

Processus cognitifs d'ordre supérieur mobilisés lors de la résolution de problèmes complexes de conception en génie par les personnes étudiantes de premier cycle

Anastassis Kozanitis
Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec

Pour citer cet article :

Kozanitis, A. (2024). Processus cognitifs d'ordre supérieur mobilisés lors de la résolution de problèmes complexes de conception en génie par les personnes étudiantes de premier cycle. *Didactique*, 5(2), 98-123. <https://doi.org/10.37571/2024.0204>.

Résumé : Les défis associés au monde de l'ingénierie sont complexes et en évolution rapide. Ils nécessitent la capacité de mobilisation de processus cognitifs d'ordre supérieur, comme la pensée analytique, la créativité et l'évaluation critique. C'est pourquoi la résolution de problèmes complexes de conception constitue le cœur de la formation initiale des ingénieurs au Canada. Dans ce contexte, les personnes étudiantes en génie sont confrontées à des problèmes qui exigent bien plus que la simple application de formules préétablies. Pour ce, elles sont encouragées à faire usage de processus cognitifs d'ordre supérieur, grâce notamment à une implication active lors de l'apprentissage par projet, une méthode d'enseignement privilégiée en génie. L'objectif de cet article est d'analyser les processus cognitifs mis en œuvre par les personnes étudiantes lorsqu'elles se trouvent en situation de résolution de problèmes complexes. Pour y parvenir, des entretiens d'explicitation ont été menés auprès de dix participants. Les résultats montrent que plusieurs aspects semblent être communs à l'ensemble des répondants en ce qui a trait aux opérations mentales mobilisées en début de processus de conception. Il s'agit de la considération de l'objectif et du but du projet, de la considération des connaissances préalables ou des données connues, ainsi que le repérage de solutions existantes en lien avec le projet de conception. D'autres processus

cognitifs partagés par l'ensemble des répondants peuvent survenir à d'autres moments, c'est le cas pour la visualisation mentale et la capacité de se poser des questions. Certains aspects différencient les répondants, notamment la stratégie de l'essai et erreur ainsi que l'anticipation des problèmes et la prévision des conséquences des choix.

Mots-clés : processus cognitifs, conception ingénierie, formation des étudiants, problème complexe.

Introduction et contexte

Tous les programmes de formation en génie au Canada reçoivent leur agrément par le Bureau canadien d'agrément des programmes de génie (BCAPG). Cet organisme exige depuis une quinzaine d'années que les programmes fassent la démonstration que leurs finissants possèdent douze compétences liées au domaine du génie. Parmi ces compétences se trouve celle de conception, c'est-à-dire «la capacité de concevoir des solutions à des problèmes d'ingénierie complexes et évolutifs et de concevoir des systèmes, des composantes, ou des processus qui répondent aux besoins spécifiés, tout en tenant compte des risques pour la santé et la sécurité publique, des aspects législatifs et réglementaires, ainsi que des incidences économiques, environnementales, culturelles et sociales». Autour de cette compétence centrale pour un ingénieur gravitent d'autres compétences commensurables comme l'analyse de problème, l'investigation, l'utilisation d'outils d'ingénierie. Des compétences dites transversales complètent le profil de finissant, c'est le cas du travail en équipe, de la communication écrite et orale, du professionnalisme, de la gestion de projet, de la déontologie et l'équité, et de l'apprentissage continue. Les programmes ont donc entrepris des réformes curriculaires et didactiques afin que les finissants acquièrent ces compétences techniques et professionnelles. Pour ce, plusieurs de ces programmes ont introduit des cours projet-intégrateur qui font vivre tout au long de la formation une véritable expérience de conception en génie. Les étudiants ont ainsi diverses opportunités d'y intégrer leurs connaissances et de développer progressivement la compétence de conception. Le véritable enjeu réside dans le développement des processus cognitifs d'ordre supérieur qui permettent aux apprenants de résoudre des problèmes complexes, d'innover et de s'adapter à un environnement professionnel en constante évolution (Paul, Niewoehner et Elder, 2006). La nature précise de ces processus et la manière dont ils sont développés suscitent encore de nombreuses questions au sein de la communauté scientifique (Soo Eun et Lee, 2019). Cette recherche vise à contribuer au développement de connaissances significatives sur les processus cognitifs d'ordre supérieur en contexte universitaire, notamment ceux qui s'avèrent congruents à la réalisation de tâches complexes en génie. Ainsi, notre problématique s'articule autour des questions suivantes : les situations d'apprentissage proposées dans le cadre de cours projet-intégrateur en génie qui exploitent la méthode de l'apprentissage par projet suscitent-elles la mobilisation de processus cognitifs d'ordre supérieur? Quels sont les processus cognitifs d'ordre supérieur qui entrent en jeu lors de ces situations particulièrement exigeantes? Comment évoluent les processus cognitifs d'ordre supérieur chez les apprenants en génie tout au long de leur formation académique? L'analyse de ces questions est basée sur des entretiens d'explicitation auprès d'apprenants en génie.

Problématique

Le domaine de l'ingénierie connaît des transformations technologiques perpétuelles qui façonnent les conditions d'insertion sur le marché du travail, particulièrement la récente révolution de l'industrie 4.0, qui exige une intégration multidimensionnelle d'aspects sociaux et technologiques (Venkatraman et al., 2022). De la sorte, la prolifération des connaissances, couplée à la complexité croissante des situations, font qu'il est impossible pour une personne de tout connaître et rendent l'agir professionnel exigeant (Karimi et Pina, 2021). D'aucuns estiment que la réussite dans une société en constant changement requiert le développement et la mobilisation de processus cognitifs d'ordre supérieur, et qu'elle ne peut plus tenir qu'à l'accumulation structurée de connaissances et à la compréhension d'un domaine d'études (Kyndt, et coll., 2011; Pinho-Lopez et Macedo, 2014). Or, on reproche aux universités de ne pas suffisamment développer ces processus cognitifs qui sous-tendent l'expertise professionnelle dans nos sociétés (Al-Maskari, et al., 2022; Arum et Roksa, 2014).

Les problèmes complexes requièrent souvent des solutions complexes, obtenues au moyen de processus cognitifs supérieurs tels que la capacité d'évaluer, d'analyser, d'interpréter, de faire preuve d'une pensée critique, logique, réflexive, métacognitive et créative (Zimmerman, 2013). Ces processus cognitifs sont activés lorsqu'un apprenant est confronté à une tâche complexe, c'est-à-dire avec laquelle il est peu familier, qui comporte un haut degré d'incertitude, des questions sans réponses ou bien qui peut être réalisée de différentes manières et avoir différentes solutions.

Plusieurs travaux se sont intéressés aux processus cognitifs d'ordre supérieur en contexte de formation universitaire. Il s'agit de processus génériques qui sous-tendent la pensée critique et créative. Ils requièrent la manipulation d'informations nouvelles ou de connaissances antérieures en vue de résoudre une situation nouvelle qui ne peut être résolue par l'application routinière de ces connaissances (Jerome et al., 2019; Resnick, 1987). Leur mobilisation a été étudiée auprès de personnes étudiantes provenant d'une variété de disciplines, que ce soit en sciences sociales et humaines, en sciences et technologie, ou en sciences de l'administration (Letchumanan et al., 2020). Les travaux de Marzano (2001) ont permis d'établir que les processus cognitifs d'ordre supérieur sont consubstantiellement liés au processus d'apprentissage, et qu'ils permettent à l'apprenant d'améliorer ses performances scolaires et de réduire ses lacunes. De plus, les personnes étudiantes qui démontrent un développement adéquat de ces processus sont généralement mieux outillées pour résoudre des problèmes complexes (Chinedu, Kamin et Olabiyi, 2015). Par contre, la majorité des études a porté sur les processus cognitifs mobilisés lors de la réalisation de tâches d'application de connaissances en situation d'évaluation. La plupart de ces

situations ne concernent pas la résolution de problèmes complexes ou de problèmes ouverts (Green, 2014). Il s'agit là d'un écueil qui limite la généralisation des résultats empiriques, puisqu'il est difficile de discerner parmi la pluralité des contextes et la diversité des méthodes et stratégies d'enseignement considérées par les chercheurs lorsqu'ils étudient ces processus en contexte scolaire (Trigwell et Prosser, 2020; Thomas, Munawar et Komaro, 2018).

