

Colloque « Eduquer et former au monde de demain »

AXE 4 : Dispositifs et pratiques de formation et d'éducation

Titre : Enseigner l'innovation en école d'ingénieurs

Stéphanie Buisine, LINEACT-CESI, sbuisine@cesi.fr

Bertrand Moulin, LINEACT-CESI, bmoulin@cesi.fr

Bernard Blandin, LINEACT-CESI, bblandin@cesi.fr

Mots-clés : enseignement de l'innovation, école d'ingénieurs, formation, dispositifs

Résumé :

Il existe deux principaux types de processus d'innovation. L'un, positiviste, enchaîne de façon séquentielle les phases de pose du problème, de résolution créative du problème et d'évaluation des solutions [1]. Cette approche de l'innovation est implémentée notamment dans les grands groupes et l'industrie traditionnelle [2]. Pour être fiable, elle demande un fort investissement dans les phases amont du processus. Le second repose sur un principe constructiviste, selon lequel le problème est construit de façon itérative en même temps que la solution [3]. Cette approche se retrouve dans de nombreux mouvements de conception récents (génie logiciel [4], développement agile [5], design thinking [6], lean startup [7]...). Elle semble mieux adaptée lorsque les ressources (en temps, en budget, en compétences) sont limitées, mais le risque d'échec est aussi plus élevé.

L'enseignement de l'innovation en école d'ingénieurs suit traditionnellement le modèle positiviste issu des grands groupes, alors qu'il tend à être remis en question de multiples manières. Tout d'abord, les observatoires de l'innovation montrent les limites de la stratégie des grands groupes français qui peinent à maintenir leur compétitivité [8, 9]. A l'inverse, l'écosystème de startups françaises (French Tech) est de plus en plus reconnu à l'échelle mondiale [10], suggérant que l'innovation française est aujourd'hui plus performante du côté des startups que des grands groupes. Il semblerait que l'approche constructiviste itérative des startups favorise l'attention aux signaux faibles présents dans l'environnement, la capacité à saisir les opportunités offertes, et donc la sérendipité [11]. D'un point de vue pédagogique, ce modèle semble aussi plus approprié pour monter en compétence progressivement sur les méthodes d'innovation, gagner en créativité et en confiance. C'est donc ce modèle qui est proposé dans les formations à l'innovation destinées à nos élèves ingénieurs.

Nous présentons deux expériences pédagogiques : l'une menée auprès de 27 élèves ingénieurs dans le cadre de projets d'innovation individuels de 10 séances, l'autre auprès de 30 élèves ingénieurs dans le cadre de projets de groupes de 5 semaines. La comparaison des résultats fait apparaître un ensemble de facteurs de réussite pour la formation à l'innovation, et notamment : l'approche constructiviste centrée sur les besoins utilisateurs plutôt que sur les contraintes techniques, la connaissance et l'appropriation des mécanismes de créativité, le mentorat, le travail en groupe et l'analyse des usages. Pour finir, nous discutons des limites de

ces formations et des méthodes qui restent à être inventées ou diffusées auprès des élèves ingénieurs pour favoriser l'innovation de demain.

Introduction : L'innovation en France

La Recherche & Développement (R&D) française est connue comme l'une des plus performantes au monde [8]. Les principaux indicateurs en sont par exemple : les dépenses de R&D par rapport au Produit Intérieur Brut, l'attractivité de la Recherche et notamment la capacité du territoire à attirer des chercheurs étrangers, et bien sûr le nombre de brevets déposés chaque année à l'échelle du pays. En France, les plus grands déposants de brevets en 2015 ont été PSA Peugeot Citroën, Safran, Valeo, le Commissariat à l'Energie Atomique et Renault. A titre d'illustration, PSA a déposé 1508 brevets en 2015, ce qui représente en moyenne 6 brevets déposés chaque jour ouvré. Ces chiffres impressionnants sont-ils également révélateurs de l'innovation en France ? Quelle est la différence entre R&D et innovation ?

L'Organisation de Coopération et de Développement Economique [12] définit l'innovation comme *la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures*. Elle considère ainsi 4 catégories d'innovation : l'innovation de produit, de procédé, d'organisation et de commercialisation. Si on se concentre plus précisément sur l'innovation de produit, celle-ci peut être définie comme la rencontre d'une *invention* avec un *marché*.

