Titre: Title:	Améliorer la performance créative des futurs ingénieurs par une approche cognitive
Auteur: Author:	Sophie Morin
Date:	2016
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Morin, S. (2016). Améliorer la performance créative des futurs ingénieurs par une approche cognitive [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2439/

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2439/
Directeurs de recherche: Advisors:	Jean-Marc Robert, & Liane Gabora
Programme: Program:	Génie industriel

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AMÉLIORER LA PERFORMANCE CRÉATIVE DES FUTURS INGÉNIEURS PAR UNE APPROCHE COGNITIVE

SOPHIE MORIN

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

AMÉLIORER LA PERFORMANCE CRÉATIVE DES FUTURS INGÉNIEURS PAR UNE APPROCHE COGNITIVE

présentée par : MORIN Sophie

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. BOURGAULT Mario, Ph. D., président

M. ROBERT Jean-Marc, Doctorat, membre et directeur de recherche

Mme GABORA Liane, Ph. D., membre et codirectrice de recherche

M. KAVANAGH Éric, M. A., membre

M. GARDONI Mickael, Doctorat, membre externe

DÉDICACE

À tous ceux et celles que j'aime.

REMERCIEMENTS

J’aimerais tout d’abord remercier mon directeur et ma codirectrice de recherche, M. Jean-Marc Robert et Mme Liane Gabora, pour leur collaboration. M. Robert m’a habilement attrapée au vol lorsque l’intérêt de revenir aux études s’est présenté. Toujours encourageant et passionné par la recherche, il m’a guidée dans le choix d’un sujet captivant et tout à fait approprié à mes champs d’intérêts, ralliant de nombreux traits de ma personnalité. Mme Gabora a su me rassurer et me conseiller tout au long du processus d’écriture. Leur précieuse participation m’a permis de produire un travail dont je suis fière.

Je voudrais aussi remercier du fond du cœur mes collaborateurs, Magali Marcheschi, Louis-Marc Bourdeau et Marion Cossin, pour leur participation active, leurs judicieux conseils et leur intérêt indéniable pour mon projet de recherche. Le parcours doctoral n’aurait pas été aussi riche sans leur présence.

Je remercie aussi Polytechnique et le Fonds de Recherche sur la nature et la technologie du Québec pour leur indispensable appui financier. De nombreux étudiants et professionnels ont participé à la collecte de données pour mes études et je tiens à les remercier pour leur contribution sans laquelle rien n’aurait été possible. Une mention spéciale à tous les étudiants qui ont suivi le cours de créativité à Polytechnique Montréal pour leur motivation soutenue, leur intérêt sans borne et leur formidable participation semaine après semaine.

Finalement, je n’aurais pu faire ce projet de doctorat sans l’appui incommensurable de mon entourage. Je remercie mon copain, mes parents, ma sœur et son mari pour leur soutien, leurs encouragements et leur amour. Sans eux, ce long périple n’aurait pas été possible. Un merci tout spécial à ma mère qui m’a soutenue, épaulée et poussée au-delà de mes espérances.

RÉSUMÉ

Les personnes créatives et innovantes sont reconnues pour leur contribution au bien-être de la société. En tant que professionnels, les ingénieurs sont souvent appelés à produire des idées novatrices et à participer ainsi à l’amélioration des produits, services et procédés de leur organisation. La recherche sur la créativité fournit des théories, des modèles, des outils et des résultats empiriques pouvant être exploités dans les programmes de formation sur le sujet. Les institutions d’enseignement et les entreprises pourraient en tirer profit afin de développer les compétences créatives de leurs étudiants et employés. Cependant, l’étendue et la dispersion de la littérature sur la créativité dans plusieurs disciplines, le manque de structure dans les cadres théoriques, la grande diversité des objectifs poursuivis et des activités pédagogiques rapportées dans les études sur l’enseignement de la créativité et le peu de travaux sur l’évaluation des impacts font que les enseignants et les concepteurs de programmes éducatifs ont besoin de guidage pour savoir comment s’y prendre pour obtenir de bons résultats. Suivant une approche cognitive, nous avons réalisé trois études qui nous ont menée à concevoir et développer un cours sur la créativité ayant les avantages d’être ancré sur un cadre théorique solide, d’être pleinement expliqué et d’avoir été testé sur le terrain auprès de trois groupes d’étudiants en ingénierie.

La première étude visait à clarifier le processus d'évaluation du test *Creative Engineering Design Assessment* (CEDA) et à vérifier sa fiabilité selon une méthode statistique fréquemment utilisée en génie, la méthode Reproductibilité et Répétabilité (R&R). Celle-ci, généralement utilisée sur des données quantitatives comme la longueur ou la tension, a été appliquée au CEDA qui utilise des échelles de Likert pour faire des évaluations subjectives. Les échelles permettent d’évaluer cinq aspects de la créativité (pensée divergente, pensée convergente, satisfaction des contraintes, identification des opportunités, résolution de problème) selon quatre critères (fluidité, flexibilité, originalité et utilité). Trois juges ont ainsi évalué 22 résultats de tests effectués auprès de professionnels intéressés par le sujet de la créativité. L’analyse de ces résultats révèle que l'utilisation de la méthode R&R est pertinente dans cet environnement de psychométrie pour évaluer la performance du CEDA. Celle-ci est jugée satisfaisante en ce qui concerne la variation totale mesurée, puisque moins de 10% de la variation des résultats est due à l'outil lui-même. De plus, l’utilisation de cartes de contrôle (graphiques permettant de suivre et maîtriser la variation de processus) pour analyser la fiabilité de la stratégie d'évaluation a montré que le processus d'évaluation mis en œuvre pour les deux critères qualitatifs (originalité/utilité) était sous contrôle,

puisque les résultats obtenus se situaient entre les limites de contrôle calculées, et que les variations étaient dues à des causes inévitables ou incontrôlables. Par ailleurs, des discussions entre les juges ont permis de clarifier le processus d'évaluation de la créativité en définissant de manière détaillée les échelons des échelles de Likert pour les critères d'originalité et d'utilité. La clarification du processus d'évaluation avec le CEDA permet aux éducateurs d'avoir une mesure plus précise et fiable de la performance créative de leurs étudiants.

Les modèles théoriques de la créativité suggèrent souvent que le processus de créativité implique un style de pensée particulier. Par conséquent, la deuxième étude visait à investiguer le lien entre deux capacités cognitives reliées à la créativité et la performance créative (évaluée par le CEDA). L'étude comprenait deux expériences et un test (CEDA) impliquant différents groupes de futurs ingénieurs. Dans la première expérience qui porte sur le rappel et la représentation externe (sur papier) d'informations stockées en mémoire, nous avons étudié le nombre de mots (ou d'idées) que les participants rapportaient et les types de représentations externes qu'ils utilisaient pour montrer les informations stockées dans leur mémoire relativement à trois stimuli (deux objets et un mot) qui leur étaient présentés un à un. L'objectif de cette expérience était de voir si certains types de représentations externes (étoile, chaîne, réseau ou leur combinaison) favorisaient une plus grande créativité (mesurée avec le test). Les résultats montrent que 89% des participants ont produit des graphiques en forme d'étoiles reliant des mots (avec ou sans chaînes de mots) avec une moyenne de 11 mots par participant. Au plan de l'originalité, 79% des participants ont obtenu un score entre 2 et 4 sur 10. La deuxième expérience visait à connaître l'état d'esprit des participants à qui on demandait de lire deux courts textes se rapportant à deux domaines différents (défense militaire et médecine) en vue de répondre à une question posée à la fin du deuxième texte sur l'existence de liens possibles entre les scénarios présentés dans les deux textes. Il s'agit d'une expérience utilisée dans le cadre d'études sur le raisonnement lors du traitement d'une analogie. L'objectif était de voir si les personnes qui réussissent mieux à établir des liens entre différents domaines avaient une meilleure performance créative (mesurée avec le CEDA). Les résultats révèlent que 76% des participants ont utilisé des idées en cours de définition ou « à moitié cuites », c'est-à-dire qui sont présentes dans le processus de réflexion amorcé mais qui restent floues et incomplètes. Finalement, le test avec le CEDA a permis de mesurer la performance créative des participants afin de voir s'il existait des corrélations entre la façon dont on représente (à l'externe) l'information stockée dans la mémoire ou l'originalité de ces mots et la performance créative, et entre la perception d'analogies entre différents domaines et la performance créative. Aucune corrélation significative sur le plan statistique n'a pu être montrée. Cependant les résultats empiriques ont pu être partagés avec les apprenants afin d'accroître leurs connaissances de leurs propres processus cognitifs (et métacognitifs) leur donnant ainsi un levier éducatif additionnel pour développer leur potentiel de créativité.

La troisième étude a permis de concevoir, de développer, de donner et d'évaluer l'impact d'un cours de 45 heures sur la créativité dans le contexte de l'ingénierie. Le cours est ancré sur un cadre théorique cognitif et fait appel à 10 stratégies pédagogiques dont des jeux sérieux, un cahier d'observations personnelles, des projets individuels (artistiques) et collectifs (ingénierie). L'impact du cours sur la performance créative a été évalué quantitativement et qualitativement avec le CEDA. Le cours a eu lieu à l'École Polytechnique de Montréal durant trois sessions. Cent-trente-deux étudiants provenant de programmes de premier cycle et des cycles supérieurs ont participé au cours. Les résultats quantitatifs (*t-test* pairés pré-post : fluidité *(t=-2.95)*, flexibilité *(t=-2.62)*, originalité *(t=-3.06)*, utilité *(t=-3.58))* indiquent que le cours permet d'améliorer significativement la performance créative des participants, selon les quatre critères d'évaluation du CEDA mentionnés ci-dessus. Les résultats qualitatifs, classés selon trois thèmes (pertinence, perception, apprentissage), révèlent que les étudiants ont apprécié le cours et l'ont trouvé pertinent, et que celui-ci contribuait à accroître leur compréhension de la créativité, de ses mécanismes cognitifs et des approches disponibles pour l'améliorer.

Les trois études ont permis d'acquérir une meilleure compréhension de la créativité et des façons de la développer dans un contexte d'ingénierie. Il est raisonnable de penser que les leçons tirées de ces études s'appliquent à de nombreux domaines dans lesquels il pourrait être pertinent d'avoir des activités de formation à la créativité.

ABSTRACT

Creative and innovative people are recognized for their contribution to society's wellbeing. Engineers are often called upon to produce innovative ideas and thus participate in the improvement of their organization's products, services, and processes. Research on creativity provides theories, models, tools, and empirical results which can be exploited in training programs on the subject. Educational institutions and organizations could benefit from this in order to improve the creative skills of their students and employees. However, the extent and dispersion of the literature on creativity across many disciplines, the lack of structure in theoretical frameworks, the wide range of objectives and pedagogical activities reported in the studies on the teaching of creativity and the limited number of work on impact assessment mean that teachers and curriculum developers need guidance on how to achieve good results. Following a cognitive approach, we conducted three studies that led us to design and develop a course on creativity that had the advantages of being rooted in a solid theoretical framework, fully explained, and tested on the ground with three groups of engineering students.

A recent tool proposed to evaluate creativity in an engineering context is the Creative Engineering Design Assessment (CEDA) (Charyton, 2014). Considering that there are very few reports on its use in the field, our first study was designed to improve the CEDA's evaluation process and determine its reliability using a statistical method widely used in engineering: the Reproducibility and Repeatability method (R&R). R&R is generally used on quantitative data such as length or voltage, but in this case it was applied to the CEDA which uses qualitative data. The scales make it possible to assess five aspects of creativity - divergent thinking, convergent thinking, constraint satisfaction, problem finding and problem solving - using four criteria - fluency, flexibility, originality and usefulness. Three judges assessed 22 tests completed by professionals interested in creativity. Control charts (for monitoring and controlling process variation) were used to analyze the reliability of the evaluation strategy. As a first step, the Likert scales' criteria for assessing originality and usefulness were decided collectively by the evaluators. Because less than 10% of the measurement system's total variation was due to the tool variation, we concluded that CEDA can provide an accurate and reliable measure of the creative performance in engineering, and that R&R provides an adequate assessment for the CEDA's reliability.

The second study investigated the relationship between creative performance and two cognitive abilities related to creativity: the retrieval and external representation of encoded concepts, and the management of multiples concepts at one time (potentiality). It consists of two cognitive exercises and the CEDA test. The first was inspired by mental and conceptual mapping to study the recovery and external representation (on paper) of concepts stored in memory. Three stimuli (two objects and one word) were presented one at a time to engineering students who were asked to represent what those stimuli made them think of. We calculated the number of words (concepts) reported by each participant; an average of 11 words was counted. The types of external representations they used to display the concepts stored was also studied; 89% of participants produced stars-like representations, with or without chains (more than one concept in line). Also, the originality of the words composing those maps was evaluated; 79% scored between 2 and 4 out of 10 for originality. The ultimate goal was to determine whether certain types of external representations (showing more elaborate connections between concepts) foster more creativity (measured with the CEDA) than other types of representations. There were no significant correlations between the types of external representations or their originality and the creative performance.

Theoretical models of creativity often suggest that the creativity process involves a particular thinking style or as Amabile depicts “the ability to use wide, flexible categories for synthesizing information and the ability to break out of perceptual and performance ‘scripts’” (Amabile, 2012, p. 3). Therefore, the goal of the second experiment was to determine the participants’ thinking style when resolving a problem. Participants were asked to read two short scenarios from two different fields (military strategy and medicine), to answer a question at the end of the second text which showed whether they had seen the analogy between the military problem and the medical problem. This procedure is often used in studies of analogy. No significant correlation was found between success in establishing links between different fields (principle of analogy) and creative performance as measured with the CEDA. Interestingly, however, 76% of participants used *ill-defined* or “half-baked” ideas, which lends support to the theory that ideas unfold through reflecting on, and thereby crystallizing, unclear and/or incomplete ideas, as opposed to generating many and choosing the best. Participants who reported “half-baked” ideas did not necessarily obtain higher CEDA scores. This is consistent with the hypothesis that the benefits of honing of ill-defined ideas come to light in creative problems or tasks that unfold over hours, days, or years, particularly those that involve breaking out of a rut.

The CEDA was used to compare participants' creative performance on the two previous cognitive experiments to determine if there were correlations between creative performance and (1) the way information stored in memory is externally represented, and (2) the detection of analogies. No significant correlations were found. However, the results (especially map types and CEDA) provided information that was shared with students to increase their knowledge of their own processes (metacognition), giving them additional educational mechanisms to develop their creative potential.

The third study consisted in the design and teaching of a three-semester, 45-hour course on creativity in an engineering context at Polytechnique Montreal. The course was anchored in a conceptual framework involving 10 pedagogical activities, including serious games, a personal observation notebook, individual (artistic) and collective (engineering) projects. One hundred and thirty-two students from undergraduate and graduate programs participated. The impact of the course on creative performance was evaluated quantitatively and qualitatively with the CEDA. The t-test paired values (pre-post) showed the course significantly improved participants' creative performance, according to four criteria: fluidity *(t=-2.95)*, flexibility *(t=-2.62),* originality *(t=-3.06)*, usefulness *(t=-3.58)*. The qualitative information was categorized into three themes: relevance, perception and learning. The students reported that they enjoyed the course, and found it relevant in their curriculum, and claimed it helped to increase their understanding of creativity, its cognitive mechanisms, and techniques for improving it. Thus, the third study provides useful information on how to build a creativity course anchored on a theoretical framework, and empirical results on the impact of the course on participants' creative performance.

We concluded that the three studies were useful to gain a better understanding of creativity and ways to develop it in an engineering environment. It is reasonable to think that the lessons learned from these studies apply to many areas in which it would appear appropriate to develop effective and efficient creativity training activities.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASME	American Society of Mechanical Engineering
BCAPG	Bureau canadien d’agrément des programmes de génie
CEDA	Creative Engineering Design Assessment
Modèle CHC	Modèle Cattel - Horn - Carroll
NAE	National Academy of Engineering

GLOSSAIRE[1]

Activité d'apprentissage/pédagogique

Activité qui se déroule habituellement dans le cadre scolaire et qui réfère à une situation pédagogique globale ou spécifique.

Capacité (cognitive)

Le terme capacité (*ability*) réfère à un trait général, stable, qui facilite la performance d'un individu dans une variété de tâches.

Créativité

La créativité est l'habileté de produire un artéfact nouveau, original et utile qui répond à un besoin identifié, en recombinant d'une manière différente des concepts déjà intégrés. (de l'auteure de cette thèse)

Fonction cognitive[2]

Capacités de notre cerveau qui nous permettent notamment de communiquer, de percevoir notre environnement, de nous concentrer, de nous souvenir d'un événement ou d'accumuler des connaissances.

Métacognition/approche métacognitive

Connaissance qu'on a de nos propres processus cognitifs, de leurs produits et de tout ce qui y touche, par exemple, les propriétés pertinentes pour l'apprentissage d'informations ou de données.

Pensée divergente / pensée convergente

La divergence ouvre la possibilité de nombreuses solutions, la convergence devient indispensable lorsqu'il s'agit de choisir une solution à un problème défini […] deux phases dans tout acte cognitif aussi bien dans le domaine des arts que des sciences. *Divergence* : phase où le jugement est différé. *Convergence* : phase centrée sur la recherche d'une réponse « juste ».

Processus

Suite d'opérations se succédant en fonction d'un but.

Processus créatif

Sélection, choix, arrangement de nouveaux matériaux, idées, actions ou choses dans un ordre nouveau.

---

[1] Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. Montréal, CA: Guérinpages

[2] https://aqnp.ca/la-neuropsychologie/les-fonctions-cognitives/

Processus cognitif

Processus mental de haut niveau tels que la perception, la mémoire, le langage, la résolution de problèmes et la pensée abstraite. (traduction libre[3])

Stratégie cognitive

Technique ou procédure intellectuelle choisie par une personne comme étant la plus propice à la résolution d'un problème.

[3] http://www.apa.org/research/action/glossary.aspx?tab=3 (American Psychology Association), page consultée le 15 septembre 2016.

LISTE DES ANNEXES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

> « *The role of design and innovation has never been as relevant and powerful as it is in today's rapidly changing, interconnected and complex world. Design and innovation is a creative response to the critical need to drive development and growth against a backdrop of austerity, resource scarcity, growing unemployment and inequality, demographic shifts and new patterns of demand and supply. It can be considered a practice, a tool, an approach or a discipline that aims to create value for society.* » *("Global Agenda Council on Design & Innovation 2012-2014," 2013, p. 1)*

L'innovation est l'une des préoccupations les plus importantes en ce début du 21^{e} siècle (Sawyer, 2006). L'enjeu est particulièrement présent lorsqu'il est question de perspectives mondiales sur l'avenir et la rentabilité des organisations qui résultent fortement de leur capacité d'innover. Celle-ci dépend de l'émergence d'idées nouvelles, leur permettant de s'améliorer, de se renouveler et de se développer dans un contexte de changements de plus en plus rapides, de décloisonnement des marchés et de compétition qui s'accroit toujours. Or, en 2008, Mckeag associait l'innovation à la créativité en soutenant que la créativité est le point de départ du processus d'innovation qui mène à la commercialisation d'une idée nouvelle : « In terms of engineering creativity can be said to embrace these terms and have value to the client or customer. Innovation can embrace creativity in that in the context of engineering it is generally accepted as the commercialisation of ideas that are the result of creative thought. » (2008, p. 2).

Partout dans le monde, les organisations publiques et privées font de l'innovation la pierre angulaire de leur développement économique stratégique (Chesbrough & Appelyard, 2007; Sawyer, 2012). D'ailleurs, depuis 2007 aux États-Unis, les industries créatives représentent 11% du PIB (Produit Intérieur Brut) (Gantchev, 2007). Certains experts de l'innovation parlent du « open innovation era »: « Firms that can harness outside ideas to advance their own businesses while leveraging their internal ideas outside their current operations will likely thrive in this new era of open innovation. » (Chesbrough, 2003, p. 41). L'Organisation des Nations-Unies (ONU) a publié un rapport qui explique et promeut la valeur d'une économie créative au cœur de l'économie mondiale de l'avenir (CNUCED, 2008). Selon cette dernière, il existe des preuves empiriques que les organisations créatives participent de manière dynamique au commerce mondial même si la majorité des pays en voie de développement ne sont pas encore en mesure de participer à leur plein potentiel. De plus, l'Union Européenne a nommé l'année 2009 comme « l'année européenne de la créativité et de l'innovation » (2009, p. 1). La même année, trois agences de financement canadiennes de la recherche (Conseil de recherches en sciences humaines, Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada, Institut de recherche en santé du Canada) ont publié les recommandations du Gouvernement du Canada quant aux futures demandes de financement : « Research excellence and creativity are now understood as key assets for national success and international competitiveness. » (2009, p. 1). Encore une fois, la créativité tient une place prépondérante.

Dans son ouvrage « Creativity in Engineering: Novel Solutions to Complex Problems », Cropley réserve le deuxième chapitre à l'explication du lien qui existe entre l'ingénierie et la créativité. Il présente une figure pour décrire ce qui, selon lui, illustre le besoin d'être créatifs pour les ingénieurs: « New technologies – solutions – and new problems are linked together in a mutually beneficial way, with one or the other driven by change » (Cropley, 2015, p. 19). Il parle de changements, tels que la modification du climat ou l'évolution du mode de vie. Ainsi, par leurs rôles et leurs fonctions au sein des organisations, les ingénieurs sont aux premières loges du processus de création et de l'innovation parce qu'on s'attend à ce qu'ils apportent une réponse (possiblement technologique) à ces différents changements. « The link between creativity and engineering is clear. Where new customer demands can be met by new technological solutions, we need engineers who are equipped – both technically and creatively – to generate those solutions ». (Cropley, 2015, p. 25)

Dans cet ordre d'idées, l'Académie nationale de l'ingénierie des États-Unis (NAE : National Academy of Engineering) et la Société américaine de génie mécanique (ASME : American Socitety of Mechanical Enginreering) ainsi que le Bureau canadien d'agrément des programmes de génie (BCAPG) mettent l'accent sur la nécessité de former des ingénieurs créatifs (Engineers Canada, 2014; National Academy of Engineering, 2004; Warrington, 2010). En 2004 la NAE a publié sa vision de l'ingénieur de 2020. Elle a présenté plusieurs compétences non techniques (*soft skills*) importantes que les ingénieurs devraient maîtriser telles que le leadership, la communication et la créativité (National Academy of Engineering, 2004). En 2010, Warrington a publié un rapport en collaboration avec l'ASME mentionnant que les futurs ingénieurs auront besoin d'être plus outillés en matière de communication, leadership et créativité (Warrington, 2010). Il y déplorait que ces sujets ne fassent pas plus concrètement partie des programmes de formation des ingénieurs. La même année, le BCAPG du Canada a demandé aux facultés d'ingénierie d'intégrer le développement de 12 « qualités » dans leur curriculum (Engineers Canada, 2014). Deux de ces qualités réfèrent à la créativité, à savoir la conception et l'utilisation d'outils d'ingénierie. La conception est définie comme la capacité de concevoir des solutions, des systèmes, des composants et des processus en tenant des contraintes. L'utilisation d'outils d'ingénierie renvoie à la capacité de créer, d'utiliser et d'adapter des techniques, des ressources et des outils (Engineers Canada, 2014, pp. 13-14). Les notions de nouveauté et d'adéquation (*appropriateness*) sous-entendues dans les descriptions de ces qualités d'ingénieur nous ramènent aux définitions actuelles de la créativité.

1.1 Le besoin de formation des ingénieurs

Les recommandations provenant d'organismes très importants pour les programmes d'ingénierie poussent les responsables de programmes et les professeurs à proposer des activités pédagogiques qui visent à développer la créativité des futurs ingénieurs. Or, la créativité a longtemps été perçue comme un don inné ou une capacité naturelle de certaines personnes à avoir des idées différentes. Cette perspective laisse peu de place à l'apprentissage de la créativité. Par ailleurs, la créativité est un concept vaste et complexe qui a fait l'objet d'une multitude d'études dans de nombreuses disciplines comme la psychologie, le design et l'éducation. Ainsi, des connaissances sont disponibles et peuvent être mises à profit lors de la conception d'un programme de formation axé sur l'apprentissage de la créativité.

Nous avons répertorié dans la littérature cinq catégories d'interventions pédagogiques visant à améliorer la créativité des apprenants. Dans la première catégorie se trouvent certains programmes universitaires comprenant des cours spécifiques à ce sujet comme à l'École Nationale Supérieure en Génie des Systèmes et de l'Innovation (ENSGSI, France) et à *Oakland University*[4]. Dans la deuxième catégorie, principalement aux États-Unis, on trouve des programmes menant à des diplômes en créativité (ex., *International Center for Studies in*

---

[4] http://www.ensgsi.univ-lorraine.fr/formations/titre-b2/,
http://catalog.oakland.edu/preview_course_nopop.php?catoid=11&coid=9021

Creativity à Buffalo State University, *Edward de Bono Institute for the Design and development of Thinking* à University of Malta, *Texas A&M University*)[5]. De plus, nous avons observé de nombreuses formations indépendantes qui varient fortement entre elles en termes de durée, de contenus et de méthodes (ex. : Polytechnique Montréal, HEC Montréal, *The Thinking Business* au Royaume-Uni)[6]. Une quatrième catégorie d'interventions pédagogiques s'adresse plus particulièrement aux professionnels puisqu'il s'agit de compagnies privées proposant leurs services pour accompagner leurs clients dans des démarches créatives (ex., *Idea Connection* (British Colombia, Canada), Zins Beauchesne and Associates (Québec, Canada), *Good Morning Creativity* (Paris, France))[7].

Finalement, la cinquième catégorie concerne l'intégration de la créativité dans divers cours. À notre connaissance, cela se traduit principalement par le fait d'encourager les étudiants à faire preuve de créativité lors de la résolution de problèmes ou comprend des activités considérées comme sous-jacentes à des stratégies pédagogiques telles que l'apprentissage par projet (Mills & Treagust, 2003; Savage, Chen, & Vanasupa, 2007; Zhou, 2012).

La littérature sur ce sujet nous amène à penser qu'il est temps de dépasser le paradigme traditionnel de la demande de faire preuve de créativité lors de la réalisation d'un projet et de considérer la créativité comme un objet d'apprentissage en soi. Les travaux extensifs des psychologues américains Guilford dans les années 50 (Guilford, 1967) et Torrance dans les années 70 (Torrance, 2004) ont permis de considérer la créativité comme une compétence pouvant être développée, donc enseignée dans des programmes de formation (Fasko, 2000-2001). Plus récemment, des études en sciences cognitives ont mis en évidence que certaines fonctions relevant de l'intelligence humaine soutiennent le processus créatif (Anolli, Antonietti, Crisafulli, & Cantoia, 2001; Avitia & Kaufman, 2014; Nijstad, Dreu, Rietzschel, & Baas, 2010; Smith & Ward, 2012).

---

[5] http://creativity.buffalostate.edu/, https://www.um.edu.mt/create, http://epsy.tamu.edu/degrees-and-programs/creative-studies-minor

[6] http://www.polymtl.ca/etudes/cours/details.php?sigle=CAP7010%20%20%20, https://mosaic.hec.ca/ecoledete/, https://www.thethinkingbusiness.com/

[7] https://www.ideaconnection.com/, http://www.zba.ca/, http://www.goodmorningcreativity.com/fr/

Les sciences cognitives nous apprennent que pour fonctionner de manière efficace dans la vie, les individus développent des cadres (*frames, clusters*) qui sont des structures de connaissances leur permettant de prendre des raccourcis cognitifs (Ness, 2011). En d'autres mots, pour être en mesure de gérer toute l'information disponible, ils construisent des regroupements pour stocker les divers concepts dans leur mémoire. Au cours de la vie, des milliers de ces cadres sont créés, que ce soit les lettres de l'alphabet, les chiffres, les fruits, les couleurs, les vêtements, les moyens de transports, etc. Tout ce qui est perçu et appris est classé et stocké selon ses caractéristiques, ce qui permettra de faire appel à ces informations lorsque nécessaire. L'éducation dans son ensemble sert à la construction de ces références, des liens qui les unissent et de leur utilisation. Or, une des expressions les plus utilisées dans le domaine de la créativité est « penser en dehors du cadre » (*think outside the box*). Plusieurs programmes de formation à la créativité offerts aux individus et aux entreprises reposent sur ce principe. Selon celui-ci, être créatif voudrait dire sortir des cadres habituels de pensée (*frames*) pour faire preuve d'originalité et de nouveauté qui sont les principales caractéristiques des idées créatives.

1.2 Génie, éducation, créativité et sciences cognitives

De récents travaux sur les stratégies cognitives reliées à la créativité (Charyton, 2014; Gabora, 2010; Gabora & Saab, 2011; Knoll, 2010; Nijstad et al., 2010; Schilling, 2005) offrent des pistes intéressantes pour pallier les lacunes de formation en matière de développement de la créativité. Certains de ces travaux révèlent que des activités d'apprentissage permettant l'explicitation des processus cognitifs sous-jacents à la créativité (métacognition) et leur mise en œuvre consciente dans des exercices appropriés pourraient améliorer la génération de nouvelles idées (Sawyer, 2013). La manière d'opérationnaliser cette mise en œuvre demeure toutefois très peu documentée.

Nous croyons pertinent de faire un parallèle entre l'apprentissage menant au développement des capacités cognitives supportant la créativité et l'apprentissage menant au développement des capacités cognitives supportant d'autres habiletés. Qu'il s'agisse de musique, de danse, de football, de théâtre ou d'écriture de texte, il est essentiel de bénéficier de conseils d'experts et de passer des heures à pratiquer pour atteindre un bon niveau de performance. Des activités élémentaires doivent être effectuées pour développer certaines capacités de base (cognitives et physiques). Par exemple, faire des gammes en musique, faire des ports de bras en danse, réaliser des passes au football, produire des effets de style au théâtre, réussir des associations d'idées en écriture, etc. Bref, l'apprentissage d'une discipline et la maîtrise de compétences se développent forcément par la compréhension et la pratique des activités de base de celle-ci.

Dans le cas particulier de la créativité, les capacités de base à développer sont peu documentées. Les écrits à ce sujet, qu'ils soient théoriques (Avitia & Kaufman, 2014; Nusbaum & Silvia, 2011) ou pratiques (Clapham, 1997; Mougenot, 2008; Shah, Smith, Vargas-Hernandez, Gerkens, & Wulan, 2003) mettent en évidence les concepts de pensée divergente et de pensée convergente. L'utilisation des deux types de pensée séparément et de manière conjuguée favorise les résultats créatifs (Cropley, 2016). Depuis 60 ans, les chercheurs du domaine de la créativité s'entendent pour placer ces concepts à la base de la créativité. Pour créer, les individus doivent pouvoir diverger dans leurs réflexions tout comme pouvoir converger vers une solution adéquate, répondant à des contraintes. À notre avis, Barack et al. (2002, p. 230) proposent les définitions les plus claires des deux types de pensée :

> «*Divergent thinking is concerned with the location and review of ideas and solutions in many varied directions with maximal openness and the avoidance of premature judgement. […] Convergent thinking, uses mainly knowledge, mathematical-logical laws analysis and judgement to find the most suitable solution.* »

Il s'agit ici de la vision la plus répandue de ces concepts. Toutefois, les écrits de Gabora proposent une vision différente, se basant sur un point de vue physiologique et cognitif. Cette vision réfère au fait que la mémoire emmagasine l'information selon les contextes. Selon Gabora, la pensée divergente serait de nature « associative », c'est-à-dire, qu'elle serait reliée aux contextes, plutôt qu'une opération de recherche aléatoire dans l'ensemble de la mémoire. Ainsi, l'association devient l'élément central du processus de pensée divergente plutôt que la quantité d'idées (Gabora, 2017 (À paraître)).

De nombreuses disciplines incluant le génie, le design ou l'ergonomie, pourraient bénéficier des études portant sur les stratégies cognitives reliées plus spécifiquement à la génération d'idées. Ainsi, pour de nombreux ingénieurs, designers industriels et ergonomes, il serait possible non seulement d'ajouter une corde à leur arc mais d'approfondir la maîtrise de leur discipline. Des résultats de recherche en sciences cognitives soutiennent qu'une approche métacognitive pourrait permettre d'atteindre un degré plus élevé de maîtrise des connaissances (Daly, Mosyjowski, & Seifert, 2014; Hargrove & Nietfeld, 2015; Jaušovec, 2011).

Appuyée par la littérature, nous sommes d'avis qu'un grand potentiel d'amélioration de la formation à la créativité réside à la jonction des sciences cognitives et de l'éducation. Des avancées théoriques concernant les stratégies cognitives associées à la créativité sont faites par les chercheurs mais semblent peu exploitées par les éducateurs. Pour cette raison, les travaux présentés dans cette thèse de doctorat visent entre autres l'utilisation des connaissances en sciences cognitives pour conceptualiser et offrir à des étudiants en génie un cours spécifique à la créativité et en évaluer l'impact.

1.3 Structure de la thèse

Cette thèse compte huit chapitres dont trois sont des articles soumis à des revues. La structure générale et la contribution de chaque chapitre pour atteindre les objectifs de recherche sont abordées dans le présent chapitre. La revue de littérature au chapitre 2 porte sur les définitions et modèles de la créativité, les aspects cognitifs de la créativité, les principales formes d'enseignement de la créativité ainsi que la mesure de cette dernière. Les six objectifs de recherche sont présentés à la fin de ce chapitre.

Les chapitres 3, 4, 5 présentent les trois articles qui ont été produits dans le cadre de la thèse. Le chapitre 3 (article 1) décrit une étude méthodologique sur le CEDA (*Creative Engineering Design Assessment*) visant à clarifier le processus d'évaluation et à améliorer la fidélité de ce test. Le chapitre 4 (article 2) présente une étude empirique sur la créativité basée sur l'analyse de deux expériences et un test soit le rappel et la représentation externe des informations stockées en mémoire à partir de différents stimuli, la manière de résoudre une analogie, ainsi que la mesure de la performance créative. Le chapitre 5 (article 3) porte sur la conception, la mise en œuvre et l'évaluation de l'impact d'un cours universitaire de 45 heures sur la créativité donné à trois groupes d'étudiants en ingénierie.

Le chapitre 6 présente une discussion des résultats par rapport aux connaissances actuelles, et, le chapitre 7 présente une conclusion générale ainsi que des pistes de recherche pour des projets futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA CRÉATIVITÉ

Ce chapitre présente plusieurs aspects de la créativité qui s'avèrent pertinents pour nos travaux. Cela comprend certains fondements ainsi que les facteurs et composantes qui influent sur le processus créatif, le développement de la créativité et la formation des ingénieurs sur ce sujet, enfin, l'évaluation de la créativité. À la lumière de ces connaissances, nous avons élaboré un cadre théorique devant servir de fondement à nos travaux.

2.1 Fondements

Cette section vise à établir les bases théoriques essentielles à la compréhension de nos recherches. D'abord, nous examinons plusieurs définitions de la créativité et différentes théories cognitives concernant le processus de l'idéation. Puis nous présentons un aperçu du modèle de l'intelligence (CHC) proposé par trois chercheurs afin de placer le processus créatif dans une perspective cognitive. En dernier lieu, nous décrivons trois modèles de composantes de la créativité.

2.1.1 Définitions

La plupart des auteurs qui s'intéressent à la créativité en suggèrent une définition. Ces définitions reflètent différentes perspectives mais partagent plusieurs points communs. Certaines sont strictement liées au produit de la créativité alors que d'autres se rapportent aux stratégies cognitives[8] préconisées. Le tableau suivant présente plusieurs définitions de la créativité, selon les perspectives « produit » et « processus ».

[8] « Technique ou procédure intellectuelle choisie par une personne comme étant la plus propice à la résolution d'un problème. » (Legendre, 2005)

Tableau 2-1 – Définitions de la créativité

Perspective	Définitions	Auteurs
Produit	« Creativity is typically defined as the ability to produce work that is novel (i.e., original, unexpected), high in quality, and appropriate (i.e., useful, meets task constraints). »	Sternberg, Lubart, Kaufman, & Pretz (2005)
	« Creativity is the interaction among aptitude, process, and environment by which an individual or group produces a perceptible product that is both novel and useful as defined within a social context. »	Plucker et al. (2004)
	« A note about definitions: Although the word "creativity" has been used to mean many different things, in recent years definitions of creativity seem to be cohering around an emphasis on two main requirements - novelty and appropriateness. »	Amabile, 1996; Baer, 1993; Sternberg & Lubart (1999)
Processus	« Creative ideas or solutions must be both original and adapted to the context. »	Lubart & Sternberg, 1995
	« The sudden interlocking of two previously unrelated skills, or matrices of thought. »	Koestler, 1975, p. 121
	« Creativity is the result of a relationship between working memory and long-term memory, based on a process of “selective emphasis”. »	Koestler, 1975
	« The activation and recombination in a new way of previous knowledge elements in order to generate new properties based on the previous ones. »	Ward et al. (1997); Wilkenfeld and Ward, (2001)

Une combinaison des deux perspectives nous a permis de formuler la définition suivante qui apparaît satisfaisante dans le contexte d’ingénierie auquel nous nous intéressons plus particulièrement : *La créativité est l’habileté de produire un artéfact nouveau, original et utile qui répond à un besoin identifiable, en recombinant d’une manière différente des concepts déjà intégrés.*

Dans le cadre de ce projet doctoral, l’expression « capacités cognitives à la base de la créativité » renvoie à la traduction du mot « *abilities* »[9], tel qu’utilisé dans des travaux fondamentaux sur l’intelligence et la psychométrie de l’intelligence (Carroll, 1993; Newton & McGrew, 2010). Dans ces travaux, le terme capacité cognitive réfère à toute ressource cognitive utilisée pour accomplir une tâche cognitive. Carroll (1993, p. 9) précise qu’une tâche cognitive constitue « any task in which correct or appropriate processing of mental information is critical to successful

[9] http://www.larousse.fr/dictionnaires/anglais-francais/ability/560668?q=abilities Consulté le 26 novembre 2013

performance ». Il propose un modèle de l'intelligence, dans lequel se trouve une nomenclature des éléments de l'intelligence qui se décline en trois niveaux (*stratum*), à savoir la capacité globale, les capacités générales et les capacités spécifiques. Cette nomenclature est utilisée dans cette thèse pour référer aux capacités cognitives servant de fondements à la créativité.

2.1.2 Théories cognitives de l'idéation

Comment apprendre à être créatif ? Cette question a poussé plusieurs chercheurs à approfondir leur compréhension de la créativité et à construire des modèles qui permettraient de l'expliquer. Lubart et Nijstad présentent un bref historique de l'évolution de ces modèles (Lubart, 2010; Nijstad et al., 2010). Le « *Creative Cognitive Approach* » de Ward, Finke et Smith et le « *Geneplore model*[10]» de Finke sont certainement parmi les plus connus. Un modèle initial à quatre phases a été proposé par le sociologue anglais Wallas en 1926, auquel Guilford a ajouté trois phases en 1950, suivi d'une version modifiée comportant de multiples sous-processus. De ces travaux, les chercheurs actuels retiennent que la créativité constitue un phénomène comportant plusieurs étapes : préparation (ex. : identification du problème), génération d'idées (idéation), incubation, élaboration, validation et communication. Chacune de ces étapes fait appel à des processus cognitifs qui lui sont propres, qu'il faut étudier indépendamment les uns des autres mais aussi de manière intégrée.

Le processus créatif s'apparente à celui d'une résolution de problèmes (Adams, Kaczmarczyk, Picton, & Demian, 2007; Barack & Goffer, 2002; Fontenot, 1993; Mumford, Baughman, Maher, Costanza, & Supinski, 1997; Richards, 1990). Les activités cognitives sous-jacentes correspondent à chaque étape de la résolution de problème et sont habituellement étudiées et maîtrisées dans le cadre des études en génie, notamment à travers divers projets proposés aux étudiants au cours du curriculum. Toutefois, même si chacune des étapes requiert une part de créativité, l'étape d'idéation ressort comme étant celle qui demande le plus d'attention. La consigne de « générer des idées » est loin d'être évidente à réaliser pour les enseignants et les étudiants ; elle comporte à elle seule de nombreux défis. Par conséquent, plusieurs chercheurs se

---

[10] **Gene**rate/Ex**plore** Model

sont intéressés plus particulièrement à cette étape du processus créatif pour mieux la comprendre d'un point de vue cognitif.

Les études sur le caractère cognitif de l'idéation ont surtout été réalisées en psychologie (Rietzschel, Nijstad, & Stroebe, 2007; Ward, Patterson, & Sifonis, 2004) et en design (Hernandez, Shah, & Smith, 2010; Shah, Smith, et al., 2003). Comme le design partage certaines similitudes avec l'ingénierie, on peut vraisemblablement transférer d'une à l'autre une très grande partie des résultats de recherche obtenus dans ces deux discipline (Shah, Millsap, Woodward, & Smith, 2012).

Enfin, il paraît logique de penser que l'encodage, à savoir la façon dont l'information est encodée dans le cerveau lors de l'apprentissage, pourrait être lié à la performance créative. Les travaux de Beghetto & Kaufman (2007) ont mis en évidence que toute l'information qui passe par l'un des cinq sens est stockée dans le cerveau après avoir subi un certain traitement, une transformation personnalisée (Beghetto & Kaufman, 2007). En effet, chaque individu encode ou classe les informations selon ses expériences, ses perceptions ou le moment. Cet encodage réfère principalement aux liens entre les informations, entre les concepts. Étant donné le caractère combinatoire des processus cognitifs de créativité, la façon dont les idées sont organisées dans le cerveau a vraisemblablement une influence sur les capacités de faire des liens entre celles-ci. Des réseaux de connections riches en liens entre les informations stockées permettraient de relier plus facilement ces informations lors d'un processus de créativité. Comme la créativité repose principalement sur la capacité de faire des liens entre des domaines éloignés (Bonnardel & Marmèche, 2005), la présence d'un réseau comportant des relations variées entre les concepts pourrait être liée à l'émergence de liens originaux. Dans sa recherche, Bonnardel (2009) démontre que les concepteurs experts sont meilleurs pour effectuer ce genre de liens que les novices. Par conséquent, cela s'apprend, se développe ; on peut donc envisager d'entraîner les gens à être le plus conscients possible de ce processus cognitif et à devenir ainsi plus efficaces, plus rapidement.

