

Evaluation des systèmes d'information à base de technologies émergentes

Application à la blockchain

Jacky Akoka¹, Isabelle Comyn-Wattiau²

1. CEDRIC-CNAM et Institut Mines Telecom (TEM)

2 Rue Conté, 75003 PARIS, France

jacky.akoka@lecnam.net

2. ESSEC Business School

1 Avenue Bernard Hirsch, 95021 CERGY, France, wattiau@essec.edu

RESUME. Les technologies émergentes représentent une innovation majeure qui offre des avancées significatives aux organisations tant privées que publiques. Un exemple de ces technologies est la « blockchain » qui combine des mécanismes de cryptographie et l'architecture pair à pair. L'importance que prennent ces technologies émergentes nécessite le recours à des méthodes d'évaluation afin d'appréhender leur apport et les risques associés. L'objectif de cet article est de proposer une méthode d'aide à l'évaluation des systèmes d'information à base de technologies émergentes et de l'illustrer par l'application à la « blockchain ». Cette démarche de guidage est fondée sur le constat que les technologies émergentes sont des systèmes complexes. Notre démarche combine trois cadres conceptuels : la théorie sous-jacente aux systèmes d'information complexes, la systémique et la norme ISO 25001 dédiée à la qualité des logiciels. Nous proposons une hiérarchie multicritères qui sert de base à l'évaluation et nous l'appliquons au cas particulier de la « blockchain ».

ABSTRACT. Emerging technologies represent a major innovation that offers significant advances to both private and public organizations. An example of these technologies is the "blockchain", which combines cryptographic mechanisms and peer-to-peer architecture. The importance of these emerging technologies requires the use of evaluation methods in order to understand their contribution and the associated risks. The objective of this article is to propose a method supporting the evaluation of emerging technologies and to apply it to blockchains. This guidance approach is based on the recognition that emerging technologies are complex systems. Our approach combines three conceptual frameworks: the underlying theory of complex information systems, systems theory, and the ISO 25001 standard devoted to software quality. We propose a multi-criteria hierarchy which serves as the basis for the evaluation. To illustrate this approach, we apply it to the particular case of "blockchains".

Mots-clés : technologies émergentes, blockchain, SI complexe, méthode, évaluation, guidage.

KEYWORDS: emerging technology, blockchain, complex IS, methodology, assessment, guidance.

1. Introduction

Selon (Day *et al.*, 2004), les technologies émergentes (TE) représentent une innovation qui a le potentiel de transformer une industrie existante et/ou d'en créer de nouvelles. Bien entendu, il existe d'autres définitions. Rotolo *et al.* (2015) les résumant en cinq caractéristiques principales : (i) innovation radicale, (ii) croissance rapide, (iii) cohérence, (iv) impact significatif et (v) incertitude et ambiguïté.

La différence principale entre les TE et les nouvelles technologies traditionnelles réside dans le fait que ces dernières offrent des changements incrémentaux alors que les premières sont caractérisées par une innovation radicale. Cozzens *et al.* (2010) considèrent que les TE sont celles qui possèdent un potentiel élevé mais n'ont pas encore démontré leurs valeurs ni fait l'objet d'un consensus. Song et Yin (2007) définissent quatre étapes dans l'évolution des TE. La première étape est relative à la mutation technologique, la deuxième est l'implantation des technologies, la troisième est caractérisée par l'application de l'innovation. Enfin la dernière correspond à l'innovation par l'intégration de technologies.

Il existe de nombreux exemples de TE. Le MIT présente une liste non exhaustive de ces TE par année¹. Mentionnons les nanotechnologies qui possèdent un potentiel de création dans de nombreuses industries, comme l'industrie pharmaceutique, l'aérospatiale, l'informatique quantique, les dispositifs médicaux, l'industrie textile, etc. (Letaba *et al.*, 2014). Il existe un ensemble de ces TE particulièrement utiles pour les systèmes d'information de lutte contre l'incendie. Citons les cartes digitales spécialisées, les drones dédiés, les robots terrestres, les systèmes d'information d'urgence et les vêtements de protection intelligents (Schlauderer *et al.*, 2016). Citons aussi les différentes technologies mises en œuvre dans le « cloud » et plus particulièrement l'apprentissage mobile par le cloud (Cloud Mobile Learning) (Al-Arabi *et al.*, 2015). Les technologies de stockage de l'énergie en sont un autre exemple, notamment celles qui transforment l'électricité en d'autres formes (chimique, mécanique) ainsi que les « smart grids » (Wang *et al.*, 2017).

La plupart des auteurs s'accordent à considérer qu'une des caractéristiques principales de ces TE est la complexité. Ainsi Huang et Yuan (2010) affirment que les TE ont un degré d'incertitude élevé et une complexité certaine. C'est cette dernière qui différencie les TE des technologies existantes. Ces TE constituent des systèmes complexes, et plus généralement des systèmes d'information (SI) complexes.

Une question importante est relative à la capacité des organisations à évaluer l'apport de ces TE et les risques associés. L'objectif principal de cet article est précisément de proposer une démarche d'évaluation des SI à base de technologies émergentes tenant compte de la complexité qui les caractérise et d'illustrer cette démarche par l'évaluation de la « blockchain », qui constitue aujourd'hui l'innovation disruptive la plus importante. Le reste de l'article est organisé de la façon suivante. Le deuxième paragraphe est consacré à un état de l'art sur la complexité, les

¹ <https://www.technologyreview.com/lists/technologies/2016/>

systèmes complexes, et les méthodes d'évaluation de technologies émergentes considérées comme des systèmes complexes. Notre approche de l'évaluation des technologies émergentes est présentée dans la troisième partie. La partie suivante est dédiée à l'application de cette démarche à la technologie émergente que constitue la « blockchain ». Nous concluons dans la dernière partie et présentons quelques voies de recherche futures.