La R&D se positionne clairement du côté de l'invention, et le brevet sanctionne une activité inventive, mais un brevet n'aboutit pas systématiquement à une innovation. Pour qu'une invention, ou un brevet, devienne une innovation, il faut qu'il soit commercialisé, diffusé auprès d'utilisateurs / de clients, ou encore adopté par la pratique sociale.

La performance d'innovation se mesure donc par le biais, par exemple, des exportations de produits de moyenne et haute technologie, des exportations de services à forte intensité de connaissance, du chiffre d'affaire généré par les produits nouveaux, ou encore des recettes tirées de licences et de brevets. On comprend le rôle de la R&D dans ces métriques, puisqu'il est question de technologie, d'intensité de connaissance, de produits nouveaux, ou de brevets. Cependant, la R&D ne suffit pas car il faut ensuite que ces inventions ou ces connaissances soient valorisées d'un point de vue commercial et financier.

En France, on constate un décalage important entre performance de la R&D et performance de l'innovation. A titre d'illustration, en 2013 la R&D française était classée au 6^{ème} rang mondial, et l'innovation française au 16^{ème} rang mondial [8]. La France classe en moyenne une dizaine d'organisations dans les classements des entreprises les plus innovantes tels que le *Top 100 Innovators* de Thomson Reuters¹. Mais cette reconnaissance doit en permanence être reconquise, compte tenu de l'intensité de la concurrence sur les activités d'innovation. La

¹ <http://top100innovators.com/> En 2015, les entreprises françaises figurant dans ce classement sont, par ordre alphabétique : Alcatel-Lucent, Alstom, Arkema, CEA, CNRS, IFP, Safran, Saint-Gobain, Thalès et Valeo.

Figure 1 montre par exemple l'évolution du nombre d'entreprises françaises dans le classement de Thomson Reuters en fonction des années : entre 2013 et 2014, ce nombre a chuté de 12 à 7, suggérant que la compétitivité des grands groupes français était remise en question sur la scène internationale.

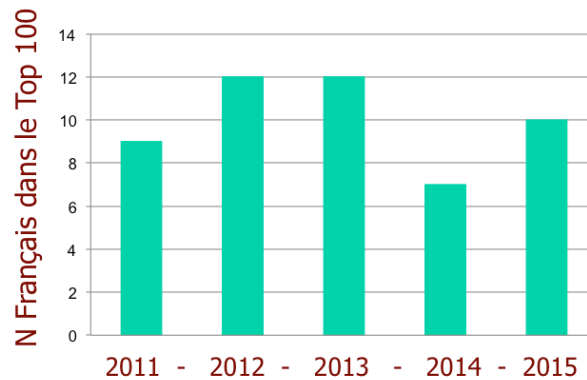


Fig. 1 : Evolution du nombre d'organisations françaises dans le *Top 100 Innovators* de Thomson Reuters.

Cependant, les grands groupes ne sont pas les seuls à porter l'image de l'innovation française à l'international. En effet, la France est aussi reconnue pour son écosystème de startups particulièrement dynamique, connu sous le terme de French Tech. Ces startups se multiplient, en particulier dans les événements à forte visibilité mondiale, comme par exemple le *Consumer Electronic Show* (CES) de Las Vegas. La Figure 2 montre le nombre de startups françaises présentes au CES depuis 2013, jusqu'à 190 startups françaises en 2016. La France est ainsi devenue depuis deux ans le 2^{ème} pays le plus représenté, après les Etats Unis. Autre indicateur de son dynamisme, la French Tech réalise des levées de fonds de plus en plus importantes, 862 millions d'euros en 2014 et 960 millions d'euros en 2015.

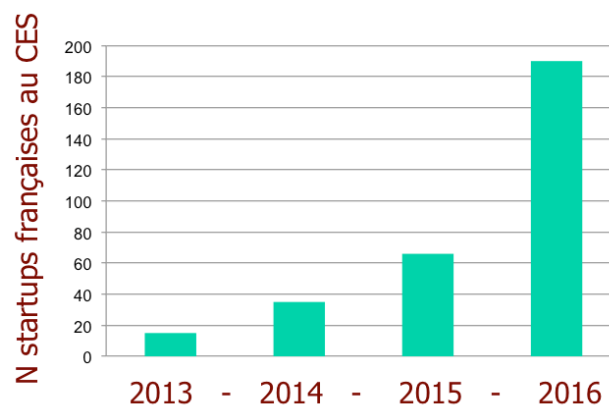


Figure 2 : Evolution du nombre de startups françaises au *Consumer Electronic Show* de Las Vegas.