De son côté, l'auteure Liane Gabora a élaboré le « *Honing Theory* ». Selon cette théorie, la pensée créative découle d'associations causées par des chevauchements d'ensembles de cellules neurales responsables de l'encodage des expériences dans la mémoire (Gabora, 2010; Gabora & Saab, 2011). D'un point de vue cognitif, lors d'un processus créatif, un individu peaufine itérativement des idées en fonction de sa vision et de ses perceptions du monde extérieur. À la suite d'un tel processus, sa vision du monde sera transformée en raison des nouvelles associations créées.

Une branche de cette théorie décrit comment le processus de construction des liens se produit dans le cerveau. Deux stratégies cognitives permettent le traitement d'une analogie, soit la cartographie structurée ou l'actualisation du potentiel. Pour la première, l'individu compare un élément source à un élément cible pour déterminer s'ils peuvent former une analogie acceptable. Les différentes caractéristiques de la source sont comparées deux à deux avec celles de la cible pour confirmer ou infirmer la relation. S'il n'y a pas d'analogie, l'individu passe à l'élément source suivant. Pour la deuxième stratégie, l'individu considère simultanément plusieurs éléments sources en lien avec la cible, pour voir s'ils ont le potentiel d'être une solution. Au fur et à mesure que les caractéristiques sont vérifiées, les éléments sources ne convenant pas sont éliminés. Les deux stratégies conduisent normalement au même résultat. Étant donné que la créativité repose souvent, sinon toujours, sur la capacité des individus de faire des liens (ex. : analogie, opposition) entre plusieurs concepts, il paraît donc raisonnable de proposer que l'état d'esprit « actualisation du potentiel » soit en lien avec la démonstration de créativité. L'auteure résume cette vision en écrivant : « *But perhaps the strongest reason to suppose that creativity involves, in the general case, not selection amongst multiple ideas but the honing of a half-baked idea, is that it is consistent with the structure of associative memory.* » (Gabora & Saab, 2011, p. 1).

Aussi, Gabora introduit la notion de *neurds* (Gabora, 2010), ces idées ou concepts qui sont éloignés du sujet d'intérêt mais qui, selon le contexte, peuvent et devraient être sollicités lors du processus de réflexion d'une personne. L'auteure suggère qu'il serait intéressant de stimuler ces *neurds* plus souvent et plus facilement, pour être en mesure de connecter des idées plus lointaines, et donc potentiellement plus créatives.

Bonnardel a quant à elle développé le modèle A-GC pour Analogie et Gestion des contraintes (Bonnardel, 2006). Elle associe les notions de divergence à celles de traitement des analogies (faire des liens avec d'autres domaines) et les notions de convergence à celles de gestion de contraintes. Elle souligne la nécessité de faire des liens pour avoir un comportement créatif. Elle décrit la notion d'association d'idées plus précisément lorsqu'elle parle des combinaisons intra ou inter-domaines (Bonnardel & Marmèche, 2005). Ses études sur la créativité et le design en situation contrôlée ont permis d'investiguer le phénomène de création de liens entre les concepts.

Pour sa part, Knoll (2010) propose trois catégories de processus cognitifs reliés à l'idéation selon qu'ils soient associés à un changement de perspective (*CoP*) ou non. Il décrit ces processus étant les directions cognitives à prendre pour produire des idées créatives : provocation, aléatoire, analogie. Sa contribution est intéressante sur le plan de l'illustration des processus cognitifs reliés à l'idéation qui prend la forme de cartes conceptuelles. À titre d'exemple de la perspective « provocation », la Figure 2-1 illustre la manière dont cet auteur conçoit la construction de liens lors de la recherche d'idées nouvelles.

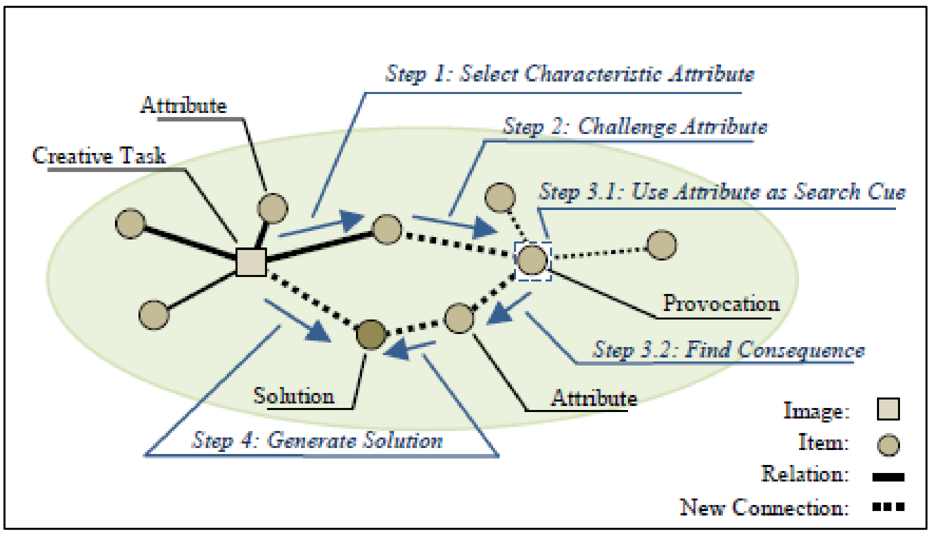


Figure 2-1 - Modèle cognitif (Provocation) (Knoll, 2010)

Un autre aspect intéressant du modèle de Knoll est qu'il propose une approche concrète pour stimuler la créativité au sein de groupes de travail collaboratif. Bien qu'il s'agisse d'une application concrète, les étapes d'opération sont nombreuses et comportent des instructions qui manquent de spécifications, ce qui rend son utilisation impossible en l'absence d'un spécialiste de l'approche. (Knoll, 2010, p. 10).

Deux autres modèles théoriques ont été proposés pour expliciter le phénomène de l'idéation. Le modèle SIAM propose une explication du processus d'idéation (Nijstad & Stroebe, 2006) alors que le « *dual pathway* » s'avère un modèle plus général portant sur le processus de créativité (Nijstad et al., 2010). Le modèle SIAM, présenté à la Figure 2-2 (Liikkanen & Perttula, 2010, p. 547), représente de manière très technique le cheminement cognitif lors d'une démarche de recherche d'idées. À notre avis, il illustre clairement comment, à partir d'un problème à résoudre, des idées émergent de la mémoire, sont sélectionnées puis combinées de manière à créer de nouvelles idées en vue de résoudre le problème.

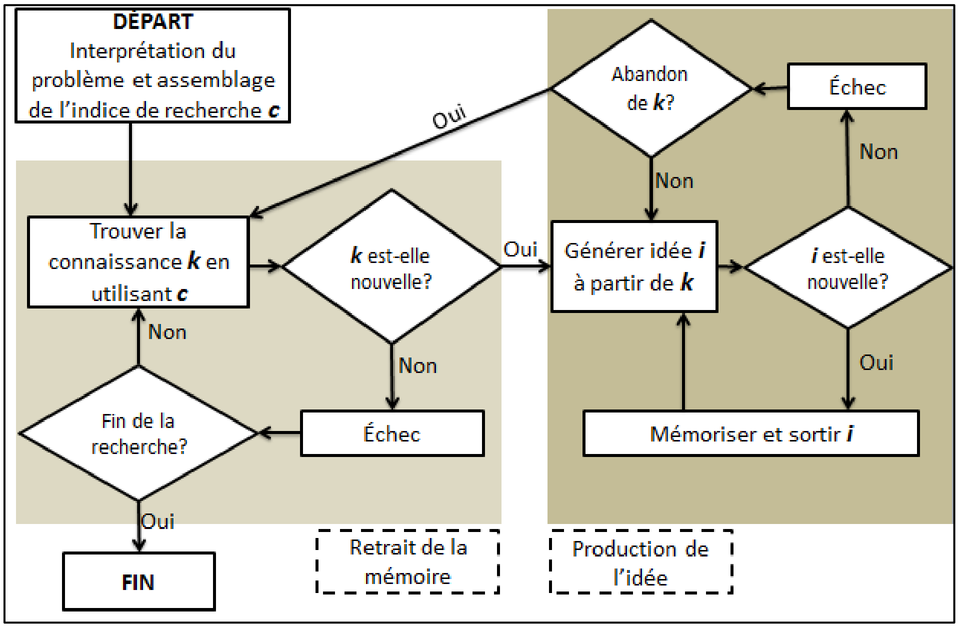


Figure 2-2 – Modèle SIAM (traduction libre) (Liikkanen & Perttula, 2010)

Nijstad introduit le concept de « *dual pathway* » qui réfère à une double voie, soit une voie de flexibilité et une voie de persistance. Selon ce concept, il y aurait deux façons d'être créatif : en couvrant plusieurs terrains de recherche (flexibilité) ou en creusant au sein d'un même domaine (persistance) (Nijstad et al., 2010).

Finalement, Schilling témoigne de son originalité en tentant d'expliquer le processus d'idéation de manière mathématique à l'aide de la théorie de l'effet du petit monde (*small world effect*). Il explique, dans le même sens que la théorie de Milgram sur les six degrés de séparation, que des idées connectées de manière aléatoire entraîneraient de courts trajets même dans un réseau étendu (grappes) (Figure 2-3). Il s'agit d'une vision très avant-gardiste, encore peu utilisée mais qui démontre bien la diversité des avenues étudiées dans le domaine de la créativité (Schilling, 2005).

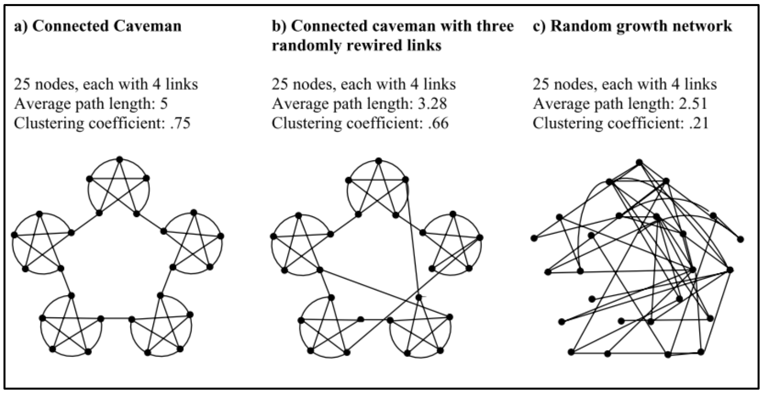


Figure 2-3 – Principes des longueurs de trajets et de formation de grappes

Toujours dans l'objectif d'étudier le processus créatif dans une perspective cognitive, nous avons consulté la littérature sur les modèles de l'intelligence humaine.

2.1.3 Modèle CHC – La créativité et l'intelligence

Il appert que certaines capacités cognitives sont directement reliées à la créativité. Il ne s'agit pas de capacités cognitives restreintes à la créativité mais de capacités particulièrement sollicitées lors d'un processus créatif. Le modèle Cattel-Horn-Carroll (CHC) (Newton & McGrew, 2010) propose une organisation des capacités cognitives pouvant soutenir l'exploration et l'étude de capacités cognitives supportant la créativité.

Ce modèle CHC regroupe une centaine de capacités cognitives classées selon trois niveaux (*stratum I-II-III*) (Annexe 1). Selon les auteurs, il s'agit de diverses facettes de l'intelligence modélisées sous forme de capacités cognitives. La Figure 2-4 illustre l'organisation générale du modèle. Fortement appuyé par la communauté scientifique (McGrew, 2009; Newton & McGrew, 2010), le modèle CHC hiérarchise les capacités cognitives répertoriées. Cet outil de modélisation a été conçu principalement dans l'objectif de faciliter la mesure des diverses capacités cognitives des individus.

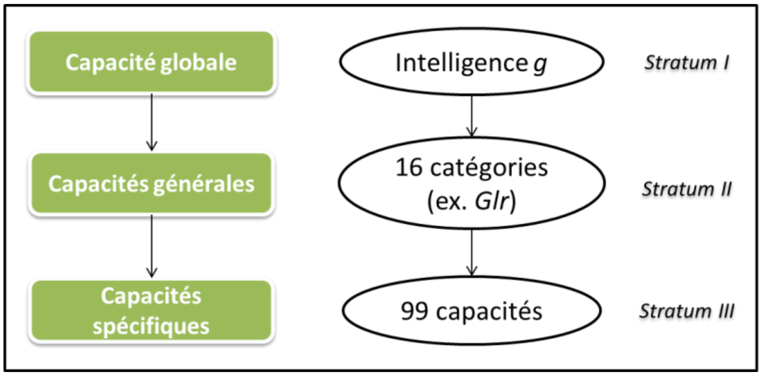


Figure 2-4 – Schématisation du modèle CHC

Le Tableau 2-2 présente les 16 catégories de capacités générales proposées par le modèle CHC. Selon le modèle, ces capacités rassemblent tout ce qui compose l'intelligence humaine.

Tableau 2-2 – Capacités générales du modèle CHC (Newton & McGrew, 2010)

Modèle CHC – 16 capacités générales	
*Fluid reasoning (Gf)**	*Processing Speed (Gs)*
Comprehension-Knowledge (Gc)	*Reaction and decision speed (Gt)*
General (domain-specific) knowledge (Gkn)	*Psychomotor speed (Gps)*
Visual processing (Gv)	*Quantitative knowledge (Gq)*
Tactile abilities (Gh)	*Kinesthetic abilities (Gk)*
Auditory processing (Ga)	*Reading and writing (Grw)*
Short-term memory (Gsm)	*Psychomotor abilities (Gp)*
Long-term storage and retrieval (Glr)	*Olfactory abilities (Go)*

**G : Intelligence*

Trois des 16 capacités générales de ce modèle ont été identifiées comme étant particulièrement reliées à la créativité, soit le « *fluid reasoning* » (Gf), « *comprehension-knowledge* » (Gc), et « *long-term storage and retrieval* » (Glr) (Avitia & Kaufman, 2014). L'approche cognitive utilisée pour la conceptualisation et la réalisation du cours sur la créativité dont il est question dans cette thèse s'inspire de ces dernières capacités générales du modèle CHC.

2.1.4 Facteurs d'influence et modèles de composantes de la créativité

Parmi le nombre impressionnant d'études qui traitent de la créativité, plusieurs visent à décrire des facteurs qui l'influencent. Les travaux de Sternberg (2006b) sont régulièrement cités. Ce psychologue américain a publié plus de 200 livres sur l'intelligence, l'intelligence créative et la créativité. Le modèle de Sternberg, un des plus connus et des plus utilisés dans le domaine de la psychologie cognitive, propose six facteurs qui influent sur la créativité : le style de pensée, la motivation intrinsèque, la personnalité, l'expertise (connaissances), les habiletés intellectuelles et l'environnement. Un résumé du modèle est illustré à la Figure 2-5. Selon son auteur, l'optimisation de ces six facteurs se trouve à la confluence de ces derniers.

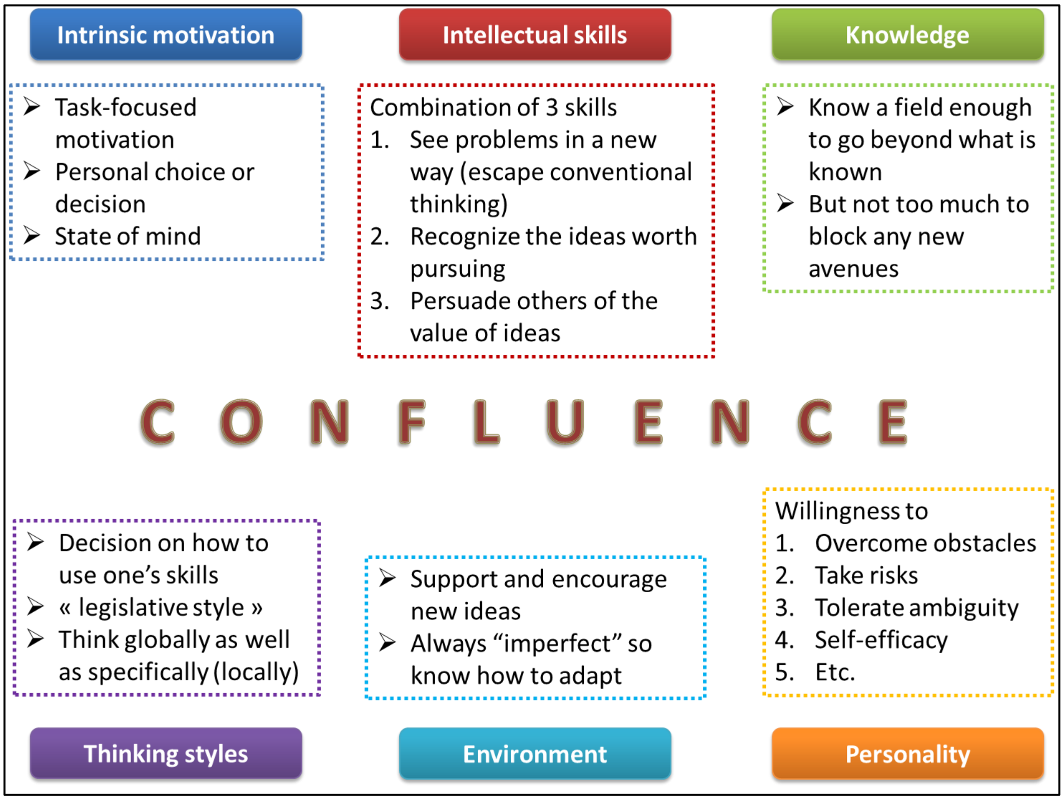


Figure 2-5 – Résumé du modèle de Sternberg

D'autres auteurs ont plutôt proposé des modèles de composantes de la créativité (*componential model*). Malgré une nomenclature quelque peu différente (composantes vs facteurs), les éléments qui se trouvent dans ces modèles et dans ceux de Sternberg et d'autres sont tout à fait comparables et dans le même ordre d'idées. Par exemple, la connaissance apparaît comme une composante de la créativité pour certains et comme un facteur qui l'influence pour d'autres.

Cropley et Urban (2000) présentent un modèle plus détaillé que celui de Sternberg, qui englobe des composantes de la créativité d'un individu, d'une organisation et même d'une société (Figure 2-6). Le modèle est basé sur six composantes, chacune possédant des sous-composantes qui entrent en jeu dans le processus créatif, le tout étant intégré dans un cadre de conditions environnementales.

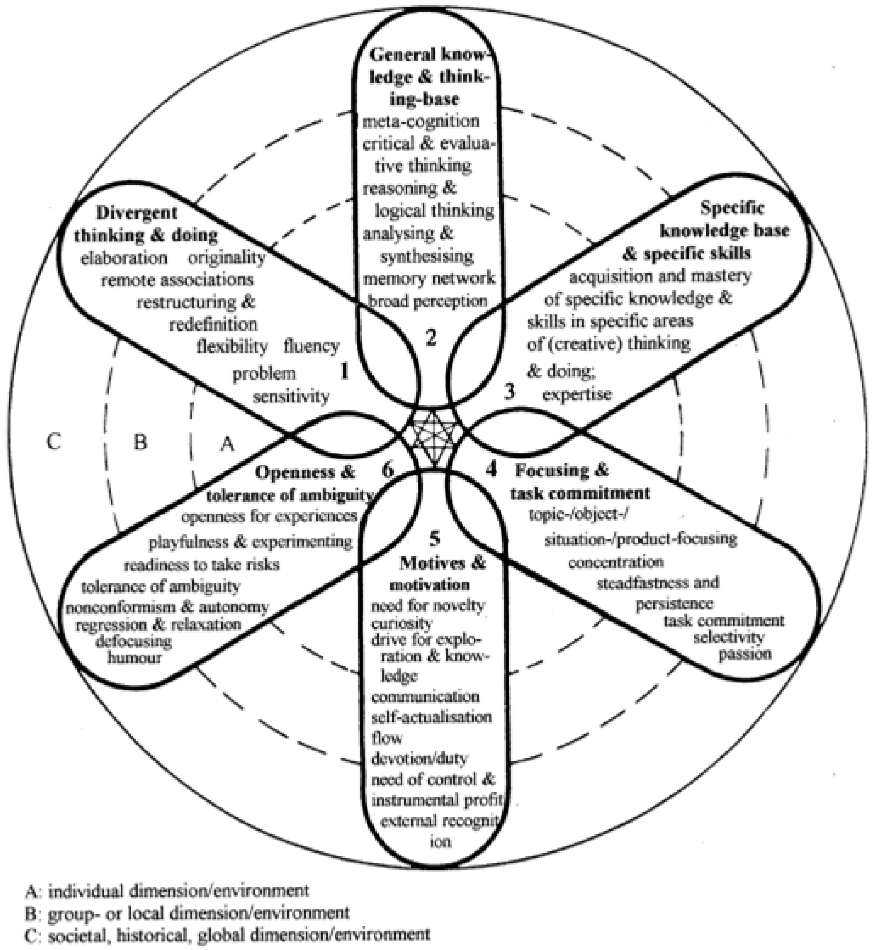


Figure 2-6 – Résumé du modèle de Cropley et Urban (Cropley & Urban, 2000, p. 20)

Amabile, une chercheure renommée dans le domaine, suggère un autre modèle qui propose des composantes, qui rassemblent des facteurs d’influence du processus créatif (Amabile, 2012). Dans la figure ci-dessous, nous avons ajouté les quatre rectangles du bas pour décrire plus en détails les différentes composantes évoquées par la prolifique chercheure du Harvard Business School.

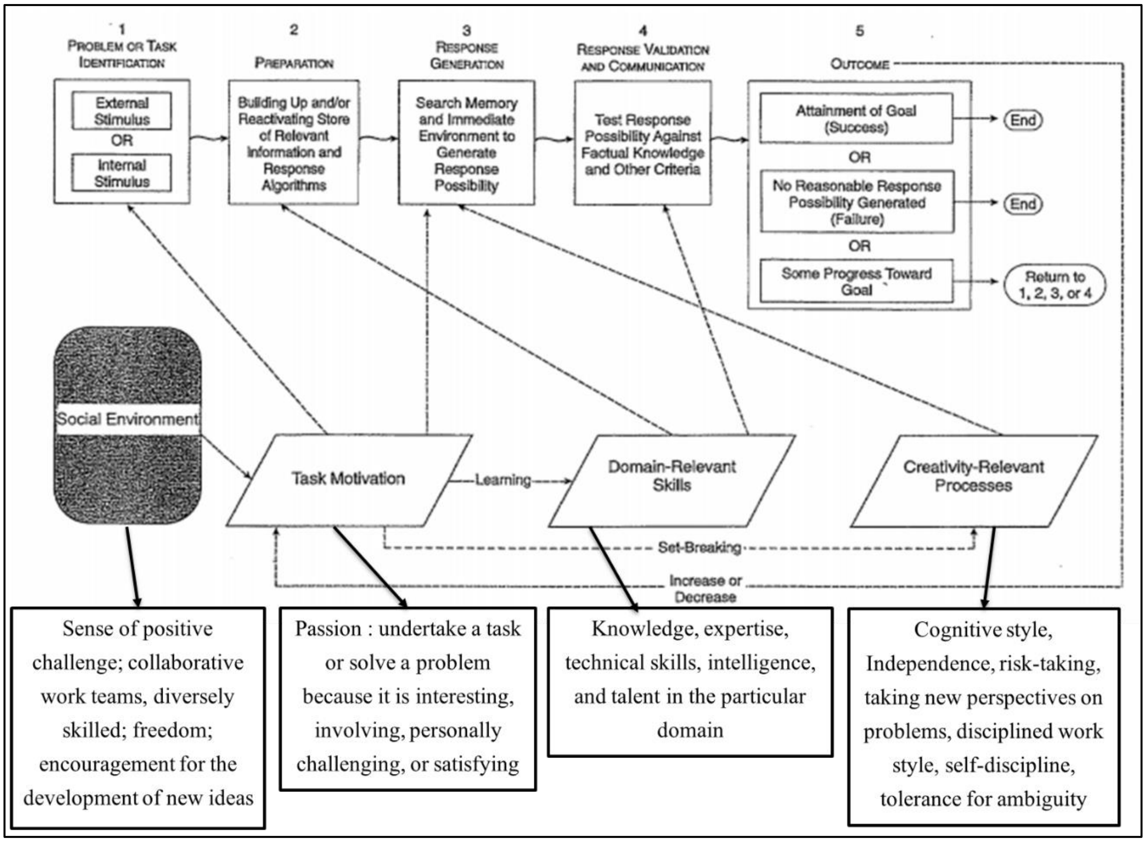


Figure 2-7 – Résumé adapté du « *componential theory of creativity* » d’Amabile (Amabile, 2012)

Finalement, à des fins de synthèse, nous avons regroupé en deux catégories les facteurs ou les composantes identifiés par les différents auteurs, soit les facteurs environnementaux et les facteurs personnels.

Facteurs environnementaux. Il s’agit de l’ensemble des facteurs externes à la personne qui influent sur le processus créatif. Il serait difficile d’établir une liste exhaustive et définitive de tous ces facteurs. Le climat d’ouverture des différents acteurs face aux activités de création, la convenance et la disponibilité des ressources pour réaliser les projets ainsi qu’une culture organisationnelle tournée vers la réalisation de projets créatifs ont déjà été documentés dans ce sens (*open innovation*) (Chesbrough, 2007). Les études mentionnent que la présence de tels éléments dans l’environnement d’une démarche créative favorise des résultats positifs. L’influence de facteurs environnementaux est d’ailleurs fréquemment décrite dans des études qui traitent de la réussite de projets en général au sein d’une organisation (Balachandra & Friar, 1997; Hobday, Boddington, & Grantham, 2011).

Facteurs personnels. L'autre catégorie de facteurs concerne l'individu lui-même. Comme le mentionne Sternberg (2006a), des traits de personnalité ont été identifiés comme directement liés à la capacité de créativité, notamment désirer surmonter des obstacles, être capable de tolérer l'ambiguïté, aimer prendre des risques, être autonome dans son travail (Court, 1998; Csikszentmihalyi, 1996). La motivation intrinsèque est un autre facteur faisant partie de la plupart des modèles. Bien que la motivation extrinsèque comme l'avancement professionnel ou la rémunération soit habituellement considérés comme un incitatif fort, si l'individu n'y voit pas un intérêt personnel, si le projet ne l'interpelle pas, il lui sera plus ardu de faire preuve de créativité (Fasko, 2000-2001).

À la lumière des différents modèles de créativité présentés ci-dessus et des nombreux facteurs ou composantes de créativité qui leur sont associés, nous avons construit un modèle qui retient les principaux facteurs et sert de fondation pour notre recherche (voir Figure 2-8). Ce modèle sera particulièrement utile lors de la conception du cours présenté dans la troisième étude.

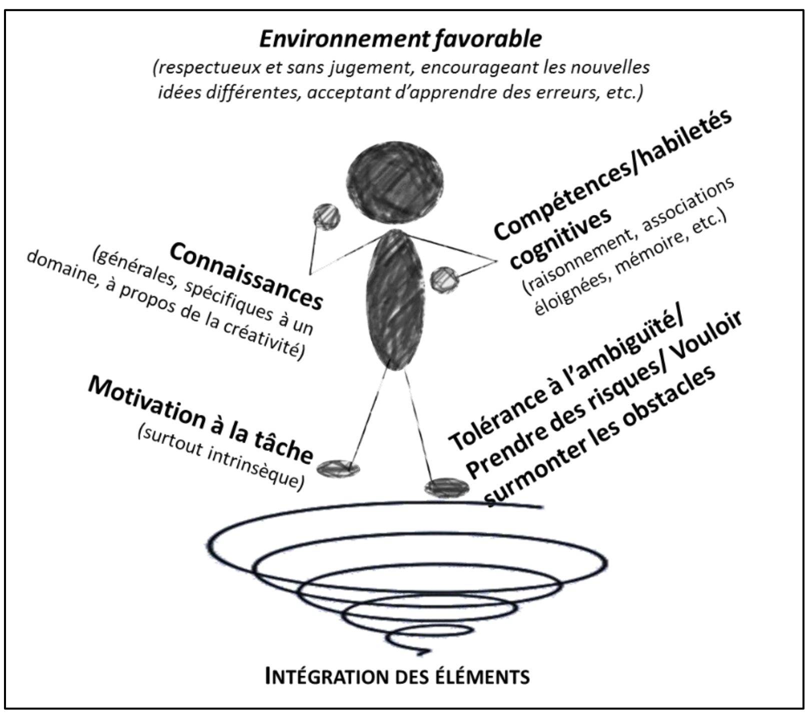


Figure 2-8 – Synthèse de facteurs qui influent sur la créativité

Un des facteurs personnels qui revient le plus souvent dans la littérature est certainement celui de l'expertise et des connaissances générales. Les écrits montrent que le fait d'être un expert de son domaine peut à la fois nuire au processus de création et le favoriser (Bateya, Chamorro-

Premuzicb, & Furnham, 2009; Litzinger, Lattuca, Hadgraft, & Newstetter, 2011; Sternberg, 2006a). Une maîtrise approfondie d'un domaine permet d'en bien connaître les enjeux et les mécanismes de fonctionnement (le cadre ou la « boîte »). Par contre, un expert peut trop bien connaître son cadre de référence pour être capable de penser en dehors de celui-ci, et ainsi éprouver des difficultés à faire preuve de créativité. Le raisonnement inverse peut s'appliquer à savoir que même si la naïveté laisse place à une grande liberté face aux enjeux et aux mécanismes de fonctionnement d'un domaine, il est difficile de sortir du cadre établi quand on n'en connait pas bien les caractéristiques. Un consensus émerge des écrits sur le fait que l'expertise doit être accompagnée d'un grand éventail de connaissances générales pour qu'une personne soit en mesure de faire des liens entre plusieurs domaines (Yeh, 2011), tel qu'illustré dans la Figure 2-9. Ainsi, la possibilité de faire des liens entre des connaissances de domaines différents demeure un atout pour la créativité (Bonnardel, 2006).

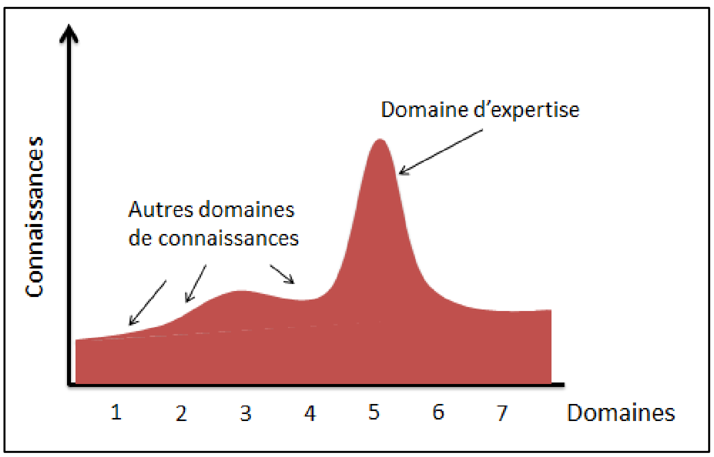


Figure 2-9 – Connaissances et domaines d'expertise

Dans la catégorie des facteurs personnels, nous allons plus particulièrement nous intéresser à certains processus cognitifs qui sont liés à la créativité. Par exemple, la métacognition désigne le fait de porter attention à ses propres processus cognitifs et de tenter de les comprendre. Prendre conscience des fonctions cognitives et des ressources utilisées pour atteindre un objectif ou effectuer une tâche, comme apprendre un poème ou faire une analogie, peuvent aider à transférer des connaissances d'un domaine à l'autre. Dissocier le processus de l'activité elle-même peut s'avérer avantageux pour répéter le processus dans un contexte différent. Comprendre et réaliser les étapes du processus de créativité de manière consciente et éclairée peuvent aider à maîtriser des éléments importants de l'activité créative. Tout cela devrait faire partie d'une approche pédagogique développant la créativité.

2.2 Développement de la créativité et formation des ingénieurs

Lors d'une conférence TED (*Technology, Entertainement and Design*), Ken Robinson, sommité anglaise du domaine de l'éducation, a accusé le système scolaire de « tuer » la créativité (Robinson, 2006). Avec 40 millions de vues, il s'agit de la conférence la plus regardée du site web[11]. Donner les bonnes réponses, faire comme les autres, apprendre et respecter les règles, les conventions, etc., font partie d'une éducation traditionnelle et nécessaire au bon fonctionnement de la société. Selon Robinson, une place plus importante pourrait et devrait être faite à l'apprentissage de la créativité, ce qui l'influence et comment on peut faire pour optimiser le potentiel créatif des individus dans les programmes d'éducation en général. Les sous-sections suivantes présentent d'abord une synthèse des approches utilisées actuellement lors d'activités de formation à la créativité ou d'amélioration de la performance créative dans plusieurs types d'organisations. La sous-section suivante porte sur le modèle du traitement de l'information de Rasmussen (1983) qui propose une hiérarchisation des apprentissages jusqu'à un niveau de systématisation des habiletés et qui peut s'appliquer à l'apprentissage de la créativité. Dans la dernière sous-section, il est question de la littérature sur l'apprentissage de la créativité chez les ingénieurs.

2.2.1 Approches stimulant la créativité

Les termes *méthode* et *technique* sont utilisés dans les écrits pour décrire les démarches qui visent à améliorer la créativité individuelle ou de groupe. Les termes *outils* et *activité* sont également mentionnés dans le même sens. Étant donné l'ambiguïté induite par ces termes, nous utilisons le mot *approche*[12] pour désigner toute méthode, technique, outil ou activité répertoriés.

---

[11] https://www.ted.com/playlists/171/the_most_popular_talks_of_all/ (page consultée le 16 août 2016)

[12] « Action, manière d'aborder un sujet, un problème » (Larousse, http://www.larousse.fr/) Consulté le 15 novembre 2013.

Parmi les premiers concepteurs de ces approches, on pense à Guilford (1950) (pensée convergente et divergente), Osborn (remue-méninges) et De Bono (méthode des six chapeaux[13]) qui ont participé à l'élaboration de nombreuses façons d'accompagner les gens dans un processus de créativité. Au cours des 20 dernières années, des techniques comme TRIZ (Altshuller, 1998) et C-K (Benguigui, 2012) ont été utilisées à grande échelle. D'ailleurs, C-K est l'objet d'un important travail de théorisation, ce qui aide à mieux en comprendre les mécanismes cognitifs sous-jacents (Hatchuel & Weil, 2002). Le Tableau 2-3 présente les principes de base des quatre approches mentionnées ici.

Des centaines d'autres approches pour stimuler la créativité ont été proposées par divers auteurs (Barak, 2004; Beghetto & Kaufman, 2009; Kowaltowski, Bianchi, & Teixeira de Paiva, 2010; Liu & Schönwetter, 2004; McKeag, 2008; Michalko, 2006; VanGundy, 2005). Un grand nombre d'articles et d'ouvrages leur ont été consacrés (VanGundy, 2005). Malheureusement, les bases scientifiques de plusieurs de ces approches sont peu fiables, étant insuffisamment décrites ou absentes. Souvent, un auteur ou un groupe d'auteurs base son approche sur ses années d'expérience personnelle et professionnelle, donc sur sa propre manière de gérer, d'encourager et de favoriser la créativité. Sans aucun doute, plusieurs de ces auteurs font de judicieuses recommandations qui peuvent aider les organisations et leurs employés à être plus créatifs. Mais il n'en demeure pas moins que les fondements théoriques cognitifs demeurent mal définis.

[13] http://www.debonogroup.com/six_thinking_hats.php Consulté le 20 septembre 2013.

Tableau 2-3 – Description de quatre approches pour stimuler la créativité

Approches	**Définitions / Explications**
Remue-méninges (Brainstorming) *(http://www.mindtools.com/brainstm.html)*	« *Brainstorming combines a relaxed, informal approach to problem solving with lateral thinking. It encourages people to come up with thoughts and ideas that can, at first, seem a bit crazy. Some of these ideas can be crafted into original, creative solutions to a problem, while others can spark even more ideas.* »
Six Chapeaux *(http://www.debonogroup.com/six_thinking_hats.php)*	« *You and your team members can learn how to separate thinking into six clear functions and roles. Each thinking role is identified with a colored symbolic "thinking hat." By mentally wearing and switching "hats," you can easily focus or redirect thoughts, the conversation, or the meeting.* »
TRIZ *(http://www.triz-journal.com/archives/what_is_triz/)*	« *TRIZ is a problem solving method based on logic and data, not intuition, which accelerates the project team's ability to solve these problems creatively. TRIZ also provides repeatability, predictability, and reliability due to its structure and algorithmic approach.* »
C-K (Concept-Knowledge) (Benguigui, 2012)	« L'approche C-K propose ainsi d'étudier en même temps deux dimensions : les concepts et les connaissances. La mise en rapport de ces deux éléments n'existe pas dans les théories précédentes et fait apparaître deux espaces expansibles, intimement liés et bien distincts. Ce dualisme est nécessaire à l'élargissement des connaissances, qui permet dans un même temps aux concepts de s'étendre. »

AUTRES APPROCHES (VanGundy, 2005)		
SCAMPER	Personas	*Brainmapping*
Brainwriting	*Brainsketching*	Liste à puces
Random Input	Le jeu des noms	*Copy Cat*
Pensée métaphorique	Plus/Moins/Intéressant	Le magasinage d'idées
Matrice de recadrage	La pluie d'idées	Fais-moi un dessin
Synectics	La purge du cerveau	La construction de scénarios
Biomimétisme	Le casse-tête	Jeux de rôles

En plus des lacunes de bases théoriques, ces approches à l'exception du remue-méninges n'ont pas fait l'objet d'études permettant de conclure à leur efficacité. Yilmaz et Seifert (2010) affirment en être surpris, compte tenu de l'étendue de la popularité grandissante de ces approches.

Les concepteurs et promoteurs de ces approches affirment qu'elles permettent aux participants de stimuler leur capacité à utiliser la pensée convergente et divergente. Toutefois, parce qu'elles proposent des consignes vagues et potentiellement difficiles à réaliser telles que « penser à autre chose qu'à l'habitude » ou « générer des idées », elles peuvent être difficiles à mettre en œuvre.

Même lorsqu'il est question d'une « simple » session de remue-méninges, il est essentiel de comprendre et de respecter plusieurs lignes directrices pour que l'exercice soit utile.

Ces approches ne sont pas spécifiques à un contexte. Or, le choix d'une approche optimale pour une situation particulière, un problème précis ou un type d'industrie spécifique demeure crucial pour obtenir les résultats attendus (Yilmaz & Seifert, 2010). En l'absence d'études comparatives et évaluatives, comment faire une sélection éclairée entre les approches disponibles ?

Actuellement, le *remue-méninges* est l'approche la plus utilisée pour développer des idées nouvelles. Très connue, elle semble simple d'emploi. Toutefois, de nombreuses études ont mis en évidence ses faiblesses potentielles dans un environnement de groupe (Nijstad, Stroebe, & Lodewijkx, 2003). De plus, selon Davy Monticolo (communication personnelle), professeur de créativité à l'ENSGSI (École nationale supérieure en génie des systèmes et de l'innovation) d'Annecy, la qualité des animateurs des sessions de travail constitue une condition fondamentale à l'obtention de bons résultats.

Plusieurs expériences de terrain soutiennent la validité externe de différentes approches de formation à la créativité. Certaines approches, dans certains contextes, favorisent l'identification d'un problème (opportunité), la production et la priorisation de nouvelles idées, ou même la vérification de la pertinence de ces idées (Knoll, 2010; Kowaltowski et al., 2010).

À notre connaissance, Knoll (2010) est le seul à avoir proposé un classement à partir d'une base théorique. Il a classé les 101 approches pour stimuler la créativité proposées par Van Gundy (2005), en fonction de quatre catégories basées sur le principe de changement de perspective (*CoP*, *Change of Perspective*) : par analogie, par provocation, de manière aléatoire et sans changement de perspective (Tableau 2-4).

Tableau 2-4 – Catégories de méthodes pour changer de perspectives (Knoll, 2010, pp. 4-5)

Catégories (*CoP*)	**Définitions**
Analogie	« *Analogy searches for similar situations and uses the knowledge about these situations to generate ideas for the creative task.* »
Provocation	« *Provocation challenges the assumptions of the creative task to generate a new perspective on the creative task.* »
Aléatoire	« *Random changes the perspective by external stimuli which are unrelated to the creative task. To generate new ideas, the individual combines knowledge about a random element with the items of the creative task.* »
Sans changement de perspective	« *Most of these techniques describe a collaboration process that instructs the participants to generate ideas […] and share them to inspire one another.* »

L'application de ces approches est loin d'être simple. C'est pourquoi de plus en plus d'entreprises de services-conseils offrent d'aider et d'accompagner les entreprises dans leurs processus de création. Spécialistes d'une méthode comme TRIZ (ou sa version allégée ASIT) ou généralistes, elles viennent de manière ponctuelle soutenir et guider (et/ou former) les équipes dans leurs démarches de résolution de problèmes ou de production d'idées nouvelles. Cela met en évidence la nécessité de détenir une expertise dans l'application des approches de créativité pour que la démarche soit optimale (https://triz-journal.com/).

Dans cet ordre d'idées, nous sommes d'avis qu'une formation adéquate menant au développement de capacités cognitives liées à la créativité permettrait aux apprenants d'être mieux outillés et plus efficaces lors de sessions de résolution de problèmes. Pour être en mesure de jouer une pièce au piano, il faut avoir complété plusieurs heures de répétition afin de développer les capacités nécessaires pour enchaîner les mesures. Il en est de même pour la créativité : il faut développer certaines capacités cognitives sollicitées lors d'un processus créatif et les pratiquer.

2.2.2 Modèle SRK de Rasmussen (Skills-Rules-Knowledge)

Plusieurs chercheurs ont élaboré des modèles de traitement humain de l'information (Atkinson & Shiffrin, 1971; Lindsay & Norman, 1980; Wickens, 1984). Parmi ces modèles, celui de Rasmussen (Figure 2-10) est particulièrement intéressant pour représenter trois niveaux de compétence pouvant être atteints lors d'un apprentissage (Rasmussen, 1983, 1986).