2. Etat de l'art

La revue de littérature synthétisée dans cette partie porte sur la notion de complexité, caractéristique importante des SI à base de technologies émergentes. La théorie des systèmes est aussi rappelée, notamment parce qu'elle intègre la complexité. Enfin, les méthodes d'évaluation des SI complexes sont résumées.

Il existe plusieurs définitions de la complexité qui reflètent les différents systèmes concernés et leurs contextes. Lloyd (2001) présente une trentaine de définitions de la complexité ainsi que les mesures qui y sont associées.

Baccarini (1996) considère que la complexité possède deux dimensions : organisationnelle et technologique. La complexité organisationnelle est définie par l'ampleur de la différenciation existant à l'intérieur des différents éléments qui constituent l'organisation. La complexité technologique est relative à la variété et à la diversité des tâches, ainsi qu'à l'interdépendance existant entre elles (Fitsilis, 2009). Geraldi et Adlbrecht (2007) caractérisent la complexité par trois dimensions : la confiance, le fait et l'interaction.

Dans la théorie des systèmes, la complexité est assimilée à un grand nombre d'éléments qui interagissent et dont le comportement individuel ne peut être prédit. De tels systèmes sont auto organisés et possèdent donc la propriété d'émergence qui permet de générer de nouvelles propriétés (Skyttner, 2005).

La théorie des systèmes complexes considère que ces systèmes sont caractérisés par leur degré d'auto organisation, par la propriété d'émergence, leur caractère innovant, leur capacité d'apprentissage et par leur pouvoir d'adaptation (Sommerville *et al.*, 2012). La recherche dans ce domaine se focalise sur des notions telles que l'émergence de propriétés collectives, le comportement chaotique, l'auto-organisation, la redondance, la récursion, etc. (Holland, 2006). Certains auteurs considèrent que l'interdépendance et la taille ont un effet important sur la complexité. D'autres mettent davantage l'accent sur l'incertitude (Perminova *et al.*, 2008).

Nous considérons que les technologies émergentes sont des systèmes complexes car ils possèdent toutes les caractéristiques et les attributs décrits plus haut. Leur complexité est due notamment au nombre important de composants, aux types de relations existant entre les composants, aux types de relations entre le système et son environnement, ainsi qu'à la propriété émergente de ces systèmes. Ces derniers peuvent être vus comme composés d'un grand nombre d'agents auto-organisés, qui interagissent de façon dynamique et non linéaire (Kim et Kaplan, 2006).

Plus généralement, nous les assimilons à des SI complexes qui doivent répondre rapidement à des changements dans les dimensions sociotechniques et à des besoins non fonctionnels. Ils doivent aussi prendre en compte les changements des exigences des utilisateurs, des besoins organisationnels (processus métiers et règles de gestion), des interdépendances accrues entre les individus, les organisations et les technologies. Ils doivent aussi intégrer les changements de l'environnement de ces systèmes tels que ceux des marchés, des organismes de régulation, de la concurrence, des menaces et des opportunités. Enfin, ils doivent permettre de faire face aux changements générés par les solutions propriétaires, les logiciels libres et par l'émergence de nouvelles applications et de nouveaux protocoles. Plus généralement, ils doivent résoudre les problèmes qui découlent des évolutions rapides des technologies de l'information qui constituent une dimension importante des systèmes d'information complexes.

Les changements précédents caractérisent fortement les systèmes d'information complexes, du fait notamment de :

- leur taille : ce sont souvent des systèmes de grande taille en termes de composants et sous-composants, de sites, de volume, de nature, et de rapidité de l'information.
- leurs interconnexions : en effet, le comportement du système émerge de l'interaction entre les composants, générant un comportement difficile à caractériser.
- les demandes évolutives : l'environnement dans lequel évolue le système requiert des adaptations sur une échelle de temps plus petite, comparée à celle nécessaire au développement et au déploiement.
- les technologies évolutives : les architectures matérielles et logicielles ainsi que les protocoles évoluent rapidement.

Il existe plusieurs approches de gestion de la complexité, notamment la théorie des systèmes complexes adaptatifs (Holland, 2006), la théorie réductionniste (Emmeche *et al.*, 1997) et la théorie des systèmes (Skyttner, 2005). Tout comme nous avons considéré que les technologies émergentes sont des systèmes d'information complexes, nous considérons aussi que la théorie des systèmes est la plus adaptée pour faciliter la gestion de la complexité. En effet, la complexité du système est liée à sa structure, à son comportement et à sa relation avec l'environnement. Ces trois éléments sont précisément les caractéristiques principales de la théorie des systèmes (Sommerville *et al.*, 2012).