Cela dit, un certain consensus semble émerger dans la littérature quant au rôle que peuvent avoir l'environnement didactique et les approches pédagogiques innovantes sur la formation des personnes étudiantes (Bégin-Caouette et al., 2021). En effet, plusieurs études montrent qu'une approche didactique mixte, qui combine l'enseignement explicite de contenu disciplinaire, en ayant recours à l'exposé magistral par exemple, et des méthodes d'enseignement dit d'apprentissage actif qui incitent à utiliser des processus cognitifs d'ordre supérieur, obtient des effets de grandeur supérieurs aux approches purement traditionnelles (Abrami et al., 2008; Luesia et al., 2023). De plus, la recherche montre que les activités d'apprentissage actif, comme les discussions, le travail collaboratif ou l'apprentissage par projet, contribuent au développement des processus cognitifs d'ordre supérieur (Baum, 2013; Collin et al., 2019). Ces nouveaux contextes de formation ont introduit des méthodes d'enseignement centrées sur l'apprenant, c'est-à-dire basées sur l'apprentissage actif. Un tel environnement didactique tendrait à susciter un engagement cognitif élevé de l'étudiant qui, en retour, favorise la mobilisation ou le développement de processus cognitifs d'ordre supérieur (Stolk et Harari, 2014).

À ce sujet, Behar-Horenstein et Niu (2011) indiquent que les personnes enseignantes doivent avoir une bonne compréhension des processus cognitifs d'ordre supérieur propices à leur discipline et proposer des activités d'apprentissage susceptibles de les développer. Bien que la méthode de l'apprentissage par projet soit couramment employée en génie (De los Rios et al., 2010), entre autres pour contribuer au développement de compétences disciplinaires et transversales, peu d'études se sont penchées sur la nature des processus cognitifs mobilisée par les personnes étudiantes en de telles circonstances (McCormick et al., 2015).

De la sorte, l'objectif de cette recherche est d'identifier les processus cognitifs mobilisés par les personnes étudiantes en situation de réalisation de tâches complexes. Les tâches complexes qui nous occupent particulièrement renvoient à la conception en génie. Les résultats de cette recherche pourraient informer la mise en œuvre de programmes de formation plus efficaces, l'adaptation des méthodes d'enseignement et la mise en place de pratiques pédagogiques visant à maximiser le potentiel des futures générations

d'ingénieurs capables de relever les défis complexes de notre société en constante évolution.

Cadre théorique

Taxonomies des processus cognitifs

La taxonomie des processus cognitifs développée par Benjamin Bloom et ses collègues dans les années 1956 est sans doute la plus répandue, et leur contribution a été considérable dans le monde de l'éducation. Elle organise les processus cognitifs à l'intérieur d'une hiérarchie à six échelons, dont les trois premiers représentent des activités cognitives d'ordre inférieur, soit la mémorisation, la compréhension et l'application. Les trois échelons les plus élevés représentent des activités cognitives d'ordre supérieur, soit l'analyse, la synthèse et l'évaluation. Plus récemment, la contribution de Krathwohl (2002) a été de modifier la terminologie de cette taxonomie en utilisant des verbes plutôt que des noms communs pour identifier les échelons, ainsi que d'inverser l'ordre des deux échelons supérieurs. La taxonomie révisée se lit comme suit : 1) mémoriser, 2) comprendre, 3) appliquer, 4) analyser, 5) évaluer, 6) créer. Cette modification renforce l'idée que ce sont des processus qui résultent d'une activité cognitive volontaire et intentionnelle, dont il est possible d'en observer le résultat à travers les réalisations étudiantes. De plus, la taxonomie révisée situe la capacité de créer au plus haut de la hiérarchie, lui reconnaissant sa nature plus complexe, abstraite et cognitivement plus exigeante. Par exemple, il est plus complexe de créer un nouveau modèle d'une quelconque réalité que d'en évaluer un déjà existant.

Toutefois, cette façon de considérer et d'ordonner les processus cognitifs n'est pas partagée par l'ensemble de la communauté scientifique. De ce fait, la perspective psychocognitive (Anderson et *coll.*, 2004), qui reconnaît et valide ces processus cognitifs, vient nuancer le modèle proposé par Krathwohl en relatant que tout type de pensée a le potentiel d'être d'ordre supérieur, tout dépendant des structures sous-jacentes l'activité. Prenons par exemple la capacité de se rappeler qui se situe au premier échelon de la taxonomie révisée de Krathwohl. Pour les psychologues qui étudient le développement de l'expertise, la capacité de se rappeler reflète l'automatisation des connaissances et des habiletés en réponse à une tâche qui est rendue possible grâce à de nombreuses années de mise en application délibérée et indicative d'une maîtrise et d'une structure organisée de connaissances (Ericsson, 2009). De plus, les travaux d'Anderson et *coll.* (2004) montrent que toute cognition humaine, qu'elle consiste à mémoriser ou à résoudre des problèmes complexes, est fondée sur deux types de structures sous-jacentes de connaissances : 1) les connaissances de concepts (aussi appelées connaissances déclaratives) et 2) les connaissances d'habiletés (aussi appelées connaissances procédurales). Ce qui détermine

l'ordre inférieur ou supérieur de la cognition dépend de la tâche à réaliser ainsi que de l'organisation et de la cohésion du réseau des structures des connaissances déclaratives ou procédurales propres au sujet et qui sous-tendent la réalisation de la tâche (Lewis et Smith, 1993).

Plus récemment, Schraw et Robinson (2011) ont élaboré une taxonomie des processus cognitifs d'ordre supérieur qui se décline en quatre grandes catégories, non mutuellement exclusives, et correspondant à quatre principales activités cognitives, soit le raisonnement, l'évaluation des preuves ou des arguments, la résolution de problèmes et la pensée critique, et enfin la métacognition. Ces auteurs précisent que pour certaines tâches, le degré de complexité peut être tel qu'elles nécessitent la mobilisation de l'ensemble de ces processus. L'habileté de raisonner renvoie aux raisonnements déductif et inductif. Les chercheurs se sont également penchés sur le raisonnement heuristique, qui réfère aux raccourcis ou aux règles du pouce utilisées par souci d'économie de temps. L'habileté d'évaluer des preuves et des arguments, qui inclut l'habileté de générer des preuves et des arguments, est un processus cognitif important puisqu'il permet aux individus d'étayer des affirmations, de compiler et de vérifier des preuves en vue de soutenir ou réfuter des assertions (Andrew, 2007). Cette habileté se développerait lentement durant la période de l'adolescence et de jeune adulte (Halpren, 2003). Pour ce qui est de l'habileté de résoudre des problèmes, plusieurs écrits font une distinction entre des problèmes ouverts [on trouve également les vocables problèmes complexes, mal structurés ou mal définis (*ill-defined*)] et des problèmes fermés (*well-defined*). Ces derniers ont une seule solution correcte et une manière généralement bien établie pour les résoudre. Tandis que les problèmes ouverts ne disposent pas de solution unique ni de façon claire ou évidente de les résoudre. Ce type de problème exige souvent de poser un jugement sur la solution envisagée. De plus, pour Jonassen (2011), un problème mal structuré nécessite l'intégration de connaissances disciplinaires variées. Mayer et Wittrock (2006) ajoutent que l'expérience en lien avec la résolution d'une certaine famille de problème devient également un facteur à considérer. Des milliers d'heures d'entraînement et de pratiques explicites sont nécessaires au développement d'une véritable expertise en résolution de problème. La pensée critique, qui est un terme parfois galvaudé, décrit simplement les principes d'une pensée de "bonne qualité". Une pensée de "bonne qualité" est la capacité d'analyser des arguments avec perspicacité et de ne pas se laisser influencer par une idéologie, un fondamentalisme, un endoctrinement, des préjugés et des croyances sans fondement. La pensée critique ne constitue pas une simple pensée rationnelle, elle implique un savoir propositionnel ou déclaratif (savoir), un savoir procédural (savoir-faire) et un savoir dispositionnel (savoir-être). Enfin, la métacognition consiste à réfléchir sur sa manière de réfléchir et de penser dans le but de les réguler en fonction de l'atteinte d'un objectif. Selon Schraw, Crippen et Hartley (2006), la métacognition comporte deux principales composantes. La première

renvoie aux connaissances que l'individu peut avoir de sa cognition. La seconde lui permet de réguler et de contrôler ses processus cognitifs. Elle est en quelque sorte au service des autres processus cognitifs d'ordre supérieur. En effet, la métacognition peut s'avérer utile en situation de résolution de problèmes complexes puisqu'elle permet de réfléchir sur les actions, les méthodes et la démarche de résolution afin d'évaluer si elles sont adéquates (Jonassen, 2011). C'est au moment d'exécuter différentes tâches cognitives que l'individu a habituellement recours à la métacognition (Kuhn, 2000). Une utilisation adéquate de cette dernière augmente les chances d'une performance réussie relativement à la résolution de problème complexe (Coutinho, Wiemer-Hastings, Skowronski et Britt, 2005).