En synthèse, plusieurs indices nous laissent à penser que l'innovation française est aujourd'hui au moins aussi dynamique, voire plus, du côté des startups que du côté des grands groupes. Sachant cela, comment doit-on enseigner l'innovation ? Doit-on s'appuyer préférentiellement sur le processus d'innovation traditionnel, tel qu'il est déployé dans la

plupart des grands groupes français, ou au contraire former les étudiants à l'innovation telle qu'elle est pratiquée dans les startups ? Nous développons dans la section suivante les différences entre les processus d'innovation de ces deux types d'entreprises innovantes.

Le processus d'innovation : Grands groupes vs. startups

Certains auteurs utilisent une métaphore évolutionniste pour expliquer les stratégies et processus d'innovation des entreprises [13]. Dans le même esprit, nous assimilons l'innovation dans les grands groupes à la reproduction humaine (Figure 3) : le processus de gestation et de développement est relativement long, le nombre de produits nouveaux est relativement faible, mais, lorsqu'un produit nouveau arrive sur le marché, il est de grande qualité et a de fortes chances de succès. C'est une stratégie basée sur la qualité et la compétitivité.



L'innovation dans les grands groupes	L'innovation dans les startups
Entreprises de type K	Entreprises de type r
	
Qualité et compétitivité	Quantité et opportunisme
Positivism	Constructivisme
Processus en cascade	Processus itératif

Figure 3 : Illustration des contrastes entre processus d'innovation dans les grands groupes et dans les startups.

A l'inverse le processus d'innovation dans les startups ressemblerait davantage à la reproduction du pissenlit : les idées foisonnent, sont semées à tous vents, mais relativement peu aboutissent (c'est-à-dire deviennent des innovations). Tous les jours naissent et meurent de nouvelles idées, de nouveaux produits, de nouvelles startups. C'est une stratégie basée sur la quantité et l'opportunisme.

Ces processus impliquent aussi des différences au niveau épistémologique. Dans les grands groupes, l'innovation s'inscrit dans une vision positiviste du monde : le processus est structuré et repose sur la méthode scientifique. Les grandes étapes suivent la théorie de la conception et s'enchaînent de façon séquentielle [1] : Pose du problème, puis Résolution du problème, puis Evaluation des solutions. Cela se traduit en entreprise par des processus linéaires [14], en cascade ou en V, et des systèmes Stage-Gate [15] avec un investissement très important dans les phases amont du processus (*fuzzy front-end*).

A l'inverse le fonctionnement des startups est plutôt assimilable au constructivisme postmoderne, qui part du principe que la réalité est un construit social relatif dans l'espace et dans le temps. Dans cette vision du monde, le problème ne précède pas la solution mais est co-construit en même temps que celle-ci. Cela se traduit en entreprise par des processus plutôt itératifs et circulaires, avec une grande flexibilité et capacité de remise en question. L'investissement dans les phases amont du processus est inférieur dans cette stratégie. La plupart des mouvements récents de conception, comme le développement agile [5], le *design thinking* [6] ou encore le *lean startup* [7] s'inscrivent dans ce paradigme. Cette approche constructiviste semble mieux adaptée lorsque les ressources (en temps, en budget, en compétences) sont limitées, mais le risque d'échec est aussi plus élevé.

Former à l'innovation : Etude 1

Pour mieux comprendre le besoin de nos étudiants en matière de formation à l'innovation, nous avons réalisé une première expérimentation avec 27 élèves ingénieurs en dernière année (23 hommes, 4 femmes, 23 ans de moyenne d'âge).

Ces étudiants ont reçu un enseignement de 150 heures intitulé « Développement de produit » autour des méthodes listées dans le Tableau 1. En dehors des heures de cours, ils ont eu à réaliser un projet d'innovation individuel sur une période de 8 semaines. Pour valider l'exercice, ils devaient y consacrer 10 séances de travail personnel. L'objectif de cet exercice était d'imaginer une cuisine modulaire pour monospace. Une série de spécifications techniques et fonctionnelles était aussi fournie.

Traduction du besoin	Veille technologique Analyse des tendances Analyse des usages Analyse fonctionnelle / de la valeur
Interprétation du besoin	Créativité Analyse multicritère
Définition du produit	Conception détaillée Matérialisation Analyse des risques
Validation du produit	Procédé de fabrication Tests utilisateurs

Tableau 1 : Processus et méthodes enseignées dans l'étude 1 [16].