(Mala et Cil, 2011) décrivent de nombreuses mesures de la complexité ainsi que leurs limitations. Les métriques généralement retenues sont fondées sur la taille du système considéré, son entropie, l'information, la hiérarchie des coûts et l'organisation. D'autres métriques sont proposées, notamment celles fondées sur les contributions de Shannon. Des exemples d'évaluation de systèmes complexes sont présentés par (Owen, 2007). Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation des technologies. (Tran et Daim, 2008) proposent une taxonomie de ces méthodes en différenciant celles applicables au domaine public de celles qui sont utilisées dans le domaine privé. En ce qui concerne le domaine public, des méthodes fondées sur la théorie des systèmes telles que la modélisation structurelle ou la dynamique des

systèmes ont donné lieu à des techniques de type Electre, Spin ou Qsim. Une autre famille de méthodes relève de l'analyse d'impact. Un exemple en est Delphi (Linstone et Turoff, 1975). L'analyse des scénarii est une démarche qui permet de mesurer l'impact de l'interaction de technologies composant un portefeuille de technologies. C'est le cas du modèle Scenario-Based Assessment Model (SBAM) (Banuls et Salmeron, 2007). L'évaluation des risques liés à la technologie est une approche qui tend à mesurer les « synergies négatives », et qui a donné naissance au développement de la méthode ITRACS (Internet-Accessible Technology Risk Assessment Computer System) (Wilhite et Lord, 2006). Mentionnons les méthodes d'analyse de décision dont l'approche la plus représentative est celle proposée par (Saaty 2004) fondée sur l'analyse hiérarchique multicritères.

A la différence des approches décrites plus haut, notre démarche d'évaluation des technologies émergentes intègre trois cadres conceptuels : les systèmes d'information complexes, la théorie des systèmes et la norme ISO 25000 (SQuaRE)² pour la qualité des logiciels.

3. Notre approche

Notre objectif est de définir une approche de guidage pour l'évaluation d'un système d'information à base de technologies émergentes. Dans une première section, nous présentons la hiérarchie multicritères que nous avons définie pour organiser l'évaluation. Dans la deuxième partie, nous décrivons l'approche proposée.

3.1. Une hiérarchie multicritères pour l'évaluation d'une technologie émergente

Appréhender une technologie émergente comme un système d'information complexe requiert l'analyse des différentes caractéristiques de ce système. De nombreuses définitions d'un système ont été proposées. Dans une première étape de notre approche, nous nous sommes concentrés sur la forme canonique proposée par Jean-Louis Le Moigne (Le Moigne, 1990). Un système obéit à un but. Il a une structure, qui peut être statique ou dynamique ou qui peut comprendre une partie statique et une partie dynamique. Le système est en interaction avec son environnement. Enfin, un système n'est pas figé : il évolue dans le temps. Ainsi, on peut évaluer une technologie émergente comme un système qui a une structure, un environnement et une évolution. Nous proposons d'organiser notre hiérarchie selon ces trois caractéristiques. Qu'il s'agisse du système lui-même, de son environnement ou de son évolution, de nombreux facteurs entrent en jeu pour le caractériser et pour l'évaluer.

La théorie des systèmes d'information complexes s'appuie sur la perspective sociotechnique des systèmes d'information qui permet de distinguer les facteurs sociaux des facteurs techniques. L'adjectif social est à prendre ici au sens large. Il

² <http://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards>

englobe tant la dimension organisationnelle que la dimension humaine ou encore la dimension économique et financière. De même le facteur technique couvre tous les aspects de la technologie émergente, tant matérielle que logicielle par exemple. Ainsi notre deuxième niveau d'organisation de la hiérarchie consiste à appréhender le système, son environnement et son évolution d'une part sur le plan social et, d'autre part, sur le plan technologique.

L'organisme de normalisation ISO a élaboré une norme appelée SQuaRE (Software QUALity Requirements and Evaluation) pour l'évaluation des logiciels. Cette norme s'appuie sur un modèle de qualité en huit dimensions qui sont principalement techniques (six) et fonctionnelles (deux). Issues du modèle de Mc Call (Mc Call, 2002), elles matérialisent les trois types de facteurs (fonctionnement, évolutivité, maintenabilité) préconisés par ce modèle. De cette façon, elles sont aussi en alignement avec les dimensions préalablement considérées pour la description du système d'information complexe.

Ainsi, en considérant successivement, la technologie émergente, comme un système, puis comme un système sociotechnique, puis comme un logiciel, on obtient une hiérarchie en trois niveaux principaux qui peuvent ensuite être affinés (Figure 1). Les huit dimensions de la norme SQuaRE (pertinence fonctionnelle, utilisabilité, fiabilité, sécurité, portabilité, maintenabilité, performance, compatibilité) sont ensuite subdivisées en une trentaine de sous-caractéristiques qui ont été intégrées à la hiérarchie.

Par un processus de mise en correspondance (« mapping ») et de fusion (« merging »), dans un but de complétude, on a ensuite aligné la hiérarchie avec notamment celles proposées dans (Wu *et al.*, 2011) et dans (Huang et Yuan, 2011). Ce processus nous a permis de :

- 1) Prendre en compte l'environnement économique du système avec les caractéristiques de risque financier, rentabilité, coût total de possession, valeur ajoutée, part de marché.
- 2) Intégrer l'aspect réglementaire avec la conformité à la loi, à la réglementation du secteur et, le cas échéant, aux certifications en vigueur.
- 3) Enrichir la hiérarchie avec l'aspect sociétal dans ses dimensions éthique et environnementale.

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous présentons le modèle résultant à la figure 1.