Rôles des processus cognitifs d'ordre supérieur

De façon générale, les processus cognitifs d'ordre supérieur renvoient aux opérations mentales qui permettent la saisie, le traitement et le stockage d'informations dans le cerveau. Selon divers auteurs, ces processus collaborent avec d'autres processus cognitifs lorsqu'il devient nécessaire de penser à la manière d'agir ou de croire ou pour s'adapter à des situations nouvelles non routinières (Schraw et Robinson, 2011; Gagné et al., 2009; Houdé et Borst, 2015). Dans de telles situations, le fait de penser va aider à dissiper le doute quant à la meilleure décision à prendre. Selon Kahneman (2011), deux systèmes aux vitesses différentes peuvent intervenir au moment de penser, soit le système 1 et le système 2. Le premier fonctionne de manière rapide et sans effort. Ce sont des pensées qui arrivent automatiquement, elles sont dépourvues d'un quelconque contrôle délibéré. Le système 2 est plus lent et mène vers des pensées plus élaborées. Il nécessite temps, exige des efforts et permet l'ordonnement des activités mentales. Le système 2 renvoie aux fonctions exécutives qui donnent lieu à des facultés mentales élaborées, comme la planification, la résolution de problème et le raisonnement logique. Par exemple, les travaux de synthèse de Gagné et al. (2009) proposent six fonctions exécutives génériques, soit la mémoire de travail, la planification et organisation, l'activation, l'inhibition, la flexibilité cognitive et la régulation émotionnelle. La mémoire de travail est utile pour retenir de l'information pour une courte durée afin de réaliser des tâches ponctuelles. La planification et l'organisation sert à gérer les tâches ponctuelles, ainsi que celles qui durent dans le temps. Elle sert également pour établir des liens entre les connaissances. L'activation sert à la mise en action et à entretenir un niveau d'activation jusqu'à la réussite des tâches. La fonction d'inhibition, qui selon Houdé serait un système 3, sert à contrôler les comportements et les pensées, mais aussi les distractions et les impulsions liés aux tâches. Elle permet notamment de résister aux habitudes ou aux automatismes, d'éviter les biais cognitifs ou les préjugés et rend possible la flexibilité cognitive. Cette dernière rend la personne capable de s'ajuster aux exigences et aux contraintes des situations et des tâches, de choisir les

stratégies idoines pour la résolution des problèmes et de penser de façon divergente. Enfin, la régulation émotionnelle sert pour évaluer et régir les réactions émotionnelles.

Penser sert également pour aider à se former des croyances et pour choisir des buts personnels (Barron, 2008). C'est l'espérance de retombées positives ou la recherche d'un bien-être qui incitent à penser adéquatement dans ces situations. Toute décision relève d'un choix d'actions à exécuter. Les décisions sont prises pour atteindre des buts, elles se fondent sur des croyances quant aux actions qui permettront de les atteindre. Parfois les décisions à prendre peuvent être simples, c'est le cas, par exemple, lorsqu'il n'y a qu'un seul but et que deux choix d'options. Dans ce cas, les croyances quant à la meilleure décision s'imposent aisément. Toutefois, certaines décisions peuvent être complexes, impliquant plusieurs buts et plusieurs options. Dans ce cas, les croyances sont plutôt incertaines, elles peuvent nécessiter davantage de recherches d'informations pour dissiper le doute. Selon Barron (2008), ces recherches d'informations portent généralement sur trois objets : des possibilités, des preuves et des buts. Les possibilités sont des réponses aux questions qu'on se pose, ou des solutions possibles au doute existant. Les possibilités peuvent venir de sources extérieures (par exemple, un collègue qui partage son expérience vécue dans une situation similaire), ou elles peuvent venir de soi (par exemple, compter sur sa mémoire). Les buts deviennent alors le principal critère d'évaluation des possibilités. Les preuves consistent de croyances ou de croyances potentielles qui aident à déterminer jusqu'à quel point une possibilité peut mener à l'atteinte d'un but. Il s'agit d'un processus d'inférence par lequel on attribue un degré de vraisemblance aux possibilités en fonction des preuves et compte tenu des buts poursuivis. Le jugement devient alors important puisqu'il permet d'évaluer les possibilités quant aux preuves et aux buts poursuivis. Les buts déterminent la façon dont seront utilisées les preuves (Barron, 2008).

Les objets auxquels nous pensons sont représentés dans notre cerveau (*mind* en anglais). Nous en sommes conscients, par conséquent ils sont disponibles à notre conscience. Même lorsqu'ils ne sont pas immédiatement présents dans notre conscience, il est possible de les y ramener lorsque cela s'avère pertinent, et ce, même s'il y a interruption durant ce processus (Baron, 2008). Cet aspect est particulièrement intéressant dans le cadre de cette recherche qui vise l'évocation de gestes ou de pensées qui ont eu lieu dans le passé. Par ailleurs, les processus impliqués lors de la pensée ne surviennent pas dans un ordre fixe ou en séquence préétablie. Ainsi, les divers processus, que ce soit la recherche de possibilités ou de preuves, la considération des buts ou encore les inférences provenant de l'évaluation des possibilités, peuvent se superposer, voire se produire en alternance.

Résolution de problèmes : différences entre personnes novices et expérimentées

Une manière de clarifier le développement de la capacité à résoudre des problèmes complexes consiste à comparer les apprenants sur la base de l'expérience acquise à réaliser de telles tâches. Il s'agit de pouvoir différencier les apprenants selon qu'ils soient en début de parcours, donc novices, ou qu'ils soient plus avancés dans leur cheminement du programme, on les considère alors comme expérimentés. Toutefois, le sens du terme expérimenté n'est pas à confondre avec celui d'expert, généralement utilisé en contexte professionnel ou juridique, par exemple. Il ne s'agit pas non plus d'une expertise telle que l'entendent les spécialistes du domaine (voir Erickson, Charness, Feltovich, Hoffman, 2006; Gobet, 1997). Les termes novice et expérimenté sont simplement utilisés comme des états opposés afin que l'on puisse distinguer les apprenants quant à leur façon de résoudre des problèmes, en tenant compte de leur cheminement dans le programme. Pour ce, il devient nécessaire de considérer la performance, c'est-à-dire les gestes et les actions posés en situation de résolution de problèmes complexes. Taconis et coll. (2001), indiquent que les personnes expérimentées accomplissent les tâches de manière rapide et harmonieuse, sans hésitation ou sans erreurs, et avec une vérification continue sur d'éventuelles erreurs. La rapidité, l'aisance et la fluidité de l'activité cognitive des personnes expérimentées contrastent avec la performance des personnes novices qui tend à être plus lente, hésitante et généralement empreinte d'erreurs. En ce qui a trait à la résolution de problèmes complexes, deux dimensions peuvent caractériser le passage de l'état novice à celui d'expérimenté : 1) de non structuré à structuré et 2) d'une performance par étape à automatisée. Ainsi, la performance des personnes expérimentées est hautement structurée, tandis qu'elle est non structurée chez les novices. Les travaux de diverses personnes auteurs ont permis d'identifier cinq caractéristiques présentes chez les personnes expérimentées qui leur facilitent la résolution de problème, soit celle de posséder des connaissances étendues pour un domaine, de les organiser dans une structure cohérente, de disposer d'un répertoire d'habiletés de résolution de problèmes automatisées, de dédier davantage de temps à la planification et d'assurer un suivi efficace du processus de résolution de problème (Alexander, 2003; Ericsson, 2009; Lajoie, 2003). Ces caractéristiques expliquent pourquoi les experts sont plus rapides, plus efficaces et témoignent d'une meilleure réflexion structurée et automatisée que les novices.