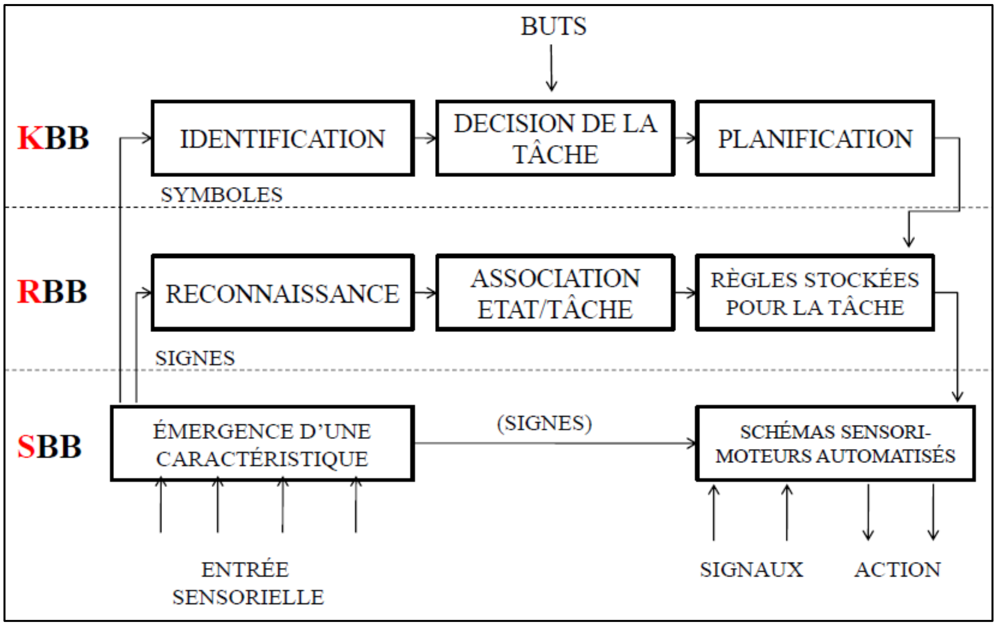


Figure 2-10 – Modèle de Rasmussen (Rasmussen, 1983)

Dans ce modèle, face à une nouvelle tâche ou un nouveau problème, un individu doit traiter (analyser) les informations perçues de façon consciente pour comprendre ce qu'elles signifient, décider de ce qu'il peut en faire et planifier son action. En cela, le traitement de ces informations mobilise des ressources mentales (en quantité plus ou moins grande selon le niveau de difficulté de la tâche) et est coûteux sur le plan cognitif. On parle ici de connaissances de toutes sortes, déclaratives ou procédurales par exemple (Legendre, 2005). Ensuite, si ces connaissances s'approfondissent et sont progressivement reliées entre elles et à la tâche ou au problème à résoudre, elles s'organisent sous forme de règles (*rules*). Enfin, la répétition de ces règles poursuivant une plus grande maîtrise des connaissances se transforme progressivement en habileté (*skill*). À ce dernier niveau, les actions posées des centaines, voire des milliers de fois suite à la réception d'un stimulus sont devenues des automatismes, le cheminement cognitif ayant été tellement pratiqué et répété que le traitement de l'information est réduit à son minimum. De nombreuses tâches de la vie quotidienne deviennent des habiletés à force de les exécuter : attacher ses lacets, se brosser les dents, conduire une automobile, aller à bicyclette, etc.

La littérature précise que ou la mémoire de travail a une capacité limitée et que, pour gérer de plus en plus d'informations, il faut transférer une partie de celles-ci dans la mémoire à long terme pour limiter le besoin de traitement immédiat. En développant des capacités (cognitives ou physiques), un individu libère de l'espace dans sa mémoire de travail pour traiter de nouvelles informations en plus des anciennes. Cela lui permet d'aller encore plus en profondeur dans l'apprentissage d'une notion et de développer des habiletés (*skills*).

Dans tous les sports de haut niveau, il faut répéter les mêmes gestes des milliers de fois pour qu'ils deviennent automatiques et ne nécessitent presque plus de traitement cognitif (des auteurs affirment qu'il faut 10 000 heures de pratique pour devenir un expert, (Ericsson, Prietula, & Cokely, 2007)). C'est ce qu'on appelle « développer un pilote automatique ». Cela justifie la nécessité de pratiquer pour développer des capacités cognitives qui seront utilisées dans un processus créatif. Possédant ces capacités cognitives, il sera alors possible pour un individu de concentrer son attention sur les opérations de haut niveau à faire pour exécuter une tâche ou résoudre un problème plutôt que sur les opérations de base puisqu'elles feront partie de ses habiletés (*skills*).

2.2.3 Formation des ingénieurs

Plusieurs auteurs soulignent le besoin de former des futurs ingénieurs plus créatifs (Badran, 2007; Baillie & Walker, 1998; Cropley & Cropley, 2000; Felder, 1987; Johri, Chen, & Lande, 2009; Lande, 2009; Liu & Schönwetter, 2004; Richards, 1998). Dans les programmes de formation professionnelle en génie, la créativité est considérée comme souhaitable mais ne semble pas essentielle ; les enseignants invitent les apprenants à l'utiliser dans le cadre de projets d'apprentissage sans toutefois y référer spécifiquement. On aborde le sujet de la créativité dans le contexte d'un cours, on présente deux ou trois techniques pour l'exercer et on prend pour acquis que les étudiants s'en sortiront pour être créatifs dans le contexte de leurs projets d'apprentissage.

Selon Kowaltowski (2010), même dans un contexte de formation en design, les moyens éducatifs retenus pour développer la créativité ne sont finalement que complémentaires à la formation, et souvent utilisés de manière informelle, plus ou moins structurée pour stimuler les discussions de groupes. Pourtant, le besoin d'améliorer concrètement la créativité des ingénieurs dans les programmes de formation initiale a été clairement identifié (Engineers Canada, 2014; Murdock & Keller-Mathers, 2011). Par ailleurs, plusieurs entreprises cherchent à développer la créativité de leurs employés, y compris celles des ingénieurs, y consacrant souvent des ressources humaines et financières importantes.

Les recherches dans les bases de données et au moyen de moteurs de recherche effectuées dans le cadre de cette thèse révèlent que l'enseignement de la créativité dans les programmes de génie est très peu documenté. Enseigner de manière créative, laisser une place à une « facette créative » dans un cours ou un projet et présenter de manière magistrale les principes de base de la créativité, ressortent comme étant les pratiques les plus courantes (Murdock & Keller-Mathers, 2011). Même pour Charyton (2011), l'auteure du CEDA qui souligne l'importance de la créativité chez les ingénieurs, l'apprentissage par projet suffirait à développer la créativité des futurs ingénieurs sans qu'elle soit directement abordée comme une compétence spécifique (voir section 2.3.2).

Un examen approfondi de la littérature met en évidence la complexité du concept de créativité en général, et plus spécifiquement en tant que compétence qui est « un savoir agir complexe prenant appui sur la mobilisation et la combinaison efficaces d'une variété de ressources » (Tardif, 2003). Ainsi, tout comme les habiletés de communication, de leadership ou de travail en équipe, la créativité est une compétence transversale et interdisciplinaire comportant des dimensions personnelles et contextuelles et plusieurs niveaux de performance. Toutefois, bien que plusieurs modèles théoriques aient été proposés, les responsables de formation ne disposent toujours pas d'un cadre théorique solide pour l'élaboration de programmes ou d'activités de formation visant le développement de cette compétence (Lubart, 2010; Sternberg, 2006a; Ward, 2004), comme le dit Sweller (2009).

> « *We do not, for example, have educational techniques intended to enhance human creativity that are supported by a body of empirical research using randomized, controlled studies demonstrating the effectiveness of the techniques. A lack of connectivity between research into creativity and our rapidly advancing knowledge of human cognitive architecture may partly explain the failure to advance knowledge in this area.* »

À ce titre, les enseignants et les apprenants doivent avoir l'occasion de prendre conscience de la créativité, pour identifier et comprendre les mécanismes qui la sous-tendent et pratiquer les activités qui la développent, d'où la nécessité d'aborder le sujet directement et de faire des exercices de pratique. Avec le besoin d'accroître la formation pour améliorer la performance créative vient celui d'évaluer la créativité.

2.3 Évaluer la créativité

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l’évaluation de la créativité (Charyton et al., 2011; Clary, Brzuszek, & Fulford, 2011; Piffer, 2012; Shah, Vargas-Hernandez, & Smith, 2003) et proposent des mesures de résultats (*outcome based*) ou de processus (*process based*). Essentiellement centrés sur l’évaluation de la pensée divergente, les tests de créativité sont loin de faire l’unanimité (Plucker & Runco, 1998). Étant donné le nombre de définitions de la créativité et la quantité de facteurs qui l’influencent, il est facile de comprendre pourquoi tous et chacun développent et utilisent des outils différents pour mesurer la créativité.

2.3.1 Processus général d’évaluation

Pour certains, l’évaluation du processus créatif apparaît plus complexe que l’évaluation du résultat, et les deux sujets pourraient faire l’objet d’une thèse en soi. De nombreux auteurs proposent des manières d’évaluer la créativité. Treffinger et ses collègues (2002) ont publié un guide pour éducateurs de 120 pages pour décrire différentes façons d’évaluer la créativité des apprenants. En 2012, Piffer a publié un article qui mentionne que les tests actuels pour évaluer la créativité se restreignent trop aux résultats produits et que des entrevues semi-structurées seraient un moyen plus adéquat de évaluer la créativité d’un individu (Piffer, 2012).

De son côté, Shah (2003) soutient que les processus cognitifs liés à la créativité sont peu connus et trop complexes à observer pour tenter de les évaluer. Il suggère d’utiliser quatre indicateurs de l’idéation tous reliés aux résultats : la nouveauté (*novelty*), la varitété (*variety*), la qualité (*quality*) et la quantité (*quantity*). Il a développé des algorithmes mathématiques pour obtenir des résultats quantitatifs pour chacun des indicateurs. Il précise que l’agrégation de ces valeurs n’est pas pertinente, car ce sont des indicateurs indépendants les uns des autres. Ce type d’étude et les modèles qui en découlent (comme celui de Shah) sont basés sur des conditions de recherche contrôlées et pourraient poser problème lorsqu’on s’intéresse aux situations réelles.

Dans le cadre de cette thèse, il a été important de choisir un test bien adapté au domaine de l’ingénierie auquel on s’intéresse en particulier ; la section suivante présente ce test.

2.3.2 Creative Engineering Design Assessment (CEDA)

Charyton et ses collègues ont développé un instrument d'évaluation de la créativité : le CEDA (*Creative Engineering Design Assessment*) (Charyton et al., 2011) qui permet d'évaluer les résultats de la créativité et certaines de ses composantes. Le CEDA est spécialement conçu pour des gens ayant des connaissances en génie qui doivent apprendre à « sortir des cadres » tout en tenant compte de certaines contraintes. L'instrument évalue la pensée divergente et la pensée convergente, la satisfaction des contraintes, l'identification des opportunités et la résolution de problèmes (Tableau 2-5). Le CEDA permet d'évaluer les indicateurs de créativité suivants : le nombre d'idées (*fluency*), la flexibilité des idées (*flexibility*) et leur originalité (*novelty*). Il s'apparente ainsi aux indicateurs développés par Shah (2003).

Tableau 2-5 – Processus créatif et le CEDA

Processus créatif	**Éléments d'évaluation**
Pensée divergente	2 solutions différentes pour chaque problème
Pensée convergente	1 solution trouvée pour chaque problème
Satisfaction des contraintes	Formes et matériaux utilisés pour satisfaire les paramètres de design
Identification des opportunités d'amélioration	Identifier d'autres problèmes résolus par la solution proposée
Résolution de problèmes	Résolution du problème donné

Le CEDA est un outil spécifiquement développé pour évaluer la performance créative des ingénieurs (Charyton, Jagacinski, & Merrill, 2008). Il s'inspire du *Purdue Creative Test (PCT)* (Harris, 1960a), très reconnu dans le domaine de la mesure de la créativité et validé par la communauté scientifique. Le CEDA prend en considération trois éléments fondamentaux reliés à la créativité : la flexibilité, la fluidité et l'originalité en plus de tenir compte de l'utilité (*usefulness*), un élément essentiel dans le cadre de la profession d'ingénieur.

Les coefficients de validité convergente et discriminante ont été obtenus en comparant les résultats du CEDA à ceux de plusieurs autres tests d'évaluation des performances créatives en génie et aussi à ceux de tests évaluant la créativité dans un sens plus général et tenant compte des caractéristiques personnelles (Tableau 2-6). Les tests choisis par Charyton et son équipe sont utilisés par les chercheurs du domaine et reconnus par la communauté scientifique (Charyton & Merrill, 2009). Dénotant de faibles corrélations entre le CEDA et les trois tests d'évaluation de la créativité « générale », Charyton en déduit que le CEDA mesure la créativité dans le contexte spécifique de l'ingénierie plutôt que dans un contexte général : « *Discriminant validity for the*

CEDA was established with the general creativity measures, […] suggesting that the CEDA is domain specific to engineering. » (Charyton, 2014, p. 16). De plus, selon les corrélations obtenues pour deux des trois tests de créativité liés au domaine du génie, Charyton conclut que « *by directly assessing Originality and usefulness, the CEDA assesses creativity as a well-accepted standardized definition that is also domain specific to engineering.* » (Charyton, 2014, p. 17)

Tableau 2-6 – Tests de créativité liés à la création du CEDA et leurs corrélations

Évaluation en génie	**Coeff. corrélation avec CEDA**	**Évaluation de caractéristiques personnelles**	**Coeff. corrélation avec CEDA**
Purdue Creativity Test (PCT)	*0.31*	*Creative Personality Scale*	*0.11*
Purdue Visualization Spatial Test - Rotation	*0.21*	*Creative Temperament Scale*	*0.03*
Systems Tests – Rollercoaster Functionnality	*-0.03*	*Cognitive Risk Tolerance Scale*	*-0.07*

Lors de l'administration du CEDA, les participants doivent produire six designs. Le même exercice est répété trois fois avec certaines nuances. Le nombre d'objets proposés pour réaliser les designs passe de deux à trois et à quatre (tube, sphère, cube, pyramide). De plus, le problème à résoudre change aussi chaque fois (design qui fait du bruit, design qui améliore la communication, design qui peut se déplacer). Ce test dure 30 minutes (trois tâches) et, selon les auteurs, il peut être utilisé dans un contexte de pré-post test.

Le calcul des résultats du CEDA est établi par deux juges qui évaluent le travail des participants en suivant une grille d'évaluation. Le test ainsi que la grille d'évaluation sont présentés en annexes (Annexes 2-3). Les scores obtenus aux deux premiers critères, la fluidité et la flexibilité, sont calculés de manière quantitative puisque chacun est une sommation d'éléments comptés (ex. : nombre de matériaux, nombres de pièces, nombre d'utilisateurs). Les deux autres critères utilisent des échelles de Likert comportant une expression qualitative pour définir chaque niveau. La Figure 2-11 présente les différents niveaux sur chacune des échelles (traduction libre de l'anglais).

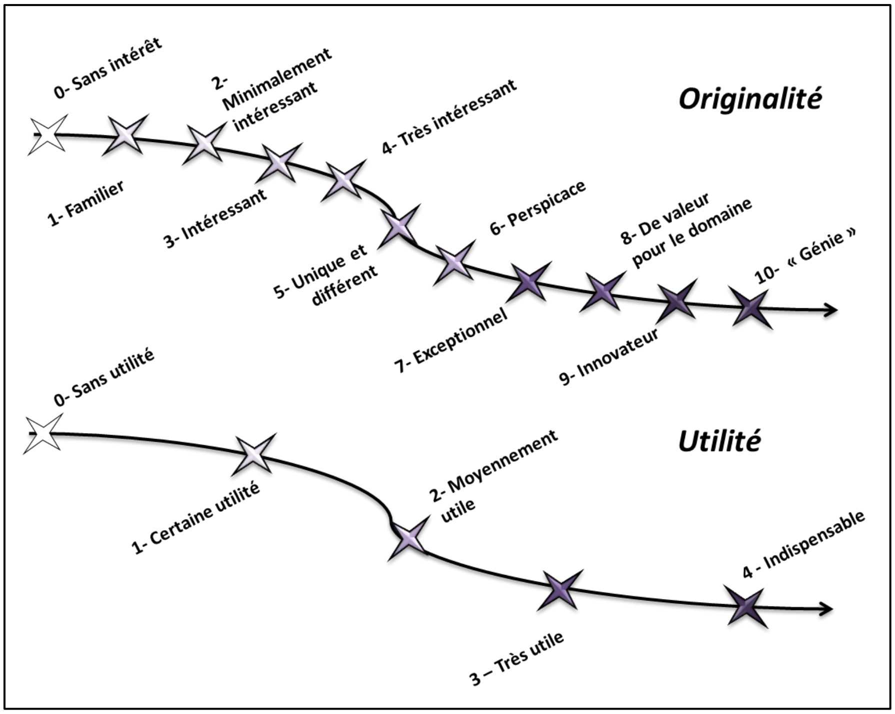


Figure 2-11 – Niveaux des échelles de Likert proposés par Charyton pour les critères Originalité et Utilité

Le CEDA fournit un score global chiffré qui permet de comparer les résultats entre eux et par rapport à eux-mêmes lorsque le test est repris. Charyton précise que plus le score obtenu est élevé plus la personne a une forte performance créative. Cependant, il n'y a pas d'indications à savoir si le niveau de performance créative correspond à un score de sorte qu'on ne sait pas quelle valeur représente un bon ou un mauvais score.

En somme, il n'y a aucun doute que la créativité est étroitement liée à l'innovation qui est essentielle dans le travail de nombreux ingénieurs. La créativité est l'habileté de produire un artéfact nouveau, original et utile qui répond à un besoin identifiable, en recombinant d'une manière différente des concepts déjà intégrés. L'analyse des écrits a permis de montrer que différentes théories cognitives de l'idéation se recoupent, notamment en ce qui concerne les réseaux et l'aspect combinatoire. De plus, le CHC est un modèle structuré de l'intelligence comprenant des capacités cognitives spécifiquement liées à la créativité. Par ailleurs, trois modèles de présentation des multiples facteurs ou composantes qui influent sur la créativité ont été synthétisés afin de servir d'outil pédagogique pour le cours créé dans le cadre de cette thèse. L'analyse des écrits met aussi en évidence des centaines d'approches visant à stimuler la créativité dont certaines sont plus fréquemment utilisées en génie. Toutefois, les bases théoriques de ces approches sont peu définies sauf pour la méthode C-K (Concept-Knowledge). Enfin, malgré ses limitations, le CEDA constitue un choix sensé pour l'évaluation de la performance créative. Tous ces éléments permettent l'élaboration du cadre théorique de la thèse.

2.4 Cadre théorique de la thèse

Le cadre théorique proposé pour cette thèse (Figure 2-12) a été établi à la lumière de la littérature scientifique sur la créativité et permet de relier entre elles les trois études que nous avons réalisées et qui sont présentées aux chapitres 3, 4 et 5 (Morin, Bourdeau, & Robert, 2016; Morin, Robert, & Gabora, 2016a, 2016b). Ce cadre théorique considère la créativité comme un ensemble dynamique de processus cognitifs menant à la combinaison d'idées ou de concepts déjà acquis. Cette activité fait appel à la pensée divergente et la pensée convergente qui, dans le modèle de l'intelligence CHC, peuvent être décrites par l'utilisation de certaines capacités cognitives générales et spécifiques. À la rencontre des perspectives cognitive et éducative, des activités pédagogiques peuvent être adoptées pour aider les apprenants à développer les capacités cognitives appropriées et devenir ainsi potentiellement plus créatifs.

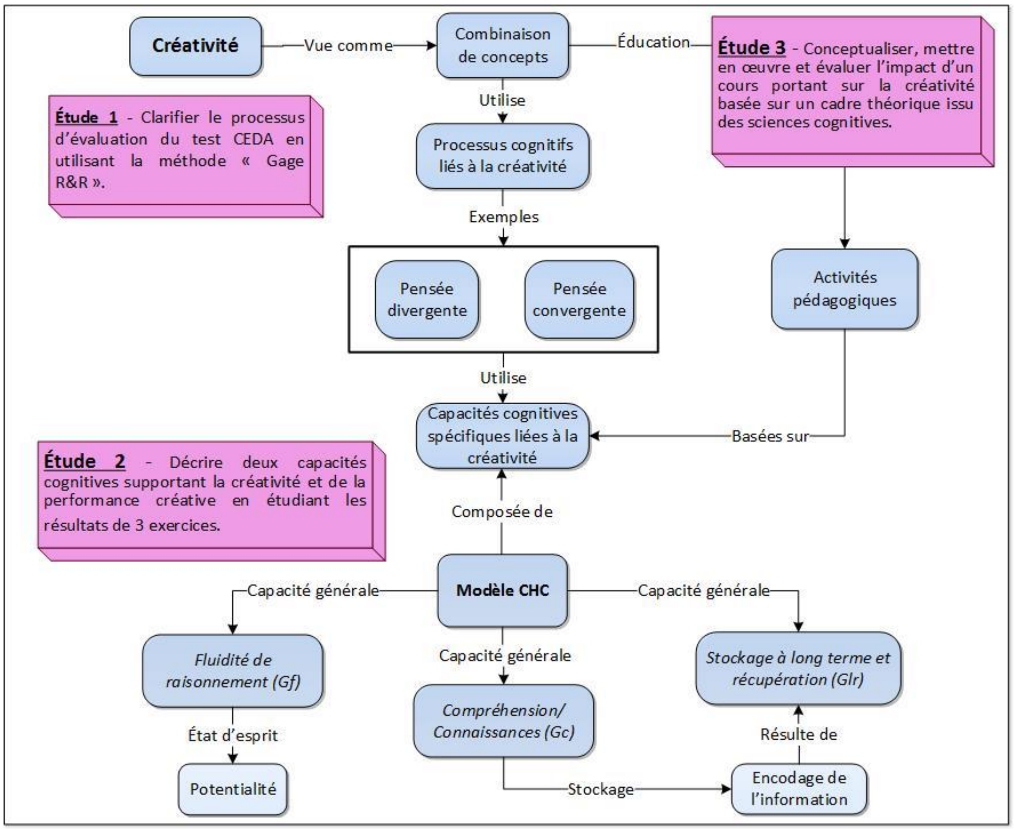


Figure 2-12 – Cadre théorique reliant les trois études que nous avons réalisées

2.5 Objectifs de la thèse

Sur le plan théorique, l'objectif général de la thèse est de contribuer à l'avancement des connaissances au sujet de l'apprentissage de la créativité, de son évaluation et principalement de son développement dans le domaine de l'ingénierie. Sur le plan pratique, les résultats obtenus fournissent aux éducateurs voulant améliorer la créativité de leurs étudiants un exemple de cours basé sur une approche cognitive, qui a été testé et validé sur le terrain, et des conseils pratiques sur le processus d'évaluation avec le test CEDA. L'objectif général comporte trois catégories d'objectifs qui se retrouvent dans les trois études composant la thèse.

(1) <u>Objectifs concernant le cadre théorique</u>

a) Élaborer un cadre théorique à contenu cognitif pouvant servir d'ancrage solide à la définition d'un programme de formation sur la créativité (*articles 2 et 3*)

b) Identifier les relations d'une part, entre les résultats à des activités cognitives étroitement liées à la créativité et la performance créative des sujets, et d'autre part, entre le type d'état d'esprit (potentialité vs non-potentialité) des apprenants et leur performance créative. (*article 2*)

(2) <u>Objectifs concernant le processus d'évaluation de la créativité des futurs ingénieurs</u>

a) Clarifier le processus d'évaluation de la créativité avec le CEDA. (*article 1*)

b) Vérifier la fiabilité du test dans sa version traduite en français selon deux aspects : inter-juges et intra-juge. (*article 1*)

(3) <u>Objectifs concernant le programme de formation (cours)</u>

a) Aider les formateurs s'intéressant au développement de la créativité en leur fournissant une banque d'activités d'apprentissage ancrées sur un cadre théorique et un exemple de cours de 45 heures ayant été testé et validé en classe auprès d'étudiants en ingénierie. (*article 3*)

b) Évaluer l'impact d'un cours visant à développer des capacités cognitives sur la performance créative des apprenants. (*article 3*)

Le comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains de Polytechnique a approuvé la tenue du projet de recherche (voir Annexe 4).

CHAPITRE 3 : ARTICLE 1 : USING THE "GAGE R&R" METHOD TO EVALUATE THE RELIABILITY OF A CREATIVITY TEST

(Sophie Morin, Jean-Marc Robert, Louis-Marc Bourdeault; Testing, Psychometrics, Methodology in Applied Psychology)

3.1 Context

In the context of research and training, the assessment of creativity is a major challenge (Clary, Brzuszek, & Fulford, 2011; Cropley, Kaufman, & Cropley, 2011; Plucker & Runco, 1998; Treffinger, Young, Selby, & Shepardson, 2002). Even though numerous tools have been developed for it in the last 60 years (Clary et al., 2011; Kim, 2014; Treffinger et al., 2002), most of the tools including the widely used *Alternate Uses Test* (Guilford, Christensen, Merrifield, & Wilson, 1960) assess more specifically divergent thinking (DT[14]).

According to some authors, DT is often confused with creativity as explained by Piffer: "The name of the most popular creativity test, the *Torrance Test of Creative Thinking*, is exemplar. Its name suggests that other cognitive tests (e.g., Working memory tests, general knowledge, IQ tests) are not tests of creative thinking. And this can be misleading because convergent thinking[15] is as important for creativity as divergent thinking." (2012, p. 260). In the same vein, authors like Gabora and Kaufman (2010) have argued that creative production relies as heavily on knowledge and analytical thinking (which are associated to convergent thinking) as on imagination and divergent thinking.

One of the newest tools to assess creativity, the CEDA test, was developed in the US by Charyton and her colleagues (2014) to assess engineering students' creative performance. It is based on a validated test, the *Purdue Creativity Test* (PCT) (Harris, 1960). Harris used geometric shapes as sources of inspiration to design (asking people to imagine and draw things from these shapes) and three criteria (flexibility, fluidity, and originality) to assess the results. Charyton

---

[14] "The search for many varied and imaginative possible problem solutions" (Smith & Ward, 2012, p. 465).

[15] "Type of problem solving or reasoning in which cognitive operations are intended to converge upon the single correct answer" (Smith & Ward, 2012, p. 465).

followed the same line of thought by adding the "usefulness" criterion to the test and adopting a more elaborate quantitative scale.

The CEDA is a psychometric test that uses qualitative criteria requiring assessments made by observers (or judges). In psychometrics as well as in many other fields, statistical methodologies are often used to demonstrate that a measuring system is precise and accurate, i.e. gives the same results when applied to the same person or item under the same conditions (Ostle, Turner, Hicks, & McElrath, 1996). In this study, we used an engineering methodology (Gage *R&R: repeatability and reproducibility*) to evaluate the reliability of the CEDA creativity test since it is not well established yet. With multiple operators (reproducibility) measuring several times a same element (repeatability), one can study a measurement system's reliability. Moreover, the method Gage R&R will describe the statistical variation in regards to the judges, the subjects, and the test itself.

The paper is structured as follows. Firstly, we describe the Gage *R&R* method then we present the CEDA test. Thirdly, we explain the methodology followed and present the results. The last sections present the discussion, the conclusion and suggest future work.

3.2 "Gage R&R" method

The "*Gage R&R*" is a statistical method used in engineering to measure (or gage) the reliability of a measurement system (Ostle et al., 1996; Wheeler, 2006). Comprising several variability factors, typically in engineering, the operator (human or not), the work piece and the tool, the variability of any measuring system must be evaluated. A Gage R&R study helps to determine whether the measurement system's variability is small compared with the process' variability, how much variability is caused by the operators, and whether the measurement system is capable of discriminating between different parts.

A measurement system is affected by four variables: the bias in the instrument, the effect of the units measured, the effect of the operators involved, and the random error (Ostle et al., 1996). The equation below illustrates a model representing this situation.

$$\boldsymbol{Y_{ijk} = T_i + \beta + P_i + O_j + \epsilon_{ijk}} \textbf{ with } \boldsymbol{T_i + \beta \; a \; constant}$$

Y_{ijk} = *k*th value recorded by the *j*th operator for the *i*th part

T_i = True value of *i*th part (can't be measured)

β = constant bias in measurement system

P_i = effect of *i*th part

O_j = effect of *j*th operator

ϵ_{ijk} = random error remaining

Equation 1 – Measurement model

Consequently, with this model, the different variances can be expressed this way:

$$\overbrace{\sigma_Y^2}^{\text{Total variance}} = \overbrace{\sigma_P^2}^{\text{Part variance}} + \underbrace{\sigma_O^2}_{\text{Operator variance}} + \overbrace{\sigma_\epsilon^2}^{\text{Error variance}} = \underbrace{\sigma_P^2}_{\text{Part variance}} + \overbrace{\sigma_M^2}^{\textit{Measurement}\text{ variance}}$$

Equation 2 – Measurement variation versus total variation

Although the number of operators, parts, and trials varies for a particular application of the Gage R&R method, a general procedure of measurement consists of the following activities:

1. Form a part sample.
2. Randomly choose three operators (if the operator is human, he should be trained and familiar with the process but not the best or worst).
3. Proceed with 1st assessment.
4. Repeat step 3 for the second trial (randomize the order of the measurements).

If the total variance associated with the measurement system (repeatability & reproducibility) is less than 10%, the measurement system is judged acceptable. If the total variance is between 10% and 30%, the measurement system is judged acceptable depending on the application, the cost of the measuring device, the cost of repair, or other factors. Finally, if it is more than 30%, the measurement system is judged unacceptable and should be improved (Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010; Ostle et al., 1996; Wheeler, 2006).

The *gage R&R* method is used in multiple engineering contexts to evaluate the performance (precision and accuracy) of a measurement system. Engineers have to verify if a measurement system gives the same measure depending on the operator using it, every time s/he uses it. For example, an airplane bolt has to be exactly the right size, for obvious security reasons. Therefore, the measurement instrument (tool) and process in place (with operator) should be valid and reliable to ensure every part produced is delivered according to the plans.

3.2.1 Description

The *R&R* method is used for multiple purposes: compare the measurement system variability to the process variability, calculate how much variability in the measurement system is caused by differences between operators, and determine if the measurement system is capable of discriminating between different parts. The section below explains the principal theoretical elements of the method.

3.2.1.1 Precision and accuracy

The *R&R* method is able to measure precision and accuracy. What is meant by precision is "hitting the same spot every time" (*i.e. obtaining the same result every time the measurement is done*) and by accuracy is "hitting the right spot" (*i.e. measuring the right thing*). In other words, the method can determine if a measuring system measures consistently the right concept. Figure 3-1 illustrates the two concepts.

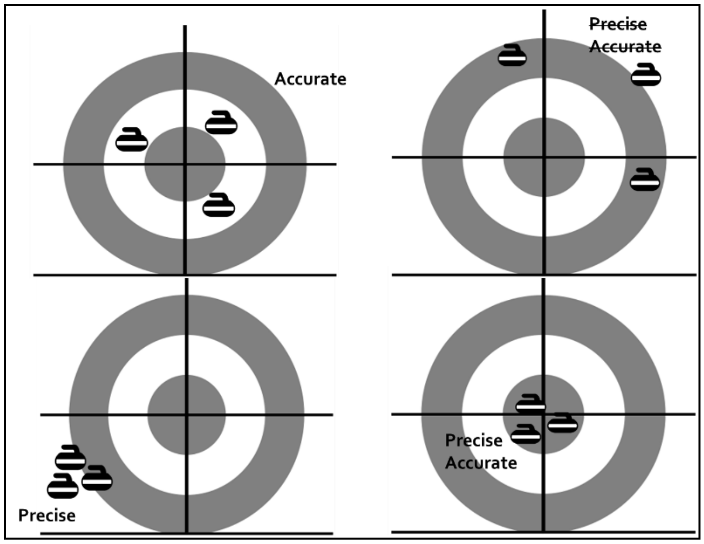


Figure 3-1 – « Precision » and « Accuracy » concepts

The accuracy aspects of the test (bias, linearity, stability) (Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010) are not addressed in this study. We rely on previous studies by Charyton and her team (Charyton, 2014) to establish that the CEDA has a good validity and is indeed assessing creativity. In section 3.2.2 we explain the principal reasons supporting this decision.

3.2.1.2 Repeatability and Reproducibility

A measurement system' precision is evaluated by two constructs: repeatability and reproducibility. "The repeatability of a measuring device is the variability observed when repeated measurements are obtained by the same operator on the same unit or part" (Ostle et al., 1996). "The reproducibility of the measurement process is estimated by considering the variability among the sample averages for the operators used in the study" (Ostle et al., 1996). The *R&R* method analyses the two constructs' variabilities and identifies how much variance in the results is due to the measurement system. Figure 3-2 illustrates how repeatability and reproducibility are combined in this statistical method.

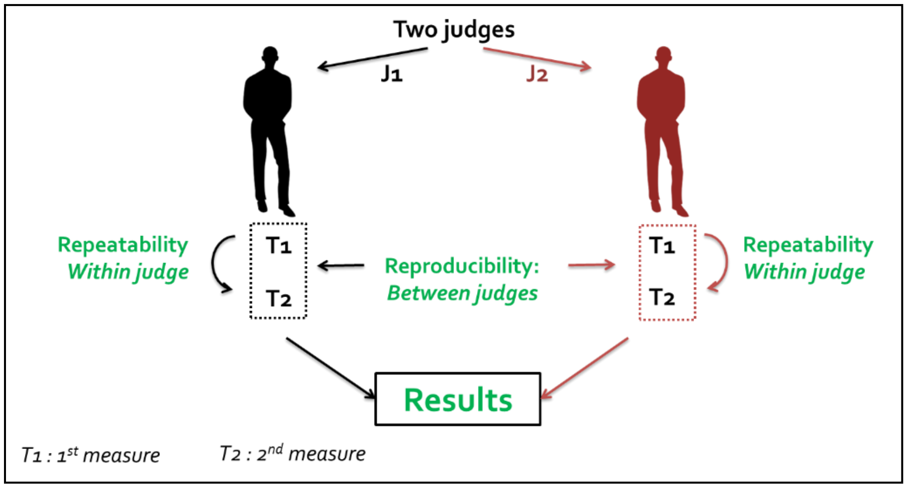


Figure 3-2 – Repeatability and Reproducibility Constructs Summary

3.2.1.3 Control charts

One of the most useful features of the methodology of evaluation is the control charts (Figure 3-3). They allow the professionals in charge of the test (e.g., engineer, researcher, manager) to visually determine if the measured values are between the upper and lower control limits, *i.e.* if a process is "in control". According to Wheeler & Chambers (1992), a process will inevitably include variation. However, two types of variation exist: controlled and uncontrolled. Controlled variation is due to "random" causes and uncontrolled variation is due to "assignable" causes. A process "not in control" is being affected by assignable causes that can be identified and eliminated. Control charts are the tool used to overcome those assignable causes and move beyond the barrier of process improvement. (Wheeler & Chambers, 1992, p. 19)

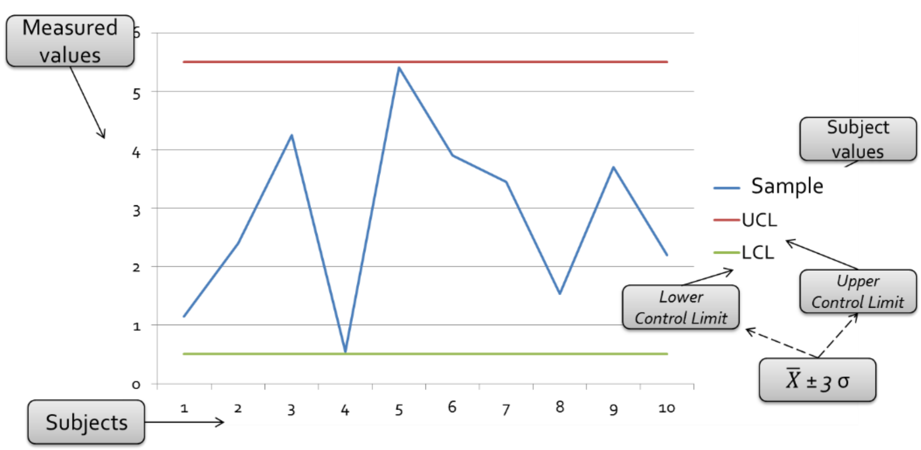


Figure 3-3 – Principal elements of the control charts

The data of several operators (judges) can be displayed on the same chart to get a global view of the assessments (see examples in Figure 3-6).

3.2.2 Creative Engineering Design Assessment Test (CEDA)

The most important innovation of this new instrument is that it assesses five different aspects of the creative process among which the last three are directly related to engineering: divergent thinking, convergent thinking, constraint satisfaction, problem solving, problem finding (Charyton & Merrill, 2009) (Figure 3-4). The test is judged valid to assess the creativity of engineering students (Charyton, 2014; Charyton, Jagacinski, & Merrill, 2008; Charyton, Jagacinski, Merrill, Clifton, & Dedios, 2011; Charyton & Merrill, 2009). Our literature review suggests that the CEDA assesses five important aspects of creativity (Figure 3-4); these aspects form the basis of the content validity of the test (which is about the correspondence between the items of the test and the measurement object) and confer a strong face validity to the test.

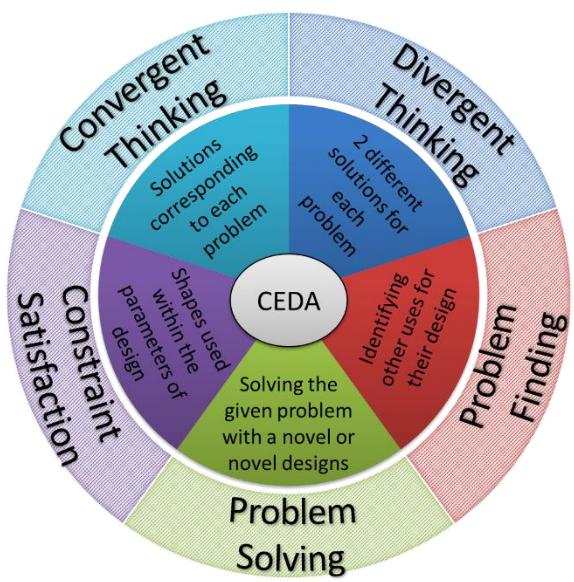


Figure 3-4 – Five creativity aspects covered by the CEDA test (figure inspired by Charyton)

The CEDA uses four criteria to evaluate the creative performance: fluidity, flexibility, originality and usefulness. Fluidity is the number of different items produced by a person during a creative session, flexibility is the number of categories covered by those items, originality is the frequency with which the items are found (or repeated) across the sample, and usefulness corresponds to how well an item responds to the general goal suggested (example Figure 3-5). The first three are well known and often used to assess creativity (Clary et al., 2011; Kim, 2006; Treffinger et al., 2002). Charyton added the usefulness criterion due to its importance, indeed essentiality, in an engineering context. The test provides a score (a number between 0 and 284) that allows to compare individuals; the higher the score, the more the person is judged creative. However, very limited quantitative data have ever been published to show any range of results. The fluidity and flexibility criteria are measured quantitatively whereas originality and usefulness are measured qualitatively (by the assessors) using Likert scales. Creativity tests almost always use the criterion of originality which is evaluated qualitatively. A detailed description of each level of the Likert scale, limits the unavoidable subjectivity. To this day, no results have been published to show, describe and analyze links between assessors' work and participants' scores.

From our point of view, this test has several merits but lacks details in the assessing process. *"As in the previous study, two judges scored each CEDA: one judge from engineering and one judge from psychology. There were a total of four engineering judges, who scored subsets of the CEDA's, and one psychology judge, who was a CEDA test developer. Two of the CEDA test developers trained the judges. Judges practiced scoring in a team environment; however, each judge evaluated the CEDA's separately."* (Charyton et al., 2011, p. 785). From a practical viewpoint, these guidelines are vague and difficult to apply. Very limited work has been published by others researchers to further understand the test's operationalization (Carpenter, 2016).

3.2.3 Research objectives

This research has two objectives: (1) test the reliability of the measurement system CEDA, specifically of the French version we produced; to do so, we used the R&R method that is described above; (2) clarify the assessment process of CEDA. To do so, we run the test to two samples of subjects and three judges analysed and criticized the process in order to improve it, if needed.

3.3 Methodology

This section presents the participants, judges, material, task, experimental design and procedure used for testing the reliability and the assessment process of CEDA.

Subjects. Table 3-1 describes the two samples of subjects who participated in our study. In phase 1, subjects came to attend a conference/workshop on creativity. The test was presented as an introduction. No compensation was given to the subjects. They were invited through personal networking. They were all interested in learning more about creativity and how it can be developed. The three workshops were held at Polytechnique Montreal and consisted of three sessions of 3 hours each.

In Phase 2, 98 subjects did the test. This time, we had access to a somewhat homogenous group since all were industrial engineering students in second year at Polytechnique Montreal. The test was given during a course as a creativity exercise to prepare them for the semester project. No financial or academic compensation was given and all the subjects signed a consent form. The first author of this paper was invited by the professor in charge of the course "Integration project" as a creativity consultant to help students integrate creativity into their project.

Table 3-1 – Sample description

Sample description	Phase 1	Phase 2
Number of subjects	22	98
Genders (Female; Male)	6; 16	48; 50
Engineering Edu. (Undergrads; Grads)	16; 7	98; 0
Age (20-29; 30-39; 40-49; 50-59)	8; 12; 2; 1	94; 3; 1; 0
Occupations (Phase 1 subjects)		
E.g..: Project manager, teacher, sound technician, pedagogical consultant, marketing director, industrial engineer, receptionist, professor.		

Judges. The three judges are female engineers aged 25-40 years old, with an interest in creativity as a competency, and working as educators. All three have been involved in arts (circus, dance) for many years. They assessed the CEDA tests in two phases, two months apart to minimize the memory bias.

Material. Subjects were given the test in one paper document. They could use any of their own crayons, pencils, erasers, etc.

Task. The subjects had 30 minutes to complete the task. The CEDA is presented on four pages, three with problems and one with guidelines. There is a different general goal for each problem (Design that can produce sound, Design that can communicate, Design that can travel). They have to describe two original designs for each problem, built around suggested objects (sphere, cube, cylinder, pyramid) (example in Figure 3-5 - A).

Judges' task. The judges' task is to assess each design in regards to the four criteria. For the first analysis, the three judges used the CEDA's original scoring system. They followed the general instructions given by Charyton and her team. They used objective/quantitative measures for fluidity and flexibility, and subjective/quantitative measures (on two Likert scales) for originality and usefulness. They made one judgment for each design and a third one (overall) for each problem (Figure 3-5 - B). They proceeded with the summation of the four criteria, with the equation suggested by Charyton: Fluidity + Flexibility + 2*Originality + 2*Usefulness.