Le système	Social	Pertinence fonctionnelle	Complétude fonctionnelle		
			Exactitude		
				Adéquation fonctionnelle	
	Technique	Fiabilité		Maturité	
				Disponibilité	
				Tolérance aux fautes	
		Sécurité		Recouvrabilité	
				Confidentialité	
				Intégrité	
				Non-répudiation	
		Performance		Imputabilité	
				Authenticité	
				Efficiences temporelle	
				Utilisation des ressources	
				Capacité	
Son environnement	Social	Humain <i>Utilisabilité</i>	Adéquation aux utilisateurs		
			Reconnaissabilité		
			Facilité d'apprentissage		
			Opérabilité		
			Protection des erreurs		
		Esthétique de l'interface			
				Accessibilité	
		Organisationnel		Maîtrise des compétences techniques	
		Economique		Risque financier	
				Rentabilité	
	Coût total de possession				
			Valeur ajoutée		
			Part de marché		
	Sociétal		Acceptabilité éthique		
			Acceptabilité environnementale		
	Réglementaire		Conformité à la loi	Respect de la vie privée	
			Conformité à la réglementation du secteur	Droit de la propriété intellectuelle	
			Respect des certifications		
Technique		Coexistence			
<i>Compatibilité</i>		Interopérabilité			
Son évolution	Sociale		Adaptabilité organisationnelle		
			Adaptabilité fonctionnelle		
			Adaptabilité réglementaire		
			Adaptabilité sociétale		
	Technique	Portabilité		Adaptabilité	
				Installabilité	
				Remplaçabilité	
		Maintenabilité		Modularité	
				Réutilisabilité	
				Analysabilité	
		Modifiabilité			
		Testabilité			
		Passage à l'échelle			

Figure 1. La hiérarchie multicritères d'évaluation

3.2. La méthode de guidage

Face à une technologie émergente, le décideur doit trouver l'information pertinente pour comprendre les enjeux, les composants, les opportunités mais aussi les risques associés. Il lui faut ensuite organiser cette information pour comprendre et, le cas échéant, se faire aider par des experts pour l'évaluation. Il peut ensuite synthétiser cette information.

Le processus proposé comporte ainsi quatre étapes décrites ci-dessous (Figure 2).



Figure 2. Processus d'évaluation

3.2.1. Alimentation de la hiérarchie d'évaluation

Par un « parsing » pour le moment manuel, l'alimentation consiste à engranger la documentation sur la technologie émergente, qu'il s'agisse de presse professionnelle, de livres blancs, d'articles de recherche techniques ou organisationnels. Toutes les données et informations recueillies à partir de ces sources et jugées pertinentes sont transférées dans les nœuds de la hiérarchie. Ce processus est conduit jusqu'à saturation, c'est-à-dire tant qu'il reste de la documentation non parcourue et/ou que des éléments nouveaux sont encore découverts. C'est une phase qui a pour vocation de rassembler et structurer l'information d'aide à la décision.

3.2.2. Evaluation à l'aide de la hiérarchie

Selon son niveau d'expertise, à l'aide de la hiérarchie, l'utilisateur parcourt cette dernière pour :

- porter un jugement sur chaque aspect renseigné,
- détailler et enrichir la hiérarchie pour les aspects jugés plus pertinents,
- compléter, le cas échéant, les éléments manquants, si nécessaire par interrogations d'experts.

3.2.3. Edition du rapport d'évaluation

Après l'élagage et le raffinement de l'arborescence, un rapport ainsi structuré peut être édité.

3.2.4. Capitalisation de la connaissance

La hiérarchie elle-même peut être enrichie des nouvelles branches obtenues lors de son utilisation, permettant ainsi une capitalisation des nouveaux facteurs d'évaluation proposés par les experts.

Le modèle et la méthode ont été utilisés pour évaluer la blockchain, en vue de montrer la faisabilité et l'utilité de l'approche. Cette illustration est expliquée dans la section suivante.

4. Application à la blockchain

Créés en 2008 par Satoshi Nakamoto, le concept et la technologie de blockchain (BC) est le résultat de la combinaison des mécanismes de cryptographie et de l'architecture pair à pair (P2P). La blockchain est considérée comme une innovation disruptive qui a le potentiel de redéfinir de nombreux secteurs de l'économie, des marchés financiers, des activités publiques et gouvernementales, ainsi que des entreprises de haute technologie. A l'origine, cette combinaison était consacrée au développement du « bitcoin », considérée comme une monnaie virtuelle.

La technologie qui sous-tend le bitcoin s'appelle la blockchain. Cette dernière fonctionne comme une base de données publique ou un grand livre de compte ouvert où sont enregistrés les détails de chaque échange de bitcoins. Cette technologie est conçue de manière à empêcher que le même bitcoin ne soit comptabilisé en double, et ce sans qu'aucun intermédiaire, une banque par exemple, n'intervienne. La blockchain enregistre notamment un ensemble de données comme une date et une signature cryptographique associée à l'expéditeur. Dans le cas du bitcoin, il s'agit du nombre de bitcoins envoyés, mais ce pourrait être l'empreinte cryptographique numérique, appelée « fonction de hachage », de n'importe quel document électronique.