Méthode

La collecte des données s'est faite par des entretiens d'explicitation, réalisés auprès de dix personnes étudiantes de premier cycle en génie. Ces entretiens, d'une durée approximative de 45 minutes, ont été conduits dans les semaines qui ont suivi la fin de la session d'hiver

et d'été 2019 et avaient pour objet de documenter les processus cognitifs préconisés lors de la réalisation de tâches d'apprentissage complexes. La méthode de l'entretien d'explicitation, développée par Vermersch (2006, 2011), a pour but d'accéder à des dimensions du vécu de l'action qui ne sont pas immédiatement présentes à la conscience de la personne en vue d'une description aussi fine et détaillée que possible de la réalisation d'une tâche ou d'une activité passée. Pour ce faire, l'évocation et la prise de parole incarnée sont deux éléments cruciaux de cette méthode qui visent à approfondir la compréhension des processus mentaux d'une personne en lui demandant de se replonger dans son expérience et de la relater avec un niveau de détail riche et nuancé. Selon Vermersch (2006), l'entretien d'explicitation « vise donc en priorité la verbalisation de l'action (matérielle, mais aussi mentale) telle qu'elle est effectivement mise en œuvre dans l'exécution d'une tâche précise (p. 3). » L'entretien d'explicitation est un dispositif méthodologique efficace pour ramener à la conscience de précieux détails de la mise en œuvre des actes posés (*comment ai-je fait?* et non seulement *qu'est-ce que j'ai fait?*). L'action est considérée comme une source privilégiée d'informations pour comprendre les aspects fonctionnels de la cognition. Ce sont les aspects procéduraux plutôt que conceptuels que prend pour objets de réflexion l'entretien d'explicitation. Ce dispositif permet ainsi à l'apprenant de prendre conscience de la dimension implicite de ses processus cognitifs, qui peut ainsi constituer un élément clé de son apprentissage.

Analyse des données

L'analyse de contenu des entretiens d'explicitation préalablement transcrits a été réalisée selon l'approche de Landry (1993). Elle a porté sur le contenu manifeste et a permis d'extraire des unités de sens qui donnent lieu à une classification des processus cognitifs lors de la réalisation de tâches d'apprentissage complexes. Une synthèse qualitative a été faite de ces processus.

Échantillon

L'échantillon est composé de cinq femmes et cinq hommes, âgés de 19 à 22 ans, inscrits dans un programme de premier cycle en génie. Nous avons choisi un échantillon stratifié, c'est-à-dire composé de personnes étudiantes de chacune des quatre années du programme d'études. Un tel échantillon permet de déceler d'éventuelles différences entre les processus cognitifs mobilisés par des personnes étudiantes débutantes et celles plus avancées. Le tableau 1 présente la répartition des participants, dont le véritable nom a été substitué par un pseudonyme pour préserver l'anonymat. On y trouve également des informations sur leur âge, leur genre, l'année d'études ainsi que le programme de génie dans lequel ils sont inscrits.

Tableau 1.*Répartition des participants de l'échantillon*

Pseudonyme	Âge	Genre	Année d'études	Programme de génie
Hamed	19	Homme	1 ^e année	Mécanique
François	19	Homme	1 ^e année	Logiciel
Céline	20	Femme	2 ^e année	Chimique
Mylène	20	Femme	2 ^e année	Chimique
Isabelle	20	Femme	2 ^e année	Industriel
Steeve	20	Homme	3 ^e année	Industriel
Leila	21	Femme	3 ^e année	Civil
Stéphane	22	Homme	3 ^e année	Géologique
Sandrine	21	Femme	4 ^e année	Environnement
Charles	21	Homme	4 ^e année	Civil

Il faut noter que l'échantillon ne comporte pas de représentant de l'ensemble des programmes de génie offerts dans l'établissement où s'est déroulée la recherche. La répartition hommes-femmes de l'échantillon n'est également pas représentative de la population étudiée, qui est plutôt de l'ordre de 75% d'hommes et 25% de femmes dans l'ensemble pour cet établissement. Une répartition plus près de la parité dans notre échantillon peut s'expliquer du fait que trois des six programmes (chimique, industriel et environnement) représentés ont une proportion de genre quasi paritaire. Ce sont ces dix participants qui ont répondu favorablement à notre invitation à prendre part à l'étude.

Déroulement des entretiens

Les personnes participantes étaient convoquées à une rencontre individuelle avec le chercheur, d'une durée maximale d'une heure. Leur consentement était obtenu sur une base libre et volontaire. Elles ont été informées oralement de l'objectif de la recherche ainsi que de la nature et des conditions de leur participation. Le même protocole de collecte de

données a été suivi pour l'ensemble des répondants, par souci d'uniformité des conditions de réalisation des entretiens. Ceux-ci ont eu lieu à l'extérieur des périodes de cours afin d'éviter des contraintes académiques (examens, travaux à remettre, cours à suivre, etc.). On leur demandait d'abord de s'installer confortablement sur la chaise située à l'intérieur d'un petit local dédié aux travaux en petites équipes. Puis, on obtenait la permission de pouvoir enregistrer l'entretien sur support audio. L'objectif ainsi que le thème de l'entretien leur étaient rappelés pour enchaîner avec la phrase introductive habituelle : « si vous acceptez, je vous propose de prendre le temps de laisser remonter un moment où vous aviez à faire de la conception. » Cela était généralement suivi par la phrase : « Prenez le temps qu'il faut pour penser à ce moment et dès que vous l'avez, vous me l'indiquez. »

Les entretiens d'explicitation ont permis de mettre en lumière comment les répondants s'y prennent lors de la réalisation de tâches complexes relatives à la conception en génie. Les répondants étaient libres de choisir la situation de conception de leur choix. La seule contrainte qui leur était imposée était la nécessité d'avoir réalisé eux-mêmes ces tâches. Il était permis, et parfois nécessaire, de changer la situation en cours d'entretien d'explicitation. Cela arrivait lorsqu'un répondant réalisait qu'il ne s'agissait pas vraiment d'une tâche complexe ou lorsque soudainement surgissait dans leur esprit une situation plus pertinente. Dans ces cas, le chercheur acceptait la modification et l'entretien reprenait en se concentrant sur la nouvelle situation. Cela s'est produit à deux reprises, l'une avec Hamed et l'autre avec Céline. Dans le cas de Hamed, c'est le chercheur qui s'est rendu compte que la situation évoquée en première instance concernait un problème non complexe. Dans le cas de Céline, elle a préféré changer de situation quelques minutes après le début de l'entretien, indiquant que son implication avait été plus grande. Quoi qu'il en soit, la situation retenue pouvait avoir eu lieu en début, en milieu ou en fin de processus de conception. Tous les répondants ont réussi à trouver une situation permettant l'explicitation de leurs actions. Ils ont également tous été en mesure d'entrer en évocation et de prendre la position de parole incarnée (Vermesch, 2006).