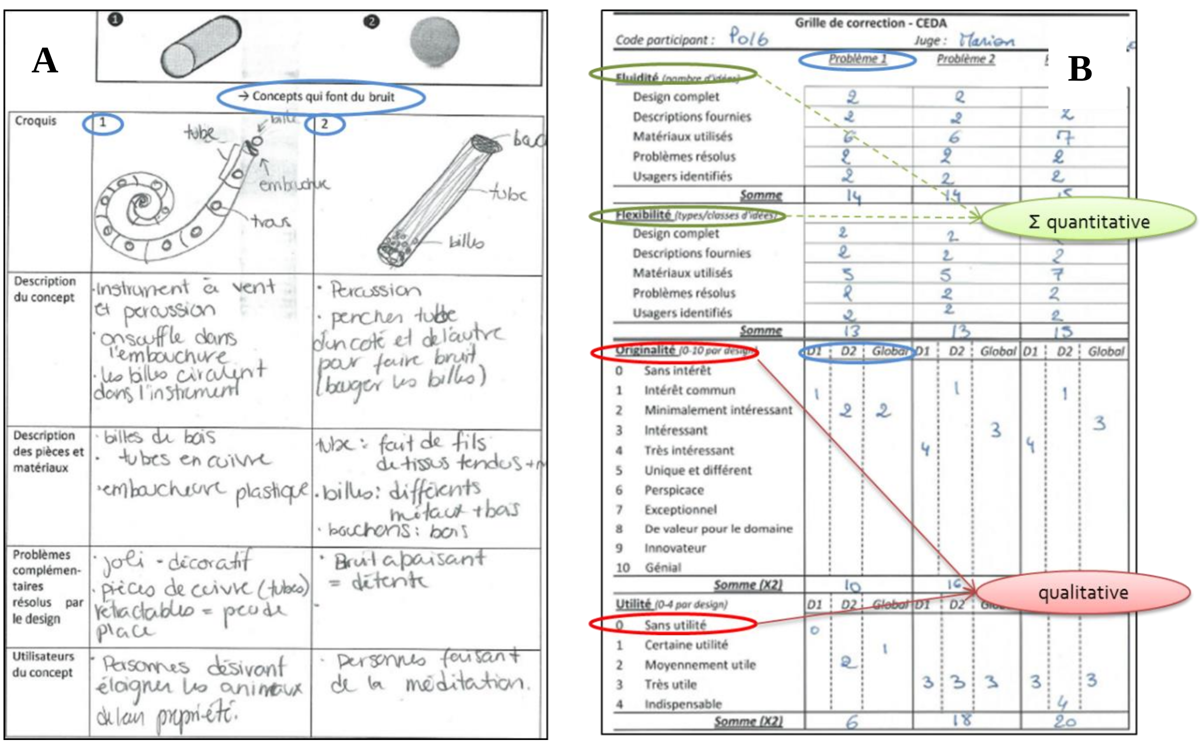


Figure 3-5 – CEDA examples (A: Answer sheet, B: assessment sheet)

Procedure.

Table 3-2 presents the subjects' and judges' activities during each phase of the study.

Table 3-2 – Overview of our tests with CEDA

Phase	Subjects	Judges' activities	Objectives
1	23 professionals attend a conference on creativity and complete the CEDA test*	---	Clarifying the assessment process
	22 tests are selected	First judge meeting to explain the guidelines (3 judges)	
		First assessment – Individually (4 criteria)	
		Group meetings to clarify the assessment process	
		Second assessment – Individually (originality, usefulness) – *2 months after first assessment*	*R&R* analysis to evaluate the assessment system's reliability
2 (3 months after phase 1)	106 students complete the CEDA test	Participation in an engineering class	Simplify the assessment process
	98 tests are selected	Group meeting to assess Flexibility/Fluidity	
		First assessment – Individually (originality, usefulness)	
		Group meeting to discuss particular results (2 judges)	
		Second assessment – Individually (originality, usefulness) – *2 months after first assessment*	*R&R* analysis to evaluate the assessment system (originality, usefulness) with control charts

** Details in section "Sample analysis"*

In Phase 1, the 22 tests were evaluated by three judges. This phase was used to establish a more detailed assessment scale for the originality and usefulness criteria than what was suggested by Charyton. As mentioned above, the Likert scales given to assess the tests were very generic (eg., 0 → dull, 1 → common place, 2 → somewhat interesting, 3 → interesting, etc.). Also, this phase allowed us to conduct a first evaluation of the judges' performance. In the second phase, 98 new tests were assessed by two of the three judges. All assessments were done individually but a group discussion happened between the two assessments for each phase to resolve any problems.

3.3.1.1 Phase 1

Confronted with assessment difficulties and questions, the judges met to clarify certain aspects of their evaluations. To diminish the confusion regarding the levels for originality and usefulness, copies of the designs created by the subjects were made (sketch only) and classified according to the scale suggested. During that process, the judges defined in more details what each level meant in regard of the CEDA. The results of this process are presented below.

Two months later, a second assessment was conducted. The tests were randomly distributed to eliminate a possible interaction bias across tests. With these results in hand, we analysed the data with the *R&R* method to test the reliability as well as the judge's concordance.

3.3.1.2 Phase 2

In Phase 2, the judges counted the items together instead of separately (98 tests). This way of doing allowed us to do faster assessments with greater calculation certainty. At that time, the judges had not discussed or made comments about the originality or usefulness of the designs, they kept those opinions for the individual assessments. After the first assessments were completed, judges met to discuss scores that were more than two levels apart (*e.g.*, 2→ Somewhat interesting and 4→ Very interesting). They wanted to understand the differences in judgement and adapt the assessment criterion descriptions if necessary. Two months later, they proceeded to reassess originality and usefulness for the 98 tests, randomly redistributed.

Following the assessment, the *R&R* method was used a second time to evaluate more specifically originality and usefulness' scores. We built control charts to verify if the scores obtained corresponded to an assessment process "in control". Examples are presented in the results section.

3.4 Results

This section presents the principal results obtained in each phase of the study. In the 1st phase, the assessment process is studied and clarified. Also, control charts allow us to compare judges' concordance. In the 2nd phase, statistical analysis show how the test is reliable from two perspectives, repeatability and reproducibility.

3.4.1 Phase 1

3.4.1.1 Assessment clarification

The scale provided by Charyton to evaluate the two qualitative criteria, originality and usefulness, was a starting point but remained difficult to use because of the lack of specificity.

After each judge individually assessed the first 22 tests, they met to discuss the results and how they understood the scales. One of the judges suggested it would be helpful to define with more precision each level in regards of the test itself. To accomplish the task, they took each design and used the "think aloud" approach to describe what they thought about them. It helped build common knowledge and become more confident with the assessment task. With the sorting exercise (cf. 3.1.1), each level of the scale was defined more precisely according to the answers at hand. Even with 22 tests, categories and patterns emerged (*e.g.*, musical instruments, houses, cars, etc.). With these "subgroupings" of designs, it was possible to visualize what could be expected for each level. The same process was applied for originality and usefulness. these discussions and findings were used to clarify and standardised the assessment strategy. Table 3-3 and Table 3-4 show what is provided by Charyton and her colleagues and what this added.

Table 3-3 – Originality criterion description

From Charyton	Added in our study
0 - Dull	Does not correspond to the general goal suggested; common object (daily use).
1 – Common place	Designs that come often in the tests.
2 – Somewhat interesting	Minimal transformation or use of multiple suggested forms, multiple materials, added objects or materials.
3- Interesting	A concept more perceptive but not so much developed.
4- Very interesting	Combination of 2 or more simple concepts.
5- Unique and different	Combination of more developed and complex concepts, concepts not existing in this suggested form.
6- Insightful	Well developed idea, well described (details), combining multiple concepts (different fields) in a novel way.
7- Exceptionnal	*In all of our assessments, no designs obtained higher marks than 6, so we didn't have examples to discuss and compare scores 7 to 10.*
8- Valuable to the field	
9- Innovative	
10- Genius	

Table 3-4 – Usefulness criterion description

From Charyton	Added in our study
0 - Useless	Does not respond to the general goal suggested, does not present any possible uses
1 – Somewhat usefull	Responds to the general goal suggested but has limited possible uses
2 – Usefull	Relevant uses but for very specific cases
3- Very usefull	Existing concepts but not optimal/one solution among others, existing concept that needs elaboration
4- Indispensable	Existing concepts, indispensable or integrated to modern life

3.4.1.2 Gage R&R method

Figure 3-6 illustrates the repeatability and reproducibility of creativity measures with the CEDA. Each chart shows the two measures made for each subject by one of the three judges. The first chart (at the top) shows that judge 1 gave the most consistent judgments since the two lines are very close to each other. Judge 3 (chart at the bottom) is less consistent and judge 2 (chart of the middle) is even less consistent (see red circles).

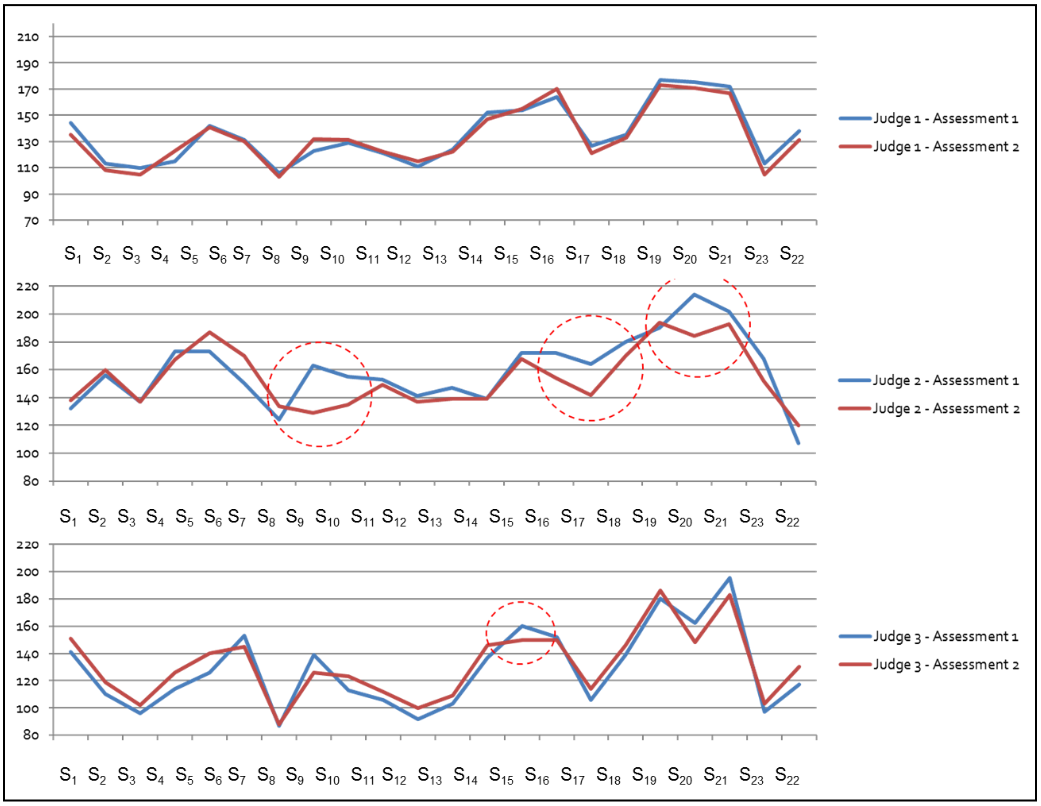


Figure 3-6 – Scores of creativity on CEDA attributed by three judges in Phase 1; P = participant; in ordinate: CEDA score (min.: 84; max: 214) *P23 and P22 were reversed for analysis reasons (judge 2 did not assess P21)

The Pearson concordance coefficient between judges has been calculated to show how similarly the three judges assessed the results for each subject (Kline, 2005). As Table 3-5 shows, the coefficient is higher for judge 1 and 3. In line with this result and for organisational reasons (availability, time, cost), we felt comfortable to proceed with 2 judges (1 and 3). Furthermore, Charyton proceeded with two judges in all her studies so we believed it was a suitable decision. Even though we have confidence that with more training judge 2 could tighten her results, for the reasons mentioned above, we chose to continue the project with only two judges.

Table 3-5 - Pearson Concordance Coefficient

Pearson Coef. (R^2) :

Var.	$\bar{X}$ J1	$\bar{X}$ J2	$\bar{X}$ J3
$\bar{X}$ J1	**1**	0,398	0,828
$\bar{X}$ J2		**1**	0,452
$\bar{X}$ J3			**1**

3.4.2 Phase 2

The 98 test results of phase 2 were divided randomly into four groups (25, 25, 25, 23) because the different constants used to calculate the variations in reproducibility and repeatability are established for small samples (N = 25). Control charts were built to verify if the measures were in control *i.e.* predictable from a statistical point of view. Figure 3-7 shows that the values obtained are between the limits so that the assessment process is in control for the two qualitative criteria, originality and usefulness. This means that the values' variation is caused by unpredictable but normal and inevitable events and nothing specific can be done to further control the assessment process.

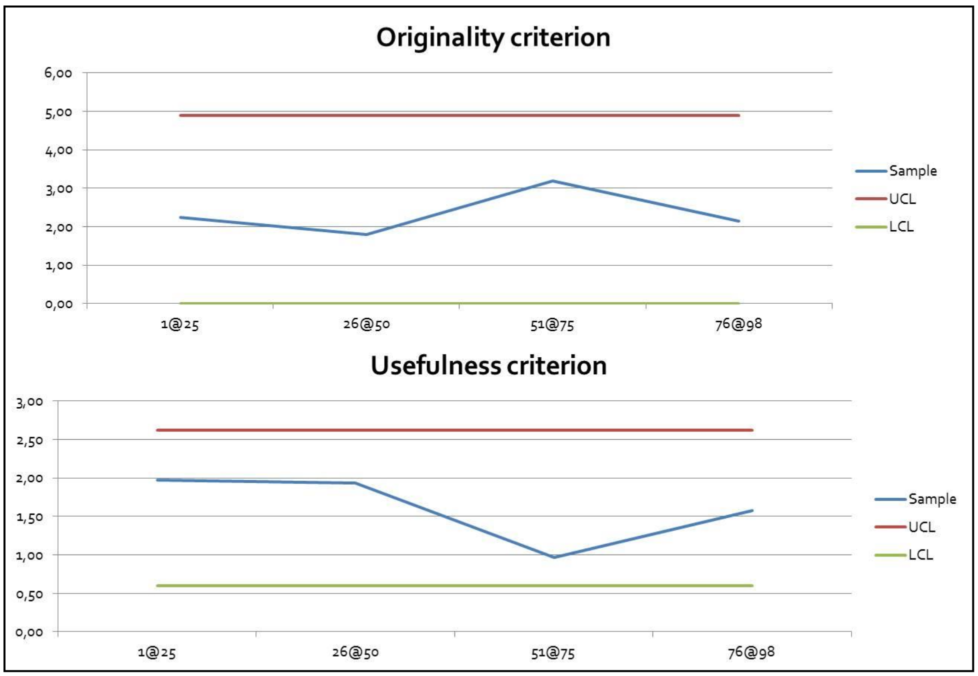


Figure 3-7 – Control Chart – Originality and Usefulness criteria

Using the same four groups of subjects, Figure 3-8 illustrates the percentages of evaluation variability related to three categories: repeatability, reproducibility and subjects. When using a measuring system, it is essential that the variability observed be due to the subjects and not to the instrument itself or its use. That is what is shown in these graphs. For the two criteria originality and usefulness, between 85% and 95% of the variability is due to the subjects and not the judges or the assessment process (repeatability/reproducibility).

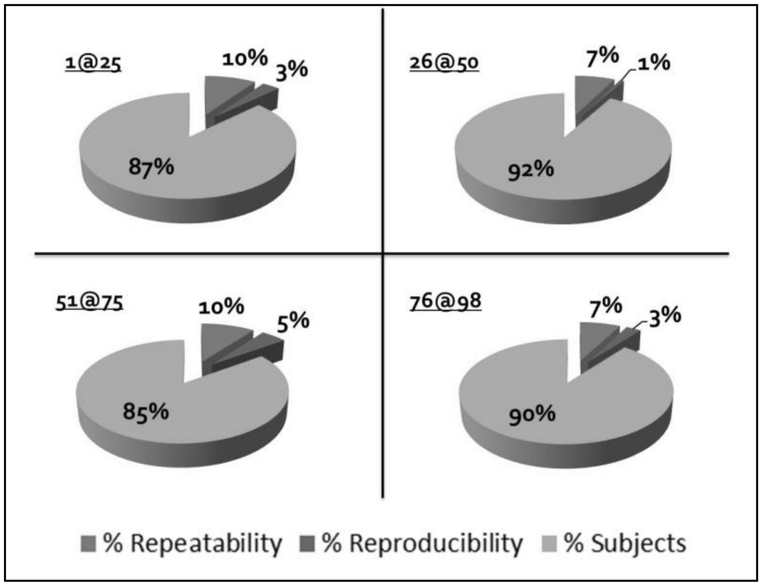


Figure 3-8 –Percentages of evaluation variability for Originality (4 samples : 88.5%)

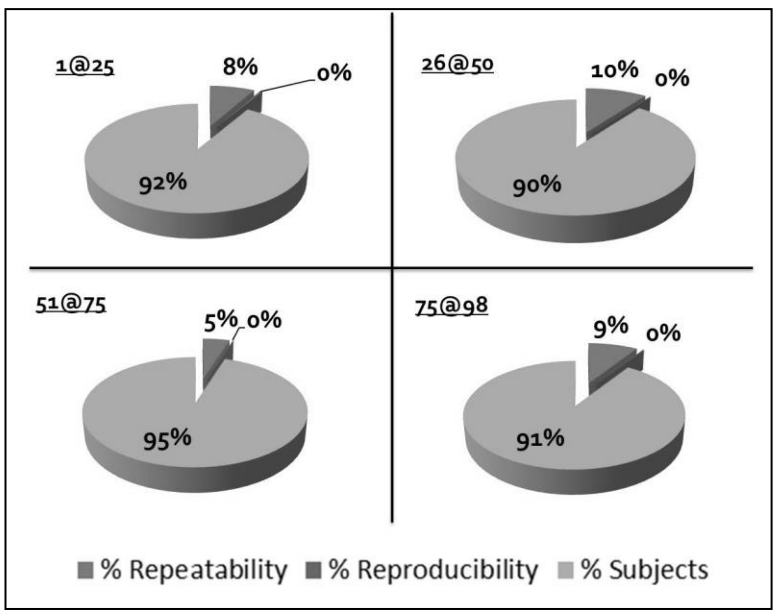


Figure 3-9 – Percentages of evaluation variability for Usefulness (4 samples : 92%)

In short, we calculated the standard deviation (SD), the variance and their percentages. The measurement system is responsible for 8.5% of the total variance (see Table 3-6), 6.7% of the variance being caused by the repeatability and 1.8% by the reproducibility. For an engineering process, a 10% limit is usually the maximum acceptable (Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010; Ostle et al., 1996; Wheeler, 2006). This value is therefore judged acceptable. In other words, 91.5% of the variance is due to the subjects' differences.

Table 3-6 – Types of variances

Variations	Standard deviation	Variance	% (R & R)	% (R & R Tot)
Repeatability: measure to measure	5,79	33,55	78,82	6,70
Reproducibility: judge to judge	3,00	9,02	21,18	1,80
Subject to subject	21,40	458,00		91,50
R & R total	8,80	42,57	100,00	**8,50**
Total	30,20	500,57		100,00

3.5 Discussion and conclusion

3.5.1 Phase 1

In Phase 1, 22 subjects completed the CEDA test. With the assessment guidelines provided by (Charyton, 2014), the three judges performed a first round of assessment. The guidelines concerning the two criteria fluency, flexibility, on how to count the items and categories them were reasonable to follow but those regarding originality and usefulness were much less practical. They caused assessment difficulties so that the judges had to meet and discuss several answers. Even though a few words were provided to describe the Likert scale (Table 3-3 & Table 3-4), the judges felt they did not describe with enough details the possibilities revealed in the tests. What is "somewhat interesting"? What is "moderately useful"? *"To score Originality (Uniqueness), rate each design on the scale from 0 to 10. Scorers or judges should think of a word on your own that describes each design and then look on the rubric list to find the word and assign that number to the design."* (Charyton, 2014, p. 21). No completed assessment sheets (examples with designs and scores) were ever published or available to understand how the judges worked in Charyton's team. We are aware that the descriptions we came up with still leave room for personal judgement. However, with little training supported by a manual containing examples (designs and scores), judges should be better equipped to make more precise assessments.

Another difficulty was the assessment of the "overall" subject's production suggested by Charyton. "*Each design should be assessed separately (D1, D2). Then, an overall evaluation of the entire problem should be rated. The Originality score for the entire problem (Overall) will be the score that is analysed and becomes the overall Originality score for the problem. Although* *each design score can be inputted and analysed, we recommend using the overall problem score. It is also important to note that this process of scoring each design is pertinent towards making an assessment of the overall Originality score per problem*." (Charyton, 2014, pp. 21-22). This explanation was not convincing and did not sufficiently describe how this overall score could or should be used. Also, according to Charyton, all scores should be added up (D1, D2, Overall). Given these obstacles, we made changes to this strategy in Phase 2.

We performed an *R&R* statistical analysis to see if the three judges were able to adequately repeat their assessments over time (period of 2 months) as well as come up with similar scores (overall precision of the assessment system). In this phase, the judges followed the aggregation method suggested by Charyton. She proposes a formula adding the four scores (fluency, flexibility, originality, usefulness) but the two scores of originality and usefulness are multiplied by 2. The explanation provided by the author is the following: "*The correlations for the revised formula with usefulness (2* Usefulness added to the original CEDA formula) illustrates similar findings with the new scoring of the revised CEDA compared with the previous scoring method without usefulness*." (Charyton, 2014, p. 18) When asked in a personal communication to give more details, Charyton added "*this formula was based on theory in relation to the conceptualization of originality and usefulness as integral components of creativity specific to engineering design"*. We still had serious reservations so we made adjustments in phase 2.

3.5.2 Phase 2

Charyton proposed an evaluation of every design but also added a third one, more global, to give an average score for each pair of designs (Figure 3-5 – B). In collaboration with a statistician, we determined this score was unnecessary as it represented an average of two scores we already sum up. Moreover, it accentuated the gap between judges. It was an additional judgment not even assessing a specific element of design.

An important problem arose when a specific situation occurred: if subjects came up with only one of the two designs per problem, they would get a score for the first one (*e.g.*, 3-somewhat interesting) but would get 0 for the second one. What should be the overall score? 0-1-2-3? How does it adequately represent the overall subject's performance? To overcome this hurdle, we decided to eliminate the overall score. Statistically it was pulling apart the judges' assessments and theoretically it was not adding any information to the result.

As mentioned above, we felt uncomfortable using the CEDA's original scoring formula proposed by Charyton because it was lacking specifications. We found limited statistical and theoretical explanations as why originality and usefulness numbers should be doubled as well as the reference value of 100 for the fluidity and flexibility criteria. Therefore, in phase 2, all four scores were calculated independently and no total scores were tabulated. This would allow us to do more specific analysis on each criterion and keep differences between judges to a minimum.

Even with these modifications, the CEDA remains a relevant tool since it provides an overall assessment of creativity (five creativity elements and four evaluation criteria), which is particularly rare in the literature on the subject.

3.5.3 Final comments

This study had two objectives: test the reliability of the CEDA measurement system and clarify the assessment process of CEDA. For the first objective, we used the "gage R&R" method to verify reliability in regards to two aspects, repeatability and reproducibility. With 91.5% of the evaluation variation caused by the subjects (not the judges or the test itself), the test was proven highly reliable. The second objective was achieved by organizing discussions between judges about the classification and scoring of the subjects' design works. That yield longer and hopefully better descriptions of the qualitative Likert scales for the originality and usefulness criteria, as well as a critique and a revision of the scoring process.

It was innovative to use the "gage R&R" method to analyze data from a psychometric test. To our knowledge, it is not a common application. It has an advantage over other types of analysis commonly used in social sciences (*e.g.*: variance component analysis), as it can be done on a small sample.

For future research, it is believed that an overall score, a composite indicator of creativity, could be established with more precision and specifications. A single score would be easier to manage and work with (compare, rank, etc.) than four. Charyton did use an overall score but it remains questionable for the reasons evoked above (multiplication by 2, overall problem score). Also, from a statistical point of view, the scores of fluidity and flexibility are always very close to each other, and seem highly correlated. Should they be merged together or should one be eliminated?

Interesting research could be done in this direction. Finally, we started to build a visual guide with the different designs collected to ease and simplify the assessment process. Sketches with scores could be used to guide future judges in their assessments and help them provide comparable results from one study to another.

Acknowledgments

We are grateful for funding to the first author from the *Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies* (FRQNT).

REFERENCES

Automotive Industry Action Group (AIAG). (2010). Measurement System Analysis (MSA) (pp. 241): Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors Corporation.

Carpenter, W. A. (2016). *Engineering creativity: Toward an understanding of the relationship between perceptions and performance in engineering design*. (PhD), University of Akron, Ohio, USA.

Charyton, C. (2014). *Creative Engineering Design Assessment: Background, Directions, Manual, Scoring Guide and Uses*: Springer Londonpages

Charyton, C., Jagacinski, R. J., & Merrill, J. A. (2008). CEDA: A Research Instrument for Creative Engineering Design Assessment. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, 2*(3), 147-154.

Charyton, C., Jagacinski, R. J., Merrill, J. A., Clifton, W., & Dedios, S. (2011). Assessing Creativity Specific to Engineering with the Revised Creative Engineering Design Assessment. *J. of Engineering Education, 100*(4), 778-799.

Charyton, C., & Merrill, J. A. (2009). Assessing General Creativity and Creative Engineering Design in First Year Engineering Students. *J. of Engineering Education*, 145-156.

Clary, R. M., Brzuszek, R. F., & Fulford, C. T. (2011). Measuring Creativity: A Case Study Probing Rubric Effectiveness for Evaluation of Project-Based Learning Solutions. *Creative Education, 2*(4), 333-340.

Cropley, D. H., Kaufman, J. C., & Cropley, A. J. (2011). Measuring Creativity for Innovation Management. *Journal of Technology Management & Innovation, 6*(3), 13-30.

Guilford, J. P., Christensen, P. R., Merrifield, P. R., & Wilson, R. C. (1960). *Alternative Uses Manual*. Retrieved from

Harris, D. (1960). The Development and Validation of a Creativity Test in Engineering. *Journal of Applied Psychology, 44*(4), 254-257.

Kim, J. (2014). *An assessment method to evaluate team project based engineering design*. Paper presented at the The 9th International Conference on Computer Science & Education, Vancouver, CA.

Kim, K. H. (2006). Can We Trust Creativity Tests? A Review of the Torrance Tests of = Creative Thinking (TTCT). *Creativity Research Journal*, *18*(1), 3-14. doi:10.1207/s15326934crj1801_2

Kline, T. J. B. (2005). *Psychological Testing, A practical Approach to Design and Evaluation*. Californie: Sage Publications.356 pages

Ostle, B., Turner, K. V., Hicks, C. R., & McElrath, G. W. (1996). *Engineering Statistics, The Industrial Exprience*. USA: Duxbury Presspages

Piffer, D. (2012). Can creativity be measured? An attempt to clarify the notion of creativity and general directions for future research. *Thinking Skills and Creativity, 7*, 258-264.

Plucker, J. A., & Runco, M. A. (1998). The Death of Creativity Measurement Has Been Greatly Exaggerated: Current Issues, Recent Advances, and Future Directions in Creativity Assessment. *Roeper Review, 21*(1), 36-39. doi:10.1080/02783199809553924

Smith, S. M., & Ward, T. B. (2012). Chapitre 23 : Cognition and the Creation of Ideas. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Eds.), *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning* (pp. 456-474).

Treffinger, D. J., Young, G. C., Selby, E. C., & Shepardson, C. (2002). *Assessing Creativity: A Guide for Educators*. Retrieved from University of Connecticut:

Wheeler, D. J. (2006). *EMP III (Evaluating the Measurement Process) : Using Imperfect Data* (3rd ed.): SPC PRESSpages

Wheeler, D. J., & Chambers, D. S. (1992). *Understanding Statistical Process Control*. Tennessee, USA: SPC Presspages

CHAPITRE 4 : ARTICLE 2 : DO FUTURE ENGINEERS HAVE A CREATIVE THREAD? AN ANALYSIS OF TWO COGNITIVE EXERCICES AND A TEST

(Sophie Morin, Jean-Marc Robert, Liane Gabora; Creativity Research Journal)

4.1 Context

The capacity to generate original and useful ideas depends largely on organizations' ability to stimulate the creative potential of their employees as well as their own capacity to engage in a creative process (Cropley, 2015; "Global Agenda Council on Design & Innovation 2012-2014," 2013).

It is widely believed that creativity often involves making connections between concepts or ideas in distant domains (Bonnardel & Marmèche, 2005; Knoll, 2010; Liikkanen & Perttula, 2010; Marupaka, Iyer, & Minai, 2012). A rich knowledge network of multiple links and many concepts is expected to allow easier access to remote but interconnected ideas. Mednick (1962) described his vision of creativity in those terms: "creative people should have a richer, better connected, and more flexible associative network than less creative people". Learning how to take advantage of these networks and optimize related cognitive processes appears as a promising avenue.

Moreover, creative tasks ranging from highly constrained analogy problem solving to highly unconstrained art making involve the "actualization of potentiality" (Gabora & Saab, 2011). This means that the creative task induces a cognitive state that is an amalgam of potentially disparate thoughts, memories, and concepts, which feels subjectively like a 'half-baked idea' and which can be mathematically described as a state of superposition (Aerts, Gabora, & Sozzo, 2013; Gabora & Aerts, 2002, 2009). An idea can unfold in different ways depending on the different contexts it interacts with, *i.e.* perspectives it is considered from. We suggest that by teaching students to be comfortable with half-baked ideas, and trust in their own abilities to develop them, students' creative potential could be enhanced.

4.1.1 Research objectives

This study has two principal objectives: (1) Describe/investigate encoding retrieval abilities and state of mind in regards to analogy for future engineers and (2) Connect these two cognitive aspects with creative performance. The next section presents the methodology followed to achieve those objectives.

4.2 Methodology

To achieve our objectives, we adopted a 3-part testing approach. Figure 4-1 illustrates the approach.

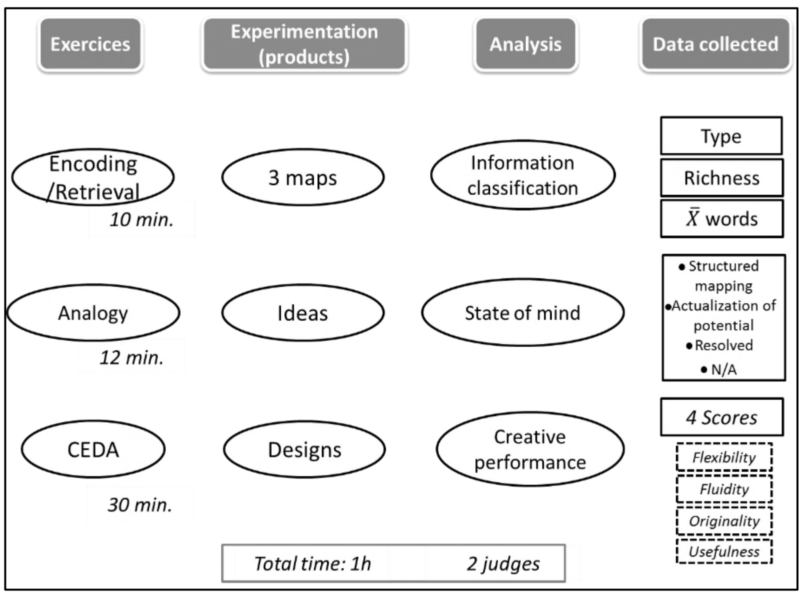


Figure 4-1 – Study structure

4.2.1 Sample

This article is the second paper of a three part study on developing an effective, theoretically anchored, creativity training program for engineers based on a cognitive approach (Morin, Bourdeau, et al., 2016; Morin, Robert, et al., 2016b). To be consistent between these studies, all participants in this research project were engineering students. They were following the same course (“Integrative project”) at Polytechnique Montreal (2nd year industrial engineering). We were able to contextualize the exercises and the test with pedagogical activities on creativity.

Besides the exercises and the test, a socio-demographic questionnaire was used to better understand the sample. Participants provided general information such as gender, age group, engineering program and education profile (Table 4-1). Participants' confidentiality was ensured by coding the results. Only the principal researcher could track participants if additional or complementary information was needed. An ethical certificate was obtained to proceed with the research.

Table 4-1 – Sample description

Number of students	98
Genders (Female; Male)	50; 48
Education in engineering (Undergrads)	98
Age (20-29; 30-39; 40-49)	94; 3; 1

4.2.2 Study design

This section presents the material, task, experimental design and procedure used for the study. During the experimentation, participants were told that the exercises and the test were to study the cognitive skills related to creative performance and that two judges would evaluate the two exercises and the test produced.

Material. Subjects were given the exercises and the test in one paper document. They could use any of their own such as crayons, pencils, erasers.

Task. The subjects take 1 hour to complete the three parts. First, the principal researcher used a power point presentation to guide the subjects with the stimuli (time and images) for the encoding retrieval exercise. Second, the analogy exercise was performed with the methodology described in section (see 4.2.4.2.1). Thirdly, the CEDA was presented on four pages, three with problems and one with guidelines.

Judges' task. (1) Encoding retrieval exercise. The procedure followed is described in section 4.2.4.1. (2) Analogy exercise. The procedure followed by the judges is described in section 4.2.4.2. (3) CEDA. The original assessment process and its modifications are presented in section 4.2.4.3. They used objective/quantitative measures for fluidity and flexibility, and subjective/quantitative measures (on two Likert scales) for originality and usefulness.

4.2.3 Judges

Two judges (woman) between 25-30 years old, made the final assessments. Several meetings allowed a collaborative work between the judges. They discussed, shared opinions and assessments strategies to ensure coherent and reliable results. The assessments were repeated twice in time to verify the process' reliability. Between the assessments, a two-month period was left to allow judges to "forget" what they assessed.

4.2.4 Exercises and test

The sections below describe the theoretical elements that support the use of the two exercises and the test in this study of cognitive processes related to creativity and their results. Discussions follow in the next section.

4.2.4.1 Encoding retrieval exercise

Information is classified and stored in the brain as networks (Mumford et al., 1997). Much like a spider web, words, concepts or ideas form nodes and links built according to the conditions in which they were learned (Mumford, Baughman, Supinski, & Maher, 1996). It is defined as "context-addressable memory" (Hinton & Anderson, 1989). We will refer to this structuring process by the encoding process. For example, the word "ski" does not evoke the same image if we add the context "winter" or "summer" (Figure 4-2).

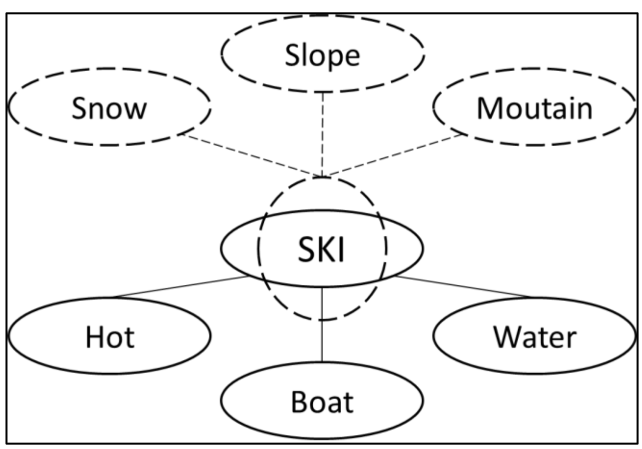


Figure 4-2 – Encoding illustration

With the help of virtual associative networks, researchers demonstrated what Mednick suggested in his work. They created 3D networks to illustrate how words were connected to each other in peoples' work such as poems or stories. By combining results from creativity tests (remote associations) and this 3D mapping of concepts, they concluded that more creative individuals tend to have more complex and interconnected networks. "*In a recent study, Yoed Kenett and colleagues applied network science tools to directly examine Mednick's theory among the general population. […] If Mednick is right, then creative people should have a richer, better connected, and more flexible associative network than less creative people. And that's exactly what they found*." (Kaufman, 2015). Following this viewpoint, we created an encoding retrieval exercise to assess participants' networks of thoughts.

4.2.4.1.1 Mind maps

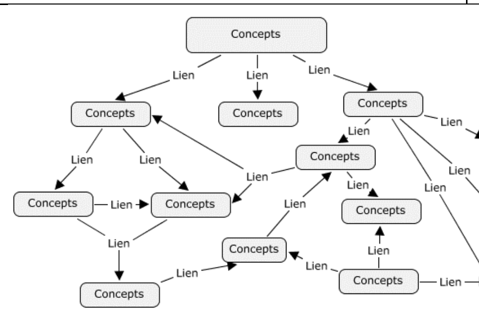
As other researchers in the domain do to study associative thinking (Doumit, Marupaka, & Minai, 2013; Kaufman, 2015), we hypothesized that the way a person represents information on a sheet of paper is representative of how this information is encoded in his memory. That is to say, the number of words (concepts) and especially links between words (concepts) is indicative as how the person stored and organized the information into his or her brain

Several tools based on the principle of maps used to accompany reflexive processes (Davies, 2011; Eppler, 2006) were developed in learning contexts: mind maps (Buzan, 2011), concept maps (Novak & Cañas, 2007), conceptual diagrams and visual metaphors. For the purposes of this research project, we have chosen to combine complementary characteristics of concept maps and mind maps as recommended by Eppler (2006) in an article which compared these learning tools.

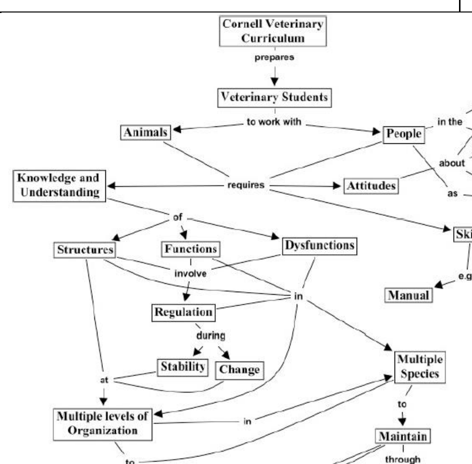
The concept map is used in an academic context for evaluating concepts' understanding. The mind map rather serves during exercises of "brainstorming" or, more specifically when individuals show divergence in their ideas (Brinkmann, 2003). Concept maps are known for their ability to update knowledge networks (Kinchin, 2008) while the mind maps are used to display how the information is stored (Davies, 2011).

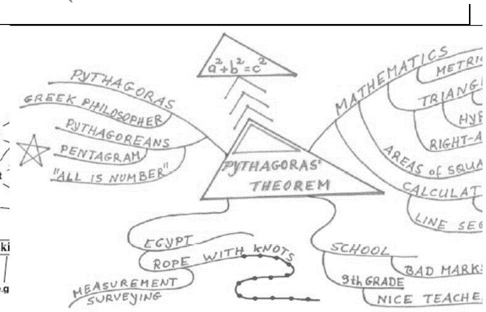
Table 4-2 describes the main features of each type of maps.

Table 4-2 – Mind maps and concept maps comparison (Brinkmann, 2003; Eppler, 2006)

<table>
<tr><th>Elements</th><th>CONCEPT MAP</th><th>MIND MAP</th></tr>
<tr><td>Objective</td><td>Represent logical connections between key concepts related to an identified problem.</td><td>Represent visually and pictorially the hierarchical structure of a concept.</td></tr>
<tr><td>Rules</td><td>• Illustrates the "hierarchy" of concepts
• Has an initial question
• Identifies concepts to classify
• Has a link word that logically connects the concepts</td><td>• Illustrates concepts hierarchically
• Has an original concept
• Is able to contain drawings
• Presents the words on branches
• Leaves room for the creativity of individuals (colors, shapes, images)</td></tr>
<tr><td>Mapping</td><td>


</td><td>


</td></tr>
<tr><td>Examples</td><td>


</td><td>


</td></tr>
</table>

Table 4-2 – Mind maps and concept maps comparison (Brinkmann, 2003; Eppler, 2006) (suite)

Elements	**CONCEPT MAP**	**MIND MAP**
Basics	• Representing concepts in relation with others helps to make the most significant and extensive learning. • Make links and qualify the links between concepts can force the learner to create a cognitive structure of understanding.	• Classify, sort and organize information to promote its understanding and assimilation. • The use of colors, shapes, designs, etc. will make concrete and visual what is in the brain.
Uses	Pedagogical: • Ensure learners' understanding of a concept, a subject • Verify the accuracy of links between concepts	Personal (metacognitive): • Become aware of his/her own understanding of a subject • Validation tool for one's own knowledge (education tool)

A key element to be documented in this study was the presence of connections, links or relationships between concepts put forward during the stimulus presentation. By its nature (a network), the concept map better responds to the research's needs than the mind map that is mainly hierarchical (branches). However, the apparent simplicity of the mind map and its openness to customization (colors, images, etc.), make it more appropriate for the objective of the encoding retrieval exercise as planned for this study.

It is for these reasons that we choose the term "mental map" for this research project while using the typology of concept maps for their classification.

4.2.4.1.2 Measurement instrument -Maps

The inspiration for the encoding retrieval exercise came from an activity organized for a creativity workshop and the free association task (Kenett, Anaki, & Faust, 2014). As a divergent thinking exercise, participants were asked to describe what they thought about different concepts and compare it with others to see how similar or different they were with respect to content and presentation (*e.g.*, lists, drawing, networks, mind maps). Based on the experience and the comments raised, the exercise was constructed with three different stimuli, a picture (grey ball), a word ("cube") and a common object (computer mouse) (Figure 4-3).