Le principe de la blockchain réside dans le fait que chaque opération se trouve inscrite dans des milliers de Grands Livres de compte, chacun soumis à la scrutation d'un observateur différent. Toute blockchain est un registre (et donc un fichier) existant en de très nombreux exemplaires. Les deux paramètres principaux sont la longueur de la blockchain et le nombre d'exemplaires. Pour le bitcoin, la longueur de la blockchain est passée de 27 Go début 2015 à 74 à la mi-2016. On définit le concept de la blockchain comme un système permettant d'enregistrer des transactions. Ce système est fiable puisqu'il est fondé sur la cryptographie. Il est aussi résilient grâce à l'architecture P2P.

À partir de 2014, le concept de blockchain est étendu à des secteurs nécessitant d'enregistrer des transactions ou des contrats (Tsai *et al.*, 2016 ; Yli-Huumo *et al.*, 2016) . A titre d'exemple, mentionnons le site web Proof of Existence³ qui permet à un utilisateur de télécharger n'importe quel document et d'enregistrer son empreinte pour toujours dans la blockchain. Cette opération permet de prouver que la personne qui a téléchargé le document avait ce document précis en sa possession à un moment donné. Cela peut aussi être utilisé pour prouver que le document n'a pas été modifié depuis ce moment. La startup Stamperya a transformé ce service en une entreprise commerciale qui permet aux autres entreprises « d'affranchir numériquement » n'importe quel document électronique ou e-mail de façon à en établir la propriété et

³ <https://proofofexistence.com/>

l'intégrité. L'organisme fédéral américain de réglementation et de contrôle des marchés financiers, le Securities and Exchange Commission, a approuvé l'utilisation de la blockchain comme registre de propriété d'actions par le site de e-commerce Overstock.com. Ce dernier compte utiliser le système technologique de trading alternatif proposé par To.com pour permettre aux particuliers d'acheter et de vendre des actions. L'attrait de ce système tient au fait qu'il offre un règlement immédiat alors que les sociétés de bourse traditionnelles proposent un délai de règlement de 3 jours. Mentionnons aussi la startup Slock.it dont l'idée est d'intégrer le mécanisme de la blockchain via la chaîne Ethereum dans des appareils physiques. Il existe aussi des applications de type « smart contracts » reposant sur l'Internet des objets. Un nombre d'objets connectés très élevé est envisagé, probablement 30 milliards au total en 2020 (McKinsey). Notons que le 16 février 2016, le NASDAQ a lancé un projet visant à enregistrer le vote des actionnaires sur la bourse de Tallin en utilisant la blockchain. Enfin, le 1er mai 2016, l'État du Delaware a annoncé que la blockchain doit remplacer les écritures de cet Etat.

4.1. Alimentation de la hiérarchie d'évaluation

Le « parsing » des documents relatifs à la blockchain conduit à une sélection et annotation des paragraphes ou phrases ou expressions, annotation qui les rapproche d'un nœud de la hiérarchie. A titre d'illustration, une partie du texte précédent est représenté ci-dessous après parsing. Les annotations sont en italiques. Les phrases non pertinentes sont barrées.

Créés en 2008 par Satoshi Nakamoto, le concept et la technologie de blockchain (BC) est le résultat de la combinaison des mécanismes de cryptographie et de l'architecture pair à pair (P2P) *<Le système/Technique>*. La blockchain est considérée comme une innovation disruptive qui a le potentiel de redéfinir de nombreux secteurs de l'économie, des marchés financiers, des activités publiques et gouvernementales, ainsi que des entreprises de haute technologie *<Le système/Social>*. ~~A l'origine cette combinaison était consacrée au développement du bitcoin, considérée comme une monnaie virtuelle.~~

~~La technologie qui sous-tend le bitcoin s'appelle la blockchain. Cette dernière fonctionne comme une base de données publique ou un grand livre de compte ouvert où sont enregistrés les détails de chaque échange de bitcoins *<Le système/Social>*. Cette technologie est conçue de manière à empêcher que le même bitcoin ne soit comptabilisé en double, et ce sans qu'aucun intermédiaire, une banque par exemple, n'intervienne *<Le système/Technique/Sécurité/Intégrité>*. La blockchain enregistre notamment un ensemble de données comme une date, et une signature cryptographique associée à l'expéditeur. Dans le cas du bitcoin, il s'agit du nombre de bitcoins envoyés, mais ce pourrait être l'empreinte cryptographique numérique, appelée « fonction de hachage », de n'importe quel document électronique *<Le système/Social/Pertinence fonctionnelle>*.~~

Le principe de la blockchain réside dans le fait que chaque opération se trouve inscrite dans des milliers de Grands Livres de compte, chacun soumis à la scrutation d'un observateur différent. Toute blockchain est un registre (et donc un fichier) existant en de très nombreux exemplaires <Le système/Social/Pertinence fonctionnelle>. Les deux paramètres principaux sont la longueur de la blockchain et le nombre d'exemplaires. Pour le bitcoin, la longueur de la blockchain est passée de 27 Go au début de 2015 à 74 à la mi 2016 <Le système/Technique/Performance/Capacité>. On définit le concept de la blockchain comme un système permettant d'enregistrer des transactions <Le système/Social/Pertinence fonctionnelle>. Ce système est fiable puisqu'il est fondé sur la cryptographie <Le système/Technique/Fiabilité>. Il est aussi résilient grâce à l'architecture P2P <Le système/Technique/Sécurité/Non-répudiation>.