Lors de chaque séance de travail, les étudiants devaient remplir un journal de bord ; ce qui nous a permis de garder les traces du processus d'innovation, des méthodes utilisées et des productions intermédiaires. Le livrable final du projet était constitué de 6 fiches idées : chaque étudiant devait fournir 2 fiches idées réalisables à court terme, 2 fiches idées pour le moyen terme et 2 fiches idées pour le long terme.

L'ensemble des 162 fiches idées (6 fiches * 27 étudiants) ont été analysées et notées par 5 experts en innovation. Les fiches étaient anonymes et les experts ont travaillé indépendamment. Chaque fiche a été notée sur une échelle de créativité de 1 à 7 (1: pas du tout créative; 7: extrêmement créative). L'accord inter-juges s'est avéré très satisfaisant, avec un alpha de Cronbach de .80.

A partir des notes de créativité accordées par les juges, nous avons divisé les étudiants en 2 sous-groupes: ceux qui ont eu une note supérieure à la médiane (groupe C+ composé de 14 étudiants) et ceux qui ont eu une note inférieure à la médiane (groupe C- composé de 13 étudiants). L'analyse des journaux de bord a ensuite montré que les principales différences entre les étudiants du groupe C+ et ceux du groupe C- étaient les suivantes :

- Les étudiants du groupe C+ ont utilisé plus de méthodes, et en particulier plus de méthodes de créativité.
- Ils les ont aussi utilisées plus tard dans le processus, c'est à dire que certains étudiants du groupe C+ n'ont pas hésité à mobiliser des méthodes de créativité lors de la dernière séance de travail.
- Une autre particularité des C+ est qu'ils ont traité les spécifications techniques et les contraintes de manière assez désinvolte, certains ont cherché à les reformuler, les contourner ou ont choisi volontairement de les ignorer.
- Enfin nous avons constaté une utilisation plus fréquente des méthodes centrées utilisateurs dans le groupe C+, comme par exemple la méthode des Personas [17] qui permet de stimuler l'empathie vis-à-vis des utilisateurs.
- A l'inverse les étudiants du groupe C- ont eu tendance à davantage se focaliser sur les spécifications et les contraintes techniques, et ont consacré beaucoup de temps et d'énergie à réaliser des analyses fonctionnelles et analyses de la valeur très détaillées.

Cette première étude nous suggère que pour une formation à l'innovation en école d'ingénieurs, il vaut mieux s'inscrire dans un processus constructiviste, dans lequel on s'autorise à proposer de nouvelles idées jusqu'à la fin, on investit peu dans les phases amont de type analyse fonctionnelle ou analyse de la valeur car le fait de se focaliser sur les futurs critères d'évaluation du produit risque de bloquer la créativité. Enfin, il semble important de favoriser une approche centrée utilisateur qui sera susceptible de stimuler la créativité.

Former à l'innovation : Etude 2

Les recommandations issues de l'étude 1 ont été appliquées lors de la conception d'une nouvelle formation à l'innovation qui a été déployée en 2015 à l'école d'ingénieurs du CESI. Cette formation a été suivie par 30 élèves ingénieurs en dernière année (21 hommes, 9 femmes, âge moyen 24 ans). Ils ont été répartis en 5 groupes de 6 et chaque groupe a eu à réaliser un projet d'innovation réel : soit le projet était proposé par une entreprise partenaire, soit il correspondait à un projet entrepreneurial proposé par un des élèves ingénieurs.

Cette formation a été réalisée exclusivement en pédagogie par projet, c'est-à-dire que les groupes n'ont pas suivi de cours à proprement parler mais qu'ils ont découvert le processus, les méthodes et les défis de l'innovation au travers de la réalisation de leurs projets. Ceux-ci

se sont déroulés sur une durée de 5 semaines à temps plein (soit 175 heures) et étaient structurés de sorte à réaliser 5 itérations autour des blocs méthodologiques suivants :

- La veille (technologique, concurrentielle, brevets...);
- L'analyse des usages (des journées étaient dédiées à des sorties « sur le terrain » permettant aux étudiants d'aller réaliser des observations et de rencontrer des utilisateurs);
- La créativité;
- La matérialisation des idées, qui inclut la communication, le maquettage et le prototypage, l'utilisation des moyens du Fablab, etc.
- Le mentorat qui consistait à fournir aux groupes un accompagnement collégial de la part d'experts en innovation;
- Le marketing stratégique et le business plan;
- La propriété intellectuelle (un exercice obligatoire consistait par exemple à déposer une enveloppe Soleau pour chacun des projets).