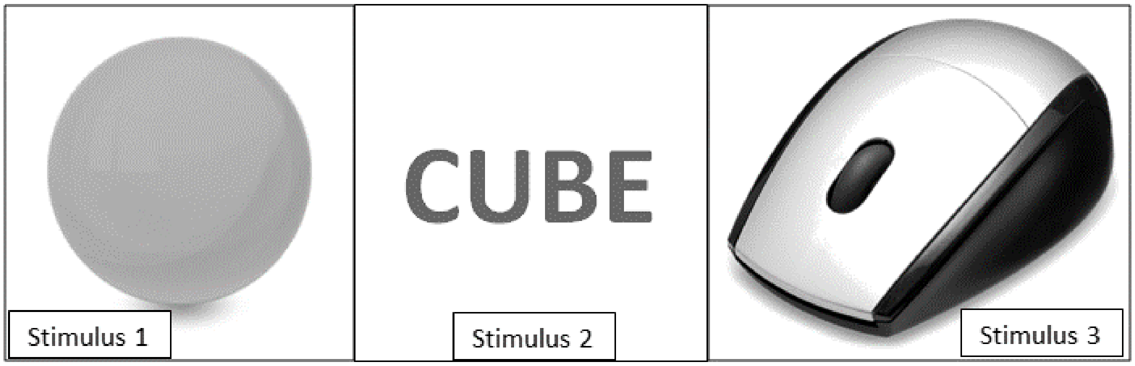


Figure 4-3 – Stimuli used for the encoding retrieval exercise

The first two stimuli are general *i.e.* they can evoke several things for the same person, leaving room for interpretation. For example, a ball may represent a planet, an atom, a gumdrop or a bead while a cube can remind you of sugar, a house, edges or a box. However, a computer mouse directly suggests a function or use and leads the participants to a hasty specific classification. The third stimulus will help to investigate whether a specific object modifies the characteristics of mental maps (*e.g.*.: shape, number of concepts, etc.). With three different stimuli, we will see if there are encoding differences depending on the type of stimuli (general vs specific, word vs drawing).

A crucial part of the exercise is that no specific information was given as to what kind of map was expected. Two instructions were given: (1) You have 4 minutes to illustrate what the presented stimulus evokes for you; show everything it makes you think of. (2) Any form of representation is adequate (e.g.: text, drawing, picture, figure). According to our exploratory experiments, these instructions are sufficient.

First, the encoding retrieval exercise instrument was used with a group of 15 people at a "Poly-Art" conference at Polytechnique Montreal. The objective of this exploratory exercise was to check whether the exercise allowed to observe the types of maps presented by Kinchin (2008). He suggested a simple classification, composed of three families, the spoke, the chain and the net (Figure 4-4).

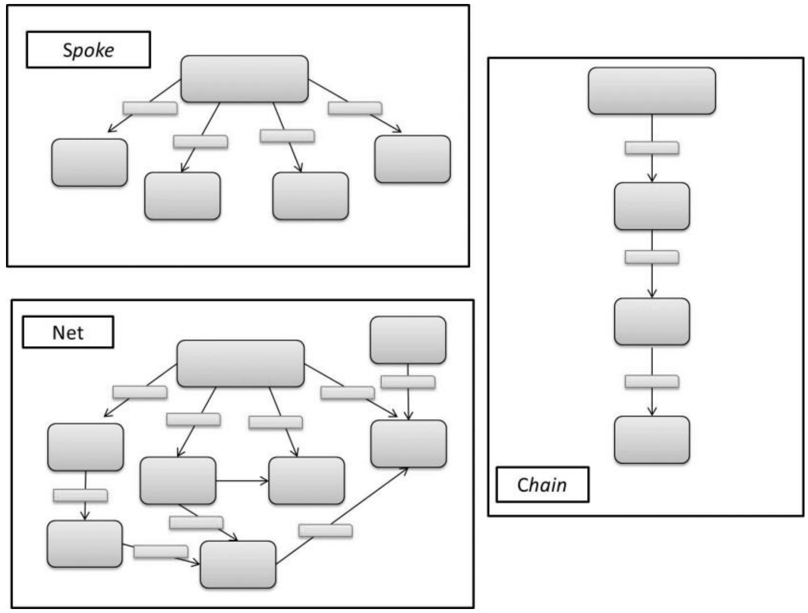


Figure 4-4 – Map typology (Kinchin, 2008)

The results confirmed the presence of the three basic types of forms (spoke, chain, net) but these turned out to be insufficient; more complex types and subcategories were needed. We added a “drawings” category to classify maps that would be in that form. We also created combinatorial categories to represent “hybrid” maps (Table 4-3). The objective of this part of the research project is based on the descriptive aspect of mental maps. Therefore, we chose to define more precisely the maps’ shapes produced by the participants.

Table 4-3 – Typology for assessing mental maps in this research project

Categories (Kinchin)	**Sub-categories (our project)**
(1) Spoke	(2) Spoke with chain
(3) Chain	---
(4) N*et*	(5) Net with chain
Drawings	Added to all others

The three mental maps developed by the participants were rated according to three criteria: type of map, number of words and word originality (richness). The judges first associated each map with one of the five types described above (Spoke, Chain, Net, Net with chain, Spoke with chain). Then they added up the number of words (or expressions) that appeared on each map to calculate an average number for the three maps. Finally, they made a judgment on the words’ originality with an 11 point Likert scale (0-10). After agreeing on basic principles, the judges performed a first assessment individually. Then they discussed the maps that obtained different results to see if a consensus could be found. During this process, no maps caused a significant divergence in opinion.

4.2.4.1.3 Encoding retrieval results

The maps collected took many different forms. One of the goals was to see how the students would spontaneously display the information extracted from their memory, so we purposely did not give specific instructions. However, with the typology chosen, we were able to classify all the responses. As shown in Figure 4-5, even though the left image looks like a "list", we classified those structures as spokes. We made the decision to consider a list, *i.e.* where every word is related directly back to the stimulus, as a spoke.

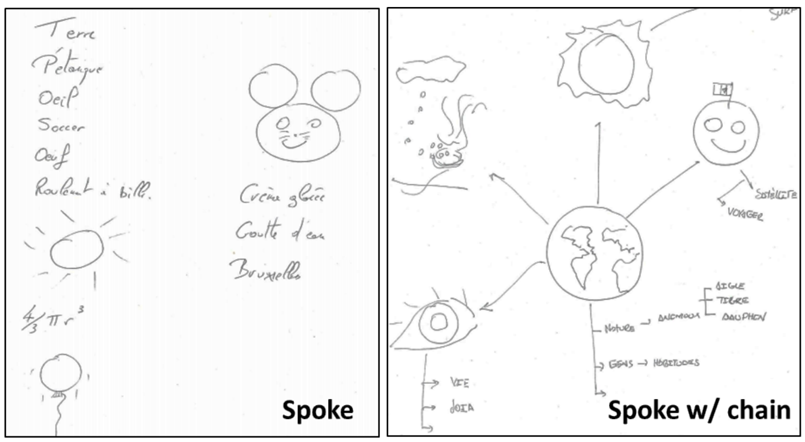


Figure 4-5 – Mental maps examples

Figure 4-6 shows that a clear majority of students (54 + 35 = 89%) is classifying information as a spoke or spoke with chain. A small number showed chains and only 2% contained nets.

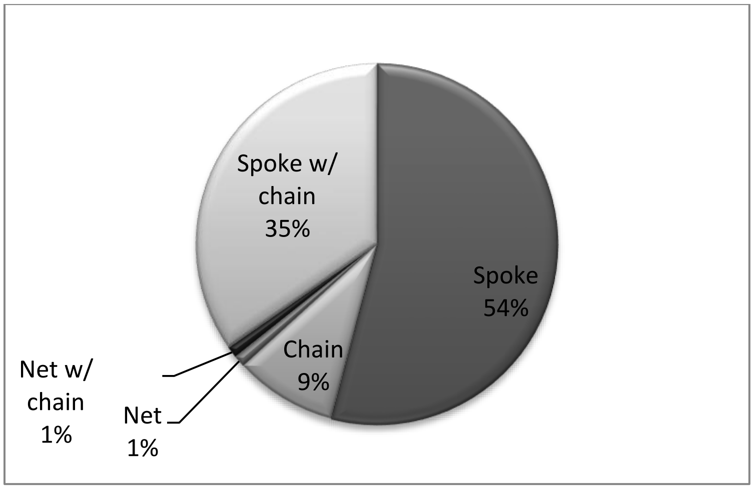


Figure 4-6 – Encoding retrieval results: Map Types

Figure 4-6 shows a normal appearing distribution from 0 to 6 for the originality score. No one was attributed scores from 7 to 10.

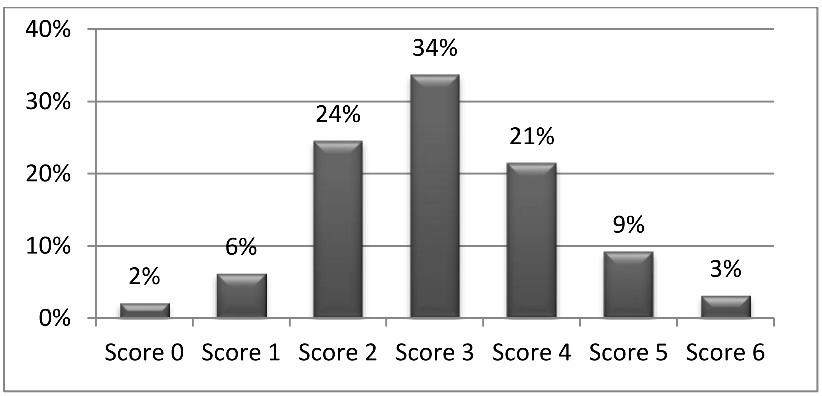
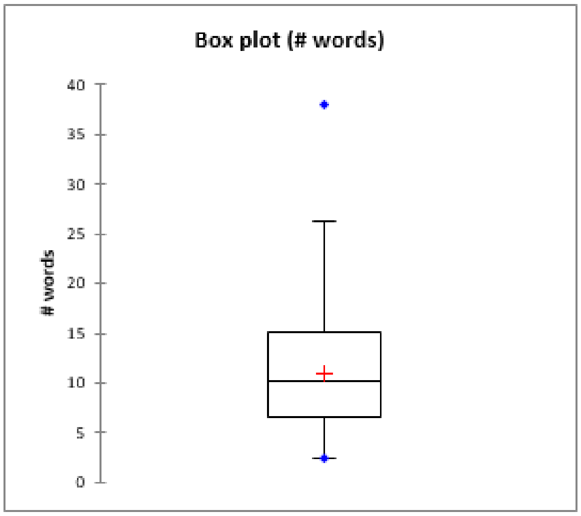


Figure 4-7 – Encoding retrieval results: Originality score

Figure 4-8 presents descriptive statistics for the encoding retrieval exercise. Fifty percent of the participants came up with an average between 6.67 and 15.09 words for the three maps. We did not count the number of links as planned. Because the maps were organized as chains, the number of words was almost always equal to the number of links so we discarded this variable.



Range	2.3 - 38
Average	11.01
1st quartile	6.667
Median	10.167
3rd quartile	15.083

Figure 4-8 – Encoding retrieval results: Average number of words

4.2.4.2 Analogy exercise

The notion of potentiality, presented by Gabora & Saab (2011), refers to a state of mind associated with the resolution of an analogy.

> « *When an idea emerges through creative interference, the contributing items are not searched or selected amongst because together they form a single structure. This structure can be said to be in a state of potentiality because its ill-defined elements could take on different values depending on how the analogy unfolds* » (Gabora & Saab, 2011, p. 2).

We believe it is appropriate to consider "potentiality" as another cognitive element taking part in the creative process (Bonnardel, 2000; Chan et al., 2011; Linsey, Markman, & Wood, 2012). As explained previously, the creative process being primarily based on the ability to make connections between concepts, the state of mind related to the potentiality of ideas appears to be relevant when studying creativity.

Gabora & Saab (2011) proposed a potentiality exercise that identifies a person's state of mind when making associations in the form of an analogy resolution. It was used in an english-speaking environment so the instrument was translated into French for the present study.

4.2.4.2.1 Measurement instrument – "The General"

This exercise has three steps : the exposure to the source, the exposure to the target and the monitoring (Gabora & Saab, 2011). During the first step, participants have five minutes to read a short text (*The General*) and write a short summary of the main elements (to ensure they understand the subject). Secondly, they read a second text (*The Radiation Problem*). No indication is given as to a possible link with the first text. After 100 seconds, the participants are stopped in their thinking process and asked to write exactly what they were thinking at that moment. It is this response that identifies the state of mind. According to pilot studies conducted by Gabora, on average it takes 180 seconds to solve the problem of analogy. Since the objective is to capture the ideas under development, it is important to interrupt the process of reflection before it ends. Finally, in the third step, participants are asked if they had noticed a relationship between the two problems and if so, when.

This exercise has been used since 1980 to study analogical problem solving (Gick & Holyoak, 1980). Developed in the United States, the experience could only be found in English. Supported by a translating software, the principal researcher proceeded to translate in French the two texts involved. A pre-test version was conducted to ensure adequate instructions understanding. A first data collection phase (22 subjects) validated the exercise's usability. Being an "American" exercise, we did not challenge the culture bias. Mostly used by researchers in the psychology field, undergraduates from psychology courses were usually chosen as participants for the exercise. However, our participants being future engineers, we believed they had the scientific background to grasp the theoretical aspects addressed (medicine, military strategy). Finally, because the first step is to write a short summary, it was considered that if there were understanding problems they would be identified.

Two judges determined the category of the state of mind for each participant. To do this, they evaluated the elements of response submitted by the participants in step 2. Three analogies could be drawn between the two situations. They are presented in Table 4-4.

Table 4-4 – Analogy elements (Gabora & Saab, 2011, p. 3509)

The General (source)	**The Radiation Problem (target)**
1. Multiples groups of soldiers	1. Multiple rays
2. Small groups	2. Low intensity rays
3. Groups converge from different directions	3. Rays converge from different directions

According to the responses provided during this exercise, participants were classified in one of four categories: structured mapping (SM), actualization of potentiality (AP), resolved or N/A. This was possible by comparing responses with a correction grid (presented in Table 4-5) as well as with examples given by Gabora & Saab.

Table 4-5 – Characteristics used to judge incomplete analogy solutions (Gabora & Saab, 2011, p. 3509)

Structured Mapping (SM)	**Actualization of potentiality (AP)**
- If multiple solutions are given they are considered separate and distinct (for example, separated by the word ‘or’)	- If multiple solutions are given they are jumbled together
- Does not contain extra, irrelevant information	- Contains extra information that would be relevant for related problems but that is not relevant for this one

Since we were interested in what happens during the resolution of analogy, participants who solved the analogy were subtracted and placed in the « resolved » category. While making the assessment of certain copies, we observed that a few participants didn’t give any clue as to their state of mind (e.g.: "I do not know anything in the field" or "I do not know"). So in addition to the two possible outcomes suggested by Gabora’s research (CS, AP), and following an exchange of emails with her, we added a third and fourth category: “N/A” and Resolved.

4.2.4.2.2 “The General” results

Figure 4-9 shows a large portion of participants (76.53%) in the “actualisation of potential” (AP) category. We added and reported the “resolved” category as well as the “N/A” category instead of removing those copies as Gabora did. It the case of structured mapping (SM), it is shown that only 10% of the participants fall in this category that was considered the single possibility.

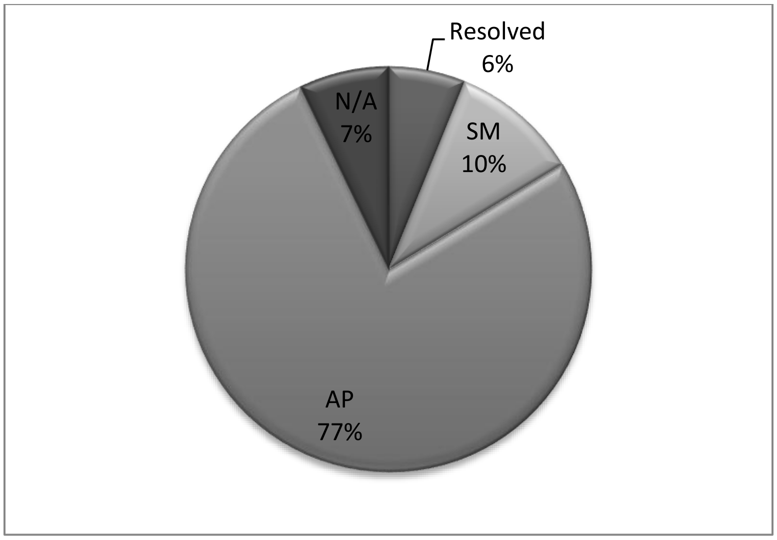


Figure 4-9 – Potentiality results

Finally, a creativity test specifically designed for engineers was used to measure the participants' creativity in regards of four criteria.

4.2.4.3 Creative Engineering Design Assessment: creativity test

The Creative Engineering Design Assessment (CEDA) is a recent instrument developed to specifically assess engineers' creativity (Charyton et al., 2008). The next section explains the theoretical framework behind the test, how it was administered, how the pre-test was done and how the data were analysed.

Unlike many other creativity assessment tools (*eg*.: CAP = Creativity Assessment Packet; RAT = Remote Association Test; SOI = Structure of Intellect; TTCT = Torrance Tests of Creative Thinking; WKCT = Wallach–Kogan Creativity Test; CCh = The Creativity Checklist) (Lemons, 2011; Piffer, 2012), the CEDA can take into account five elements of the creative process (

Table 4-6). Usually, instruments only measure divergent thinking since the latter is often associated, even confused, with creativity. However, it is widely believed that creativity has several other aspects that deserve to be studied in order to get an overview of someone's creative performance. Especially for engineers, being able to satisfy constraints, solve problems and identify opportunities for improvement ("problem finding") are essential aspects of their work.

Table 4-6 – CEDA and the creative process (Charyton & Merrill, 2009, p. 146)

Creative Process	**CEDA assessment elements**
Divergent thinking	2 different solutions for each problem
Convergent thinking	One solution given for each problem
Constraint Satisfaction	Shapes used and materials added within the parameters of design
Problem finding	Identifying other uses for their design
Problem solving	Solving the given problem with a novel or novel designs

When administering the CEDA, the same exercise is repeated three times with certain nuances. The participants are expected to create six concepts. The number of objects suggested increases from two to three to four (tube, sphere, cube, pyramid). The "problem" to be solved also changes three times (designs that produce sound, that facilitate communication, that can travel). Figure 4-10 depicts the instructions as they are presented in the test.

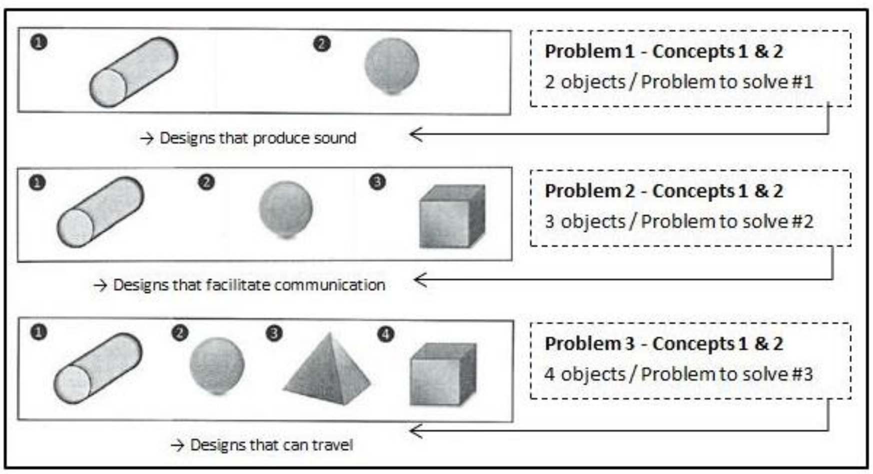


Figure 4-10 – CEDA Instruction structure

The test lasts 30 minutes. It provides a score (a number) for comparing students to each other and to themselves if the test is retaken. The author of the test says that the higher the score is, the more creative a person is. However, there is no guidance on the level of performance that corresponds to a "good" or "bad" score.

The test is based on a well-known test, the *Purdue Creative Test (PCT)* (Charyton & Merrill, 2009; Harris, 1960b). According to Harris's article, it appears that the use of simple geometric shapes as well as the use of three assessment criteria (fluency, flexibility, originality) influenced Charyton when designing the CEDA. However, nowhere do Charyton explains how she proceeded to create the CEDA from the PCT. Therefore, we could not explain with certainty why those four forms (cube, cylinder, ball, pyramid) were chosen. Also, there is no information on the process used to determine the three “problems” suggested.

Tests results from 22 participants were used to practise, discuss and establish a solid assessment foundation. The interpretation of the CEDA requires the use of more than one judge who must assess the work of the participants in an evaluation grid. Very little information is available about the test’s evaluation process. The only specifications of Charyton mentioned that judges received two hours of group training. Given these limitations, we defined our own assessment process. An article is dedicated to this particular study (Morin, Bourdeau, et al., 2016) but following is an overview.

First, a preliminary discussion took place before starting the evaluations to allow the principal researcher to explain the ground rules to the other two members of the jury. Then the three judges assessed individually, twice (spaced by few weeks) the 22 tests. Following that step, meetings were held to discuss results and correct strategies if needed.

The CEDA has four main assessment criteria: fluency, flexibility, originality and usefulness. The first two criteria are quantitative and cause no particular problem even thought specific aspects can be debatable (flexibility criteria). They consist in counting the number of responses (fluidity) for each section (complete design, description, materials, problems resolved, users) and the number of different answers (flexibility).

The originality and usefulness criteria required a more elaborated protocol to ensure the reliability between judges. We used the first 22 copies to establish the scale. The three judges conducted an analysis of each design to give them a score for originality (0-10) and usefulness (0-4). They took the opportunity to detail each assessment level, which were not described in the instruction manual supplied with the test (only one word defined each level) (Figure 4-11).

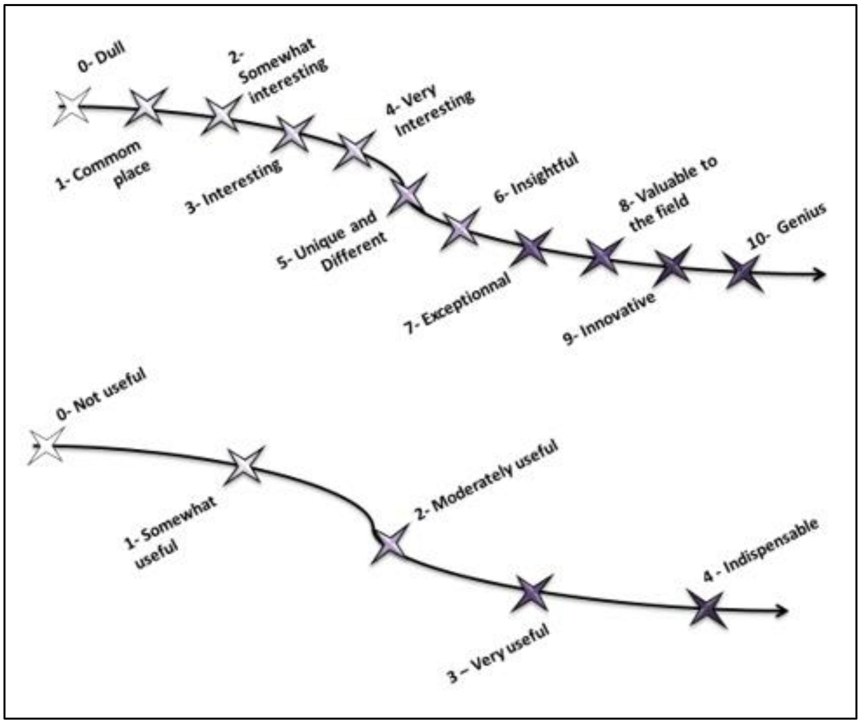


Figure 4-11 – Assessment levels of originality and usefulness in CEDA

We tried to clarify what each level meant in the test's context. With the classification of 132 designs, we described with more words what influenced our choice and defined more precisely what we expected for each level. The following two tables (Table 4-7 & Table 4-8) present the guidelines we established.

Table 4-7 - Assessment level description for the « Originality » criterion

0 - Dull	Does not correspond to the general goal suggested; common object (daily use).
1 – Common place	Designs that come often in the tests.
2 – Somewhat interesting	Minimal transformation, use of multiple suggested forms, multiple materials, added objects or materials.
3- Interesting	More « unusual » idea, an idea more insightful but not so much developed.
4- Very interesting	Combination of 2 or more simple concepts.
5- Unique and different	Combination of more developed and complex concepts, concepts not existing in this suggested form.
6- Insightful	Well developed idea, well described (details), combining multiple concepts (different fields) in a novel way.
7- Exceptionnal	*In all of our assessments, no designs obtained higher marks than 6, so we didn't have examples to discuss and compare scores 7 to 10.*
8- Valuable to the field	
9- Innovative	
10- Genius	

Table 4-8 - Assessment level description for the « Usefulness» criterion

0 - Useless	Does not respond to the general goal suggested, does not present any possible uses
1 – Somewhat usefull	Responds to the general goal suggested but has limited possible uses
2 – Usefull	Relevant uses but for very specific cases
3- Very usefull	Existing concepts but not optimal/one solution among others, existing concept that needs elaboration
4- Indispensable	Existing concepts, indispensable or integrated to modern life

The CEDA's validity was established by Charyton et al. (Charyton et al., 2011). Convergent and discriminant validities were obtained comparing CEDA results with six others results on creativity tests. Charyton used three tests measuring general, more personal, aspects of creativity such as the Creativity Personality Scale (Charyton & Merrill, 2009). Denoting low correlations between the CEDA and the three "general" creativity tests, Charyton deduced that the CEDA measured creativity in the specific context of engineering rather than general. « *Discriminant validity for the CEDA was established with the general creativity measures, […] suggesting that the CEDA is domain specific to engineering.* » (Charyton, 2014, p. 16). Also, finding average correlations for two of the three tests related to engineering, Charyton concluded that *« by directly assessing Originality and usefulness, the CEDA assesses creativity as a well-accepted standardized definition that is also domain specific to engineering.* » (Charyton, 2014, p. 17)

Even though this new instrument is starting to be known in the research community, no studies have been published reporting results or an explicit evaluation protocol. In the case of this study, Table 4-9 presents what protocol was followed.

Table 4-9 – Research protocol

Assessment steps	**Description**
Pre-test – 22 tests	
1- First presentation meeting	• Presentation of the research and test (theory, manual, general perspective)
2- Individual assessment (x2)	• Each judge had a copy of the tests with assessment grids. • They evaluated the tests twice (spaced in time)
3- Discussion, collaboration	• Three meetings, 1h each • Discussing the criteria with cut up designs
4- Conclusion	• After statistical work, we conclude we could use 2 judges (instead of three) and still have valid results.
Test – 98 tests	
1- First team meeting : two criteria assessment	• Assessment of the two quantitative criteria (fluidity, flexibility) • Each copy assessed by the two judges together
2- First individual assessment	• Each judge individually evaluated each copy with an updated assessment grid (following pre-test phase)
3- Second team meeting : discussion, collaboration	• Three hour meeting comparing grids where notable differences were seen • Discussion made to tighten the judgments.
4- Second individual assessment	• Each judge individually re-evaluated each copy with an assessment grid (few weeks after the first assessment)

First were assessed fluidity and flexibility. Given their quantitative nature, we proceed directly as a team to count the items. Time was saved and more reliable results were obtained by taking advantage of the presence of two judges. Then, each with a copy of the tests, we conducted a first assessment of originality and usefulness. When entering data, the first judge identified a number of differences. When there were more than two levels between two results (e.g.: 2 and 5), the two judges discussed to see if an agreement was possible. Most of the time, they were able to bring closer their judgments while respecting their personal opinions. When it was not possible, the results were left untouched. Finally, two months later, they proceeded to the second assessment of the same two criteria. To avoid influence between subjects, the copies' order was changed.

Lastly, it is essential to address the issue of the total score provided by this assessment tool. Charyton suggests a formula adding the four scores in the CEDA (fluency, flexibility, originality, usefulness).

Total CEDA Score for 1 of 6 designs (0–284) =
Fluidity (0–100) + Flexibility (0–100) + Originality (0–30) * 2 + Usefulness (0–12) * 2

This formula refers to a "perfect score" of 284 per problem, calculated from a maximum number of items set to 100 for fluidity and flexibility. This figure seems highly arbitrary, since according to our observations, maximum results are around 55-60. No explanations are given by Charyton to explain this number. Also, statistical reasons why originality and usefulness results should be doubled seem questionable. For these reasons, we have chosen to keep all four scores individual and not add them up. This allowed us to make more specific analyses on the criteria and especially avoid the dubious comparison with a "perfect score" of 284.

Total CEDA Score for 1 of 3 design =
Fluidity / Flexibility / Originality (0–30) / Usefulness (0–12)

Even with these modifications made, the tool remains relevant and pertinent since it allows an overall assessment of creativity, which is particularly rare in the literature.

4.2.4.3.1 CEDA results

Two types of analysis were performed with the CEDA results: descriptive statistics and principal factors analysis.

<u>Descriptive statistics</u>

As explained in the section 4.2.4.3, the four results obtained were kept separately for theoretical reasons. Table 4-10 and Figure 4-12 present various statistical results detailing the subjects' performance on the CEDA. A wide range of results can be observed for each criterion. For fluidity and flexibility, no benchmarks are available because they represent a number of items. For the originality criterion, the results obtained are based on a maximum value of 90 points.

From the 11 point Likert scale, the maximum value for each design is 10 and there are six designs in total and three global scores. For the usefulness criterion, the results obtained are based on a maximum value of 36 points. From the five point Likert scale, the maximum value for each design is four and again, there are six designs in total and three global scores. For the latter two criteria, an average was made with the results of the two judges and their two assessments.

Table 4-10 – CEDA Results : Descriptive statistics

Statistics	CEDA-Fluidity	CEDA-Flexibility	CEDA-Originality	CEDA-Usefulness
Minimum	10,0	10,0	7,0	0,0
Maximum	70,0	60,0	31,8	33,0
1st Quartile	32,0	29,0	13,3	9,8
Median	39,5	34,0	16,1	13,8
3rd Quartile	47,0	40,0	19,4	17,6
Average	40,0	34,7	16,7	13,9
Variance (n-1)	133,2	75,8	27,3	40,2
SD (n-1)	11,5	8,7	5,2	6,3

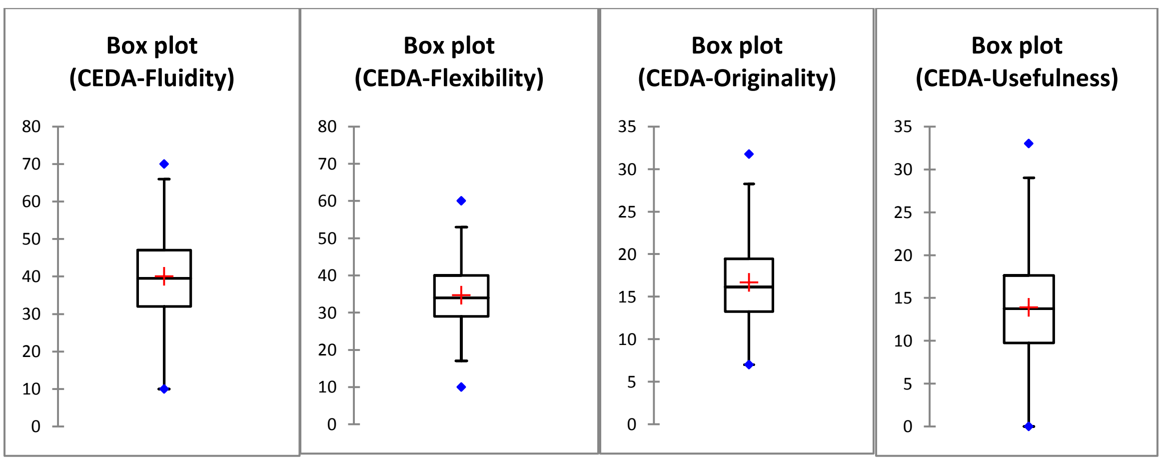


Figure 4-12 – CEDA Results: Box plots

The four histograms shown below (Figure 4-13) propose a normal distribution for each criterion. However, the Shapiro-Wilk test was used to test the distributions for normality and all but one, originality, were consistent with a normal distribution.

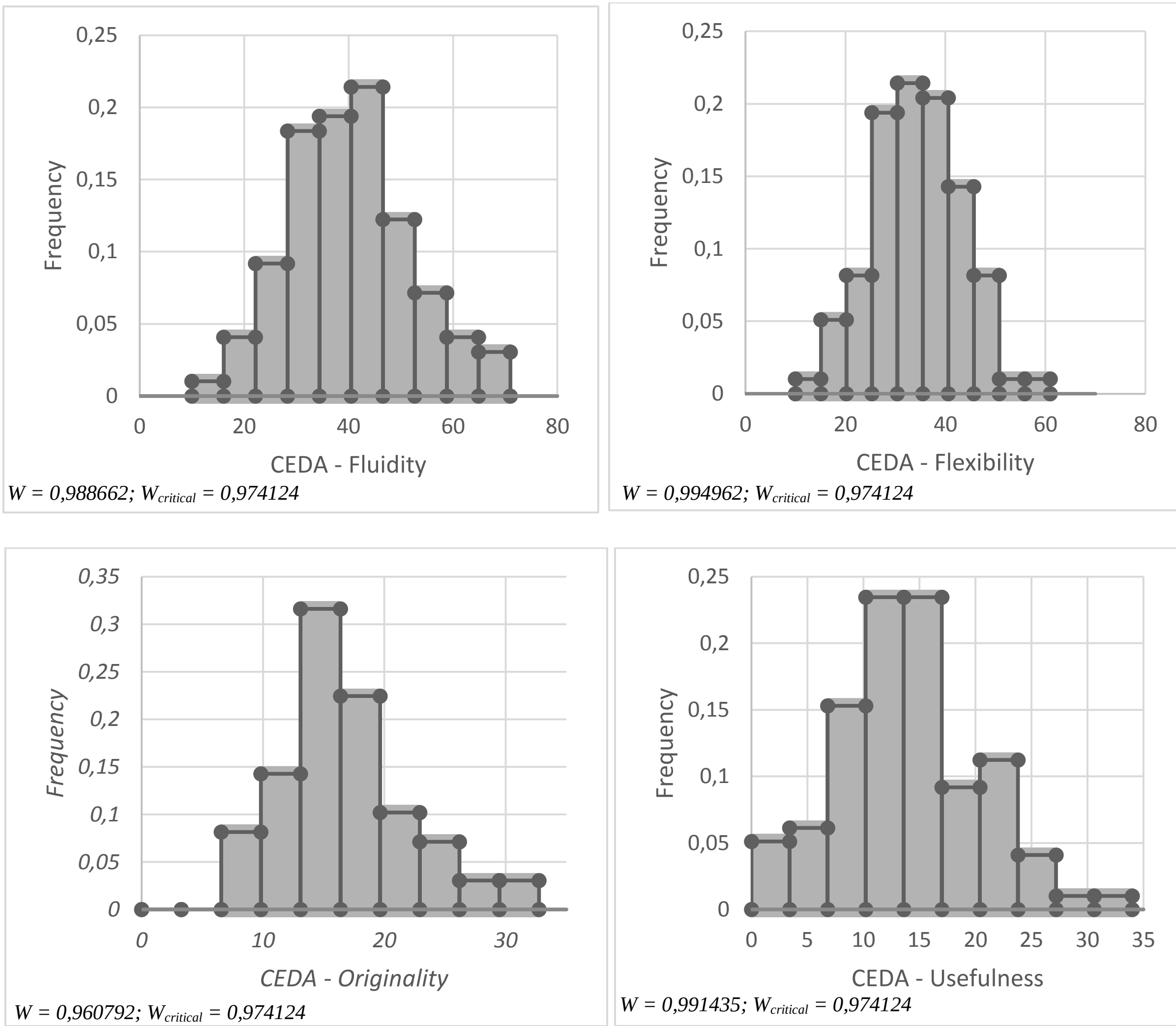


Figure 4-13 – CEDA Results: Histograms (Shapiro-Wilk W; $W_{critical}$ at 5% significance)

Principal Component Analysis (PCA)

Figure 4-14 shows that fluidity and flexibility are statistically very close to each other and that originality and usefulness are orthogonal. These variables are different from one another and can’t be predicted by the others.

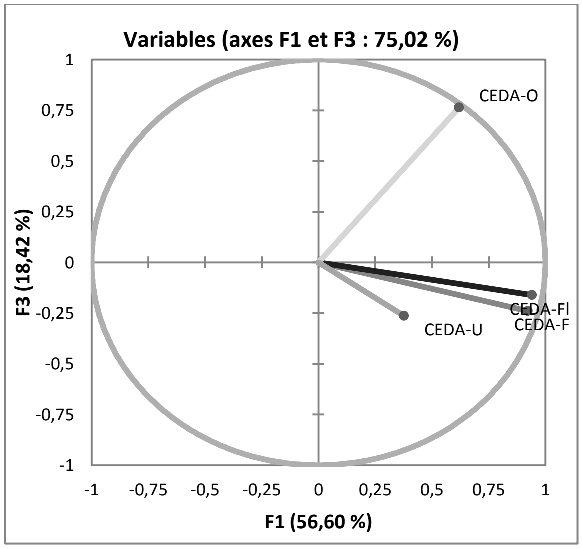


Figure 4-14 – Principal Component Analysis Results (F: fluidity, Fl: flexibility)

Table 4-11 supports the results found in the figure above as three principal factors can be identified with significant eigenvalues. With three factors, 98.4% of the variation can be explained. Additional research is needed to define more precisely those three factors.

Table 4-11 – Eigenvalues associated to the CEDA's assessment criteria

	F1	F2	F3	F4
Eigenvalues	2,264	0,936	0,737	0,064
Variability (%)	56,596	23,389	18,423	1,592
% cumulated	56,596	79,985	98,408	100,000

4.3 Discussion and conclusion

The next section presents the analysis made in regards of the two exercises and the test. Unfortunately, no connexions could be made between the exercises and the test as first hoped. Very homogenous results for the mental maps and the specific state of mind "actualisation of potential", made it difficult to link those results to the performance on the CEDA.

4.3.1 Encoding retrieval exercise

A clear finding is that the majority of the maps collected, are very similar *i.e.* spoke and spoke with chain. When recalling memories linked with a stimulus, subjects seemed to adopt a linear perspective. We were somewhat surprised by those results. In a previous round of testing, we saw more network structures and were hoping for the same observation. However, it was not the case and because the test was built for this study, no benchmarking was possible. Would the results be different in other domains like psychology, architecture or medicine? A study would have to be conducted.

With these results in hand, we are asking the question: Is “networking” a learned process? Judging by the keen interest in mind mapping education, it is definitely a skill that seems to be teachable and useful in many domains. Usually used as a pedagogical tool, we believe it could also be learned to practise the conscious act of making connexions between concepts and therefore help a future creative process. With a metacognitive approach, learners could deepen their understanding of the advantages of a networking encoding and retrieval thinking style and its consequence on the creative process.

Also, being a specific exercise developed for this study, we could have reservations about the exercise’s validity. Some theoretical issues are addressed and valid but more results from other researchers could help solidify the results obtained in this study. The use of other instruments such as the visual associative networks could also be an avenue to develop.

4.3.2 Analogy exercise

The results obtained in this study are comparable to those obtained by Gabora & Saab in their research (76.4% AP) and supports her findings (Gabora & Saab, 2011). However, to compare those proportions with the CEDA result, we would need more diversity. With 76% of people with the same result (Actualisation of potential), it is hard to relate them with quantitative CEDA results. However, again using a metacognitive approach to understand how the cognitive state of mind works, we believe we could find a way to use or take advantage of this new knowledge and train people to be better at creativity.

4.3.3 CEDA

<u>Quantitative results</u>

Our study involved a somewhat homogenous sample, all future engineers in their second year of study at Polytechnique Montréal. It allows for internal validity but it also gives restricted results, not much generalizable to other populations. That being said, the test is, by its nature (materials, usefulness, sketch, users, etc.), especially made for the engineering field. It would be difficult to compare the results with psychologists, nurses or accountants. Only similar professions could be tested such as industrial designers or architects for example. Of course, it could still be very interesting to study scores from these close domains.

To our knowledge, only two other authors published results in regards to the CEDA: the principal researcher Charyton (Charyton & Merrill, 2009) and very recently W.A. Carpenter (Carpenter, 2016). Charyton published very limited results for men/woman, engineers vs non engineers. She analysed and presented scores calculated with her suggested formula. Because we did not use the formula for theoretical reasons, we are not able to compare our results.

In our research, no results were established over 6 for originality. Is that "normal"? We don't know because the two other authors didn't detail their findings. It would be interesting to see results' range and distribution from other research team to compare our findings. However, as discussed in the next section, improvements could be made to tighten the assessment process and improve the comparison' reliability.

In the case of Carpenter, he published separated results for each criterion. Table 4-12 shows our study compared with his. We also calculated a percentage difference between average results of our results and Carpenter's for the originality and usefulness criteria.

Table 4-12 – CEDA results comparison (Our study: n=98, Carpenter: n=42)

Criteria	**Minimum**	**Maximum**	**Average**	**Average Difference**
Fluidity				
Our study	10.0	70.0	40.00	
Carpenter	7.0	60.0	32.59	
Flexibility				
Our study	10.0	60.0	34.70	
Carpenter	5.0	49.0	20.86	
Originality (/90)				
Our study	7.0	31.8	16.70	4.3%
Carpenter	6.0	29.0	12.81	
Usefulness (/36)				
Our study	0.0	33.0	13.90	9.2%
Carpenter	4.0	24.0	10.60	

<u>Assessment tool</u>

The gaps observed when comparing the results from the two studies could be due to the lack of guidelines to assess the tests. Many instructions can be interpreted differently and affect the scores. To our knowledge, no documentation giving explicit examples of assessed designs is available. It could definitely be useful and appropriate to build a “manual guide” (sketches with marks) to help guide the judges in their assessments. Making the process more standard would also help compare the results between studies.

An important change we will make in the assessment is the removal of the “global” score. The test assesses each design but also adds a third one to give an average score for each pair of designs. We determined this score was unnecessary as it represented an average of two scores we already summed up. It also accentuated the gap between judges. It is an additional judgment not even assessing a specific element of design. We were confronted with problems when a participant only had time to complete one of the two designs for one problem. They would get a score for the design, 4 for example, and 0 for this other one. We did not know how to manage such a situation. For all these reasons we decided to eliminate this score in future researches.