À partir de 2014, le concept de blockchain est étendu à des secteurs nécessitant d'enregistrer des transactions ou des contrats. A titre d'exemple, mentionnons le site web Proof of Existence qui permet à un utilisateur de télécharger n'importe quel document et d'enregistrer son empreinte pour toujours dans la blockchain. Cette opération permet de prouver que la personne qui a téléchargé le document avait ce document précis en sa possession à un moment donné. Cela peut aussi être utilisé pour prouver que le document n'a pas été modifié depuis ce moment <Le système/Social/Pertinence fonctionnelle>. La startup Stamperya a transformé ce service en une entreprise commerciale qui permet aux autres entreprises « d'affranchir numériquement » n'importe quel document électronique ou e-mail de façon à en établir la propriété <Le système/Technique/Sécurité/Imputabilité> et l'intégrité <Le système/Technique/Sécurité/Intégrité>. L'organisme fédéral américain de réglementation et de contrôle des marchés financiers, le Securities and Exchange Commission, a approuvé l'utilisation de la blockchain comme registre de propriété d'actions par le site de e-commerce Overstock.com. Ce dernier compte utiliser le système technologique de trading alternatif proposé par To.com pour permettre aux particuliers d'acheter et de vendre des actions <Son environnement/Social/Réglementaire>. L'attrait de ce système tient au fait qu'il offre un règlement immédiat alors que les sociétés de bourse traditionnelles proposent un délai de règlement de 3 jours <Son environnement/Social/Economique/Rentabilité>...

Le résultat de ce « parsing » est reporté sur les figures 2 et 3. Même si le processus de « parsing » est, pour le moment, manuel, son application nous a paru aisée, permettant ainsi l'engrangement rapide d'une documentation abondante. La hiérarchie facilite la structuration et permet une détection immédiate de la saturation de la hiérarchie. Ainsi, que la documentation disponible sur la technologie émergente soit abondante ou non, la méthode est applicable.

4.2. Evaluation à l'aide de la hiérarchie

La deuxième étape consiste à analyser la hiérarchie ainsi renseignée et à porter un jugement sur chaque nœud.

L e s y s t è m e	Social :	<p>Pertinence fonctionnelle :</p> <p>La blockchain enregistre notamment un ensemble de données comme une date, et une signature cryptographique associée à l'expéditeur. Dans le cas du bitcoin, il s'agit du nombre de bitcoins envoyés, mais ce pourrait être l'empreinte cryptographique numérique, appelée « fonction de hachage », de n'importe quel document électronique.</p> <p>Le principe de la blockchain réside dans le fait que chaque opération se trouve inscrite dans des milliers de Grands Livres de compte, chacun soumis à la scrutation d'un observateur différent.</p> <p>Toute blockchain est un registre (et donc un fichier) existant en de très nombreux exemplaires. On définit le concept de la blockchain comme un système permettant d'enregistrer des transactions.</p> <p>À partir de 2014, le concept de blockchain est étendu à des secteurs nécessitant d'enregistrer des transactions ou des contrats. A titre d'exemple, mentionnons le site web Proof of Existence qui permet à un utilisateur de télécharger n'importe quel document et d'enregistrer son empreinte pour toujours dans la blockchain bitcoin. Cette opération permet de prouver que la personne qui a téléchargé le document avait ce document précis en sa possession à un moment donné. Cela peut aussi être utilisé pour prouver que le document n'a pas été modifié depuis ce moment.</p>	Complétude fonctionnelle
			Exactitude
			Adéquation fonctionnelle
	Technique :	<p>Fiabilité :</p> <p>Ce système est fiable puisqu'il est fondé sur la cryptographie.</p>	Maturité
			Disponibilité
			Tolérance aux fautes
			Recouvrabilité
		Sécurité	<p>Confidentialité</p> <p>Intégrité :</p> <p>Cette technologie est conçue de manière à empêcher que le même bitcoin ne soit comptabilisé en double, et ce sans qu'aucun intermédiaire, une banque par exemple, n'intervienne.</p> <p>La startup Stampery a transformé ce service en une entreprise commerciale qui permet aux autres entreprises « d'affranchir numériquement » n'importe quel document électronique ou e-mail de façon à en établir l'intégrité.</p> <p>Non-répudiation :</p> <p>Il est aussi résilient grâce à l'architecture P2P.</p> <p>Imputabilité :</p> <p>La startup Stampery a transformé ce service en une entreprise commerciale qui permet aux autres entreprises « d'affranchir numériquement » n'importe quel document électronique ou e-mail de façon à en établir la propriété.</p>
			Authenticité
		Performance	<p>Efficiences temporelle</p> <p>Utilisation des ressources</p> <p>Capacité :</p> <p>Les deux paramètres principaux sont la longueur de la blockchain et le nombre d'exemplaires. Pour le bitcoin, la longueur de la blockchain est passée de 27 Go au début de 2015 à 74 à la mi 2016.</p>

Figure 2. Evaluation de la blockchain (système)

Cinq types de jugements peuvent être émis : 1) le nœud ne contient pas d'information : cette situation peut traduire un manque d'information sur ce critère ou le caractère non pertinent du critère pour cette technologie, 2) le nœud contient une information factuelle (grisé) à valeur descriptive, 3) le nœud traduit un jugement positif, une opportunité apportée par la technologie (vert), 4) le nœud représente une alerte (orange), informant le décideur sur un aspect nécessitant une surveillance particulière, 5) le nœud représente un risque (rouge) qui appelle à une évaluation renforcée.