Les indices de performance que nous avons pu relever à l'issue de ce programme de formation (appréciation des mentors, des entreprises partenaires, production des groupes) sont tous positifs. Le groupe de mentors était constitué de 12 experts en innovation représentant différents points de vue (technologie, usages, design, finance, stratégie) : chaque groupe projet est parvenu à obtenir le soutien d'un ou plusieurs experts lors des délibérations, faisant ainsi ressortir des points forts différents pour chaque projet. Par exemple, un groupe a montré beaucoup de créativité dans les solutions proposées, un autre a développé un business model très original, un troisième a imaginé une solution de rupture pour répondre à un besoin sociétal aujourd'hui non satisfait, etc. Par ailleurs, les entreprises qui avaient proposé un projet ont toutes été très satisfaites du travail réalisé, certaines ont renouvelé leur confiance en nous soumettant de nouveaux projets. En ce qui concerne les projets proposés par les étudiants, l'un a donné lieu à un dépôt de brevet (actuellement en cours), l'autre a abouti à la création d'une startup.

Nous avons également demandé aux étudiants d'évaluer quelles étapes méthodologiques avaient été décisives à la réussite de leur projet (Figure 4). Les 4 facteurs d'efficacité ressortant comme les plus importants sont la formation aux méthodes de créativité, le mentorat, la composition du groupe et enfin l'analyse des usages. En outre, les étudiants ont fourni de nombreux commentaires qualitatifs qui nous permettent de mieux interpréter les résultats. Signalons notamment que le processus itératif constructiviste a semblé naturel aux étudiants car aucun d'entre eux n'a rapporté de redondance entre les 5 itérations méthodologiques. Cela va dans le sens de notre hypothèse selon laquelle le processus itératif serait plus adapté pour monter en compétence progressivement dans le cadre d'une formation à l'innovation.

L'utilisation de méthodes de créativité s'est révélée centrale pour les étudiants, qui ont déclaré que cela a été pour eux un apprentissage marquant. Nous les avons simplement sensibilisés aux bases de quelques méthodes telles que le brainstorming, la carte mentale, la projection visuelle, l'analogie et l'inversion. Nous pensons qu'au-delà de cette sensibilisation, c'est le

processus itératif qui leur a permis de s'approprier les mécanismes de la pensée créative et de gagner en confiance dans leur utilisation.

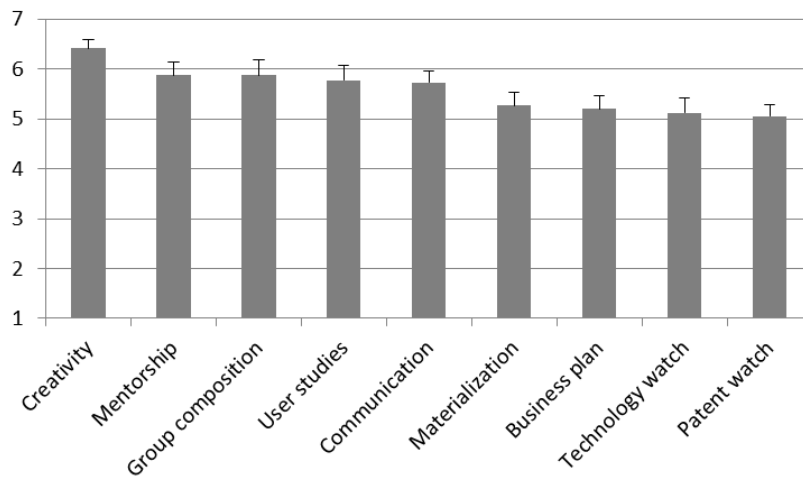


Figure 4 : Evaluation de l'impact des méthodes utilisées sur les résultats des projets d'innovation, selon les étudiants.

Les séances de mentorat ont également été jugées comme fondamentales. Nous pensons que cela est particulièrement dû au caractère à la fois pluridisciplinaire et collégial des séances : les experts avaient parfois des avis divergents, et les séances ont suscité des débats entre eux, et avec les étudiants. Cela a permis aux étudiants de comprendre qu'il n'y a pas un point de vue unique sur l'innovation ni une unique manière de faire. Juxtaposer une série de cours n'aurait sans doute pas été aussi formateur pour eux.