Présentation et analyse des résultats

La plupart des répondants ont choisi une expérience récente vécue dans un des cours projet-intégrateur suivis lors du programme d'études actuel. C'est le cas de François, Céline, Mylène, Isabelle, Steeve, Leila, Stéphane et Charles. Il s'agit d'un cours dans lequel un projet de conception en génie était prévu au plan de cours. En effet, depuis 2005, tous les programmes de premier cycle en génie de cet établissement exigent la réalisation d'un projet de conception annuellement. Pour ce qui est de Hamed et Sandrine, ils ont choisi une situation vécue lors d'un stage en entreprise, qui est également une activité de formation obligatoire depuis 2005 dans tous les programmes d'études. La nature des projets

évoqués par les répondants est très variée, et cette diversité semble liée à la nature du programme d'études auquel appartiennent les répondants. En dépit de la diversité des projets réalisés et des problèmes complexes qu'ont eu à résoudre ces personnes étudiantes, l'analyse des résultats a permis d'identifier plusieurs aspects qui semblent être communs à l'ensemble des répondants. Ces aspects ont trait aux opérations mentales mobilisées en début de processus de conception. Il s'agit de la considération de l'objectif et du but du projet, de la considération des connaissances préalables ou des données connues, ainsi que le repérage de solutions existantes en lien avec le projet de conception. D'autres processus cognitifs partagés par l'ensemble des répondants peuvent survenir à d'autres moments, c'est le cas pour la visualisation mentale et la capacité de se poser des questions.

Les aspects qui semblent différencier les répondants lors de la réalisation de tâches de conception en génie se sont avérés moins nombreux. Ces aspects ont trait à la stratégie de l'essai et erreur ainsi qu'à l'anticipation des problèmes et la prévision des conséquences des choix. Il est à noter que ces aspects concernent des différences observées selon l'année d'études de la personne étudiante. La distinction est notable surtout entre les personnes étudiantes de première et seconde année par rapport à celles de troisième et quatrième année.

Aspects communs

Considération de l'objectif ou du but du projet

Une forte majorité de répondants indique que l'une des premières opérations mentales revient à s'assurer d'avoir bien saisi le mandat qui leur est confié. Cette opération vise à préciser l'objectif de la tâche en vue d'atteindre un résultat satisfaisant. La considération de l'objectif sert également de critère principal qui orientera toutes les autres actions. De plus, c'est un élément primordial qui semble demeurer présent à tout moment dans la conscience des répondants. Les analyses et les décisions découlent de l'interprétation qui est faite de l'objectif.

« Dans la conception qu'est-ce qui est dur c'est peut-être justement la première étape, c'est de savoir qu'est-ce qu'il faut trouver parce que tu sais, exemple, on savait pour là que c'était la topographie, mais tu sais, on sait qu'on ne va pas juste faire une ligne droite puis qu'on va prendre les montagnes. » (Charles)

« Bien là, c'est ça, c'est... Bien ce que je fais c'est que... Bien je me redemande : Ok c'est quoi mon mandat? Qu'est-ce que je dois faire? C'est quoi les informations que j'ai dont je dispose? C'est quoi qui est attendu de moi et dans ce cadre-là qu'est-ce qu'on va forcément devoir retrouver? Faut que j'ai une idée en fait de ce que je veux faire. Je ne vais pas me lancer si je n'ai pas une idée directrice qui me dit Ok avec tout ça je suis censée pouvoir faire. » (Mylène)

La considération de l'objectif de la tâche à réaliser, présente chez la majorité des répondants, est une activité cognitive qui confirme les propos des experts voulant que l'atteinte d'un résultat souhaité joue un rôle important sur les processus cognitifs utilisés en situation de résolution de problème complexe (Halpern, 2003; Holyoak et Morrison, 2005). Cette considération est d'autant plus importante quand il est question de projets de conception en génie, puisque l'enjeu du problème à résoudre est exacerbé lorsque la situation se produit en contexte authentique, c'est-à-dire un problème réel, ou lorsqu'il y a présence d'un client réel (Latanda, 2020). Il en va de la crédibilité et de la réputation de l'ingénieur ou du futur ingénieur dans le cas de personnes étudiantes. D'autres facteurs accroissent également la pression de l'importance de bien comprendre le mandat à réaliser, puisque les coûts financiers, humains, environnementaux et sociaux associés à la conception en génie sont souvent très élevés. De la sorte, ces résultats suggèrent que de prendre le temps pour la clarification de l'objectif, un comportement mental associé au système 2 de Kahneman (2011), permettrait de réduire les probabilités de prendre des décisions erronées ou qui mettraient en péril l'atteinte du but désiré. Ce comportement est conforme aux propos de Barron (2008), qui relate la nécessité de penser lorsque nous sommes confrontés à une décision complexe afin de dissiper le doute quant à la meilleure décision à prendre.

Considération des connaissances préalables ou des expériences antérieures

Plusieurs personnes répondantes indiquent faire le bilan de leurs connaissances acquises durant leur formation qui pourraient leur être utiles à la résolution de la situation. Ces connaissances peuvent correspondre à des notions théoriques du domaine ou bien à des exemples de problèmes similaires résolus par elles par le passé. Ce balayage des connaissances ou des expériences antérieures, qui survient très tôt dans la démarche de résolution de problème, semble au premier abord mobiliser des processus cognitifs d'ordre inférieur comme le repérage et la récupération dans la mémoire d'informations spécifiques. Toutefois, étant donné qu'ils sont associés à une intention particulière, dans ce cas comparer et chercher des similitudes en vue de résoudre un problème, ces processus seraient considérés d'ordre supérieur (Lewis et Smith, 1993). En effet, la comparaison et le repérage sont faits *in fine*, soit pour identifier dans les acquis des éléments qui pourraient aider à résoudre le problème, soit pour considérer si une solution connue à un problème similaire peut être appliquée au problème présent. Ainsi, le rappel d'informations se produit dans un contexte particulier, soit celui de la réalisation d'une tâche complexe, en sollicitant les structures cognitives où sont emmagasinées et organisées les connaissances qui peuvent être pertinentes à cette situation (Anderson et al., 2007). En référence aux travaux de Barron (2008), les propos recueillis lors des entretiens d'explicitation

permettent de déduire que les personnes étudiantes ont recours à un processus d'inférence pour évaluer les possibilités et les preuves emmagasinées dans leur mémoire pouvant leur être utiles dans l'atteinte de leurs objectifs.

« Bien quand j'avais le sujet au tout à la fois j'ai automatiquement pensé à mon devoir. Je me suis dit : « ah, c'est la même chose, j'aurai juste à faire du « copy-paste », à changer quelques valeurs et le tour est joué. Mais une fois que je me suis vraiment imprégné du devoir, il fallait aller beaucoup plus loin que ça. Ce n'était pas vraiment ce que j'avais... C'est-à-dire que j'avais les bases pour... qu'on m'avait montré dans l'autre cours, mais il fallait moi-même que je réfléchisse et que je mette en place une nouvelle méthode pour résoudre le problème et surtout que c'était de la programmation. » (Céline)

« Donc comment je fais pour me dire je vais mettre tel élément là, tel élément là? Bien là...là quand je dessine je me dis... je le fais beaucoup à partir des connaissances que j'ai déjà. Là on peut plus parler d'un... peut-être oui, d'instinct ou de connaissances que j'ai qui me permettent de me dire que la conception elle va se faire dans tel ordre là donc là c'est un peu par rapport aux acquis que j'ai moi ou le bon sens aussi qui va me faire me dire que je vais ranger les choses dans tel ou tel ordre. » (Mylène)

Considération des données connues ou des contraintes fortes

Plusieurs personnes étudiantes vont d'abord considérer les données à leur disposition, c'est-à-dire les éléments connus de la situation. Elles prennent ainsi le temps de s'approprier les informations factuelles propres à la situation afin d'en tenir compte au moment de prendre des décisions quant au problème à résoudre. Ces informations sont, à certains moments, cruciales, car elles indiquent les caractéristiques importantes du projet qui peuvent influencer les choix. Ce sont parfois des contraintes fortes qui rendent complexe une situation et pour lesquelles les personnes étudiantes n'ont d'autres choix que de trouver des solutions pour résoudre le problème.

« Ce que j'ai fait, c'est la première chose que je fais à chaque fois, c'est à écrire ce que je savais en fait. Les données dont je disposais pour pouvoir amorcer mon problème. Je ne les écris pas forcément en ligne ou autre, mais je les écris un peu partout comme des mots... Genre, j'ai telles données, j'ai telles données, j'ai telles données, j'ai telles données... Donc, j'ai une grande feuille blanche et c'est ça que je fais au début. J'écris un peu partout toutes les données dont je dispose pour amorcer mon problème. » (Mylène)

« Parce que c'était... dans ce projet-là c'était le plus difficile à positionner. Donc vu que c'était lui le plus difficile, c'était lui qui nous demandait le plus de contraintes, tu ne pouvais pas le placer n'importe où. Fait que c'est lui qu'on plaçait en premier. Parce que si lui ça ne marchait pas, ça ne marchait pas le reste. » (Steeve)

Les contraintes relèvent d'un aspect particulièrement critique lors de la conception en génie. Elles représentent l'ensemble des obligations à satisfaire pour que la solution proposée permette d'assurer les différentes fonctions pour lesquelles elle sera conçue. La nature des contraintes est variée, celles-ci peuvent être liées au fonctionnement, à la sécurité, à l'ergonomie, à l'esthétique, au coût, au développement durable ou à tout autre élément imposé par le cahier des charges. Le cahier des charges peut parfois imposer un nombre élevé de contraintes. En contexte de formation en génie, les contraintes relatives à un projet de conception amènent les personnes étudiantes à devoir les considérer en vue de trouver une solution pertinente. Leur considération peut instiguer l'habileté de raisonner, qui figure parmi l'un des quatre processus cognitifs d'ordre supérieur proposé par Schraw et Robinson (2011). Le raisonnement dans ce cas se fait en évaluant la prépondérance des critères associés au projet de conception. Ces critères font apparaître des contraintes qui à leur tour influencent les décisions. Par ailleurs, les contraintes incitent les personnes étudiantes à considérer les conditions particulières à chacune des situations. En lien avec les travaux d'Anderson et al. (2004), qui a proposé deux types de structures sous-jacentes aux connaissances, il semble nécessaire d'ajouter un troisième type de structures qui renvoie aux connaissances conditionnelles (Tardif, 1997). Ces dernières renvoient aux conditions de l'action, à savoir quand utiliser les deux autres types de connaissances. Les connaissances conditionnelles font généralement peu l'objet d'un enseignement explicite dans les formations en génie. On constate toutefois qu'il constitue un aspect essentiel à développer pour la résolution de problèmes complexes.

Repérage de solutions existantes

La recherche d'informations pertinentes à l'intérieur des sources bibliographiques constitue une autre stratégie commune fréquemment déployée par les répondants. Ils déclarent y avoir recours pour diverses raisons. Ainsi, il se peut qu'ils le fassent pour tenter d'identifier dans les écrits de possibles solutions à leur situation. Cependant, il ne faudrait pas conclure qu'il s'agit d'un simple comportement qui cherche simplement à imiter une réponse en ne mobilisant que des processus cognitifs d'ordre inférieur. Si les personnes étudiantes se tournent vers des modèles existants de solutions à des problèmes similaires c'est plutôt pour s'en inspirer ou pour s'aider à démarrer le processus de conception. Dans ce contexte, il s'agit davantage d'émulation raisonnée, pourrait-on dire. Elles savent que la littérature peut leur fournir des patrons à partir desquelles concevoir une solution adaptée à leur situation spécifique, tout en demeurant conscientes qu'elles devront y apporter quelques ajustements mineurs, voire des adaptations importantes. De la sorte, il s'agit d'une stratégie justifiée par la démarche scientifique, dont est fortement imprégné le domaine de l'ingénierie. Cette étape de la résolution de problème complexe fait appel à la pensée critique, qui amène les personnes étudiantes à analyser des informations de façon

perspicace pour en retenir les aspects nécessaires à leurs besoins (Schraw et Robinson, 2011). De plus, cette façon de penser renvoie à la fonction exécutive de la flexibilité cognitive (Gagné et al., 2009) et soutenue par celle de l'inhibition (Houdé et Borst, 2015).

« Je suis plus du style à regarder puis essayer de faire pareil. Mais tu sais j'ai toujours un modèle que ce soit dans n'importe quoi là, construire quelque chose de mes mains ou même une recette là, j'ai toujours d'habitude un modèle que j'essaie de suivre quand même pour avoir une bonne image, fait que là c'était nouveau pour moi d'avoir tu sais... c'est bien beau j'avais l'image de l'autre qui fallait que je fasse un peu comme ça, mais tu sais ce n'est pas ça qu'il fallait que je fasse fait que c'était d'en prendre puis d'en laisser, puis d'essayer de me dire... En tous cas tout ça je trouvais ça quand même différent de qu'est-ce que j'étais habitué avant de... vu que j'étais dans l'inconnu beaucoup là... » (Isabelle)

« J'avais commencé à... on a fait de la recherche biblio de base. Donc j'avais une idée du procédé à quoi il allait ressembler. » (Stéphane)

Visualisation mentale

La visualisation mentale est fréquemment évoquée chez la plupart des répondants. Elle correspond à la faculté de se représenter une situation en faisant surgir des images mentales par l'imagination. Qu'elle survienne de façon consciente ou inconsciente, la visualisation mentale est un processus cognitif qui peut être exploité dans différents contextes, que ce soit dans le sport, les affaires, le travail ou les études. Dans le présent contexte, la visualisation mentale est employée consciemment et délibérément et semble jouer un rôle d'appui à d'autres processus cognitifs d'ordre supérieur, puisqu'elle se manifeste de façon concomitante à l'analyse de la représentation mentale ou l'évaluation des possibles décisions (Barron, 2008). Les entretiens d'explicitation ont permis de constater qu'elle prend différentes formes et s'exprime de diverses manières. Par exemple, pour certains répondants, la visualisation est séquentielle tandis que pour d'autres elle est davantage globale. De plus, certaines personnes étudiantes semblent même avoir la capacité de faire varier la distance focale (zoom) sur des aspects particuliers de l'image générée mentalement. Un autre aspect intéressant de la visualisation mentale renvoie au point de vue de la personne qui génère les représentations mentales. En effet, le point de vue peut être interne, c'est le cas lorsque le répondant relate qu'il voit directement l'image mentale. On parle alors de visualisation interne. Tandis que le point de vue est externe lorsque le répondant affirme se voir en train d'observer l'image mentale. Il s'agit alors de visualisation externe.

« Donc une fois que j'avais ces données ce que j'ai commencé à faire c'est imaginer vraiment c'est quoi les blocs d'équipement que je vais avoir besoin de rajouter moi pour pouvoir faire quelque chose de fonctionnel. C'est ça. Donc là c'est le dessin là cette fois-ci que j'étudie, que je regarde. Et j'essaie d'imaginer c'est quoi que je dois

rajouter maintenant pour pouvoir avoir une boucle qui ressemble à quelque chose. » (Mylène)

« Je me promène en dessous du pilier. Parce que moi ce que je cherche, ça c'est ma rivière et les piliers sont là, moi ce que je suis en train de voir, maintenant que la rivière n'est pas pleine bien sûr, je me déplace en dessous des piliers du pont et je regarde. Et je regarde. C'est ça ce que je fais. » (Sandrine)

« Fait que je lance une première direction puis je regarde : ah non là ça marche pas là, ah non là ici on va dire il y avait trop de rocs c'est sûr qu'on ne passait pas par là. Là tu lances. C'est ça, il y a comme un peu des directions aléatoires jusqu'à temps que tu vois qu'il y ait quelque chose qui a l'air d'avoir du sens. Bien tu lances une ligne dans... Tu fais un chemin imaginaire. Ok, on va dire, je passerais par-là, je passerais par-là. » (Charles)

S'autoquestionner

L'autoquestionnement, c'est-à-dire la faculté de se poser des questions à soi-même, est une méthode employée par l'ensemble des répondants de l'échantillon. Il peut survenir à tout moment lors du processus de conception et se manifester à voix haute ou dans la tête de l'étudiant. Deux raisons semblent motiver le recours au questionnement. La plus fréquente renvoie à une fonction d'échafaudage cognitif qui aide à suivre une procédure. De cette façon, les questions servent de guide pour s'assurer de mener une activité à terme en vérifiant la validité des connaissances procédurales (Anderson *et coll.*, 2004). Une seconde raison à l'autoquestionnement, moins fréquente, mais également utile, sert pour susciter la réflexion sur les conséquences. Les questions que se posent les participants permettent de procéder par inférence quant aux possibles résultats des décisions (Barron, 2008).

« ...j'essaie de faire, de me dire c'était quoi les étapes pour la construction. J'essaie de me dire : « ah, est-ce que ça, ça va marcher ? Est-ce que ça, ça va être compliqué ? Est-ce que je suis aussi bien de trouver d'autres choses ? Si je prends cette option-là est-ce que ça va fonctionner ? » (Isabelle)

« ...je l'ai relu, je l'ai relu puis je l'ai relu jusqu'à ce que je connaissais toutes les équations. Jusqu'à ce que vraiment je connaissais vraiment le sujet et là j'ai commencé à me poser certaines questions pour me guider vers la démarche... Bien là où je bloquais je me disais : « ok ». Je me posais la question : « Bien là je bloque. Comment je fais ? Qu'est-ce qui me manque ? » (Mylène)

Aspects qui diffèrent

L'analyse des entretiens d'explicitation a permis d'identifier quelques aspects singuliers qui permettent de distinguer les répondants quant aux processus cognitifs mobilisés lors de la réalisation de tâches complexes. On constate, toutefois, que cette distinction tient

uniquement à la variable contextuelle de l'année d'études. Les autres variables sociodémographiques, que ce soit le genre, l'âge ou le programme d'études, ne semblent pas jouer de rôle discriminant, du moins en ce qui a trait aux processus cognitifs mobilisés par les étudiants. Ces aspects renvoient d'une part, à la stratégie de l'essai et erreur, et à l'anticipation des problèmes et la prévision des conséquences des choix, d'autre part.

Essai et erreur

Les personnes étudiantes de première et deuxième année semblent avoir plus souvent recours à la stratégie de l'essai et erreur lors du processus de conception en génie que celles de troisième et quatrième année. Cette distinction peut indiquer des lacunes dans leurs connaissances déclaratives, procédurales ou conditionnelles (Anderson, 2004). Elle peut aussi être indicative d'un écart dans le développement de certains processus cognitifs d'ordre supérieur, au profit des personnes plus expérimentées (Taconis et coll., 2001). Le répertoire d'habiletés de résolution de problèmes automatisés étant plus limité chez les novices (Alexander, 2003; Ericsson, 2009; Lajoie, 2003), ces derniers ont probablement recours à la stratégie de l'essai et erreur, qui leur permet d'enrichir graduellement leur inventaire de connaissances et d'expériences pour utilisation ou référence ultérieure. Avec le temps, la somme des erreurs constatées et corrigées par les personnes apprenantes agit sur leur processus de structuration des connaissances, menant à une capacité de résolution de problème plus efficace.

« Oui. Beaucoup d'essais/erreurs pendant le projet. Pour les valeurs c'est très arbitraire. Donc on se dit que la valeur maximale c'est 255 donc... puis c'est comme, ok ça, ça doit être comme 75% de puissance, on va essayer ça. Tantôt c'était à 5.0, ce n'était vraiment pas assez on va essayer 7.5 » (François)

« ... je continue d'autres itérations. Je suis allé voir les fluides. J'ai commencé à changer un peu les températures pour voir un peu comment ça variait dans mes résultats. Est-ce que j'avais, parce que j'avais toujours cette image d'un échangeur de chaleur compact et tout donc je me disais comme est-ce que ce serait possible de me rapprocher à cette dimension-là? Donc j'ai joué un peu sur les températures et sur les paramètres que je pouvais jouer pour voir comment ça affectait mon échangeur de chaleur. Mais je voyais que ça ne devenait pas... ça ne s'améliorait pas plus là... Peut-être un peu, mais pas à ce point-là. » (Hamed)

« Donc là j'essaie de trouver une solution, etc., mais je tâtonne beaucoup et je reviens beaucoup en arrière. Je me dis aussi beaucoup : « mais est-ce que vrai... est-ce que c'était vraiment...? ». Comme je ne trouve pas en fait de... de solution, je me dis : « est-ce que c'est... est-ce que vraiment ça ne marchait pas finalement? ». Donc c'est beaucoup un processus de : je reviens en arrière; je mets en question un peu ce que je viens de me dire et puis après je refais un pas en avant, mais je tâtonne beaucoup pour arriver à une solution. » (Mylène)

Anticipation des problèmes et prévision des conséquences des choix

Les répondants ont tendance à réfléchir pour anticiper les problèmes relatifs à leur design de conception. Cette anticipation influence leur pensée et leur choix. Par contre, les personnes étudiantes débutantes ont plus de mal à prévoir les conséquences indésirables de leur choix. Ce souci est plutôt présent dans le discours des répondants qui se trouvent en troisième ou quatrième années du programme.

« Je crois que c'est juste plus d'expérience, parce qu'on ne le savait pas que ça aurait été un problème. [...] C'est vraiment difficile de pouvoir, genre, prévoir certains problèmes qui pourraient arriver, mais on se dit, ça c'est le processus idéal donc quelles seraient les parties du programme qu'on aura besoin ? » (François)

« Je n'étais pas conscient dès le début parce que je changeais la température, mais j'oubliais de refaire mes calculs de densité et tout ça donc en changeant la température je changeais l'échange thermique nécessaire, mais les propriétés de mes fluides ne changeaient pas. Donc ça c'est une erreur que j'avais constaté plus loin dans le projet où... est-ce que... attends une minute, ces paramètres là je ne les changeais pas donc... » (Hamed)

En effet, les personnes étudiantes plus avancées dans le cursus se démarquent des plus débutantes par l'anticipation qu'elles démontrent quant aux conséquences de leur choix. Ils s'appuient sur leurs connaissances pour extrapoler d'éventuels résultats selon les différents scénarios imaginés. Ce processus de substruction semble conforme aux travaux de Barron (2008) qui insiste sur l'importance du jugement lors de l'évaluation des scénarios possibles quant à l'atteinte des buts poursuivis. Ce processus cognitif s'apparente à la stratégie cognitive de la métacognition tel que proposée par Kuhn (2000), mais à la différence qu'il se réalise *a priori*, c'est-à-dire avant l'exécution des tâches. Il serait alors plus approprié de parler de précognition, une étape préalable dans la succession des processus cognitifs en situation de résolution de problème complexe.

« Les premiers c'était plus facile parce que j'y suis allé avec ceux que je sais que je ne veux pas mettre ma centrale là. Ceux que je suis sûre à 100%, que je dis : ça ne sert à rien d'essayer de la mettre là. Puis après ça là c'est dans les : humm peut-être oui ici, là c'est quoi le plus important ? Est-ce que je néglige l'environnement ou je néglige... Bien « néglige » ... Bien vous comprenez là... Est-ce que... C'est lequel que je priorise dans le fond. C'est quoi qui est le mieux pour la centrale. » (Leila)

« C'est vraiment juste une sorte de brouillon de conception des... c'est pas vraiment de la modélisation parce qu'il n'y a pas encore de chiffres vraiment qui sortent, il n'y a que des calculs primaires qui sont faits. Et puis on n'a pas encore appliqué le modèle de thermodynamique qui est derrière. Ça on y a réfléchi, mais je l'applique seulement là et là je me rends compte si ça marche ou si ça n'a vraiment pas de sens de la faire. » (Stéphane)

« J’essaie de trouver ce seraient quoi les problèmes à ce niveau-là. Comme un petit peu comme : je ne voudrais pas que ce problème-là arrive, je voudrais pas qu’en général des problèmes de construction arrivent fait que je dis bon : « qu’est-ce qui pourrait arriver comme problème. Est-ce que je peux essayer de les corriger tout de suite en changeant des pièces ou est-ce que je peux essayer d’y penser tout de suite comme ça je vais m’y attendre plus tard. » (Isabelle)

« Donc j’essaie d’imaginer en fait les défauts du dessin que j’ai fait. Et qu’est-ce qui pourrait faire qu’en fait ça ne marche pas. » (Mylène)

Conclusion

Les résultats indiquent que le recours à des pédagogies actives, comme l’apprentissage par projet, qui place les personnes étudiantes devant des problèmes complexes à résoudre, s’avère propice à la mobilisation de processus cognitifs d’ordre supérieur, renforçant les conclusions de recherches antérieures (Abrami et al., 2008). Le fait que plusieurs de ces processus se soient avérés communs à l’ensemble des personnes répondantes tend à montrer que l’environnement didactique peut influencer sur le choix des processus cognitifs, résultant d’un acte volontaire et intentionnel, ce qui est conforme au modèle de la taxonomie des processus cognitifs de Krathwohl (2002). Les processus cognitifs identifiés se situent tous dans les échelons supérieurs de cette taxonomie. De plus, ils semblent concorder aux fonctions exécutives du système 2 proposées par Kahneman (2011), puis au système 3 ajouté par Houdé et Borst (2015).

Par ailleurs, la constatation de certaines différences quant aux processus cognitifs mis en œuvre par les personnes étudiantes, selon qu’elles soient novices ou expérimentées, témoigne de la nature évolutive des processus cognitifs, et permet d’émettre l’hypothèse qu’ils peuvent se développer durant la formation universitaire. Cependant, il n’est pas possible de conclure si les personnes étudiantes ont développé ces processus cognitifs exclusivement par leur participation dans le processus de conception en génie, sans qu’il y ait eu un enseignement direct de ces dernières. Il serait pertinent de vérifier une telle hypothèse, puisque plusieurs experts affirment qu’un enseignement explicite des processus cognitifs soit nécessaire à leur développement (Chinedu, Kamin et Olabiyi, 2015; Halpren, 2003). Il serait également intéressant de vérifier si le passage par la stratégie de l’essai et erreur, un des éléments propres aux étudiants novices, est nécessaire, voire indispensable au développement des processus cognitifs davantage présents chez les étudiants expérimentés. Enfin, l’analyse des propos cueillis indique, d’une part, que les processus cognitifs peuvent se superposer, c’est-à-dire avoir lieu simultanément, comme le suggère Barron (2008). D’autre part, la simultanéité constatée révèle une dynamique complémentaire qui semble altérer la nature des processus cognitifs, qui pourraient

autrement être considérés d'ordre inférieur. Cette constatation est en accord avec la perspective psychocognitive dans laquelle s'inscrivent les travaux d'Anderson *et al.*, (2004) et ceux d'Ericsson (2009), qui catégorisent les actions cognitives des étudiants selon les structures sous-jacentes l'activité réalisée. Il serait pertinent que de futures études creusent la nature simultanée et complémentaire des processus cognitifs mobilisés en situation de résolution de problèmes complexes.

Références

- Abrami, P. C., Bernard, R. M., Borokhovski, E., Wade, A., Surkes, M. A., Tamim, R., et Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebière, C. et Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, *111*, 1036-1060. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.4.1036>
- Zhang, D. (2008). Instructional interventions affecting critical thinking skills and dispositions: A stage I meta-analysis. *Review of Educational Research*, *78*(4), 1102-1134. <https://doi.org/10.3102/0034654308326084>
- Al-Maskari, A., Al-Riyami, T. et Ghnimi, S. (2022). Factors affecting students' preparedness for fourth industrial revolution in higher education institutions. *Journal of Applied Research in Higher Education*. <https://doi.org/10.1108/JARHE-05-2022-0169>
- Arum R. et Roksa, J. (2014). *Aspiring Adults Adrift: Tentative Transitions of College Graduates*, Chicago: University of Chicago Press.
- Baron, J. (2008). *Thinking and deciding* (4th ed.). Cambridge University Press.
- Bégin-Caouette, O., Champagne-Poirier, O., Loiola, F., Beaupré-Lavallée, A. et Paradis, P. (2021). Faire face aux transformations dans l'enseignement supérieur : une conceptualisation des interactions entre différentes innovations pédagogiques. *Enjeux et Société*, *1*(1) <https://doi.org/10.7202/1078496ar>
- Behar-Horenstein, L.S., et Niu, L. (2011). Teaching critical thinking skills in higher education: A review of the literature. *Journal of College Teaching & Learning*, *8*(2), 25-41. <https://doi.org/10.19030/tlc.v8i2.3554>
- Bloom, B., Englehart, M., Furst, E., Hill, W. et Krathwohl, D. (1956). Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain. Longmans, Green.
- Coutinho, S., Wiemer-Hastings, K., Skowronski, J. J., et Britt, M. A. (2005). Metacognition, need for cognition and use of explanations during ongoing learning and problem solving. *Learning and Individual Differences*, *15*(4), 321-337. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2005.06.001>
- De los Ríos, I., Cazorla, A., Díaz-Puente, J., Yagüe, J. (2010). Project-based learning in engineering higher education: two decades of teaching competences in real

- Letchumanan, M., Kartini Said Husain, S., Fauzi Mohd Ayub, A., Tsong Chau, K., Ilham Mohd Radzi, F. et Ching Heng, I. (2020). Investigating Factors that Promote Higher Order Thinking Skills in Information and Communication Technology (ICT) Integrated Classes. *Universal Journal of Educational Research*, 8(11B), 5816 – 5823. <https://10.13189/ujer.2020.082215>
- Lewis, A. et Smith, D. (1993). Defining higher order thinking. *Theory into Practice*, 32, 131-137. <https://doi.org/10.1080/00405849309543588>
- Luesia, J., Benitez, I., Company-Cordoba, R., Gomez-Gomez, I. et Sanchez-Martin, M. (2023). Assessing the relevance of academic competencies in college admission tests from a higher-order thinking perspective: A systematic review. *Thinking Skills and Creativity*. 48, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2023.101251>
- Marzano, R. J. (2001). *Designing a new taxonomy of educational objectives*. Corwin Press.
- Mayer, R. E., & Wittrock, M. C. (2006). Problem solving. Dans P. A. Alexander & P. H. Winne (Eds.), *Handbook of educational psychology* (Second Edition, p. 287-303). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Meyer, J., Land, R. et Baillie, C. (2010). *Threshold concepts and transformational learning*. Sense Publishers.
- Paul, R., Niewoehner, R. et Elder, L. (2006). *The thinker's guide to engineering reasoning*. The Foundation for Critical Thinking. ISBN 0-94453-33-4
- Pinho-Lopez, M. et Macedo, J. (2014). Project-based learning to promote higher order thinking and problem-solving skills in geotechnical courses. *International Journal of Engineering Education*, 4(5), 20-27. <https://doi.org/10.3991/ijep.v4i5.3535>
- Schraw, G., Crippen, K.J. et Hartley, K. (2006). Promoting self-regulation in science education: Metacognition as part of a broader perspective on learning. *Research in Science Education*, 36(1-2), 111-139. <https://doi.org/10.1007/s11165-005-3917-8>
- Schraw, G. et Robinson, D. (2011). *Assessment of higher order thinking skills. A volume in current perspectives on cognition, learning, and instruction*. Information Age Publishing.
- Soo Eun, C. et Lee, M. (2019). Student-centered learning and higher-order thinking skills in engineering students. *The International Journal of Engineering Education*, 35(2), 617–622.
- Taconis, R., Ferguson-Hessler, M. G. M., et Broekkamp, H. (2001). Teaching science problem solving: An overview of experimental work. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(4), 442-468. <https://doi.org/10.1002/tea.1013>
- Tardif, J. (1997). *Pour un enseignement stratégique. L'apport de la psychologie cognitive*. Logiques.
- Trigwell, K. et Prosser, M. (2020). *Exploring university teaching and learning. Experience and context*. Palgrave Macmillan. [En ligne], consulté le 2 janvier 2024,

https://westernsydney.edu.au/_data/assets/pdf_file/0008/1898180/Exploring_University_Teaching_and_Learning_Trigwell_and_Prosser_2020.pdf

- Venkatraman, S., Benli, F., Wei, Y. et Wahr, F. (2022). Smart Classroom Teaching Strategy to Enhance Higher Order Thinking Skills (HOTS)—An Agile Approach for Education 4.0. *Future Internet*, 14, 255. <https://doi.org/10.3390/fi14090255>
- Vermersh, P. (2011). Description et vécu. *Expliciter*, 89. [En ligne], consulté le 12 mars 2023, <http://www.expliciter.fr>
- Zimmerman, B.J. (2013). From Cognitive Modeling to Self-Regulation: A Social Cognitive Career Path, *Educational Psychologist*, 48(3), 135-147. <https://doi.org/10.1080/00461520.2013.794676>