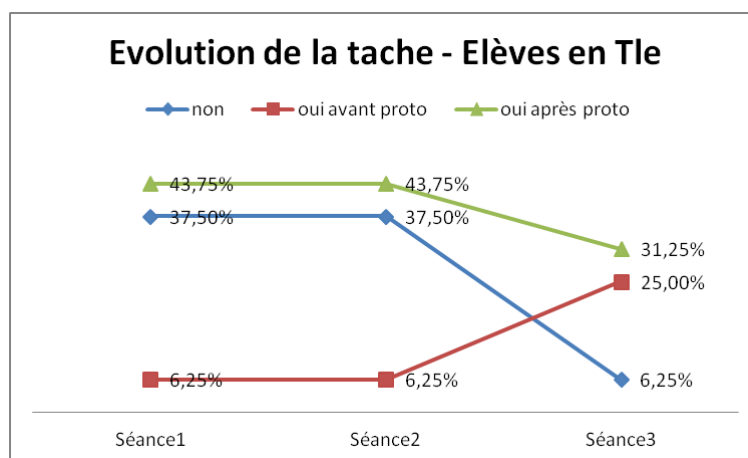
Annexe i : Evolution de la compréhension de la tâche - Elèves de 1ère Groupe Prototypage



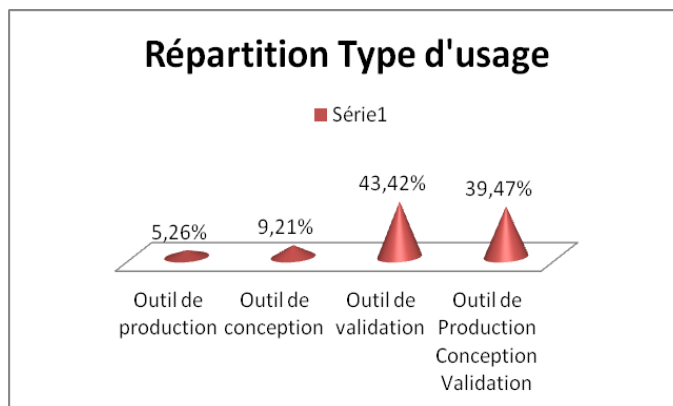
Annexe ii : Evolution de la compréhension de la tâche - Elèves de 1ère STI2D Groupe Conception



Annexe iii : Evolution de la compréhension de la tâche par les élèves de Tle STI2D



Annexe iv : Répartition du type de l'usage pour les élèves de l'imprimante 3D



Annexe v : Approche de l'usage par les élèves de l'imprimante 3D