La plupart des étudiants ont aussi rapporté avoir vécu une expérience de collaboration très forte, avoir appris grâce à ce projet à mieux travailler en groupe et à s'appuyer sur les différences et les complémentarités entre les membres du groupe. Enfin, les analyses d'usage ont été reconnues comme importantes pour la réussite du projet d'innovation, ce qui tend également à confirmer notre précédente hypothèse et nous encourage à aller plus loin. En perspectives, nous souhaitons intégrer dans nos formations à l'innovation des méthodes plus spécifiques pour l'analyse des usages, comme la méthode du *lead user* [18], l'ethnométhodologie ou encore des méthodes issues de la conception universelle (voir par exemple [19]).

Conclusion

L'originalité de notre approche repose sur les points suivants :

- Nous plaçons les étudiants en situation de pédagogie par projet exclusive ;
- Nous guidons les étudiants dans leur projet d'innovation en leur faisant suivre un processus itératif semblable à l'approche d'une startup, plutôt qu'un processus en cascade comme on peut en observer dans les grands groupes. Ce processus itératif semble efficace pour favoriser la créativité ;
- L'accompagnement est réalisé par un comité d'experts pluridisciplinaire qui conseille les groupes de façon collégiale ;

- Nous rendons obligatoire l'analyse des usages, avec un aménagement administratif permettant d'autoriser les étudiants à quitter le centre de formation pour aller sur le terrain.

Nos perspectives actuelles visent à renforcer l'analyse des usages au niveau méthodologique et à développer la pluridisciplinarité au sein des équipes projets en organisant des collaborations inter-formations ou inter-établissement, de manière à favoriser la diversité et l'innovation.

Références

- [1] Simon, H.A. (1973). The structure of ill-structured problems. *Artificial Intelligence*, 4, 181-201.
- [2] Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, pp. 543-565.
- [3] Liem, A. (2014). Toward prospective reasoning in design: an essay on relationships among designers' reasoning, business strategies, and innovation. *Le Travail Humain*, 77, 91-102.
- [4] Boehm, B.W. (1988). A spiral model of software development and enhancement. *IEEE Computer*, 21, 61-72.
- [5] Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., Grenning, J., Highsmith, J., Hunt, A., Jeffries, R., Kern, J., Marick, B., Martin, R.C., Mellor, S., Schwaber, K., Sutherland, J., & Thomas, D. (2001). *Manifesto for agile software development* agilemanifesto.org.
- [6] Cross, N. (2011). *Design Thinking: Understanding how designers think and work*. Berg/Bloomsbury.
- [7] Ries, E. (2011). *The Lean Startup: How today's entrepreneurs use continuous innovation to create radically successful businesses*. Crown Business.
- [8] Beylat, J.L., & Tambourin, P. (2013). *L'innovation, un enjeu majeur pour la France*. Rapport ministériel, Ministère du Redressement Productif, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.
- [9] Péladeau, P., Romac, B., Rozen, A., Sevin, C. (2013). *L'innovation dans les entreprises en France*. Paris: Booz & Company Inc.
- [10] Su, J.B. (2016). CES Unveiled: A FrenchTech startups invasion. *Forbes*, Jan 5, 2016. <http://onforb.es/1RfYMNU>
- [11] Van Andel, P. & Bourcier, D. (2008) *De la sérendipité dans la science, la technique, l'art, le droit. Leçons de l'inattendu*. Chambéry : l'Act Mem.
- [12] OCDE. (2005). *Manuel d'Oslo. 3^{ème} édition*.
- [13] Picq, P. (2014). *Un paléanthropologue dans l'entreprise*. Paris: Eyrolles.
- [14] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). *Engineering design - A systematic approach*. 3rd ed. Berlin: Springer.
- [15] Cooper, R.G. (1990). Stage-gate systems: A new tool for managing new products. *Business Horizons*, 33, 44-54.
- [16] Aoussat, A., Christofol, H., Le Coq, M. (2000). The new product design – A transverse approach, *Journal of Engineering Design*, 11, 399-417.
- [17] Pruitt, J., & Adlin, T. (2010). *The Persona lifecycle: Keeping people in mind throughout product design*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- [18] Von Hippel, E. (2005). *Democratizing innovation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [19] Buisine, S., & Bourgeois-Bougrine, S. (2015). The creative process in engineering. In : T. Lubart (Ed.), *The creative process*, Chapter 10, in press.