4.3.4 Implications and future work

We believe our research project is a good starting point to study prospective engineers. Better understanding how this population thinks and learns could help educators design and adapt educational programs to their students’ needs. We think that the results obtained in this study are particularly useful in regards to creativity and the implementation of a cognitive/metacognitive pedagogical approach.

Even though no relevant correlations could be found between the exercises and the test, describing the population according to these characteristics is a step forward. These results provide valuable theoretical information to share with the learners to increase their knowledge of their own processes.

As mentioned above, eventually comparing other populations (designers, architects, etc.) with prospective engineers could be interesting. Using these exercises as pedagogical instruments instead of “tests” could certainly be an effective strategy. Far from classifying the students in “different” categories, it could stimulate discussions and inspire them to share their thought processes. If cognitive differences do in fact exist between professions, learners could benefit from these variances.

Concerning the CEDA as an assessment tool, we understand that it is useful, for educators as well as professionals, to quantify creativity with a single, global score. We did not use the formula suggested by Charyton for theoretical reasons but we still think a composite indicator would be valuable. In the PCA analysis, we addressed more directly the theoretical basis of the test. Because we found fluidity and flexibility very correlated, we ask the question if they should both be kept as variables. Usually, when two variables are found correlated, they measure the same concept and therefore should be merged. Even though Charyton also found that correlation result, she did not make adjustments as other researchers did for other tests (*eg*.: Torrance Test of Creative Thinking, (Lemons, 2011). This consideration would make a difference in the establishment of a global score.

Acknowledgments

We are grateful for funding to the first author from the *Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies* (FRQNT).

We are grateful for funding to the third author from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

Aerts, D., Gabora, L., & Sozzo, S. (2013). Concepts and their dynamics: A quantum theoritical model. *Topics in Cognitive Science, 5*(4), 737-772.

Bonnardel, N. (2000). Towards understanding and supporting creativity in design: analogies in a constrained cognitive environment. *Knowledge-Based Systems, 13*, 505-513.

Bonnardel, N., & Marmèche, E. (2005). Towards supporting evocation processes in creative design: A cognitive approach. *International Journal of Human-Computer Studies, 63*(4-5), 422-435.

Brinkmann, A. (2003). Graphical Knowledge Display – Mind Mapping and Concept Mapping as Efficient Tools in Mathematics Education. *Mathematics Education Review, 16*, 35-48.

Buzan, T. (2011). Tony Buzan, inventor of Mind Mapping. Retrieved from www.tonybuzan.com

Carpenter, W. A. (2016). *Engineering creativity: Toward an understanding of the relationship between perceptions and performance in engineering design.* (PhD), University of Akron, Ohio, USA.

Chan, J., Fu, K., Schunn, C., Cagan, J., Wood, K., & Kotovsky, K. (2011). On the Benefits and Pitfalls of Analogies for Innovative Design: Ideation Performance Based on Analogical Distance, Commonness, and Modality of Examples. *Journal of Mechanical Design, 133*.

Charyton, C. (2014). *Creative Engineering Design Assessment: Background, Directions, Manual, Scoring Guide and Uses*: Springer London.

Charyton, C., Jagacinski, R. J., & Merrill, J. A. (2008). CEDA: A Research Instrument for Creative Engineering Design Assessment. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, 2*(3), 147-154.

Charyton, C., Jagacinski, R. J., Merrill, J. A., Clifton, W., & Dedios, S. (2011). Assessing Creativity Specific to Engineering with the Revised Creative Engineering Design Assessment. *J. of Engineering Education, 100*(4), 778-799.

Charyton, C., & Merrill, J. A. (2009). Assessing General Creativity and Creative Engineering Design in First Year Engineering Students. *J. of Engineering Education*, 145-156.

Cropley, D. H. (2015). Chapter 2: The Importance of Creativity in Engineering in *Creativity in Engineering: Novel Solutions to Complex Problems* (pp. 13-34): Academic Press.

Davies, M. (2011). Concept mapping, mind mapping and argument mapping: what are the differences and do they matter? *High Educ, 62*, 279-301.

Doumit, S., Marupaka, N., & Minai, A. A. (2013). *Thinking in Prose and Poetry: A Semantic Neural Model.* Paper presented at the The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN).

Eppler, M. J. (2006). A comparison between concept maps, mind maps, conceptual diagrams, and visual metaphors as complementary tools for knowledge construction and sharing. *Information Visualization, 5*, 202-210.

Gabora, L., & Aerts, D. (2002). Contextualizing concepts using a mathemathical generalization of the quantum formalism. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 14*(4), 327-358.

Gabora, L., & Aerts, D. (2009). A model of the emergence and evolution of intergrated worldviews. *Journal of Mathematical Psychology, 53*, 434-451.

Gabora, L., & Saab, A. (2011). *Creative interference and states of potentiality in analogy problem solving.* Paper presented at the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Boston, MA.

Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical Problem Solving. *Cognitive Psychology, 12*, 306-355.

Global Agenda Council on Design & Innovation 2012-2014. (2013). *World Economic Forum.* Retrieved from http://www.weforum.org/content/global-agenda-council-design-innovation-2012-2014

Harris, D. (1960). The Development and Validation of a Test of Creativity in Engineering. *Journal of Applied Psychology, 44*(4), 254-257.

Hinton, G. E., & Anderson, J. A. (1989). Models of processing information in the brain. In G. E. Hinton & J. A. Anderson (Eds.), *Parallel models of associative memory* (pp. 23-58): Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Kaufman, S. B. (Producer). (2015, September 1st, 2015). The Controlled Chaos of Creativity. [Web article] Retrieved from http://blogs.scientificamerican.com/beautiful-minds/the-controlled-chaos-of-creativity/

Kenett, Y. N., Anaki, D., & Faust, M. (2014). Investigating the structure of semantic networks in low and high creative persons. Retrieved from http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00407/full#B53

Kinchin, I. M. (2008). *The Qualitative Analysis of Concept Maps: Some Unforeseen Consequences and Emerging Opportunities.* Paper presented at the Third Int. Conference on Concept Mapping, Tallinn, Estonia & Helsinki, Finland.

Knoll, S. W. (2010). *Changing the Perspective: Improving Generate thinkLets for Ideation.* Paper presented at the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, Poipu, Hawaii.

Lemons, G. (2011). Diverse Perspectives of Creativity Testing Controversial Issues When Used for Inclusion Into Gifted Programs. *Journal for the Education of the Gifted, 34*(5), 742-772.

Liikkanen, L. A., & Perttula, M. (2010). Inspiring design idea generation: insights from a memory-search perspective. *Journal of Engineering Design, 21*(5), 545-560. doi:10.1080/09544820802353297

Linsey, J. S., Markman, A. B., & Wood, K. L. (2012). Design by Analogy: A Study of the WordTree Method for Problem Re-Representation. *Journal of Mechanical Design, 134*.

Marupaka, N., Iyer, L. R., & Minai, A. A. (2012). Connectivity and thought: The influence of semantic network structure in a neurodynamical model of thinking. *Neural Networks, 32*(Special), 147-158. doi:10.1016/j.neunet.2012.02.004

Mednick, S. A. (1962). The Associative Basis of the Creative Process. *Psychological Review, 69*(3), 220-232.

Authors. (2016). Using the “Gauge R&R’’ method to assess a psychometric creativity test. (Submitted).

Authors. (2016). How should we train future engineers to be more creative? An Educative Experience. (Submitted).

Mumford, M. D., Baughman, W. A., Maher, M. A., Costanza, D. P., & Supinski, E. P. (1997). Process-Based Measures of Creative Problem-Solving Skills: IV. Category Combination. *Creativity Research Journal, 10*(1), 59-71.

Mumford, M. D., Baughman, W. A., Supinski, E. P., & Maher, M. A. (1996). Process-Based Measures of Creative Problem-Solving Skills: II. Information Encoding. *Creativity Research Journal, 9*(1), 77-88.

Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2007). *The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct Them*. Retrieved from Florida Institute for Human and Machine Cognition:

Piffer, D. (2012). Can creativity be measured? An attempt to clarify the notion of creativity and general directions for future research. *Thinking Skills and Creativity, 7*, 258-264.

CHAPITRE 5 : ARTICLE 3 : HOW TO TRAIN FUTURE ENGINEERS TO BE MORE CREATIVE? AN EDUCATIVE EXPERIENCE

(Sophie Morin, Jean-Marc Robert, Liane Gabora; European Journal of Engineering Education)

5.1 Introduction

Increasingly, organizations seek creative engineers to maintain a competitive edge. Creativity enables innovation; it enhances the design and development of new products, processes, or services which should help to insure the profitability of organizations. The literature covering the training aspect of creativity is extensive (Cropley and Urban 2000). Creativity training programs are increasingly popular, and a new “school of creativity science” opened in Montreal in 2016. It is widely believed that creativity training can be highly effective and that society would benefit from more such programs (Yeh 2011; Liu and Schönwetter 2004; Cropley and Cropley 2000; Felder 1987), particularly for engineers (Murdock and Keller-Mathers 2011; Engineers Canada 2014). However, creativity training in engineering education programs is currently integrated in only a superficial manner (Johri, Chen, and Lande 2009). Just a few such programs have a solid theoretical foundation, and scientific evidence of their effectiveness is lacking (Zappe, Litzinger, and Hunter 2012; Zappe, Mena, and Litzinger 2013; Badran 2007; Gangopadhyay 2014).

An exhaustive search, a meta-analysis of 70 training programs, identified key instructional strategies and concepts taught in creativity training programs (Scott, Leritz, and Mumford 2004a, 2004b). They identified six meta-theoretical frameworks (cognitive, social, motivational, personality, confluence, other), eight core processes (problem identification, conceptual combination, idea generation, etc.), 17 training techniques (divergent thinking, critical thinking, elaboration, analogies, brainstorming, etc.), 12 course design variables (amount of practice, number of days, depth of material, etc.), 10 medias (lectures, videos, discussions, etc.), and eight exercises types (classroom, field, written, group, etc.). In each category, they identified which elements appeared to be most effective. For example, using conceptual combination and idea generation as core processes promote creativity information gathering. They found that the cognitive approach was the only one that was positively correlated with developing creative behavior.

By studying many characteristics of creativity courses, according to four components (cognitive processes, training techniques, communication media and types of exercises), they created 11 training 'types' (Analogies, Imagery, Analytical, Open Idea Production, Creative Process, Conceptual Combination, Interactive Idea Production, Computer Based Production, Structured Idea Production, Critical/Creative Thinking, Situated Idea Production) (Scott, Leritz, and Mumford 2004b). Numerous items related to creativity are part of each training type such as idea generation, divergent thinking, problem identification, expressive activities, etc. The background work carried out within this study facilitated understanding of how creativity training can unfold. The researchers reported the effectiveness of these components, and they made four main recommendations (Table 5-1) that stand out as an excellent basis for further research on teaching creativity.

Table 5-1 – Principal recommendations on teaching creativity (Scott, Leritz, and Mumford 2004a, 383)

Training based on valid conception of the cognitive activities underlying creative efforts.
Lengthy, relatively challenging with various discrete cognitive skills, and associated heuristics.
Articulation of principles should be followed by illustrations of their application using material based on 'real-world' cases or other contextual approaches.
Presentation should be followed by a series of exercises appropriate to the domain at hand.

Although this constitutes significant progress, there is still a need for more accurate and detailed literature on educational strategies (Papaleontiou-Louca et al. 2014). Scott's research shows how diverse creativity training can be in specific, real life experiences, but it does not relate those findings to the literature on creativity knowledge and skills, as is needed to fuse theoretical understanding of creativity with practical skills. The present study outlines a creativity training course including theoretical framework, pedagogical activities supporting cognitive skill development and knowledge acquisition, and the measurement of the course's effectiveness (quantitative and qualitative).

5.2 Theoretical framework supporting pedagogical strategies

Sawyer (2012) presents a list of 10 universities worldwide offering training programs (certificate, minors, etc.) in creativity. We found that explicit information on the frameworks, the operational details, the pedagogical strategies and media, used to build these training programs was scarce. This scarcity prevented us from concluding that they were based on a solid conceptual and theoretical framework.

In some cases, creativity is included within the Project Based Learning (PBL) approach (Daly, Mosyjowski, and Seifert 2014). In this approach, teachers encourage students to be creative, i.e. to 'think outside the box' when analyzing and solving problems. However, creativity is not considered a central learning objective, but rather a quality or an asset, an advantage in the context of the project. Most often, creativity is underestimated as a learning object and even more as a skill to develop (Murdock and Keller-Mathers 2011; Cropley 2016; Daly, Mosyjowski, and Seifert 2014). In her recent research, Daly (2014) found that even when educators had the intention to foster creativity and thought they used appropriate strategies, students were not perceiving those efforts as such. If creativity is not addressed directly to develop its process, it will remain tacit.

The following sections provide a description of the framework established from conceptual, process, and intelligence models.

5.2.1 Conceptual and Process models

Creative behaviors, products, individuals, have been widely studied, and models of the creative process have been proposed (Amabile 1988; Sternberg 2006a; Csikszentmihalyi 1996; Cropley and Urban 2000; Isaksen 1995; Gabora 2010, 2005, In press; Treffinger et al. 2002). These models focus on particular elements, such as thinking skills, personality traits, environmental and social characteristics, cognitive components, that influence creativity. The models although quite different, gather common elements (Figure 1). Four are inherent to the individual, one to the environment, and the sixth refers to integration of the others.

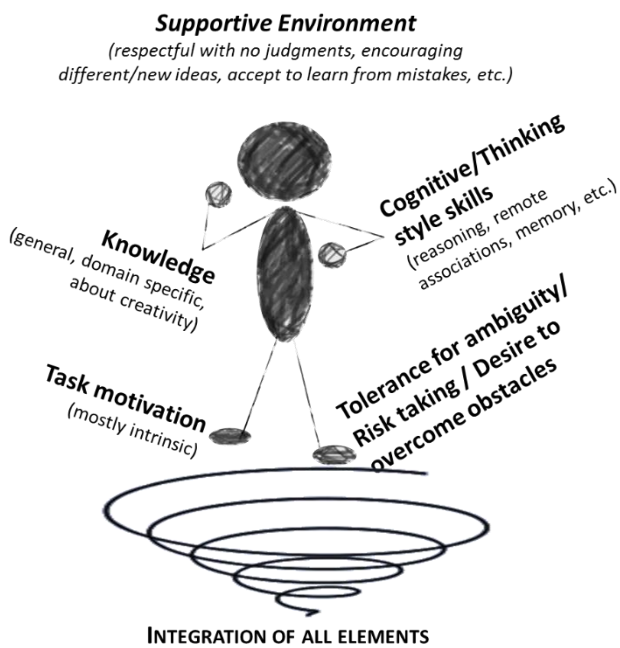


Figure 5-1 – Common elements of conceptual models of creativity

Researchers have also studied and defined creativity from a process or procedural viewpoint, i.e. the steps or phases someone goes through when involved in a creative process. Some examples are presented in Table 5-2. From the famous 4-step model of Wallas to the most recent one (up to 8 steps), Sawyer created a classified summary of these models.

Table 5-2– Models of the creative process

Sawyer (2013)	**Wallas (1926)**	**IDEAL (Bransford and Stein 1993)**	**Sternberg (2006b)**	**Mumford's group (Scott, Leritz, and Mumford 2004a)**	**IDEO (Kelley 2001)**	**CPS (Isaksen, Dorval, and Treffinger 2000)**
Ask		Identify problems, define goals	Redefine problems	Problem finding		Framing problems
Learn	Preparation	Learn	Know the domain	Information gathering		Exploring data
Look		Look			Observation	
Play	Incubation	Explore possible strategies	Take time off	Concept search		Constructing opportunities
Think	Insight		Generate ideas	Idea generation	Brainstorming	Generating ideas
Fuse			Cross-fertilize ideas	Conceptual combination		Developing solutions
Choose	Verification		Judge ideas	Idea evaluation		
Make		Act and anticipate outcomes	Sell the idea, persevere	Implementation, planning, and action monitoring	Rapid prototyping, refining, and implementation	Building acceptance

With these conceptual and process models in mind, one can anchor a creativity course more firmly on a theoretical basis. Not only does the course address and develop conceptual elements about creativity but it also allows students to engage in particular steps of the creative process.

5.2.2 Creativity and intelligence

Identifying, understanding and implementing cognitive abilities supporting creativity seem a promising avenue for training. To achieve this, we needed a model describing cognitive abilities.

The Cattel-Horn-Carroll (CHC) model of intelligence divides intelligence in 99 cognitive abilities distributed into 16 categories following three levels (stratum I-II-III) (Newton and McGrew 2010; McGrew 2009; Bateya, Chamorro-Premuzicb, and Furnham 2009). We chose this model because as McGrew reported in his article, ‘During the past decade the Cattell–Horn Gf–Gc and Carroll Three-Stratum models have emerged as the consensus psychometric-based models for understanding the structure of human intelligence.’ (McGrew 2009, 1).

Table 5-3 presents the 16 broad abilities figuring in the CHC model. The ‘Fluid reasoning (Gf)’ and ‘Comprehension-Knowledge (Gc)’ categories both include specific cognitive abilities that can be associated with the creative process (Avitia and Kaufman 2014; Sawyer 2012). However, one category of broad abilities is directly targeted as having cognitive abilities associated with creativity: ‘Long-term storage and retrieval (Glr)’ (Newton and McGrew 2010, 626). Each category contains several subcategories presented as specific cognitive abilities.

Table 5-3 – Cattel-Horn-Carroll Model of intelligence (Newton and McGrew 2010)

CHC Model – 16 broad abilities	
Fluid reasoning (Gf)	*Processing speed (Gs)*
Comprehension-Knowledge (Gc)	*Reaction and decision speed (Gt)*
Long-term storage and retrieval (Glr)	*Psychomotor speed (Gps)*
Visual processing (Gv)	*Quantitative knowledge (Gq)*
Tactile abilities (Gh)	*Kinesthetic abilities (Gk)*
Auditory processing (Ga)	*Reading and writing (Grw)*
Short-term memory (Gsm)	*Psychomotor abilities (Gp)*
General (domain-specific) knowledge (Gkn)	*Olfactory abilities (Go)*

G: Intelligence

5.2.2.1 Broad abilities

Three broad abilities from the model are particularly associated with creativity (Gf, Gc, Glr). Even though the matter is still debated, we support the idea that the creative process uses general cognitive processes rather than exclusive ones. Specific cognitive abilities are clearly more sought by the creative process than others, but they remain part of a global, general model of intelligence. In other words, particular cognitive abilities are more solicited during a creative process but are not reserved for it, they could be used in other contexts.

‘Fluid reasoning’ (Gf)

The broad ability ‘Fluid reasoning’ refers to the deliberate and controlled use of mental operations, often in a flexible manner, to solve non-standard problems, *ie*, problems that do not correspond to the usual thinking patterns (McGrew 2009). These mental processes include concept formation, classification, generalization, identifying relations, extrapolation and transforming information as well as deductive and inductive reasoning. We believe this extended cognitive ability which contains five narrow abilities (General sequential (deductive) reasoning, Induction, Quantitative reasoning, Piagetian reasoning, Speed of reasoning) has several important mental operations involved in a creative process and therefore represents an aspect to consider when developing creativity.

‘Comprehension-Knowledge’ (Gc)

The broad ability ‘Comprehension-Knowledge’, traditionally called crystallized intelligence, refers to information acquired or learned by an individual and stored in his/her brain. It is as much about procedural knowledge (know-how) than about declarative knowledge (know-what). Given the importance of ‘lateral’ knowledge in the creative process, this broad ability is certainly another important aspect underlying creativity. Ten specific abilities are linked to this broad ability (Language development, Lexical knowledge, Listening ability, Communication ability, etc.). Because we consider creativity as a combination of already seen or learned elements, how these are encoded in memory should be an important factor.

‘Long-term storage and retrieval’ (Glr)

The broad ability ‘Long-term storage and retrieval’ contains the most specific elements to the development of creativity (Avitia and Kaufman 2014; Benedek, Könen, and Neubauer 2012). It is defined as the ability to store and consolidate information into long-term memory and the ability to extract it when needed. Sixteen narrow abilities with a possible link to creativity are part of this broad ability (Associative memory, Free recall memory, Ideational fluency, Associational fluency, Expressional fluency, Naming facility, Word fluency, Figural fluency, Figural flexibility, Sensitivity to problems, Originality/Creativity, Learning abilities).

Dividing divergent and convergent thinking into more specific cognitive abilities can lead to a better understanding of what they consist of and could facilitate the design of specific teaching strategies. The simple instruction to 'think differently' encourages individuals to make a first creative effort, but it is believed that directly targeting cognitive abilities could be particularly effective in improving creativity. We followed this belief when building the course.

We used these conceptual and process models to define the pedagogical activities and their combination. The relationship between the models and the activities developed and chosen are presented in Table 5-5.

5.3 Course design

An intervention study—in which research and intervention take place simultaneously—was planned with a multi-method quantitative/qualitative descriptive design. A 45-hour course was created, named IND8108 Creativity in applied sciences and engineering. The course is an option in the 'Technological Innovation' orientation at Polytechnique Montréal (an orientation is a set of four courses at the student's discretion). An ethics certification was obtained for the project.

5.3.1 Course description

> "*My goal in developing the concept of Creative Intelligence is to make the practice of creativity routine. I believe it can be an organic, everyday occurrence, not an artificial experience orchestrated by consultants who encourage participants to wear funny hats and write wild ideas on a whiteboard*." (Nussbaum 2013).

We aimed to cultivate a deep understanding of creativity in all its complexity and practice on a weekly (ideally daily) basis without falling into the trap of teaching ‘recipes’ in uncomfortable settings. Rasmussen’s SRK work (1983) suggested that it takes many hours of practice to enhance human performance (e.g., in sport, music, dance, …), and this also applies to creative activities. In engineering projects, creativity is thought of as an auxiliary process; it often plays second fiddle to the technical aspects. An alternative view is that if learners gain cognitive skills related to creativity they can be broadly applied to meet technical challenges across an array of specific contexts. Our course includes several types of educational activities stimulating and developing cognitive abilities supporting creativity (e.g., creative projects in group or not, approaches stimulating creativity, scientific texts, a notebook of ideas, etc).

5.3.1.1 Warm-up

As athletes or musicians do for training, we chose to devote a period of time at the beginning of the course for a ‘warm-up.’ We incorporated serious games into the program. As Nussbaum (2013) describes: ‘[…] reintegrate the concept of play with the concept of work and show how the rituals of creativity cross from one dimension to the other.’ Indeed, the ‘learning by doing’ world of serious gaming is an increasingly popular approach used in scientific fields to promote in-depth learning (Mayo 2007). Whether for future airline pilots or future surgeons, serious games are being used more and more to train students. By definition, ‘Serious Games (SG) refer to applications developed using computer game technologies that serve purposes other than pure entertainment’ (Arnab et al. 2013, 15). They are mainly developed and used in domains like e-learning, military simulation and medical training. Moreover, the emergence of the new field of ‘gamification’ is evidence that this approach should be exploited (Kapp, Blair, and Mesch 2013).

Every week, basic exercises designed to practice basic cognitive abilities allow the participants to develop cognitive automations associated with the creative process. A metacognitive approach is very important to get participants to understand the learning process and the cognitive abilities they are trying to develop. Immediately or after a short period of individual work, participants are encouraged to share their ideas and describe their thinking process.

The different games prepared for the course are inspired by the book *Zig Zag* (Sawyer 2013), television programs, board games, and personal insights from analyzing creativity literature (Glover 1980; Clapham 1997). Different criteria were considered when choosing and building these games: simply played, easily explained, quickly understood, fun to play, varied. Each week, two or three games are randomly chosen and played for 20-30 minutes depending on the games and the other activities planned. Some games include an individual aspect but they all include a phase where students share and discuss their ideas. Social constructionism is an important part of the pedagogical approach. During these games, the professor acts as a guide to structure the discussion around the games' cognitive and metacognitive aspects. All these games could be (and may have been) played in other circumstances. The course's added value is the link with the creativity context, the cognitive abilities involved and the relevancy to practice these cognitive processes to achieve a certain ease. The teacher adds new games or withdraws some as they are played. Students are welcome to comment and discuss the games as well as suggest new ones.

5.3.1.2 Descriptions of serious games used in the course

Password. The goal of this game is to guess a word with the least possible clues, one clue at a time. One of the interesting aspects of this game is linked to metacognition. First played by a pair of students, others can suggest clues if there is a standstill. In performing this activity as a group, everyone can witness the path or network used by the participant to guess the word. Various avenues are possible to achieve the same word. Constructive discussions often occur. Everyone's connection and association networks can be broadened and enriched by others. The cognitive ability 'encoding' is therefore affected by such an exercise. Here is an example:

To guess the word 'mouse': (Path 1) Animal, rat, domestic; (Path 2) Computer, displacement, arrow.

Droodles. This game can help participants develop their cognitive abilities of divergent thinking. In this game known to cognitivists, participants must suggest multiple ideas as possible representations of a drawing (the droodle) they are shown. All droodles are vague, general drawings that represent nothing commonly identifiable. This game is played as a group; students raise their hand to share their ideas. It can be very interesting to hear others give their answers to enlarge our network of connections. It seems that our classification process is 'too effective' and that people lose their ability to see 'something original'. This exercise makes it possible to be aware of this situation and try to get around it. Figure 2 present examples:

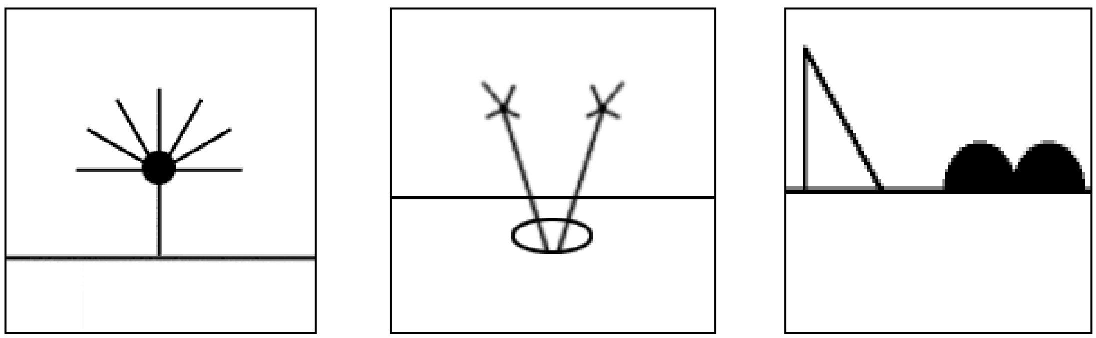


Figure 5-2 – Droodles examples

What's that for? This game is based on the highly acclaimed creativity test (divergent thinking) the 'alternative uses' (Dippo 2013). Students are asked to name the largest number of possible uses for randomly selected objects (hanger, mirror, toothpick, brick, etc.). The stimuli are given in drawings or words and the duration of the game is five minutes. After that time, students are invited to share their ideas with the group. The philosophy is that we should use exercises or activities usually reserved for assessing creative performance to develop cognitive abilities. If these tests are valid to measure individuals' creativity, they can also serve as tools to develop creativity.

Family Feud, transposed. In this game, participants try to identify the question behind the answers (transposal of the usual game). Students will therefore attempt to identify the common element between 4, 5, or 6 words. Divergent thinking is needed to paint a general portrait of each word and then convergent thinking is needed to unify all these portraits. Here is an example:

What question is behind the following words? dog, human, shark, crocodile, saw and comb.[16]

Same but different. This is based on the definition of creativity as a combination of ideas from distant domains. Indeed, the game is to find items in common between two concepts (image or word) seemingly distinct in nature. This is not to construct a story that connects the concepts but rather to analyze or dissect the characteristics to identify similarities: it could be the colors, shapes, sizes, uses, definitions, organizations, etc. This game is played out loud as students raise their hands to share their answers.

What are you thinking about? Pairs of students read a word on the screen and have a minute to come up with five related words. Words can be linked by definition, expression, meaning, etc. The only objective is to suggest the same words. In this activity, participants explore how knowledge networks are constructed and identify semantic linkages.

Draw me a map. Participants are asked to construct a network of words, all related to one another. This activity often becomes a very helpful tool to structure brainstorming productions. It allows the person to follow more easily where their thoughts are going and consequently have better control of the divergence process. This game is a fusion between conceptual maps and mind maps. It takes the network structure of the conceptual maps but the “free” divergent thinking of mind maps.

What’s the story? A picture is shown to the participants who are asked to build, together as a group, a story based on that picture. When participants have an idea, they raise their hand and add an element to the story. Piece by piece they try to construct a coherent, interesting, and original story.

[16] Answer: *Name something that has teeth.*

The following sections present several other pedagogical activities to practice cognitive abilities as well as other aspects of creativity education throughout the semester.

5.3.2 Other pedagogical activities

The cognitive abilities identified above will be used to perform other creative activities in the course as presented in the Table 5-4.

Table 5-4 - Pedagogical activities developed and used in the course context

Pedagogical Activities		**Description**
In-class activities	Warm-up exercises	30 min at the beginning of every class, cognitive exercises, serious games, individual and group
	Conference	90 min, invited speaker, presentation + exercises (Topic: Improvisation)
	‘Mouse Trap’ project	6 hours, group project, teams create their own designs, build a Rube Goldberg machine with recycled materials
	Lectures/ Discussions	Discussions about factors influencing creativity, myths and truths, definitions of creativity, etc.
	Creativity approaches	Small groups (3-4) research a given approach and present it in class (theory/exercise), 12 presentations
Projects	Artistic or personal project	Individual project, students choose their subject, first half of semester, presentation to group
	Engineering (scientific) project	Group project, students choose an engineering/scientific problem they want to tackle, second half of semester, presentation to group
Personal Work	Logbook	Individual task, ongoing through the semester, students note observations, ideas, problems, solutions, etc.
	Creative behaviors/ examples (forum)	Ongoing through the semester, posting on the course’s website
	Scientific texts (forums)	Individual reading, group discussion with guided questions (4 articles during semester e.g., Lubart, Ward, Kauffman, Gabora)

In accordance with Jaušovec (2011) and many others (Hargrove and Nietfeld 2015; Daly, Mosyjowski, and Seifert 2014; Cropley 1999; Treffinger et al. 2002) who assert that the ability to reflect on one’s creative process can boost one’s creativity, we added a metacognition component to every activity. Executive processes and heuristics are part of what is often referred to as ‘metacognition’ (Sternberg 2006a), that allows people to keep track of their own thinking (Cropley and Urban 2000). Creativity remains difficult to generalize as a common process; we believe sharing with others how the creative process is experienced can be constructive. It helps to identify what works, what doesn't and how others proceed so it can be learned from.

5.3.2.1 Creativity projects

During the 15-week semester, two projects were accomplished: a personal and a group project. The personal project is in an area of interest for the student, preferably outside his/her usual domain of competency. The project is carried out during the first half of the semester, outside the class. It gives rise to a report which should explain the steps of the creative process. Special emphasis is put on metacognition to help students reflect on their own creative process, understand it, and thus facilitate its replication and optimization.

The group project was closer to the engineering field without being restrictive. Although the chosen subject was more 'engineering' related than the personal project, it was not necessarily the design or implementation of a technical object. It may be to reflect for example on how to increase physical activity of children or reduce bicycle accidents on urban roads. The important thing was that the subject was determined by the students themselves and motivates them. The instructions were to suggest solutions to the identified problem by combining ideas from different areas and to use approaches that stimulate creativity covered in class. Deliverables were identical to the first project, namely a project report and an oral presentation that dissect the creative process followed throughout.

Both projects allowed students to put into practice the theoretical elements studied in class while learning more about their creative process in motivating contexts.

5.3.2.2 Idea logbook

An important factor for creativity is the ability to observe our environment and be inspired by it (Chang et al. 2014; Bateya, Chamorro-Premuzicb, and Furnham 2009). With this attitude in mind, students are asked to take notes of observations, facts, impressions, thoughts, etc. that cross their mind daily. The logbook helps to develop critical thinking. Moreover, because working memory has a limited capacity (Wickens

1984), the logbook frees up space by using the principle of distributed cognition (Norman 1993) i.e. it helps to create an external memory. Ideally, this logbook becomes a potential source of inspiration for future projects and most importantly becomes a habit.

5.3.2.3 Approaches stimulating creativity

Students are asked to research on different approaches to stimulate creativity (e.g., brainstorming and its variants, the six hats, bionics, SCAMPER, etc.). In an oral presentation of 15-20 minutes in class, they present the approach theoretically and add a practical exercise. They also submit a one-page document providing a summary of key elements. A dozen approaches are seen during the session. The TRIZ (ASIT version) and C-K approaches are presented by the professor.

These approaches are ‘structuring tools’ for the creative process because they help individuals organize and manage their thoughts. It is relevant that students know different approaches, but it is even more important that they understand the conceptual and cognitive mechanics behind them. Knowing how the approaches cognitively work may support students to use any of them instead of focusing on learning one in particular. It is then possible to surpass the ‘recipe’ level and understand why, when and how these approaches work (or not).

5.3.2.4 In-class participation, forums, texts, conference

Active participation in class, discussions, and open forums are essential parts of the course’s success. Given the importance placed on the stimulation and practice of cognitive abilities and metacognition, students are expected to be actively involved. The number of interventions and their relevance are assessed. Discussions about scientific texts are also important. With questions presented to jumpstart the debates, students are invited to comment and discuss. Also, an improvisation teacher is invited to talk about the creative process used during improvisation activities so students can find similarities with the problem-solving process used in engineering.

5.3.3 Framework summary

To tie the course with a theoretical framework, we matched pedagogical activities with Scott's recommendations as well as elements from the conceptual and process models of creativity. Table 5-5 presents the classification obtained for all activities.

For example, the 'Mouse Trap' project allows students to practice, hands-on, conception and construction skills in a very open engineering context. The project allows everyone to work as a team, in a supportive environment. They have to take risks and tolerate ambiguity when plan A doesn't work. Also, the project allows them to 'make' something, plan and adjust many times during the seven hours allocated to the activity. They must persevere throughout the construction/conception challenges, and rapidly find 'homemade' solutions. Engineers should be able to react fast; blueprints are not always the answer and resourcefulness is an important skill to develop.

The principal objective of the forum on creative behaviors is to relate creativity to 'real-world' examples. It allows students to learn more about creativity itself as well as about different domains displaying creative behaviors. Lateral or horizontal knowledge is important to promote and foster remote associations. The forum also helps students develop their observation skills. Knowing how to observe and notice things, people, places, behaviors, etc. is an essential part of creativity training.

The 'warm-up' period responds to the need to build the course on a 'valid conception of the cognitive activities underlying creative efforts' (Scott, Leritz, and Mumford 2004a). Serious games are used to play, think and fuse. They allow students to develop and practice cognitive, thinking skills related to making connections. Exempt from particular context, students are invited to draw maps, invent stories, find similarities, play with words, etc. During these activities, great importance is placed on metacognition by sharing everyone's ideas and reflecting on the various processes used to come up with these ideas. Students become more aware of their own process and others can benefit from the exchanges.

The implications of the CHC model are more widespread. The broad abilities 'Fluid reasoning' and 'Comprehension-Knowledge' are solicited during several (if not all) activities. In the first case, deductive reasoning and induction[17] are involved when solving a problem (e.g., accomplishing a personal and a group project, answering questions about scientific texts, etc.). In the second case, it involves the extent of lexical (words), cultural, language and general (verbal) knowledge. To make interesting creative connections, extensive lateral knowledge is essential. New knowledge (general and towards creativity) is acquired during numerous activities planned in the course (see Conceptual model elements column in Table 5-5). Communication skills (listening and talking) are also part of this broad ability and frequently practiced during the activities (oral presentations of approaches, open discussions in class, etc.). And finally, the 'Long-term storage and retrieval' broad ability is mostly engaged when playing the warm-up games. Narrow abilities (e.g., Ideational fluency, Associational fluency, Expressional fluency, Naming facility, Word fluency, Figural fluency, etc.) from this category seem to be implicated when constructing mind maps, identifying similarities between words and images, or elaborating a story from a picture. More research is needed along these lines to better understand and define the precise correlations.

[17] 'ability to combine separate pieces of information in the formation of inferences, rules, hypotheses, or conclusions.' (Newton and McGrew 2010, 623)

Table 5-5 – Pedagogical activities linked with Scott's recommendations and common elements in creativity models

Scott's recommendations (Scott, Leritz, & Mumford, 2004)	***Activities***	***Conceptual models elements*** *(Amabile, 1988; Cropley & Urban, 2000; Sternberg, 2006a)*	***Process models elements*** (Sawyer, 2013)
Training based on valid conception of the cognitive activities underlying creative efforts.	**Warm-up exercises**	Cognitive and Thinking skills, Metacognition (Urban, Cropley)	**Play** (Incubation, explore possible strategies, take time off, concept search, constructing opportunities), **Think** (Insight, generate ideas, idea generation, brainstorming, generating ideas), **Fuse** (cross-fertilize ideas, conceptual combination, developing solutions)
Presentation should be followed by a series of exercises appropriate to the domain at hand.	**Lectures/ Discussions**	Knowledge (general, towards creativity)	**Learn** (Preparation, learn, know the domain, information gathering, exploring data)
	'Mouse Trap' Project	Tolerance for ambiguity/ risk taking/ overcoming obstacles, supportive environment	**Make** (Act and anticipate outcomes, sell the idea, persevere, implementation, planning, and action monitoring, rapid prototyping, refining, and implementation, building acceptance)
	Engineering (scientific) group project	Task motivation, Integration of every element of the model	**All steps** *(Ask, Learn, Look, Play, Think, Fuse, Choose, Make)*
Relatively challenging with various discrete cognitive skills, and associated heuristics.	**Creativity approaches**	Knowledge (towards creativity), Cognitive and Thinking skills, Metacognition (Urban, Cropley)	**Learn** (Preparation, learn, know the domain, information gathering, exploring data)
	Scientific Texts (forums)	Knowledge (towards creativity)	
Articulation of principles should be followed by illustrations of their application using material based on 'real-world' cases or other contextual approaches.	**Conference**	Knowledge (general, towards creativity), Metacognition	**Fuse** (cross-fertilize ideas, conceptual combination, developing solutions), **Play** (Incubation, explore possible strategies, take time off, concept search, constructing opportunities)
	Logbook	Metacognition (Urban, Cropley)	**Look** (Look, observation)
	Creative behaviors (forum)	Knowledge (general, towards creativity)	**Learn** (Preparation, learn, know the domain, information gathering, exploring data), **Look** (Look, observation)
	Artistic or personal project	Task motivation, Tolerance for ambiguity/ risk taking/ overcoming obstacles, Knowledge (general), Metacognition (Urban, Cropley)	**All steps** *(Ask, Learn, Look, Play, Think, Fuse, Choose, Make)*

5.3.4 Quantitative assessment methodology

The next section describes the participants who were involved in the evaluation of the course' impact. It also presents how the quantitative and qualitative data were obtained.

5.3.4.1 Participants

Fifty-nine engineering students participated to the study. They attended the creativity course in different semesters (during the years 2014 and 2016). They were at the end of their engineering undergraduate studies or at the master level, and they chose this course in the 'technological innovation' orientation. They come from different fields of engineering (chemical, industrial, physics, mechanical, etc.). Since the CEDA test was administered during class as an activity, anonymity couldn't be assured. The principal researcher, who was also the professor, attributed the copies making it impossible to ensure anonymity.

Table 5-6 – Sample description by semester

Sample description			
Criteria	**Semester – Fall 2014**	**Semester – Winter 2015**	**Semester – Fall 2015**
Number of students	9	22	28
Genders (Female; Male)	4; 5	10; 12	14; 14
Education in engineering (Grads; Undergrads)	9; 0	7; 15	7; 21
Age (20-29; 30-39; 40-49)	7; 1; 1	18; 4; 0	24; 3; 1

A socio-demographic questionnaire collected data about participants' age, gender, engineering specialty, and academic level.

5.3.4.2 Quantitative assessment of creativity - CEDA

During the second week of the course, the CEDA test was administered to the participants to establish initial values of each criterion of the test and to capture a first score of creativity. During the 13th week, the same test was administered again to compare the results of each participant with those obtained at the beginning of the trimester.

The CEDA test was developed by Charyton and her colleagues (Charyton and Merrill 2009; Charyton et al. 2011; Charyton, Jagacinski, and Merrill 2008; Charyton 2014). The test is based on the Purdue Creativity Test (PCT), and adapted for an engineering population. It consists of three design problems (design that can produce sound, design that can facilitate communication, design that can travel) with two, three and four shapes which serve to 'inspire' the participants (cylinder, ball, cube, pyramid) (Figure 5-3). For each problem, two designs should be provided and described according to five aspects: sketch, description, materials, other problems solved, and users. Participants receive one document containing guidelines and the three problems (4 pages). They use their own pencils.

The test had to be translated in French for this project. Charyton and her team did propose a French version in the official manual but it was not useable as it was. The quality of the language was not up to standards. Because the text (guidelines) and terms (Sketch, Description, Materials, Problems solved, Users) were relatively simple, we proceeded to translate the test ourselves. The test validity was confirmed by the literature on creativity and Charyton's works but we re-evaluated the test reliability because of the translation and the need to practice the assessment process.

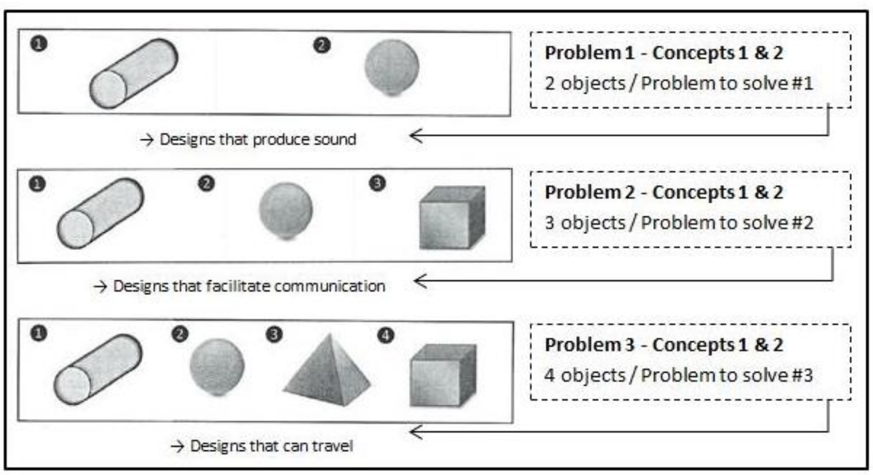


Figure 5-3 – CEDA Structure

Two judges assess fluidity (number of answers) and flexibility (number of different answers) quantitatively by counting different elements (number of materials, of users, of designs, etc.), and they assess originality and usefulness qualitatively on Likert scales (Table 5-7 & Table 5-8). It takes approximately 10-12 minutes to assess one test. A score sheet was available to compile the results where every score is listed. For each test, 30 quantitative scores were compiled (10 for each problem) and 12 qualitative scores (4 for each problem) (see Figure 5-4).