S o c i é t a r i e n n e m e n t	S o c i é t a r i e	Humain Utilisabilité	Adéquation aux utilisateurs		
			Reconnaissabilité		
			Facilité d'apprentissage		
			Opérabilité		
			Protection des erreurs		
			Esthétique de l'interface		
			Accessibilité		
		Organisationnel	Maîtrise des compétences techniques		
		E c o n o m i q u e	E c o n o m i q u e	Risque financier	
				Rentabilité :	
	L'attrait de ce système tient au fait qu'il offre un règlement immédiat alors que les sociétés de bourse traditionnelles proposent un délai de règlement de 3 jours				
	Coût total de possession				
	Valeur ajoutée				
	S o c i é t a r i e	S o c i é t a r i e	Part de marché		
			Acceptabilité éthique		
R é g l e m e n t a i r e	R é g l e m e n t a i r e L'organisme fédéral américain de réglementation et de contrôle des marchés financiers, le Securities and Exchange Commission, a approuvé l'utilisation de la blockchain comme registre de propriété d'actions par le site de e-commerce Overstock.com. Ce dernier compte utiliser le système technologique de trading alternatif proposé par To.com pour permettre aux particuliers d'acheter et de vendre des actions	Acceptabilité environnementale			
		Conformité à la loi	Respect de la vie privée		
		Conformité à la réglementation du secteur	Droit de la propriété intellectuelle		
		R e s p e c t d e s c e r t i f i c a t i o n s			
T e c h n i q u e	T e c h n i q u e	Coexistence			
		Interopérabilité			
S o c i é t a r i e	S o c i é t a r i e	Adaptabilité organisationnelle			
		Adaptabilité fonctionnelle			
		Adaptabilité réglementaire			
		Adaptabilité sociétale			
T e c h n i q u e	P o r t a b i l i t é	Adaptabilité			
		Installabilité			
		Remplaçabilité			
	M a i n t e n a b i l i t é	M a i n t e n a b i l i t é	Modularité		
			Réutilisabilité		
			Analysabilité		
			Modifiabilité		
P a s s a g e à l' é c h e l l e	P a s s a g e à l' é c h e l l e	Testabilité			

Figure 3. Evaluation de la blockchain (environnement et évolution)

L'évaluation ainsi menée de la blockchain fait ressortir un manque de documentation sur de nombreux aspects. Un effort de documentation plus complète

permettrait de disposer de plus d'éléments d'évaluation. Toutefois, on constate que plusieurs traits saillants de la blockchain sont mis en évidence notamment les nombreuses opportunités qu'elle représente (opportunité sociale, fiabilité, intégrité, non-répudiation, rentabilité) mais aussi les risques (maturité, respect des certifications). Ainsi, un des freins actuels dans son développement est celui relatif aux certifications que les entreprises, et notamment les banques, doivent respecter.

La confrontation de la documentation avec la hiérarchie permet de faciliter l'évaluation de la technologie. L'utilisateur non expert peut évaluer chaque information renseignée à l'aide de l'échelle de valeurs décrite plus haut. L'expert peut, quant à lui, valider cette évaluation, détailler certains nœuds qu'il juge trop synthétiques et ajouter des évaluations aux nœuds non renseignés, le cas échéant.

En l'état, la hiérarchie ainsi complétée sert de base à l'édition du rapport d'évaluation. Enfin, dans le cas où l'expert a complété la hiérarchie, on peut entériner ou non les nouvelles branches (phase de capitalisation de la connaissance). Dans l'exemple de la blockchain, l'acceptabilité éthique peut être affinée par l'expert et conduire à un enrichissement de la hiérarchie utile pour d'autres technologies émergentes.

5. Conclusion et recherches futures

Nous avons présenté dans cet article une démarche d'évaluation des systèmes d'information à base de technologies émergentes. Cette démarche, fondée sur le constat que les technologies émergentes sont des systèmes complexes, combine trois cadres conceptuels : la théorie sous-jacente aux systèmes d'information complexes, la théorie des systèmes et la norme ISO 25000 dédiée à la qualité des logiciels. Afin de structurer l'évaluation, nous avons développé une hiérarchie multicritères. Nous avons tenu compte des dimensions sociales et techniques pour chaque composante du système à évaluer, notamment le système lui-même, son environnement et son évolution. Ainsi, nous avons retenu des critères tels que la pertinence fonctionnelle pour l'aspect social du système, et la fiabilité, la sécurité et la performance pour l'aspect technique. Pour illustrer cette démarche, nous l'avons appliqué au cas de la «blockchain», qui constitue aujourd'hui une technologie émergente avec de nombreux domaines d'applications.

Nous projetons, en termes de recherche future, d'étendre l'évaluation en associant aux critères des métriques. En effet, chaque critère peut être évalué à l'aide de métriques avec pour objectif d'évaluer la complexité par dimension et de prioriser les actions afin de maîtriser la complexité. A noter que les poids des dimensions d'évaluation et des critères ne sont pas les mêmes selon les secteurs d'activité ou les domaines visés. Ainsi, dans certains cas, l'adaptabilité spatiale (la scalabilité ou passage à l'échelle) peut avoir un poids important. Dans d'autres cas, c'est la conformité réglementaire qui est prépondérante, tout en dépendant des domaines concernés.

Un autre axe de recherche concerne une démarche qui utiliserait le même modèle hiérarchique en rétro-ingénierie, comme trame permettant aux organisations de

déterminer les facteurs les plus importants et les plus en adéquation avec leurs besoins lors du développement de technologies émergentes.

Enfin, une autre voie de recherche consiste à intégrer les techniques d'analyse du langage naturel pour automatiser la phase d'analyse de la documentation.

Bibliographie

- Al-Arabiati, D., Ahmad, W. F. W., Sarlan, A. (2015). Review on critical factors of adopting cloud mobile learning. In *Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), 2015 International Symposium on* (pp. 69-73). IEEE.
- Baccarini, D. The concept of project complexity--a review, *International Journal of Project Management*, vol. 14, issue 4, pp. 201-204, 1996.
- Banuls V.A., Salmeron J.L. A Scenario-Based Assessment Model—SBAM, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 74, Issue 6, July 2007, Pages 750–762
- Cozzens, S., Gatchair, S., Kang, J., Kim, K. S., Lee, H. J., Ordóñez, G., Porter, A. (2010). Emerging technologies: quantitative identification and measurement. *Technology Analysis & Strategic Management*, 22(3), 361-376.
- Day, G. S., Schoemaker, P. J., Gunther, R. E. (2004). *Wharton on managing emerging technologies*. John Wiley & Sons.
- Emmeche, C., Koppe, S. Stjernfelt (1997) F. Explaining Emergence: Towards an Ontology of Levels. *Journal for General Philosophy of Science* 28: 83.
- Fitsilis P., Measuring the complexity of software projects, *World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 2009.
- Geraldi, J., Adlbrecht, G. (2008). On faith, fact, and interaction in projects. *IEEE Engineering Management Review*, 2(36), 35-49.
- Holland, J. H. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(1), 1-8.
- Huang L., Yuan Y. (2010). Evaluation on the industrialization potential of emerging technologies based on principal component and cluster analysis. In : *Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2010 12th International Conference on*. IEEE, p. 317-322.
- Kim, R. M., Kaplan, S. M. (2006). Interpreting socio-technical co-evolution: Applying complex adaptive systems to IS engagement. *Information Technology & People*, 19(1), 35-54.
- Le Moigne, J. L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Bordas, Dunod, 1990.
- Letaba, P. T., Pretorius, M. W., Pretorius, L. (2014). The use of bibliometrics in the development of technology roadmaps: Planning for industrial impact of emerging technologies. In *Engineering, Technology and Innovation (ICE), 2014 International ICE Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
- Linstone, H. A., Turoff, M. (Eds.). (1975) *The Delphi method: Techniques and applications* (Vol. 29). Reading, MA: Addison-Wesley.

- Lloyd S. Measures of complexity: a non exhaustive list. *Control Systems Magazine*, IEEE, 21:7–8, 2001.
- Mala M., Çil I. A Taxonomy for Measuring Complexity in Agent-Based Systems, 2011 IEEE *2nd International Conference on Software Engineering and Service Science*, Pages: 851 – 854.
- McCall, J. A. 2002. Quality Factors. *Encyclopedia of Software Engineering*.
- Owen, C. L. (2007). Evaluation of complex systems. *Design Studies*, 28(1), 73-101.
- Perminova, O., Gustafsson, M., Wikström, K. (2008). Defining uncertainty in projects—a new perspective. *International Journal of Project Management*, 26(1), 73-79.
- Rotolo, D., Hicks, D., & Martin, B. R. (2015). What is an emerging technology?. *Research Policy*, 44(10), 1827-1843.
- Saaty, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of systems science and systems engineering*, 13(1), 1-35.
- Schlauderer S., Overhage S., Weidinger J. (2016). New Vistas for Firefighter Information Systems? Towards a Systematic Evaluation of Emerging Technologies from a Task-Technology Fit Perspective. In *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on (pp. 178-187)*. IEEE.
- Skyttner, L. *General Systems Theory: Problems, Perspectives, Practice*. 2nd ed. Singapore: World Scientific, 2005.
- Sommerville I., Cliff D., Calinescu R., Keen J., Kelly T., Kwiatkowska M., Paige R. (2012). Large-scale complex IT systems. *Communications of the ACM*, 55(7), 71-77.
- Song Y., Yin L., Research on species traits of emerging technologies and the path of formation, *Management*, 2007, 4(2), pp. 211-215.
- Tran T.A, Daim T. A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment, *Technological Forecasting & Social Change* 75 (2008) 139–1405
- Tsai, W. T., Blower, R., Zhu, Y., Yu, L. (2016). A System View of Financial Blockchains. In *Service-Oriented System Engineering (SOSE), 2016 IEEE Symposium on (pp. 450-457)*.
- Wang K., Yu J., Yu Y., Qian Y., Zeng D., Guo S., Xiang Y., Wu J., “A survey on energy internet: Architecture, approach, and emerging technologies,” *IEEE Systems Journal*, no. 99, vol. PP, pp. 1–14, 2017.
- Wilhite, A., Lord, R. (2006). Estimating the risk of technology development. *Engineering Management Journal*, 18(3), 3-10.
- Wu F., Feng H., Huang L. (2011). Reviews on economic effects assessment of emerging technologies. In *IT in Medicine and Education (ITME), 2011 International Symposium on (Vol. 2, pp. 304-308)*. IEEE.
- Yli-Huumo, J., Ko, D., Choi, S., Park, S., Smolander K. (2016). Where Is Current Research on Blockchain Technology? — A Systematic Review. *PloS one*, 11(10), e0163477.