	Judge :						Date :		
	Problem 1			*Problem 2*			*Problem 3*		
Fluidity *(nombre of ideas)*									
Complete Design	2			1			0		
Descriptions	2			1			1		
Materials used	10			6			4		
Other resolved problems	2			0			0		
Users	3			1			0		
Sum	19			9			5		
Flexibility *(types of ideas)*									
Complete Design	1			1			0		
Descriptions	2			1			1		
Materials used	6			5			4		
Other resolved problems	2			0			0		
Users	3			1			0		
Sum	14			8			5		
Originality *(0-10)*	*D1*	*D2*	*Global*	*D1*	*D2*	*Global*	*D1*	*D2*	*Global*
0 Dull					0			0	
1 Commonplace				1					
2 Somewhat interesting		2							
3 Interesting	3								
4 Very interesting							4		
5 Unique and different									
6 Insightful									
7 Exceptional									
8 Valuable to the field									
9 Innovative									
10 Genius									
~~*Sum (X2)*~~									
Usefulness *(0-4)*	*D1*	*D2*	*Global*	*D1*	*D2*	*Global*	*D1*	*D2*	*Global*
0 Not useful				0	0			0	
1 Somewhat useful									
2 Moderately useful		2					2		
3 Very useful	3								
4 Indispensable									
~~*Sum (X2)*~~									

Figure 5-4 – Assessment sheet for the CEDA test

Several changes were made to the original assessment process suggested by Charyton (the global score for each problem was eliminated, the global score for the test was dismissed). The test' reliability was tested and confirmed with the statistical method "gage R&R". Also, the different levels on Likert scale were discussed and further defined to help the judges make their assessments. The detailed description of these modifications and their justifications are subject to another article[18]; a summary is presented in the next section.

5.3.4.3 CEDA modifications

The four criteria (fluency, fluidity, originality and usefulness) of creativity in CEDA were assessed individually and their respective scores were not added to form a general score *ie* a composite indicator. We obtained more specific results regarding each criterion but we lost the advantage of having a general "single" score to compare each participant, which is more practical than 4 separate ones.

Also, a third, more global score attributed to each problem was removed. No evidence was found of its relevance and we thought it was a difficult score to establish. If a participant only filled one of the two designs, s/he could have a score of 4 (out of 10) for originality for the first design but 0 for the second one. We did not have the proper information to manage the overall score in that particular situation and we determined this score was unnecessary as it represented an average of two scores we already summed up. It also uselessly accentuated the gap between judges.

In addition, we added details to describe each level of the Likert's scales (Table 5-7 & Table 5-8).

[18] Morin, Bourdeau, Robert (2016). Using the "Gage R&R'' method to evaluate the reliability of a creativity test (submitted for publication)

Table 5-7 – Assessment level description for the « Originality » criterion

0 - Dull	Does not correspond to the general goal suggested; common object (daily use).
1 – Common place	Designs that come often in the tests.
2 – Somewhat interesting	Minimal transformation, use of multiple suggested forms, multiple materials, added objects or materials.
3- Interesting	More « unusual » idea, an idea more insightful but not so much developed.
4- Very interesting	Combination of 2 or more simple concepts.
5- Unique and different	Combination of more developed and complex concepts, concepts not existing in this suggested form.
6- Insightful	Well developed idea, well described (details), combining multiple concepts (different fields) in a novel way.
7- Exceptionnal	*In all of our assessments, no designs obtained higher marks than 6, so we didn't have examples to discuss and compare scores 7 to 10.*
8- Valuable to the field	
9- Innovative	
10- Genius	

Table 5-8 – Assessment level description for the « Usefulness» criterion

0 - Useless	Does not respond to the general goal suggested, does not present any possible uses
1 – Somewhat usefull	Responds to the general goal suggested but has limited possible uses
2 – Usefull	Relevant uses but for very specific cases
3- Very usefull	Existing concepts but not optimal/one solution among others, existing concept that needs elaboration
4- Indispensable	Existing concepts, indispensable or integrated to modern life

Even though we made modifications to the assessment process (cited above in 3.5.2), the theoretical basis underlying the test rests on the key elements of creativity (divergent thinking, convergent thinking, constraint satisfaction, problem finding, problem solving) so that CEDA remained a relevant instrument.

A difficulty with the CEDA is its newness. No previous scores (detailed or global) were found to compare our results with. The authors of CEDA do not comment on what is a high or low score. Of course, the higher the better, but the scores obtained by the participants they tested were not available. These data would have been useful to gauge our assessments and most importantly to compare the engineering population with others. During the assessment process, we started to build a “referential” for futures judges with designs’ examples and the scores attributed. It would be a great tool to add to the test’s manual to simplify and standardize the assessments. That would eventually help to compare the results between research teams.

5.3.5 Qualitative result Assessment

5.3.5.1 Student feedback

Student feedback was collected to know their perception of the course in order to improve the course, if needed. In an anonymous forum, students were invited to answer a few questions: (1) Is a course like IND8108 relevant in an engineering curriculum? Why? (2) Explain if and why your perception of creativity has changed since the beginning of the course. (3) Do you think you’ll be able to use what you learned (knowledge and skills) during the course in a future job setting? How or why not?

5.3.5.2 Procedure

We gave the students the tests as a creativity exercise. Before we began, we read out the guidelines. Two questions were repeated more often during the test: Do we have to use every shape in each design? (No), What are the “other problems solved”?. This latter question was harder to understand for the majority of students. We answered those questions orally. We did not explain how the exercise would be assessed, and did not mention they would do it a second time two months later. We gathered comments from the students (see section 5.2). From our experience, everyone took the test seriously and wanted to perform well. However, it was definitely an inconvenience not being able to give students feedback between the two tests.

5.4 Results

The first part of this section presents descriptive statistical results as well as the paired T-test results for the 59 CEDA test collected. The second part examines the answers given by the students to three general questions about their experience and learning.

5.4.1 Quantitative results

We assessed every pre-test in the 3rd week of the semester and every post-test in the 15th week for the 3 semesters. We coded the pre-tests with letters (A, B, etc.) and letters with a prime (A', B', etc.) for the concordant post-tests. We kept the four scores independent and calculated the difference between the two tests. First, we calculated the average and standard deviation (SD) for each criterion for the pre and post tests. It gives an order of magnitude and scattering of the data. Fluidity and flexibility don't have reference values in contrary to originality that has a maximum of 60 (2 designs * 3 problems on 10 points) and usefulness, 24 (2 designs * 3 problems on 4 points). These values take into account that 34 tests had a least 1 of the 4 scores lower in the post test.

Table 5-9 – Average and SD for the four assessed criteria Pre/Post course

Data	***Pre***	***Post***	***Criterion***
Ave.	40,03	44,08	Fluidity
σ (SD)	10,86	11,16	
Ave.	35,27	39,12	Flexibility
σ (SD)	9,05	9,98	
Ave.	12,56	14,87	Originality
σ (SD)	5,48	5,51	
Ave.	9,86	11,66	Usefulnes
σ (SD)	4,02	3,28	

Secondly, we proceeded to analyze the data with paired t-test for each criterion. The results are presented in the Table 5-10. We verified the normal distribution was respected and the three test used proved so.

Table 5-10 – Paired t-tests results for the four assessed variables

	T-Test (paired)			Normal distribution (α = 0.05)		
	t-value	df	p (unilateral)	*Shapiro-Wilk*	*Anderson-Darling*	*Lilliefors*
Fluidity	*-2.62*	*58*	*0.006* % reject H_0: 1.13	*0.066* % reject H_0: 6.62	*0.105* % reject H_0: 10.51	*0.138* % reject H_0: 13.81
Flexibility	*-2.95*	*58*	*0.0025* % reject H_0: 0.45	*0.016* % reject H_0: 1.58	*0.022* % reject H_0: 2.21	*0.033* % reject H_0: 3.28
Originality	-3.06	58	0.0015 % reject H_0: 0.33	*0.087* % reject H_0: 8.67	*0.085* % reject H_0: 8,47	*0.245* % reject H_0: 24,49
Usefulness	*-3.58*	*58*	*0.0005* % reject H_0: 0.07	*0.676* % reject H_0: 67.63	*0.701* % reject H_0: 70.13	*0.748* % reject H_0: 74.76

As the *p* numbers demonstrate, all four criteria show a slight, but significant increase in values.

5.4.2 Qualitative results

At the end of the three semesters (A14-W15-A15), we asked three questions on anonymous forums. We could not identify the students and students could not read each other's answers. Thirty of the 59 students who completed the course answered the questions. At the end of the first semester, the questions were asked verbally to the eight students present. The figures below summarize and categorize the answers received.

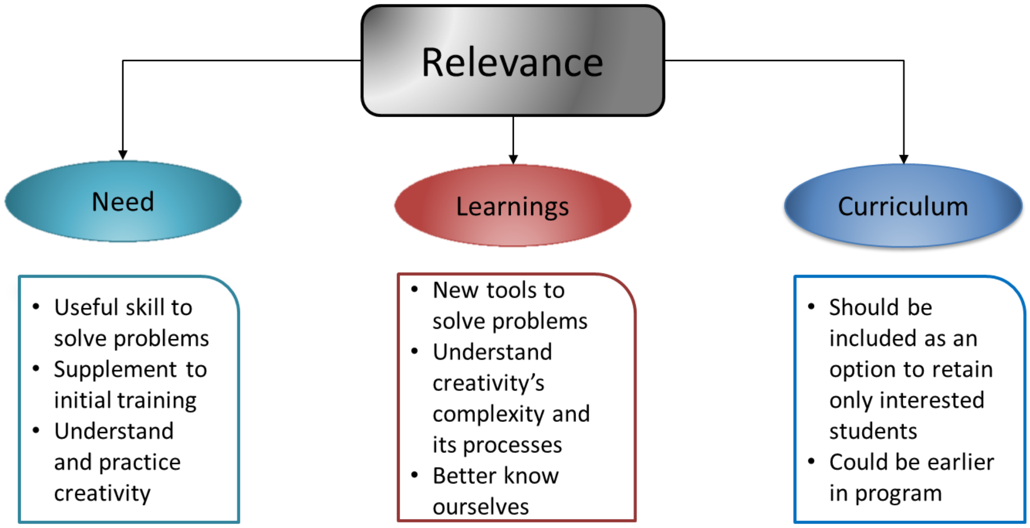


Figure 5-5 – Question 1: Is a course like IND8108 relevant in an engineering curriculum? Why?

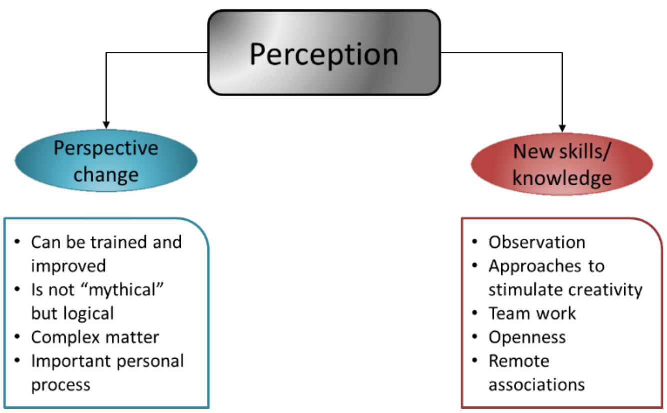


Figure 5-6 – Question 2: Explain if and why your perception of creativity has changed since participating in the course.

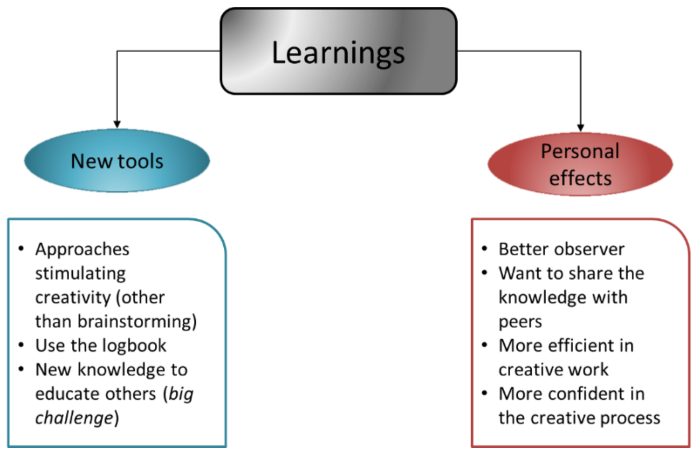


Figure 5-7 – Question 3: Do you think you'll be able to use what you learned (knowledge and skills) during the course in a future job setting? How or why not?

The students had a positive experience of the course saying that it was different from other engineering courses and useful (already using knowledge and skills in project/work). Students also mentioned encountering challenges (e.g., time, patience, motivation) when trying to implement their learning into project contexts. However, some seemed to think that the course was not for everyone because some students were not open to developing these skills (underestimate the importance or just don't believe in the necessity of addressing creativity skills). They said that they acquired new knowledge, new perspectives, and a new understanding of creativity, as well as new tools to stimulate creativity (logbook, approaches, metacognition).

5.5 Discussion

We discuss three topics: the CEDA test, the results, and the limitations and future research of this study.

5.5.1 CEDA

We gathered qualitative data about students' impressions of the CEDA (17 responses on 59 students). Opinions were divided on many aspects. Some didn't agree on the representativeness of their creativity performance offered by test (4/17). Because the course doesn't focus specifically on 'engineering creativity', students felt they acquired a lot more knowledge and developed more skills than the test assessed. A minority of students (6/17) said it was difficult to be motivated by such an exercise. Another challenge was ‘fixation’; for some students (5/17), even after 11 weeks, they remembered quite well what they had produced the first time, which made it more difficult to think of new solutions. Nevertheless, we believe the CEDA can provide an effective initial exercise to establish important theoretical boundaries (flexibility, fluidity, problem finding, etc.).

5.5.2 Quantitative and qualitative results

Our success in recruiting graduate and undergraduate students from different programs of an internationally recognized school of engineering for an elective course on creativity indicates that from students’ perspective there is an interest for this subject (an average of 30 students per semester). The students who enrolled said the reason they did so is because they believe that creativity is essential to engineers.

From these quantitative and qualitative results, positive conclusions can be drawn. We observe a statistically significant increase in the four criteria assessing creativity by the CEDA test. Even though the increase is small in number, fluidity, flexibility, originality and usefulness all show improvement when comparing pre-post results. Despite many questions surrounding the CEDA and its use, these results are very encouraging.

Qualitative results show a great need and interest for the course. Students feel they learn useful information about creativity and tools to foster it. They appreciate the openness during discussions and the metacognitive approach used to reflect on their creative process. The lessons are often made as a group where everybody can share knowledge, vision and opinions. They feel free to share their experiences and therefore contribute to the learning process. This provides a richer experience than when the teacher is the only one ‘delivering’ knowledge.

5.5.3 Limitations and future research

A limitation of this project was the short duration of the course: only 15 weeks. For these cognitive abilities to stay anchored and useable by the learners, continuous practice is important (Sawyer 2013, 2012). In the future a more ambitious training program could be considered. For example, we could aim for two creativity training courses (e.g., autumn of 1st and 3rd year of the curriculum) combined with the explicit implication of creativity in integration projects every year.

Another limitation is the short period used to measure the training's effect. Because our study does not follow the students after the course to evaluated their creativity practice and results one could question its ecological validity. It would be interesting to widen the scope to investigate whether the students become more effective innovators in their future workplaces.

The generalization to other populations can also be questioned. This aspect of the external validity should be explored and tested. The debate of whether creativity is general or domain specific is still debated; we adopted a hybrid position where the course promotes both viewpoints. We believe many pedagogical activities could be kept the same and only small adjustments could be made to personalize the course to other domains. We actually think the course would benefit from gathering students from diverse backgrounds.

An interesting avenue to explore would be to better understand the links between the development of specific narrow abilities in *Glr*, and the serious games and pedagogical strategies used in the course. As these narrow abilities are specifically studied for their links with creativity (Avitia and Kaufman 2014), it would be relevant to know more precisely how to foster and develop them.

5.6 Conclusion

Rather than pursuing a global goal of 'fostering creativity,' professors need to be conscious of which aspects of creativity they wish to develop, and which activity is likely to succeed. Students need to understand in a more specific and concrete way the objective of their learning (Cropley and Urban 2000). We believe that creativity training has a promising future.

Important aspects of education are the capacity for transfer and the long-lasting repercussions. This study does not follow the students beyond the course to see if the lessons are remembered and used to produce innovation. We are not able to predict or guarantee the long-term effects of the training. In other kinds of training (e.g., dance, visual art, English), students learn and understand the basics before deepening their understanding. Before becoming a prolific writer, one must learn the basics of grammar and spelling. However, teaching the basics of a language does not ensure that students will become great writers. Creativity should be viewed as a tool in a toolbox that individual will use and develop throughout their lives as much (or as little) as they need to.

In sum, we believe that this educational experience was a success. On numerous levels (increase in general knowledge about creativity, development of cognitive abilities, comprehension of a metacognitive approach, fulfillment of the need to train engineers to be more creative, provision of a practical training, etc.), the course was able to help students become more creative individuals. Fostering the next Leonardo Da Vinci or Marie Curie was never the intention. More realistically and more usefully, the course aims to develop ‘creativity ambassadors’, i.e. individuals who know more about creativity and its cognitive implications, practice it on a daily basis, and share their knowledge and skills with others.

Acknowledgments

We are grateful for funding to the first author from the *Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies* (FRQNT).

We are grateful for funding to the second and third authors from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

Amabile, T.M. 1988. "A model of creativity and innovation in organizations." In, edited by B. M. Staw and L. L. Cummings. Greenwich, CT: JAI Press.

Arnab, S., K. Brown, S. Clarke, I. Dunwell, T. Lim, N. Suttie, S. Louchart, M. Hendrix, and S. de Freitas. 2013. "The development approach of a pedagogically-driven serious game to support Relationship and Sex Education (RSE) within a classroom setting." Review of. *Computers & Education* 69:15-30.

Avitia, M. J., and J. C. Kaufman. 2014. "Beyond g and c: The Relationship of Rated Creativity to Long-Term Storage and Retrieval (Glr)." Review of. *Psychology of Aesthetics, Creativity and the Arts* 8 (3):293-302.

Badran, I. 2007. "Enhancing creativity and innovation in engineering education." Review of. *European J. of Engin. Education* 35 (2):573-85.

Bateya, M., T. Chamorro-Premuzicb, and A. Furnham. 2009. "Intelligence and personality as predictors of divergent thinking: The role of general, fluid and crystallised intelligence." Review of. *Thinking Skills and Creativity* 4:60-9.

Benedek, M., T. Könen, and A. C. Neubauer. 2012. "Associative Abilities Underlying Creativity." Review of. *Psychology of Aesthetics, Creativity and the Arts* 6 (3):273-81.

Bransford, J.D., and B.S. Stein. 1993. *The IDEAL problem solver*. 2nd ed. New York, NY: W.H. Freeman.

Chang, C.-., L.-P. Peng, J.-S. Lin, and C. Liang. 2014. "Predicting the creativity of design majors based on the interaction of diverse personality traits." Review of. *Innovations in Education and Teaching International*. doi: 10.1080/14703297.2014.999697.

Charyton, C. 2014. *Creative Engineering Design Assessment: Background, Directions, Manual, Scoring Guide and Uses*, *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology* Springer London.

Charyton, C., R. J. Jagacinski, and J. A. Merrill. 2008. "CEDA: A Research Instrument for Creative Engineering Design Assessment." Review of. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts* 2 (3):147-54.

Charyton, C., R. J. Jagacinski, J. A. Merrill, W. Clifton, and S. Dedios. 2011. "Assessing Creativity Specific to Engineering with the Revised Creative Engineering Design Assessment." Review of. *J. of Engineering Education* 100 (4):778-99.

Charyton, C., and J. A. Merrill. 2009. "Assessing General Creativity and Creative Engineering Design in First Year Engineering Students." Review of. *J. of Engineering Education*:145-56.

Clapham, M. M. 1997. "Ideational Skills Training: A Key Element in Creativity Training Programs." Review of. *Creativity Research Journal* 10 (1):33-44. doi: 10.1207/s15326934crj1001_4.

Cropley, A. J. 1999. "Creativity and cognition: Producing effective novelty." Review of. *Roeper Review* 21 (4):253-60.

Cropley, A.J., and K.K. Urban. 2000. "Programs and Strategies for Nurturing Creativity." In *International handbook of giftedness and talent*, edited by K. A. Heller, F. J. Mönks, R. J. Sternberg and R. F. Subotnik, 481-94. Oxford: Permagon.

Cropley, D.H. 2016. "Nurturing Creativity in the Engineering Classroom." In, 1-20. University of South Australia.

Cropley, D.H., and A.J. Cropley. 2000. "Fostering Creativity in Engineering Undergraduates." Review of. *High Ability Studies* 11 (2):207-19. doi: 10.1080/13598130020001223.

Csikszentmihalyi, Mihaly. 1996. "The Creative Personality." Review of. *Psychology Today* 29 (4):36-40.

Daly, S. R., E. A. Mosyjowski, and C. M. Seifert. 2014. "Teaching Creativity in Engineering Courses." Review of. *Journal of Engineering Education* 103 (3):417-49. doi: 10.1002/jee.20048.

Dippo, C. 2013. The Alternative Uses Test of Creativity. Paper presented at the National Conference On Undergraduate Research (NCUR), University of Wisconsin La Crosse, WI.

Engineers Canada. 2014. "Canadian Engineering Accreditation Board : Accreditation Criteria and Procedures." In, 118. Ottawa, Canada.

Felder, Richard. 1987. "On Creating Creative Engineers." Review of. *Engineering Education* 77 (4):222-7.

Gabora, L. 2005. "Creative thought as a non-Darwinian evolutionary process." Review of. *Journal of Creative Behavior* 39 (4):262-83.

———. 2010. "Revenge of the 'neurds': Characterizing creative thought in terms of the structure and dynamics of human memory." Review of. *Creativity Research Journal* 22 (1):1-13.

———. In press. "Honing theory: A complex systems framework for creativity." Review of. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*.

Gangopadhyay, D. 2014. "The Dawn of the Creative Age: Fostering Creativity Among Engineering Students." Review of. *Teaching Innovation Projects* 4 (1):Art. 4.

Glover, J. A. 1980. "A Creativity-Training Workshop: Short-Term, Long-Term, and Transfer Effects." Review of. *Journal of Genetic Psychology* 136 (1):3-16. doi: 10.1080/00221325.1980.10534091.

Hargrove, R. A., and J. L. Nietfeld. 2015. "The Impact of Metacognitive Instruction on Creative Problem Solving." Review of. *The Journal of Experimental Education* 83 (3):291-318. doi: 10.1080/00220973.2013.876604.

Isaksen, S. G. 1995. "Methodolgy for Bridging the Brain and Body for Briliant Innovations." In *Methodolgy for Bridging the Brain and Body for Briliant Innovations*, edited by À CONFIRMER !!, 145-81.

Isaksen, S. G., K.B. Dorval, and D. J. Treffinger. 2000. *Creative approaches to problem solving: A framework for change*. 2nd ed. Buffalo, NY: Creative Problem Solving Group.

Johri, Aditya, Helen L. Chen, and Micah Lande. 2009. Creativity and Cognition in Engineering Design: Theoretical and Pedagogical Issues. Paper presented at the Seventh ACM Conference on Creativity and Cognition Berkeley, Californie.

Kapp, K. M., L. Blair, and R. Mesch. 2013. *The Gamification of Learning and Instruction Fieldbook: Ideas into Practice*: Pfeiffer.

Kelley, T. 2001. *The art of innnovation: Lessons in creativityt from IDEO, America's leading design firm*. New York, NY: Doubleday.

Liu, Z. (Eric), and D. J. Schönwetter. 2004. "Teaching Creativity in Engineering." Review of. *International Journal of Engineering Education* 20 (5):801-8.

Mayo, Merrilea J. 2007. "Games for Science and Engineering Education." Review of. *Communications of the ACM* 50 (7):31-5.

McGrew, K. S. 2009. "CHC theory and the human cognitive abilities project: Standing on the shoulders of the giants of psychometric intelligence research." Review of. *Intelligence* 37:1-10.

Murdock, M., and S. Keller-Mathers. 2011. "Programs and Courses in Creativity." In *Encyclopedia of Creativity*, edited by M. Runco and S. Pritzker, 266-70. USA: Academic Press.

Newton, J. H., and K. S. McGrew. 2010. "Introduction to the Special Issu : Current research in Cattel-Horn-Carroll- Based Assessment." Review of. *Psychology in the Schools* 4 (7):621-34. doi: 10.1002/pits.20495.

Norman, D. 1993. "Distributed Cognition." In *Things that make us smart.*, 290. USA: Perseus Books.

Nussbaum, B. 2013. *Creative Intelligence : Harnessing the Poer to Create, Connect, and Inspire*. USA: Harper Business.

Papaleontiou-Louca, E., D. Varnava-Marouchou, S. Mihai, and E. Konis. 2014. "Teaching for Creativity in Universities." Review of. *Journal of Education and Human Development* 3 (4):131-54.

Rasmussen, J. 1983. "Skills, rules, and knowledge: Signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models." Review of. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* smc-13 (3):257-66.

Sawyer, R. K. 2012. *The Science of Human Innovation : Explaining Creativity*. 2nd ed. USA: Oxford University Press.

———. 2013. *Zig Zag : the surprising path to greater creativity*. 1st ed. USA: Jossey-Bass.

Scott, G., L. E. Leritz, and M. D. Mumford. 2004a. "The effectiveness of creativity training: A quantitative review." Review of. *Creativity Research Journal* 16 (4):361-88. doi: dx.doi.org/10.1080/10400410409534549.

———. 2004b. "Types of creativity training: Approaches and their effectiveness." Review of. *The Journal of Creative Behavior* 38 (3):149-79.

Sternberg, R. 2006a. "The Nature of Creativity." Review of. *Creativity Research Journal* 18 (1):87-98. doi: 10.1207/s15326934crj1801_10.

———. 2006b. "Stalking the elusive creativity quark: Toward a comprehensive theory of creativity." In *New directions in aesthetics, creativity, and the arts*, edited by P. Locher, C. Martindale and L. Dorfman, 79-104. Amityville, NY: Baywood.

Treffinger, D. J., G. C. Young, E. C. Selby, and C. Shepardson. 2002. "Assessing Creativity: A Guide for Educators." In, 121. University of Connecticut: National Research Center on the Gifted and Talented.

Wallas, G. 1926. *The art of thought*. New York, NY: Harcourt, Brace.

Wickens, C.D. 1984. *Engineering Psychology and Human Performance*. Edited by Merrill. Michigan.

Yeh, Y-C. 2011. "Research and Methods." In *Encyclopedia of Creativity*, edited by M. Runco and S. Pritzker, 291-8. USA: Academic Press.

Zappe, S., T. Litzinger, and S. Hunter. 2012. Integrating the Creative Process into Engineering Courses: Description and Assessment of a Faculty Workshop. Paper presented at the Annual Conference of the American Society for Engineering Education, San Antonio, TX.

Zappe, S., I. Mena, and T. Litzinger. 2013. Creativity is Not a Purple Dragon. Paper presented at the OPEN 2013, NCIIA's 17th Annual Conference, Washington, DC.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

Cette thèse s'articule autour de trois études qui s'appuient sur un cadre théorique dérivé d'une recension des écrits sur les fondements, l'évaluation et l'apprentissage de la créativité. Dans ce chapitre, les principaux résultats de chacune des études sont résumés tout en étant mis en relation les uns avec les autres pour unifier les impacts et les recommandations de la thèse dans son ensemble.

6.1 Aperçu des résultats

Les trois études sont de trois types différents : étude méthodologique, étude empirique, et conception et évaluation. Le Tableau 6-1 présente un résumé de leurs caractéristiques et de leurs résultats.

Tableau 6-1 – Résumé des caractéristiques et des résultats des trois études

Ch.	Type d'étude	Participants	Outils	Obj.	Résultats
3	Étude méthodologique	Phase 1 : 3 juges/22 sujets Phase 2 : 2 juges/98 sujets	Méthode Gage « R&R »	2 a)	Vérification de la fiabilité du CEDA en français Mesures répétables dans le temps (intra-juges) Mesures concordantes (inter-juges) 91,5% de la variabilité du test due aux sujets
			Test CEDA	2 b)	Clarification du processus d'évaluation (scores) Précison des 2 grilles de Likert qualitatives (originalité/utilité)
4	Étude empirique	2 juges 98 sujets	Test d'encodage Test de potenttialité Test CEDA	1 a)	Encodage : type chaîne et étoile en majorité (89%) État d'esprit : « Actualisation du potentiel » à 76,5% CEDA : aucun résultat d'originalité supérieur à 6; 40 items en moyenne pour la fluidité; fluidité et flexibilité très corréllées
			Synthèse	1 b)	Pas de liens statistiquement significatifs entre les expériences cognitives et le CEDA Données empiriques servant à développer un cours adapté à la population Données empiriques fournies aux apprenants dans l'optique de développer des processus métacognitifs
5	Conception et évaluation	1 juge (éducateur) 59 sujets (4 semestres)	Revue de littérature	1 a)	Cadre théorique défini pour appuyer les activités pédagogiques
			Cours IND8108	3 a)	Dix activités pédagogiques décrites et expérimentées, basées sur le cadre théorique établi
			Test CEDA Questionnaire	3 b)	Quatre critères d'évaluation significativement plus élevés (pré-post) Données qualitatives qui confirment la pertinence, le besoin et l'efficacité du cours

6.2 Le cadre théorique

L'élaboration d'un cadre théorique pour guider la conception et la mise en œuvre d'un cours sur la créativité est au cœur de ce projet doctoral. Ce cadre théorique prend appui sur une recension extensive des écrits sur la créativité et constitue une base solide pour une intervention éducative. Il va au-delà des cadres théoriques utilisés dans les programmes de formation sur la créativité que nous avons examinés, qui, lorsqu'ils étaient présents, étaient peu décrits ou peu rigoureux (Hargrove & Nietfeld, 2015). L'élaboration de ce cadre représente une innovation dans les recherches sur la créativité puisqu'il propose une intégration des aspects éducatifs et cognitifs.

Le cours prend appui sur plusieurs modèles théoriques de la cognition et la métacognition (Amabile, 1988; Cropley & Urban, 2000; Hargrove & Nietfeld, 2015; Sternberg, 2006a). Plus spécifiquement, les dix activités pédagogiques comprises dans le cours sont basées (1) sur les recommandations d'une étude exhaustive sur la formation en créativité, (2) sur un résumé de modèles conceptuels de la créativité et un modèle procédural récapitulatif des étapes d'un processus créatif ainsi que (3) sur le modèle de l'intelligence CHC (voir Chapitre 5). Cela permet d'ancrer la formation sur un cadre solide, ciblant des capacités cognitives directement en lien avec le comportement créatif (objectifs 1 a/b).

Aussi, les deux expériences et le test que nous avons réalisés (étude 2) nous ont permis de mieux connaître deux aspects cognitifs liés à la créativité. L'expérience d'encodage a révélé que la manière de représenter l'information extraite de la mémoire lors d'un exercice de pensée divergente était principalement linéaire ou en étoile. Espérant trouver des cartes mentales sous forme de réseau, nous avons réalisé qu'il s'agissait possiblement d'une compétence à développer puisque très peu de cartes étaient spontanément de cette forme. Les écrits décrivent les cartes conceptuelles comme des outils pédagogiques efficaces pour aider les apprenants à mettre en relation les concepts enseignés (Kinchin, 2008) alors que l'outil proposé par Buzan, la carte mentale (*mind map)* (Buzan, 2011), est devenue une méthode populaire et répandue pour structurer la phase de divergence. Étant donné l'importance de faire des liens entre des concepts éloignés pour formuler des idées créatives (Benedek, Könen, & Neubauer, 2012; Bonnardel, 2000; Hargrove & Nietfeld, 2015), et tenant compte du fait que les neurones sont reliés de manière à créer un réseau de connexions, nous croyons qu'il est fondamental d'apprendre et de comprendre comment construire des cartes mentales sous forme de réseaux (une forme combinatoire des cartes mentales et des cartes conceptuelles (voir chapitre 3). Pour diverses ces raisons, cet aspect spécifique des compétences à développer en lien avec la créativité est intégré au cadre théorique.

L'expérience de potentialité permet quant à elle d'identifier le type d'état d'esprit des participants lorsqu'ils tentent de résoudre une analogie. Les résultats obtenus ont corroboré ceux de Gabora c'est-à-dire qu'environ 75% des gens ont un mode de pensée qui leur permet de considérer plusieurs solutions simultanément. Il s'agit d'un aspect important du processus créatif lorsqu'il est abordé comme la résolution d'un problème, qui devrait être pris en compte lors de l'élaboration d'un cadre théorique supportant l'apprentissage de la créativité. Dans cette thèse, nous avons proposé l'intégration de cet aspect de la cognition dans une capacité cognitive générale du modèle CHC (*Fluid reasoning*) et par conséquent ayant une place dans le cadre théorique de notre cours sur la créativité.

6.3 Processus d'évaluation de la créativité des futurs ingénieurs

Le manuel d'utilisation du CEDA ainsi que les articles des concepteurs du test réfèrent à un processus d'évaluation faisant appel à deux juges, un psychologue et un ingénieur. Les juges évaluent les designs soumis par les participants à l'aide de deux échelles de Likert, l'une pour l'originalité (0-10) et l'autre pour l'utilité (0-4). Ils s'appuient sur les mots choisis par la chercheure pour qualifier les différents échelons (ex. : « somewhat interesting », « insightful », etc.). Malgré que ses travaux aient montré une concordance inter-juges satisfaisante, l'utilisation du CEDA dans notre projet doctoral nous a amenée à critiquer deux aspects fondamentaux du test : les qualificatifs des échelons sur deux échelles et la formule de calcul du score global de créativité (addition des quatre scores). Bien qu'un score unique soit attrayant à des fins de comparaison ou de diagnostic, nous avons préféré, pour le présent travail, traiter les quatre critères séparément.

La version française du test fournie dans le manuel d'instructions a dû être revue et corrigée. La qualité de la langue ne permettait pas l'utilisation de la version suggérée. Dans ce contexte, il était nécessaire de vérifier la fiabilité de la version française du test.

Aussi, il fallait clarifier le processus d'évaluation suggéré par le CEDA pour qu'il soit fiable et facilement utilisable. Pour y arriver, nous avons documenté notre processus d'évaluation et procédé à des rencontres de discussions (trois juges impliqués) afin de préciser les critères d'évaluation spécifiques au test (échelles de Likert). Des grilles plus précises ont permis de développer une description sommaire pour chacun des niveaux des échelles (objectif 2a). Sans être complètes, ces descriptions offrent plus de détails sur ce qui serait attendu pour chaque niveau. Même si Charyton et son équipe avaient ajouté des qualificatifs aux échelles numériques, des expressions comme « familier », « intéressant » et « très intéressant » ne nous apparaissaient pas optimales pour évaluer les divers designs. Par conséquent, il nous parut pertinent de définir chaque niveau en fonction des designs produits par les participants lors du test et non seulement par une terminologie générique (objectif 2b).

Les échelles de Likert utilisées pour évaluer les critères qualitatifs apportent inexorablement leur part de subjectivité. Cet aspect amène habituellement les chercheurs à s'attarder à la concordance inter-juges. En regardant la méthode R&R, nous avons trouvé très pertinente l'idée de mesurer la stabilité du jugement des évaluateurs (entre eux et dans le temps) à l'aide de celle-ci. De plus, étant donné la traduction du test en français ainsi que le besoin d'expérience des juges, nous avons cru important de répéter ce processus de vérification de la fiabilité déjà complété par Charyton. Étant un outil d'évaluation relativement nouveau et peu répandu dans le domaine de recherche sur la créativité, cette étude fournit une approche distincte quant à la démonstration de la fiabilité à ce dernier.

Finalement, le test CEDA a permis d'obtenir des résultats sur la performance créative des participants. Quatre critères (flexibilité, fluidité, originalité, utilité) ont pu être mesurés et étudiés. Cependant, ayant très peu de points de comparaison dans la littérature et n'ayant pas d'échelle de correspondance entre les scores de CEDA et les niveaux de performance créative réelle, il a été impossible de formuler des conclusions sur la performance réelle de nos sujets. Malgré cette lacune, ce test pourrait être utilisé comme activité pédagogique. Faire des activités avec chacun des cinq aspects de la créativité (pensée divergente, pensée convergente, satisfaction de contraintes, résolution de problème, identification d'opportunités) offre une bonne occasion de s'entraîner à faire des raisonnements créatifs, dans toutes leurs complexités.

6.4 Programme de formation (cours)

Les activités pédagogiques proposées dans le cours mettent l'accent sur une approche cognitive et métacognitive et permettent de développer des capacités cognitives supportant la créativité (objectif 3a). Les apprenants augmentent leurs connaissances de la créativité tout en développant des compétences directement en lien avec celle-ci (Hargrove & Nietfeld, 2015). Ces activités pourront être adaptées et utilisées par des éducateurs de plusieurs domaines.

Dans la troisième étude, nous avons mis en relation les activités pédagogiques choisies pour le cours avec les recommandations de Scott au sujet de l'efficacité d'un programme de formation sur la créativité (Scott et al., 2004) ainsi que différents éléments communs à plusieurs modèles (conceptuels et procéduraux) de la créativité (Amabile, 1988; Cropley & Urban, 2000; Sawyer, 2013; Sternberg, 2006a). Comme la littérature sur la créativité est vaste et souvent en silo, le fait d'associer chacune des activités pédagogiques à un ensemble d'écrits divers constitue une avancée des connaissances sur la créativité. Les activités choisies permettent entre autres, de réconcilier l'utilisation de modèles ayant des approches différentes (procédures ou concepts) tout en prenant en considération ce que la seule étude sur l'efficacité des formations à la créativité (Scott et al., 2004) fournit comme recommandations. Ces dernières étant vagues dans leur opérationnalisation, nous leur avons associé des exemples pour les rendre plus concrètes pour de futurs éducateurs. D'autres activités pourraient sans doute être ajoutées à ce tableau et tenir compte des caractéristiques des divers modèles. D'autres éducateurs pourraient se baser sur cette synthèse de modèles pour développer de nouvelles activités et ainsi participer au développement d'une banque d'activités pédagogiques appuyées par la littérature. Le domaine de l'enseignement de la créativité est en pleine expansion et une certaine structure scientifique servirait sans doute à améliorer les pratiques et assurer une meilleure efficacité des formations.

Des données quantitatives de type pré-post test ont été recueillies pour déterminer l'impact du cours sur quatre variables mesurées par le test CEDA (flexibilité, fluidité, originalité, utilité). Les résultats ont montré qu'il y avait une augmentation significative des scores dans les quatre cas. Des questions qualitatives ont aussi permis de corroborer les résultats quantitatifs mais surtout, elles ont permis de préciser ce que les apprenants pensaient du cours et de leurs apprentissages. Selon eux, le cours est tout à fait pertinent dans le cadre de leurs études en génie. Il répond à un besoin exprimé par de nombreux participants et satisfait leur curiosité sur le sujet. Cependant, le désir de suivre un cours très différent des autres de leur programme d'études (même les cours de projets), et qui en plus permet les échanges, la discussion et l'apprentissage en collectivité apparaît comme des objectifs atteints par chacun (objectif 3b).

Dans la littérature, il existe des descriptions sommaires d'expériences de formation sur la créativité. Toutefois, les études qui décrivent les cadres théoriques, les activités pédagogiques et l'impact de la formation sont rares. À notre connaissance, il n'y en a pas qui se comparent à la nôtre. Une autre étude a utilisé la méthode pré-post pour tester une formation en créativité (Clapham, 1997) mais celle-ci considérait une formation courte, complète (30 min) ou partielle (10 min), et date de 20 ans. Cependant, elle confirme qu'une formation portant sur les habiletés cognitives en lien avec la créativité est une avenue prometteuse. L'étude effectuée dans cette thèse est unique puisqu'elle combine des éléments théoriques et empiriques qui permettent de dresser un portrait général mais aussi spécifique de l'expérience des apprenants.

6.5 Limites de la recherche

L'absence d'étude sur les impacts du cours dans le temps constitue une limite importante de la recherche. L'impact du cours sur la performance créative a été mesuré à l'intérieur des 15 semaines de la session universitaire. Il n'y a pas eu de suivi pour savoir si les participants continuaient de pratiquer les différentes activités ou s'ils étaient en mesure d'utiliser leurs nouvelles connaissances dans leurs études ou leur emploi. De plus, il n'y a pas d'intégration explicite dans d'autres cours du curriculum des connaissances acquises sur la créativité. Par conséquent, il s'agit d'apprentissages potentiellement circonscrits dans le temps et dans le contexte d'un cours, cela peut limiter la profondeur des apprentissages.

Nous avons considéré l'utilisation d'un groupe témoin pour comparer l'impact du cours sur la performance créative à celui d'un autre cours qui fait appel à la créativité des participants. Or, cela s'avérait trop complexe à mettre en place. Le choix et le nombre de variables à contrôler pour avoir des groupes de sujets comparables était trop grand : expériences personnelles et académiques, facteurs personnels et environnementaux.

Le cours a été évalué dans son ensemble et non pas en fonction de chaque activité pédagogique choisie. Étant donné l'importance de l'intégration des activités, il n'était pas possible de faire une étude pré-post pour chaque activité. Nous ne sommes donc pas en mesure de déterminer l'efficacité de chaque activité mais plutôt celle de l'ensemble de ces dernières. D'ailleurs, nous pensons qu'une formation efficace se doit d'intégrer plusieurs activités sur différents aspects de l'apprentissage de la créativité et de favoriser une intégration consciente et intentionnelle de ces aspects.

De plus, plusieurs capacités cognitives supportant la créativité restent à identifier et à exploiter dans un programme de formation. Spécialement avec le modèle CHC, des chercheurs étudient et testent différentes capacités spécifiques liées à la créativité qui pourraient être ciblées lors de la création de nouvelles activités pédagogiques. Notre recherche est un premier test d'un cadre théorique basé sur des capacités cognitives. Un processus d'amélioration continue est nécessaire pour intégrer de nouvelles activités selon les résultats des recherches et les expériences vécues.

Finalement, la présente recherche s'est intéressée à la créativité dans le domaine de l'ingénierie. Le contexte particulier d'une école d'ingénierie, où les sujets ont forcément des profils de formation scientifique et sont jeunes (ils ont dans la vingtaine), pourrait limiter la portée de nos conclusions. Une population qui n'a pas choisi de suivre un tel cours ou qui possède déjà de nombreuses années d'expériences dans la démonstration de comportements créatifs, pourrait ne pas avoir le même état d'esprit et ainsi ne pas arriver aux mêmes bénéfices. Cependant, nous croyons que des apprenants de plusieurs autres disciplines pourraient tout à fait bénéficier d'une telle formation si, entre autres, les facteurs de motivation et d'ouverture d'esprit sont présents.

Le contexte du génie a aussi eu une influence sur certains aspects méthodologiques de la recherche. Effectivement, le CEDA n'aurait vraisemblablement pas été choisi si le projet avait été fait dans un contexte littéraire ou de beaux-arts par exemple. Certains aspects du test comme le croquis ou les matériaux choisis seraient potentiellement moins bien maîtrisés par les sujets. L'ajout du critère « utilité » pourrait aussi être remis en question si le projet de recherche était conduit dans des domaines où cet aspect est moins critique.

De plus, tout comme pour un sport ou un art, il peut être tout à fait pertinent de commencer tôt les apprentissages en matière de créativité. Même si la métacognition peut s'avérer plus difficile à un jeune âge, le développement de capacités cognitives et de compétences liées à la créativité est certainement possible. À force de compréhension, de pratique et de stimulation de leur intérêt envers la créativité, on peut sans doute améliorer la performance créative des personnes très tôt dans la vie.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Faire preuve de créativité est devenu une caractéristique fortement recherchée par les dirigeants de nombreuses organisations, et ce, dans une grande variété de domaines. Le présent projet de recherche s'inscrit dans cette perspective d'aider les futurs ingénieurs à devenir des professionnels plus créatifs et ce, dans toutes les facettes de leurs activités. De nombreux auteurs recommandent d'intégrer la créativité au curriculum des ingénieurs mais ils ne s'entendent pas nécessairement sur la manière de le faire.

Le projet de recherche a atteint la tous les objectifs établis en début de parcours. Mis à part le manque de relations significatives entre les résultats des deux expériences cognitives et les résultats du CEDA, nous avons été en mesure de proposer des réponses pertinentes et utiles quant à l'utilisation du CEDA et la conception et l'évaluation d'un cours améliorant la créativité des participants. La revue de littérature en sciences cognitives et sur la créativité combinée aux résultats empiriques obtenus, fournit aux éducateurs des appuis théoriques et les implications pratiques établissant une solution complète qui suggère une façon de développer des capacités cognitives à la base de la créativité.

Malgré que notre recherche ait été effectuée dans le contexte de l'ingénierie, les principes de base, les modèles et plusieurs des activités de formation à la créativité pourraient être utilisés dans d'autres contextes. Mis à part certaines activités et discussions plus axées sur le domaine de l'ingénierie, plusieurs pourraient être transférées à d'autres domaines. Toute la question de généralité ou de spécificité de la créativité fait d'ailleurs partie d'un débat au sein de la communauté scientifique. En résumé, il existe des aspects généraux qui peuvent faire l'objet de pratiques mais ces derniers sont combinés à des contextes particuliers qui varient en fonction des situations. Ce qui importe est que la créativité soit vue comme une compétence à développer et que les éducateurs en charge aient les connaissances et les compétences nécessaires pour y arriver.

Pistes de recherche pour la suite

Il serait intéressant d'évaluer le transfert des connaissances et des habiletés acquises dans le cours à d'autres activités. Cela permettrait de tester la validité écologique du cours, c'est-à-dire d'évaluer ses répercussions concrètes sur la performance créative de la personne dans le monde.

Déjà, les résultats découlant de l'expérience à l'École Polytechnique démontrent que les participants tentent de mettre en pratique leurs apprentissages au sein de leurs équipes de projet durant le trimestre en cours. Ils reviennent partager leurs impressions, leurs difficultés ainsi que leurs bons résultats. À la lumière de ces premières expériences positives dans un contexte académique, il est légitime de penser que des résultats favorables pourraient être observés en entreprise. Un tel projet de recherche met certainement les bases pour justifier la suite des recherches dans les organisations.

Malgré les améliorations apportées dans l'opérationnalisation du CEDA, quatre niveaux de l'échelle de Likert sur l'originalité n'ont pas encore été définis et pourraient faire l'objet d'études subséquentes. Dans le but de tester et valider l'amélioration des nouveaux descriptifs, il serait intéressant de fournir les échelles de Likert à d'autres chercheurs pour qu'ils en fassent l'essai. Aussi, bien que la littérature au sujet de l'évaluation de la créativité décrive habituellement les résultats selon la fluidité, la flexibilité et l'originalité (pour les tests les plus complets), nous comprenons l'intérêt d'un score global et sommes d'avis que des études supplémentaires devraient être conduites pour en définir un qui soit théoriquement et statistiquement justifiable. Le choix des variables à considérer et leurs poids dans l'équation générale demeurent des questionnements pertinents.

BIBLIOGRAPHIE

Adams, J. P., Kaczmarczyk, S., Picton, P., & Demian, P. (2007). *Improving Problem Solving and Encouraging Creativity in Engineering Undergraduates.* Paper presented at the International Conference on Engineering Education – ICEE, Coimbra, Portugal. pp. 1-6

Aerts, D., Gabora, L., & Sozzo, S. (2013). Concepts and their dynamics: A quantum theoritical model. *Topics in Cognitive Science, 5*(4), 737-772.

Altshuller, G. (1998). *40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation* (Vol. 1). Worchester, MA.143 pages

Amabile, T. M. (1988). A model of creativity and innovation in organizations. In B. M. Staw & L. L. Cummings (Eds.), (Vol. 10). Greenwich, CT: JAI Press.

Amabile, T. M. (2012). Componential theory of creativity. In E. H. Kessler (Ed.), *Encyclopedia of Management Theory*: Sage Publications.

Anolli, L., Antonietti, A., Crisafulli, L., & Cantoia, M. (2001). Accessing source information in analogical problemsolving. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology, 54*(1), 237-261. doi:10.1080/02724980042000093

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1971). *The control processes of short-term memory*. Retrieved from Stanford, California:

Avitia, M. J., & Kaufman, J. C. (2014). Beyond g and c: The Relationship of Rated Creativity to Long-Term Storage and Retrieval (Glr). *Psychology of Aesthetics, Creativity and the Arts, 8*(3), 293-302. doi:10.1037/a0036772

Badran, I. (2007). Enhancing creativity and innovation in engineering education. *European J. of Engin. Education, 35*(2), 573-585. doi:10.1080/03043790701433061

Baillie, C., & Walker, P. (1998). Fostering Creative Thinking in Student Engineers. *European J. of Engin. Education*, *23*(1), 35-44. doi:10.1080/0304379980230105

Balachandra, R., & Friar, J. H. (1997). Factors for Success in R&D Projects and New Product Innovation A Contextual Framework. *IEEE Transactions on Engineering Management, 44*(3), 276-287.

Barack, M., & Goffer, N. (2002). Fostering Systematic Innovative Thinking and Problem Solving: Lessons Education Can Learn From Industry. *International Journal of Technology and design Education, 12*, 227-247.

Barak, M. (2004). Systematic Approaches for Inventive Thinking and Problem-Solving: Implications for Engineering Education. *International Journal of Engineering Education, 20*(4), 612-618.

Bateya, M., Chamorro-Premuzicb, T., & Furnham, A. (2009). Intelligence and personality as predictors of divergent thinking: The role of general, fluid and crystallised intelligence. *Thinking Skills and Creativity, 4*, 60-69. doi:10.1016/j.tsc.2009.01.002

Beghetto, R. A., & Kaufman, J. C. (2007). Toward a Broader Conception of Creativity: A Case for “mini-c” Creativity. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, 1*(2), 73-79. doi:10.1037/1931-3896.1.2.73

Beghetto, R. A., & Kaufman, J. C. (2009). Intellectual Estuaries: Connecting Learning and Creativity in Programs of Advanced Academics. *Journal of Advanced Academics, 20*(2), 296-324.

Benedek, M., Könen, T., & Neubauer, A. C. (2012). Associative Abilities Underlying Creativity. *Psychology of Aesthetics, Creativity and the Arts, 6*(3), 273-281. doi:10.1037/a0027059

Benguigui, J. M. (2012). *Les 10 ans de la théorie C-K : Revue de littérature.* Paper presented at the XXI conference of the Association Internationale de Management Stratégique, Lille, France. pp. 1-7

Bonnardel, N. (2000). Towards understanding and supporting creativity in design: analogies in a constrained cognitive environment. *Knowledge-Based Systems, 13*, 505-513.

Bonnardel, N. (2006). *Créativité et conception; Approches cognitives et ergonomiques*. Marseille: SOLAL.205 pages

Bonnardel, N. (2009). Activités de conception et créativité : de l’analyse des facteurs cognitifs à l’assistance aux activités de conception créatives. *Le travail humain, 72*, 5-22.

Bonnardel, N., & Marmèche, E. (2005). Towards supporting evocation processes in creative design: A cognitive approach. *International Journal of Human-Computer Studies, 63*(4-5), 422-435. doi:10.1016/j.ijhcs.2005.04.006

Brinkmann, A. (2003). Graphical Knowledge Display – Mind Mapping and Concept Mapping as Efficient Tools in Mathematics Education. *Mathematics Education Review, 16*, 35-48.

Buzan, T. (2011). Tony Buzan, inventor of Mind Mapping. Retrieved from www.tonybuzan.com

Carpenter, W. A. (2016). *Engineering creativity: Toward an understanding of the relationship between perceptions and performance in engineering design.* (PhD), University of Akron, Ohio, USA.

Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities, A survey of Factor-Analytic Studies*. USA: Cambridge University Presspages

Chan, J., Fu, K., Schunn, C., Cagan, J., Wood, K., & Kotovsky, K. (2011). On the Benefits and Pitfalls of Analogies for Innovative Design: Ideation Performance Based on Analogical Distance, Commonness, and Modality of Examples. *Journal of Mechanical Design, 133*.

Charyton, C. (2014). *Creative Engineering Design Assessment: Background, Directions, Manual, Scoring Guide and Uses*: Springer Londonpages

Charyton, C., Jagacinski, R. J., & Merrill, J. A. (2008). CEDA: A Research Instrument for Creative Engineering Design Assessment. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, 2*(3), 147-154. doi:10.1037/1931-3896.2.3.147

Charyton, C., Jagacinski, R. J., Merrill, J. A., Clifton, W., & Dedios, S. (2011). Assessing Creativity Specific to Engineering with the Revised Creative Engineering Design Assessment. *J. of Engineering Education, 100*(4), 778-799.

Charyton, C., & Merrill, J. A. (2009). Assessing General Creativity and Creative Engineering Design in First Year Engineering Students. *J. of Engineering Education*, 145-156.

Chesbrough, H. (2007). Business model innovation: it's not just about technology anymore. *Strategy and Leadership, 35*(6), 12-17. doi:10.1108/10878570710833714

Chesbrough, H. W. (2003). The era of open innovation. *MIT Sloan Management Review.* Retrieved from http://sloanreview.mit.edu/article/the-era-of-open-innovation/

Chesbrough, H. W., & Appelyard, M. M. (2007). Open innovation and strategy. *California Management Review, 50*(1), 57-76.

Clapham, M. M. (1997). Ideational Skills Training: A Key Element in Creativity Training Programs. *Creativity Research Journal, 10*(1), 33-44. doi:10.1207/s15326934crj1001_4

Clary, R. M., Brzuszek, R. F., & Fulford, C. T. (2011). Measuring Creativity: A Case Study Probing Rubric Effectiveness for Evaluation of Project-Based Learning Solutions. *Creative Education, 2*(4), 333-340. doi:10.4236/ce.2011.24047

CNUCED. (2008). Rapport sur l'économie créative 2008.

Court, A. W. (1998). Improving Creativity in Engineering Design Education. *European Journal of Engineering Education, 23*(2), 141-154. doi:10.1080/03043799808923493

Cropley, A. J., & Urban, K. K. (2000). Programs and Strategies for Nurturing Creativity. In K. A. Heller, F. J. Mönks, R. J. Sternberg, & R. F. Subotnik (Eds.), *International handbook of giftedness and talent* (pp. 481-494). Oxford: Permagon.

Cropley, D. H. (2015). Chapter 2: The Importance of Creativity in Engineering in *Creativity in Engineering: Novel Solutions to Complex Problems* (pp. 13-34): Academic Press.

Cropley, D. H. (2016). *Nurturing Creativity in the Engineering Classroom*. School of Engineering. University of South Australia.

Cropley, D. H., & Cropley, A. J. (2000). Fostering Creativity in Engineering Undergraduates. *High Ability Studies, 11*(2), 207-219. doi:10.1080/13598130020001223

Csikszentmihalyi, M. (1996). The Creative Personality. *Psychology Today, 29*(4), 36-40.

Daly, S. R., Mosyjowski, E. A., & Seifert, C. M. (2014). Teaching Creativity in Engineering Courses. *Journal of Engineering Education, 103*(3), 417-449. doi:10.1002/jee.20048

Davies, M. (2011). Concept mapping, mind mapping and argument mapping: what are the differences and do they matter? *High Educ, 62*, 279-301. doi:10.1007/s10734-010-9387-6

Doumit, S., Marupaka, N., & Minai, A. A. (2013). *Thinking in Prose and Poetry: A Semantic Neural Model.* Paper presented at the The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE. pp. 8

Engineers Canada. (2014). *Canadian Engineering Accreditation Board : Accreditation Criteria and Procedures*. Ottawa, Canada.

Eppler, M. J. (2006). A comparison between concept maps, mind maps, conceptual diagrams, and visual metaphors as complementary tools for knowledge construction and sharing. *Information Visualization, 5*, 202-210. doi:10.1057/palgrave.ivs.9500131

Ericsson, K. A., Prietula, M. J., & Cokely, E. T. (2007). The Making of an Expert. *Harvard business review - Managing for the long term*, 1-8.

European Union. (2009). Manifesto. *European Ambassadors for Creativity and Innovation.* Retrieved from http://www.create2009.europa.eu/fileadmin/Content/Downloads/PDF/Manifesto/manifesto.en.pdf

Fasko, D. J. (2000-2001). Education and Creativity. *Creativity Research Journal, 13*(3 & 4), 317-327.

Felder, R. (1987). On Creating Creative Engineers. *Engineering Education, 77*(4), 222-227.

Fontenot, N. A. (1993). Effects of Training in Creativity and Creative Problem Finding upon Business People. *Journal of Social Psychology, 133*(1), 11-22. doi:10.1080/00224545.1993.9712114

Gabora, L. (2010). Revenge of the 'neurds': Characterizing creative thought in terms of the structure and dynamics of human memory. *Creativity Research Journal, 22*(1), 1-13.

Gabora, L. (2017 (À paraître)). The Neural Basis and Evolution of Divergent and Convergent Thought. In R. E. Jung & O. Vartanian (Eds.), *The Cambridge Hanbook of the Neuroscience of Creativity*: Cambridge University Press.

Gabora, L., & Aerts, D. (2002). Contextualizing concepts using a mathemathical generalization of the quantum formalism. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 14*(4), 327-358.

Gabora, L., & Aerts, D. (2009). A model of the emergence and evolution of intergrated worldviews. *Journal of Mathematical Psychology, 53*, 434-451.

Gabora, L., & Saab, A. (2011). *Creative interference and states of potentiality in analogy problem solving.* Paper presented at the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Boston, MA. pp. 1-6

Gantchev, D. (2007). *Assessing the economic contribution of creative industries: WIPO's experience*. Paper presented at the WIPO International Conference on IP and the Creative Industries, Geneva, Switzerland.

Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical Problem Solving. *Cognitive Psychology, 12*, 306-355.

Global Agenda Council on Design & Innovation 2012-2014. (2013). *World Economic Forum.* Retrieved from http://www.weforum.org/content/global-agenda-council-design-innovation-2012-2014

Government of Canada. (2009). *Canada at the Leading Edge : Common Vision, Concerted Plan*. Retrieved from http://www.nserc-crsng.gc.ca/_doc/Reports-Rapports/SSHRC-NSERC-CIHR_Final_eng.pdf.

Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist, 5*, 444-454.

Guilford, J. P. (1967). *The nature of human intelligence*. New York, NY: McGraw-Hillpages

Hargrove, R. A., & Nietfeld, J. L. (2015). The Impact of Metacognitive Instruction on Creative Problem Solving. *The Journal of Experimental Education, 83*(3), 291-318. doi:10.1080/00220973.2013.876604

Harris, D. (1960a). The Development and Validation of a Creativity Test in Engineering. *Journal of Applied Psychology, 44*(4), 254-257.

Harris, D. (1960b). The Development and Validation of a Test of Creativity in Engineering. *Journal of Applied Psychology, 44*(4), 254-257.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2002). *C-K theory: Notions and applications of a unified design theory*. Paper presented at the Herbert Simon International Conference on « Design Sciences », Lyon, France. pp. 1-22

Hernandez, N. V., Shah, J. J., & Smith, S. M. (2010). Understanding design ideation mechanisms through multilevel aligned empirical studies. *Design Studies, 31*(4), 382-410. doi:10.1016/j.destud.2010.04.001

Hinton, G. E., & Anderson, J. A. (1989). Models of processing information in the brain. In G. E. Hinton & J. A. Anderson (Eds.), *Parallel models of associative memory* (pp. 23-58): Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Hobday, M., Boddington, A., & Grantham, A. (2011). An innovation perspective on design: Part 1. *Design Issues, 27*(4), 5-15.

Jaušovec, N. (2011). Metacognition. In M. Runco & S. Pritzker (Eds.), *Encyclopedia of Creativity* (Vol. 2, pp. 107-112). USA: Academic Press.

Johri, A., Chen, H. L., & Lande, M. (2009). *Creativity and Cognition in Engineering Design: Theoretical and Pedagogical Issues.* Paper presented at the Seventh ACM Conference on Creativity and Cognition Berkeley, Californie. ACM. pp. 487-488

Kaufman, S. B. (Producer). (2015, September 1st, 2015). The Controlled Chaos of Creativity. [Web article] Retrieved from http://blogs.scientificamerican.com/beautiful-minds/the-controlled-chaos-of-creativity/

Kenett, Y. N., Anaki, D., & Faust, M. (2014). Investigating the structure of semantic networks in low and high creative persons. Retrieved from http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00407/full#B53

Kinchin, I. M. (2008). *The Qualitative Analysis of Concept Maps: Some Unforeseen Consequences and Emerging Opportunities.* Paper presented at the Third Int. Conference on Concept Mapping, Tallinn, Estonia & Helsinki, Finland. pp. 1-7

Knoll, S. W. (2010). *Changing the Perspective: Improving Generate thinkLets for Ideation.* Paper presented at the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, Poipu, Hawaii. pp. 1-10

Kowaltowski, D. C. C. K., Bianchi, G., & Teixeira de Paiva, V. (2010). Methods that may stimulate creativity and their use in architectural design education. *International Journal of Technology and Design Education, 20*, 453-476. doi:10.1007/s10798-009-9102-z

Lande, M. (2009). *Student Engineers Learning to Become Designers.* Paper presented at the Seventh ACM Conference on Creativity and Cognition, Berkeley, Californie. ACM. pp. 335

Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. Montréal, CA: Guérinpages

Lemons, G. (2011). Diverse Perspectives of Creativity Testing Controversial Issues When Used for Inclusion Into Gifted Programs. *Journal for the Education of the Gifted, 34*(5), 742-772. doi:10.1177/0162353211417221

Liikkanen, L. A., & Perttula, M. (2010). Inspiring design idea generation: insights from a memory-search perspective. *Journal of Engineering Design, 21*(5), 545-560. doi:10.1080/09544820802353297

Lindsay, P. H., & Norman, D. (1980). *Traitement de l'information et comportement humain: une introduction à la psychologie*. Montréal: Études Vivantes.754 pages

Linsey, J. S., Markman, A. B., & Wood, K. L. (2012). Design by Analogy: A Study of the WordTree Method for Problem Re-Representation. *Journal of Mechanical Design, 134*. doi:10.1115/1.4006145

Litzinger, T. A., Lattuca, L. R., Hadgraft, R. G., & Newstetter, W. C. (2011). Engineering Education and Developement of Expertise. *Journal of Engineering Education, 100*(1), 123-150.

Liu, Z. E., & Schönwetter, D. J. (2004). Teaching Creativity in Engineering. *International Journal of Engineering Education, 20*(5), 801-808.

Lubart, T. (2010). Models of the Creative Process: Past, Present and Future. *Creativity Research Journal, 13*(3-4), 295-308. doi:10.1207/S15326934CRJ1334_07

Marupaka, N., Iyer, L. R., & Minai, A. A. (2012). Connectivity and thought: The influence of semantic network structure in a neurodynamical model of thinking. *Neural Networks, 32*(Special), 147-158. doi:10.1016/j.neunet.2012.02.004

McGrew, K. S. (2009). CHC theory and the human cognitive abilities project: Standing on the shoulders of the giants of psychometric intelligence research. *Intelligence, 37*, 1-10. doi:10.1016/j.intell.2008.08.004

McKeag, D. (2008, 30 juin - 3 juillet). *Embedding Creativity and Innovation in the Engineering Curriculum.* Paper presented at the SEFI Annual Conference, Alborg, Denmark. pp. 1-8

Mednick, S. A. (1962). The Associative Basis of the Creative Process. *Psychological Review, 69*(3), 220-232.

Michalko, M. (2006). *Thinkertoys: A Handbook of Creative-Thinking Techniques* China: Ten Speed Presspages

Mills, J. E., & Treagust, D. F. (2003). Engineering Education – Is problem-based or project based Learning the answer ? Retrieved from http://www.aaee.com.au/journal/2003/mills_treagust03.pdf

Morin, S., Bourdeau, L.-M., & Robert, J.-M. (2016). Using the “Gauge R&R’’ method to assess a psychometric creativity test. (Submitted).

Morin, S., Robert, J.-M., & Gabora, L. (2016a). Do future engineers have a creative thread? An analysis of three cognitive tests (Submitted). *Thinking Skills and Creativity*.

Morin, S., Robert, J.-M., & Gabora, L. (2016b). How should we train future engineers to be more creative? An Educative Experience. (Submitted).

Mougenot, C. (2008). *Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée.* (Doctorat), École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech. (2008 ENAM 0042)

Mumford, M. D., Baughman, W. A., Maher, M. A., Costanza, D. P., & Supinski, E. P. (1997). Process-Based Measures of Creative Problem-Solving Skills: IV. Category Combination. *Creativity Research Journal, 10*(1), 59-71. doi:10.1207/s15326934crj1001_7

Mumford, M. D., Baughman, W. A., Supinski, E. P., & Maher, M. A. (1996). Process-Based Measures of Creative Problem-Solving Skills: II. Information Encoding. *Creativity Research Journal, 9*(1), 77-88.

Murdock, M., & Keller-Mathers, S. (2011). Programs and Courses in Creativity. In M. Runco & S. Pritzker (Eds.), *Encyclopedia of Creativity* (Vol. 2, pp. 266-270). USA: Academic Press.

National Academy of Engineering. (2004). *The Engineer of 2020: Visions of Engineering in the New Century*. Washington, D.C.: National Academis Press Retrieved from http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309091624.

Ness, R. B. (2011). Commentary: Teaching Creativity and Innovative Thinking in Medicine and the Health Sciences. *Academic Medicine, 86*(10), 1201-1203. doi:10.1097/ACM.0b013e31822bbb9f

Newton, J. H., & McGrew, K. S. (2010). Introduction to the Special Issu : Current research in Cattel-Horn-Carroll- Based Assessment. *Psychology in the Schools, 4*(7), 621-634. doi:10.1002/pits.20495

Nijstad, B. A., Dreu, C. K. W. D., Rietzschel, E. F., & Baas, M. (2010). The dual pathway to creativity model: Creative ideation as a function of flexibility and persistence. *European Review of Social Psychology, 21*(1), 34-77. doi:10.1080/10463281003765323

Nijstad, B. A., & Stroebe, W. (2006). How the group affects the mind: A cognitive model of idea generation in groups. *Personality and Social Psychology Review, 10*(3), 186-213. doi:10.1207/s15327957pspr1003_1

Nijstad, B. A., Stroebe, W., & Lodewijkx, H. F. M. (2003). Production blocking and idea generation: Does blocking interfere with cognitive processes? *Journal of Experimental Social Psychology, 39*, 531-548. doi:10.1016/S0022-1031(03)00040-4

Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2007). *The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct Them*. Retrieved from Florida Institute for Human and Machine Cognition:

Nusbaum, E. C., & Silvia, P. J. (2011). Are intelligence and creativity really so different? Fluid intelligence, executive processes, and strategy use in divergent thinking. *Intelligence, 39*, 36-45. doi:10.1016/j.intell.2010.11.002

Piffer, D. (2012). Can creativity be measured? An attempt to clarify the notion of creativity and general directions for future research. *Thinking Skills and Creativity, 7*, 258-264. doi:10.1016/j.tsc.2012.04.009

Plucker, J. A., & Runco, M. A. (1998). The Death of Creativity Measurement Has Been Greatly Exaggerated: Current Issues, Recent Advances, and Future Directions in Creativity Assessment. *Roeper Review, 21*(1), 36-39. doi:10.1080/02783199809553924

Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge: Signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, smc-13*(3), 257-266.

Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering.*: Elsevier Science Ltd.230 pages

Richards, L. G. (1998). *Stimulating Creativity : teaching engineers to be innovators*. Paper presented at the Frontiers in Education Conference. FIE '98. 28th Annual.

Richards, T. (1990). *Creativity and Problem Solving at Work*. Cambridge: University Press.214 pages

Rietzschel, E. F., Nijstad, B. A., & Stroebe, W. (2007). Relative accessibility of domain knowledge and creativity: The eVects of knowledge activation on the quantity and originality of generated ideas. *Journal of Experimental Social Psychology, 43*, 933-946. doi:10.1016/j.jesp.2006.10.014

Robinson, K. (2006). School kills creativity. TED: http://www.ted.com/talks/lang/fr-ca/ken_robinson_says_schools_kill_creativity.html.

Savage, R. N., Chen, K. C., & Vanasupa, L. (2007). Integrating Project-based Learning throughout the Undergraduate Engineering Curriculum. *Journal of STEM Education, 8*(3 & 4), 15-27.

Sawyer, R. K. (2006). Educating for Innovation. *Thinking Skills and Creativity, 1*, 41-48. doi:10.1016/j.tsc.2005.08.001

Sawyer, R. K. (2012). *The Science of Human Innovation : Explaining Creativity* (2nd ed.). USA: Oxford University Presspages

Sawyer, R. K. (2013). *Zig Zag : the surprising path to greater creativity* (1st ed.). USA: Jossey-Basspages

Schilling, M. A. (2005). A “Small-World” Network Model of Cognitive Insight. *Creativity Research Journal*, *17*(2 & 3), 131-154.

Scott, G., Leritz, L. E., & Mumford, M. D. (2004). The effectiveness of creativity training: A quantitative review. *Creativity Research Journal, 16*(4), 361-388. doi:dx.doi.org/10.1080/10400410409534549

Shah, J. J., Millsap, R. E., Woodward, J., & Smith, S. M. (2012). Applied Tests of Design Skills— Part 1: Divergent Thinking. *Journal of Mechanical Design, 134*. doi:10.1115/1.4005594

Shah, J. J., Smith, S. M., Vargas-Hernandez, N., Gerkens, D. R., & Wulan, M. (2003). *Empirical Studies of Design Ideation: Alignment of Design Experiments with Lab Experiments.* Paper presented at the ASME 2003 International Conference on Design Theory and Methodology, Chicago, IL. pp. 1-10

Shah, J. J., Vargas-Hernandez, N., & Smith, S. M. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies, 24*(2), 111-134. doi:10.1016/S0142-694X(02)00034-0

Smith, S. M., & Ward, T. B. (2012). Chapitre 23 : Cognition and the Creation of Ideas. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Eds.), *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning* (pp. 456-474).

Sternberg, R. (2006a). The Nature of Creativity. *Creativity Research Journal*, *18*(1), 87-98. doi:10.1207/s15326934crj1801_10

Sternberg, R. (2006b). Stalking the elusive creativity quark: Toward a comprehensive theory of creativity. In P. Locher, C. Martindale, & L. Dorfman (Eds.), *New directions in aesthetics, creativity, and the arts* (pp. 79-104). Amityville, NY: Baywood.

Tardif, J. (2003). Développer un programme par compétences : de l’intention à la mise en oeuvre. *Pédagogie collégiale, 16*(3), 36-44.

Torrance, E. P. (2004). Un résumé historique du développement des tests de pensée créative de Torrance. *Revue européenne de psychologie appliquée, 54*(1), 57-63.

Treffinger, D. J., Young, G. C., Selby, E. C., & Shepardson, C. (2002). *Assessing Creativity: A Guide for Educators*. Retrieved from University of Connecticut:

VanGundy, A. B. (2005). *101 Activities for Teaching Creativity and Problem Solving*. USA: Pfeifferpages

Ward, T. B. (2004). Cognition, creativity, and entrepreneurship. *Journal of Business Venturing, 19*, 173-188. doi:10.1016/S0883-9026(03)00005-3

Ward, T. B., Patterson, M. J., & Sifonis, C. M. (2004). The Role of Specificity and Abstraction in Creative Idea Generation. *Creativity Research Journal, 16*(1), 1-9.

Warrington, B. (2010). *Vision 2030: Creating the Future for Mechanical Engineering Education in the US.* Paper presented at the Engineering 2010, World Congress and Exhibition, Argentina. pp. 45

Wickens, C. D. (1984). *Engineering Psychology and Human Performance*. Michigan.513 pages

Yeh, Y.-C. (2011). Research and Methods. In M. Runco & S. Pritzker (Eds.), *Encyclopedia of Creativity* (Vol. 2, pp. 291-298). USA: Academic Press.

Yilmaz, S., & Seifert, C. M. (2010). *Cognitive Heuristics in Design Ideation.* Paper presented at the International Design Conference - Design 2010, Dubrovnik, Croatie. pp. 1-11

Zhou, C. (2012). Integrating creativity training into Problem and Project- Based Learning curriculum in engineering education. *European J. of Engin. Education, 37*(5), 488-499. doi:10.1080/03043797.2012.714357

ANNEXE 1 - MODÈLE CATTELL – HORN – CARROL (CHC)

Modèle CHC	
Capacités générales (Broad abilities)	*Capacités spécifiques (Narrow abilities)*
Fluid reasoning (Gf)*	General Sequential (deductive) Reasoning (RG)
	Induction (I)
	Quantitative Reasoning (RQ)
	Piagetian Reasoning (RP)
	Speed of Reasoning (RE)
Comprehension-Knowledge (Gc)	Language Development (LD)
	Lexical Knowledge (VL)
	Listening Ability (LS)
	General (verbal) Information (K0)
	Communication Ability (CM)
	Oral Production and Fluency (OP)
	Grammatical Sensitivity (MY)
	Foreign Language Proficiency (KL)
	Foreign Language Aptitude (LA)
General (domain-specific) knowledge (Gkn)	Knowledge of English as a Second Language (KE)
	Knowledge of Signing (KF)
	Skill in Lip-Reading (LP)
	Geography Achievement (A5)
	General Science Information (K1)
	Mechanical Knowledge (MK)
	Knowledge of Behavioral Content (BC)
Visual processing (Gv)	Visualization (Vz)
	Spatial Relations (SR)
	Closure Speed (CS)
	Flexibility of Closure (CF)
	Visual Memory (MV)
	Spatial Scanning (SS)
	Serial Perceptual Integration (PI)
	Length Estimation (LE)
	Perceptual Illusions (IL)
	Perceptual Alternations (PN)
	Imagery (IM)

Tactile abilities (Gh)	Tactile Sensitivity (TS)
Auditory processing (Ga)	Phonetic Coding (PC)
	Speech Sound Discrimination (US)
	Resistance to Auditory Stimulus Distortion (UR)
	Memory for Sound Patterns (UM)
	General Sound Discrimination (U3)
	Musical Discrimination and Judgment (U1 U9)
	Maintaining and Judging Rhythm (U8)
	Sound-Intensity/Duration Discrimination (U6)
	Sound-Frequency Discrimination (U5)
	Hearing and Speech Threshold factors (UA UT UU)
	Absolute Pitch (UP)
	Sound Localization (UL)
Short-term memory (Gsm)	Memory Span (MS)
	Working Memory (MW)
Long-term storage and retrieval (Glr)	Associative Memory (MA)
	Free Recall Memory (M6)
	Ideational Fluency (FI)
	Associational Fluency (FA)
	Expressional Fluency (FE)
	Naming Facility (NA)
	Word Fluency (FW)
	Figural Fluency (FF)
	Figural Flexibility (FX)
	Sensitivity to Problems (SP)
	Originality/Creativity (FO)
	Learning Abilities (L1)
Processing Speed (Gs)	Perceptual Speed (P)
	Rate-of-Test-Taking (R9)
	Number Facility (N)
	Speed of Reasoning (RE)
	Reading Speed (fluency) (RS)
	Writing Speed (fluency) (WS)
Reaction and decision speed (Gt)	Simple Reaction Time (R1)
	Choice Reaction Time (R2)
	Semantic Processing Speed (R4)
	Mental Comparison Speed (R7)
	Inspection Time (IT)
Psychomotor speed (Gps)	Speed of Limb Movement (R3)
	Writing Speed (fluency) (WS)
	Speed of Articulation (PT)
	Movement Time (MT)
Quantitative knowledge (Gq)	Mathematical Knowledge (KM)
	Mathematical Achievement (A3)

Kinesthetic abilities (Gk)	Kinesthetic Sensitivity (KS)
Reading and writing (Grw)	Verbal (printed) Language Comprehension (V)
	Cloze Ability (CZ)
	Spelling Ability (SG)
	Writing Ability (WA)
	English Usage Knowledge (EU)
	Reading Speed (fluency) (RS)
	Writing Speed (fluency) (WS)
	Reading Decoding (RD)
	Reading Comprehension (RC)
Psychomotor abilities (Gp)	Static Strength (P3)
	Multilimb Coordination (P6)
	Finger Dexterity (P2)
	Manual Dexterity (P1)
	Arm-Hand Steadiness (P7)
	Control Precision (P8)
	Aiming (AI)
	Gross Body Equilibrium (P4)
Olfactory abilities (Go)	Olfactory Memory (OM)
	Olfactory Sensitivity (OS)

ANNEXE 2 – CEDA TEST

TEST - CEDA (ou EPCI en français)

CEDA : Creative Engineering Design Assessment

– Évaluation de la performance créative en ingénierie (EPCI)

Avant de commencer, veuillez lire ***ATTENTIVEMENT*** les instructions suivantes :

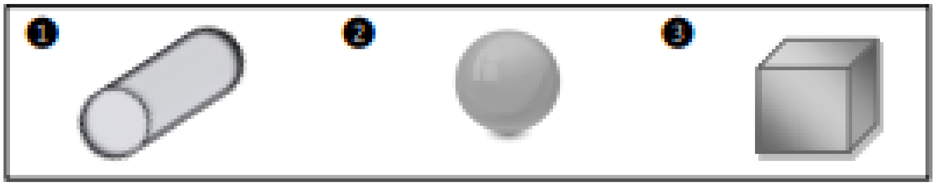
Au haut des pages suivantes se trouve une série d'objets tridimensionnels (2, 3 ou 4 objets). Utilisez **un ou plusieurs** de ces objets pour créer deux concepts **originaux** qui répondront au but général indiqué sous les formes. Les objets peuvent être composés dans le matériau que vous désirez et de la grosseur qui vous conviendrait. De plus, ils peuvent être vides ou pleins ainsi que manipulés comme vous le voulez. Vous pouvez combiner les objets d'une page et même ajouter des pièces pour compléter votre concept. Cependant, chaque objet initial ne peut être utilisé qu'une seule fois dans sa forme originale (il peut être répété en le modifiant). Chaque page devrait contenir l'information suivante :

1. Un dessin de votre concept.
2. Une description sommaire de votre concept.
3. Une description des matériaux et des pièces utilisés.
4. Une description de problèmes supplémentaires ou complémentaires résolus par votre concept.
5. Une description des utilisateurs (spécifiques) qui bénéficieraient de votre concept.

Vous avez 30 minutes pour compléter le test de 3 pages (environ 10 minutes par page). Vous divisez le temps comme vous le voulez. Nous vous demandons de produire deux concepts par page. De plus, au moins une réponse devrait se trouver dans chacune des cases des différents tableaux. Vous pouvez utiliser un crayon ou un stylo. Écrivez le plus lisiblement possible.

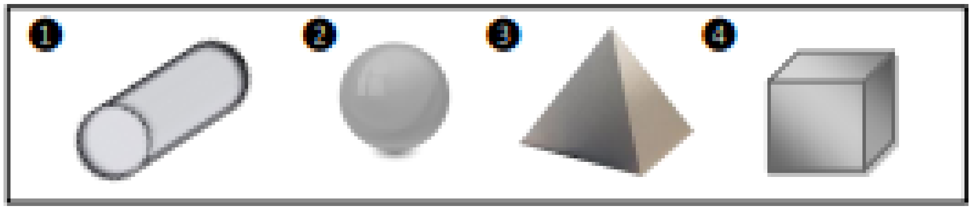
→ Concepts qui font du bruit

Croquis	1	2
Description du concept		
Description des pièces et matériaux		
Problèmes complémentaires résolus par le design		
Utilisateurs du concept		



→ Concepts qui permettent de communiquer

Croquis	1	2
Description du concept		
Description des pièces et matériaux		
Problèmes complémentaires résolus par le design		
Utilisateurs du concept		



→ Concepts qui peuvent se déplacer

Croquis	1	2
Description du concept		
Description des pièces et matériaux		
Problèmes complémentaires résolus par le design		
Utilisateurs du concept		

ANNEXE 3 – CEDA TEST – GRILLE D'ÉVALUATION

Grille de correction - CEDA

Code participant : *Juge :* Date :

	Problème 1			*Problème 2*			*Problème 3*		
Fluidité *(nombre d'idées)*									
Design complet									
Descriptions fournies									
Maté./Compos. utilisés									
Problèmes résolus									
Usagers identifiés									
Somme									
Flexibilité *(types/classes d'idées)*									
Design complet									
Descriptions fournies									
Maté./Compos. utilisés									
Problèmes résolus									
Usagers identifiés									
Somme									
Originalité *(0-10 par design)*	*D1*	*D2*	*Globa*	*D1*	*D2*	*Globa*	*D1*	*D2*	*Globa*
0 Sans intérêt									
1 Familier									
2 Minimalement intéressant									
3 Intéressant									
4 Très intéressant									
5 Unique et différent									
6 Perspicace									
7 Exceptionnel									
8 De valeur pour le domaine									
9 Innovateur									
10 Relevant du génie									
Somme (X2)									
Utilité *(0-4 par design)*	*D1*	*D2*	*Globa*	*D1*	*D2*	*Globa*	*D1*	*D2*	*Globa*
0 Sans utilité									
1 Certaine utilité									
2 Moyennement utile									
3 Très utile									
4 Indispensable									
Somme (X2)									
Total par concept									

TOTAL : ____________

ANNEXE 4 – CERTIFICAT D'ÉTHIQUE

Mme Sophie Morin,
M. Jean-Marc Robert
Département des mathématiques et génie industriel
Polytechnique Montréal

N/Réf : Dossier CÉR-13/14-17

Madame, Monsieur,

J'ai le plaisir de vous informer que les membres du Comité d'éthique de la recherche ont procédé à l'évaluation en comité restreint de votre projet de recherche intitulé «*Impact du développement de capacités cognitives à la base de la créativité sur la performance créative*» et en ont recommandé l'approbation sur la base de la documentation envoyée au CÉR en date du 30 avril 2014.

Veuillez noter que le présent certificat est valable pour une durée de un an, soit du **5 mai 2014 au 4 mai 2015**, pour le projet tel que soumis au Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains.

Nous vous prions de nous faire parvenir un bref **rapport annuel** (http://www.polymtl.ca/recherche/document/deonto.php) afin de renouveler votre certificat au moins un mois avant l'expiration du présent certificat. La secrétaire du Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains devra également être informée de toute modification qui pourrait être apportée ultérieurement au protocole expérimental, de même que de tout problème imprévu pouvant avoir une incidence sur la santé et la sécurité des personnes impliquées dans le projet de recherche (sujets, professionnels de recherche ou chercheurs).

Je vous souhaite bonne chance dans vos travaux de recherche,

Farida Cheriet, présidente
Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains

Mme Sophie Morin
M. Jean-Marc Robert
Département de mathématiques et génie industriel
Polytechnique Montréal

N/Réf : Dossier CÉR-13/14-17

Madame, Monsieur,

Je vous remercie d'avoir produit votre rapport annuel pour le projet de recherche intitulé « *Impact du développement de capacités cognitives à la base de la créativité sur la performance créative* » impliquant des êtres humains.

Étant donné que vous n'avez soulevé aucun problème majeur dans le déroulement dudit projet, votre certificat de conformité éthique est renouvelé pour une année supplémentaire.

Le présent certificat est valide du **27 février 2015 au 26 février 2016**.

Veuillez noter que conformément aux exigences des organismes subventionnaires, nous vous demanderons de produire à nouveau un rapport annuel si votre projet n'est pas terminé d'ici un an.

Entre temps, n'oubliez pas de m'informer sans délai de toute modification qui pourrait être apportée à votre protocole expérimental, ou de tout problème imprévu pouvant avoir une incidence sur la santé et la sécurité des personnes impliquées dans votre projet.

Bonne continuation dans la poursuite de vos travaux de recherche.

Céline Roehrig, M.A., M.Sc.A.
Secrétaire
Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains