



Analyse des risques et modélisation des systèmes complexes cyber physiques dans leur environnement pour une meilleure résilience

Risk Analysis and Modeling of complex cyber physical systems in their environment for a better resilience

ARBARETIER Emmanuel
AIRBUS PROTECT
emmanuel.arbaretier@airbus.com

DUVAL Carole
EDF
carole.duval@edf.fr

HIBTI Mohamed
EDF
mohamed.hibti@edf.fr

RIFI Mouna
EDF
mouna.rifi@edf.fr

MASSE François
INERIS
francois.masse@ineris.fr

GUYOMARD Frédéric
EDF
frederic.guyomard@edf.fr

BRISSAUD Florent
GRTgaz
florent.brissaud@grtgaz.com

CAIRE Jean
RATP
jean.caire@ratp.fr

1 **Résumé**

2 Cet article rend compte du projet P23-4 lancé par l'IMdR en coopération avec EDF, INERIS, GRTgaz et AIRBUS-PROTECT. L'objectif
3 de ce projet est triple : 1. Initialiser une ontologie des méthodes de traitement des systèmes complexes, basée sur les états de l'art des projets
4 IMdR P11-4 et P20-1. Outre un état des lieux synthétique, il permettra aussi d'identifier les couplages possibles entre elles. 2.
5 « Benchmarker » quelques-unes de ces méthodes sur deux cas d'application intégrant des composantes techniques, cyber, humaines et
6 environnementales. 3. Évaluer et traiter ces deux cas à l'aide de méthodes différentes : intégratrices (MBSE-MBSA, STPA...) et réseaux
7 multicouches. Ces méthodes sont susceptibles d'alimenter des jumeaux numériques ou de prendre en compte certaines informations
8 produites. On comparera les résultats et évaluera un niveau d'assurance, mettant en évidence l'intérêt et les difficultés. Cet article présentera
9 les phases 1 et 2 de la manière suivante : nous évoquerons les éléments les plus innovants d'une ontologie possible des systèmes complexes,
10 notamment à la lumière de ce qu'apportent les sciences du vivant, puis nous évoquerons les méthodes STPA et réseaux multicouches qui
11 doivent inspirer la production des modèles de systèmes dont la conception est optimisée du point de vue de leur résilience cyber physique et
12 environnementale.

13 **Mots Clés - Systèmes, Modèles, Complexité, Résilience, Cybersécurité, Risques Naturels**

14 **Summary**

15 This paper reports results of project P23-4 launched by IMdR in cooperation with EDF, INERIS, GRT-GAZ et AIRBUS-PROTECT.

16 Three objectives are targeted: produce an ontology methods to assess complexity and resilience of systems and based on SOA of IMdR
17 P11-4 and P20-1, benchmark different methods through their application to two systems integrating technical, cyber security and
18 environmental components, and finally compare these methods through different frameworks (MBSE-MBSA, STPA...) as well as multi-layer
19 networks. These methods will feed in Digital Twins. This benchmarking will address most innovative features of system complexity ontology,
20 including Life Science inspired features, putting the emphasis upon

21 *Systems chosen to be modelled are of two kind: a connected automated transportation system and an industrial site producing green H2*
22 *Methods of modelling will address Multi-Layers Networks, Digital Twins including MBSE – MBSA approach and STPA framework as*
23 *well: comparative analysis will be achieved between these different methods of conceptualization and modeling.*

24 *About the output, models produced will take into account greater complexity, which will be represented by the fact it will address most*
25 *of topics of Risk Analysis such as Dependability (Reliability, Maintainability, Availability, Safety), Cyber Security, Danger Analysis and*
26 *Resilience assessment, as well as taking account AI contributors when relevant...*

27 **Key words - System, Model, Complexity, Resilience, Cybersecurity, Environmental Risk**

28 I. INTRODUCTION

29 Dans l'attente du lancement effectif du projet de production de modèles destinés à démontrer les caractéristiques de résilience
30 d'un système complexe, nous évoquons certains des mécanismes « vertueux » susceptibles de construire cette résilience, puis
31 de méthodes susceptibles d'encadrer la production des modèles.

32 II. ONTOLOGIE DES FACTEURS DE COMPLEXITE

33 Les facteurs de complexité adressés par le monde du vivant sont de multiples natures et lui confèrent une résilience
34 particulière vis-à-vis des modifications de l'environnement et des variations autour des interactions avec les différents
35 organismes : nous apportons un éclairage spécifique sur certains d'entre eux qui nous paraissent particulièrement
36 dimensionnants.

37 A. Emergence

38 L'émergence est interprétable comme l'apparition d'une organisation stable plus complexe : à partir d'éléments d'un degré
39 donné, se constituent des entités de degré de complexité supérieure qui ont une organisation caractéristique et identifiable. Il faut
40 que les ensembles constitués par cette organisation soient stables.

41 La stabilité des entités organisées se comprend aisément d'un point de vue sélectif : seules les organisations stables se
42 maintiennent, les autres disparaissent.

43 La nécessité de stabilité implique corollairement celle de l'instabilité et donc de la disparition de certains niveaux
44 d'organisation. On entre là dans une vision évolutionniste et contingente de l'Univers.

45 Dire que le niveau supérieur émerge du niveau précédent signifie à la fois

46 1/ qu'il se constitue grâce au précédent et

47 2/ qu'il a une existence propre et des propriétés différentes

48 3/ qu'il dépend du niveau inférieur, tout en ayant une certaine autonomie

49 4/ qu'il peut disparaître.

50 Les niveaux supérieurs n'ont pas toujours été là, puisqu'ils dépendent de ceux qui les précèdent dans le temps. De plus,
51 l'émergence d'un niveau de complexité supérieure se faisant par auto-organisation, il faut certaines conditions pour que cela se
52 produise. Si ces conditions ne sont pas réunies, elle n'a pas lieu.

53 L'émergence d'un niveau d'organisation est contingente. Elle se produit à un moment de l'histoire de l'Univers, dans une
54 partie de celui-ci. Le mode d'organisation qui a émergé n'est ni omniprésent, ni immuable, ni éternel. Il est présent dans une
55 partie de l'Univers pour une durée donnée. Il peut évoluer ou disparaître.

56 D'un point de vue historique et méthodologique, l'émergence peut se situer comme une alternative puissante, comparée à
57 l'approche analytique. En effet, on peut considérer l'approche analytique comme l'équivalent de l'approche cartésienne. Ce sont
58 des approches déterministes qui proposent de trouver une réponse unique à une question. Une réponse qu'on peut démontrer
59 comme vraie. Cependant, l'approche analytique qui a été adoptée il y a 400 ans grâce aux travaux de Descartes notamment était
60 à l'origine une révolution par rapport à l'approche scolastique qui dominait auparavant et dans laquelle la vérité était définie
61 comme un amalgame des conclusions des philosophes grecs complétées par des vérités édictées par l'Église.

62 Mais malgré son utilité, la méthode cartésienne, qui nous a accompagnés à travers l'époque dite des « Lumières » jusqu'à
63 nos sociétés contemporaines, est une approche qui a aujourd'hui rencontré ses limites. En effet, les sociétés sont devenues
64 tellement complexes que les vérités et les conclusions qu'elles édictent analytiquement et qui sont issues de spécialistes en silo
65 ne permettent plus de décrire la réalité contemporaine avec suffisamment de pertinence pour prendre les bonnes décisions.

66 C'est donc en sociologie et dans le domaine des phénomènes de société, que la notion d'émergence est largement illustrée ;
67 cependant il nous faut nous reporter aux sciences du vivant pour constater que l'émergence est la base de l'évolution des
68 structures vivantes.

69 Enfin, c'est dans le domaine du vivant qu'on observe des mécanismes d'émergence dans toutes les directions, non seulement
70 à travers les directions de dépendance ou propagation au sein d'un même niveau de granularité ou d'abstraction, mais entre
71 niveaux de décomposition différents, à travers les directions ascendantes ou descendantes.

72 Il faut d'abord évoquer les multiples niveaux d'échelle au sein des systèmes vivants : entre les atomes, molécules, cellules,
73 organismes multi cellulaires ; l'objet de base en science du vivant est la cellule à même d'assurer sa propre reproduction, sa
74 réparation, son autonomie vis-à-vis de l'environnement.

75 Il existe également des organismes multi cellulaires ; les cellules forment alors des socio systèmes ; par ailleurs, se présentent
76 des organismes holobiontes, à savoir « polygénomiques » (notre ADN vient des 800 espèces de bactéries qui nous peuplent).

77 Il y a une multiplicité des niveaux d'échelles impliqués les uns dans les autres. Par exemple, le système immunitaire est très
78 diversifié : l'ADN, réarrangé au niveau somatique (trait de diversité prégnant) permet d'obtenir des systèmes cognitifs, de la
79 mémoire, des développements de réseaux.

80 Le nombre d'interfaces dans le système immunitaire est considérable ! Déjà la diversité (un des aspects de la complexité)
81 atteint des sommets : la diversité des espèces de parties variables sur les récepteurs des anticorps atteints des ordres de grandeur
82 de 10^{61} , ce qui produit des potentialités de 10^{15} cellules dans l'organisme ; de cette diversité dépendent les capacités de défense
83 (microbiotes, bactéries, cellules humaines), voire de survie ; il s'agit de tolérer notre flore microbienne et d'éviter les attaques de
84 microbes invasifs non nécessaires ; à cette fin, un système de surveillance permet d'alerter, de faire des réparations locales, mais
85 aussi des améliorations ; de nombreux dégâts sont générés de manière locale.

86 Il faut citer à ce sujet les ouvrages [1] de Philippe Kourilsky « Immunologie moléculaire » ou « Le jeu du hasard et de la
87 complexité : la nouvelle science de l'immunologie » aux éditions « Odile Jacob » sur le système immunitaire : il y expose la
88 « Sûreté de Fonctionnement » du système vivant et il l'aborde de manière très modulaire, avec une juste décomposition
89 fonctionnelle du système immunitaire, ce qui permet de comprendre par exemple pourquoi on peut modéliser le système
90 immunitaire avec les outils de l'analyse fonctionnelle.

91 L'émergence va comprendre tous ces niveaux du domaine du vivant (émergence et immergence) ; l'émergence fait passer
92 des bas niveaux aux niveaux plus macroscopiques ; dans l'autre sens on passe du niveau macroscopique au niveau microscopique,
93 en passant par le niveau mésoscopique ; par exemple, la psychologie peut agir sur des cellules ; plus généralement, il y a des
94 mécanismes de rétroaction aux différents niveaux...

95 Les mécanismes d'émergence se manifestent à travers l'activation de liens complexes : ils se créent et se propagent à travers
96 les différents niveaux de réseaux dynamiques, et produisent des évolutions de ces réseaux à travers des schémas répétitifs ou
97 structures de formes communément dénommées « patterns » ; les comportements collectifs, les aspects cognitifs s'expriment
98 par évolutions collectives des systèmes, intégrant les boucles et les options de diversité ; par exemple, le système immunitaire
99 est à la fois tolérant à l'individu dans son ensemble et à l'holobion (aux 800 espèces de bactéries qui nous peuplent) et qui
100 changent au cours de la vie (flux entrées, sorties...).

101 B. Résilience

102 Le terme « Résilience » est l'un des plus polysémiques qui soient, compte tenu de son utilisation multidisciplinaire,
103 notamment en sciences humaines et sociales, en écologie, en médecine et plus récemment par les économies d'entreprise, et
104 enfin les industriels.

105 Etymologiquement, « Résilience » vient du latin *resilio* : sauter en arrière, revenir en sautant ; il est probable que ce mot soit
106 en relation avec les techniques de guerre romaines (voir Tite-Live).

107 Plus récemment, partant d'une définition purement physique, à savoir la capacité d'un matériau à retrouver ses propriétés
108 mécaniques initiales (notamment l'élasticité) après un choc ou une contrainte de pression, on se sert du terme « résilience » en
109 psychologie pour désigner la possibilité de s'épanouir en surmontant un choc traumatique grave ([2] Cyrulnik, B. (2010).
110 Resilience (pp. 207-216). ERES Odile Jacob 2012), la « capacité à surmonter un traumatisme et/ou de continuer à se construire
111 dans un environnement favorable » ([3] Tisseron S. (2009). La résilience. Presses universitaires de France).

112 En écologie, la résilience décrit la capacité d'un écosystème ou d'une espèce à récupérer un fonctionnement ou un
113 développement normal après avoir subi un traumatisme. D'un point de vue épistémologique, la résilience fait l'objet d'une guerre
114 d'appropriation entre disciplines, voire entre chercheurs d'une même discipline. La conception des écologues propose un
115 changement paradigmatique qui intègre l'exploitation des ressources naturelles et de l'environnement dans une sphère
116 écosystémique limitée et finie ([4] Rees Janicke, M., Month, H., Ranneberg, T. and U. Simonis (1998). Economic Structure and
117 Environmental Impact: Empirical Evidence on Thirty-One Countries in Eus/ und West, Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für
118 Sozialforschung gGmbH (WZB)).

119 Considérant l'économie elle-même comme un système dynamique proche de l'équilibre répondant à la seconde loi de la
120 thermodynamique, son information brute en termes de processus de circulation des capitaux, ou « flux » est directement liée aux
121 interactions gouvernant l'équilibre « stocks-flux » de l'écosphère ([5] Prigogine et Stengers « La fin des certitudes : temps, chaos
122 et les lois de la nature », 1996) dans laquelle elle s'inscrit en termes de finitudes communes.

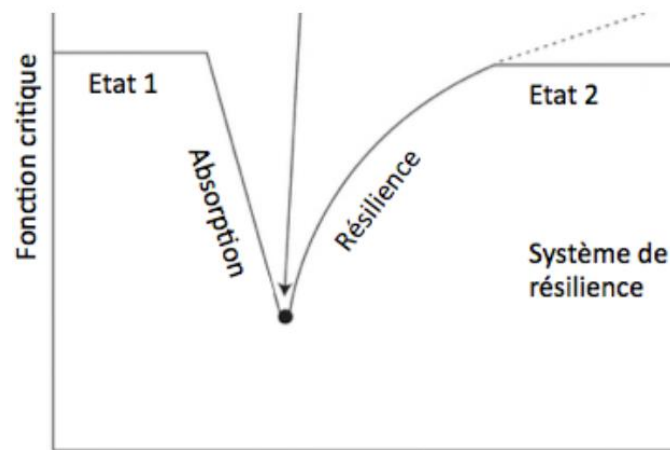
123 En conséquence, ces nouvelles pratiques « éconologiques », terme introduit par Janicke ([6] Janicke (Janicke, M., Month, H.,
124 Ranneberg, T. and U. Simonis (1998). Economic Structure and Environmental Impact: Empirical Evidence on Thirty-One
125 Countries in Eus/ und West, Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB)), sous-tendent des
126 stratégies de minimisation des coûts productifs, et une forme de rationalisation écologique comme alternative à l'investissement
127 dans le « capital travail », pour une meilleure efficacité économique et écologique des modes de production.

128 Ce faisant, la notion de résilience repose sur l'idée qu'après une perturbation, le système n'est pas marqué par un simple retour
129 à l'équilibre, expression d'un comportement de résistance qui définit la notion de résilience réactive, mais réagit souvent au
130 contraire de manière positive, créatrice, grâce à de multiples réajustements, ce que l'on appelle la résilience proactive : on trouve
131 d'ailleurs quelquefois les notions de résilience élastique (retour à l'état antérieur) et de résilience plastique (transformation en
132 une nouvelle forme).

133 La résilience réactive répond au paradigme d'un équilibre unique ([7] Dauphiné et Provitolo, La résilience: un concept pour
134 la gestion des risques. In Annales de géographie (No. 2, pp. 115-125). Armand Colin.2007), où le système met un certain temps
135 pour retourner à son état d'équilibre après avoir été perturbé. Appliqué notamment aux sciences physiques (la mécanique
136 notamment) et à la genèse des sciences de l'environnement, ce concept de résilience décrit l'aptitude d'un écosystème à revenir
137 à l'état d'équilibre après une perturbation. Lallau ([8] La résilience, moyen et fin d'un développement durable ? 2009) rappelle
138 les origines d'une interprétation écologique de la résilience, qui « du fait de la montée des périls environnementaux, [...] fait
139 l'objet d'une attention croissante dans le champ du développement. Il a d'abord été exploré dans le champ des analyses
140 systémiques, celui des systèmes socio-écologiques en particulier ».

141 Les définitions les plus récentes insistent sur le fait d'anticiper, se préparer, résister, voire absorber une situation de crise
142 adverse, afin de s'adapter et retrouver l'état initial, voire l'améliorer.

143 La notion de résilience implique donc que le système assure sa continuité non pas seulement en préservant un équilibre
144 immuable ou en revenant au même état qu'avant la perturbation (état 1, figure 1), mais également en intégrant des transformations
145 dans son évolution (état 2, figure 1). Dans cette dernière acception, la résilience est un concept qui s'intègre dans le cadre
146 théorique des systèmes loin de l'équilibre ([9] Prigogine, 1997 Les lois du chaos, Flammarion, Champs, Paris).



147
148 Figure 1 : Transition des États d'un système : absorption puis résilience vers un nouvel équilibre de long terme (Etat 2)

149 La question fondamentale est de comprendre comment, avant un éventuel basculement, un système adaptatif peut réguler ses
150 évolutions à différentes échelles de temps et à différents niveaux hiérarchiques pour s'adapter à ses contraintes de viabilité du
151 système.

152 Les rétroactions (feedbacks) fournissent a posteriori les paramètres de la structure des opérateurs destinés à assurer la stabilité
153 du système et, parmi ceux-ci, ceux qui minimisent son entropie

154 Le principe de panarchie montre comment, observée à une échelle donnée, la capacité de résilience commencerait par
155 décroître qualitativement et quantitativement, pour peu qu'on se soit mis d'accord sur des métriques applicables, en fonction de
156 la nature du système, pour augmenter ensuite, et décroître à nouveau jusqu'à l'obtention d'un nouvel équilibre entre les
157 contraintes de viabilité du système (état). Les phases de croissance, puis de conservation sont marquées par une évolution lente
158 suivies d'une phase chaotique de changement brutal, qui très vite conduit à une phase de réorganisation, quand des innovations
159 transforment le système.

160 Ainsi, par les ajustements successifs entre les différents niveaux du système lors de la phase de régulation, la panarchie
161 transforme les organisations hiérarchiques en structures dynamiques en attribuant des propriétés non-linéaires et multi-
162 connectées aux différents éléments et sous-éléments du système à toutes les échelles, temporelles et spatiales.

163 Lorsqu'un changement survient, la résilience offre des principes de bases et orientations pour le renouveau et la
164 réorganisation d'un système. Dans une perspective proche, Walker et al. ([10] Resilience, adaptability and transformability in
165 socio-ecological systems. Ecology and Society, vol. 9, 2004) considère la résilience comme « la capacité d'un système à absorber
166 les perturbations et à se réorganiser tout en opérant des changements de manière à conserver essentiellement les mêmes fonctions,
167 structures, identité et rétroactions, — en d'autres termes, pour rester dans le même bassin d'attraction ». Dans tous les cas, plus
168 un système est résilient, plus importante est la perturbation qu'il peut absorber sans basculer vers un état différent.

169 La transposition multi-échelle des effets résiliants du système par effet de panarchie illustre bien l'interdépendance forte des
170 niveaux de décision et d'action dans une période d'évolution rapide, encore appelée « fenêtre d'opportunité » dans la perspective
171 évolutionnaire Aubin ([11] La mort du devin, l'émergence du demiurge. Essai sur la contingence, la viabilité et l'inertie des

172 systèmes, Beauchesne Paris, 2010), qui fait alterner des « niveaux d'énergie », traduits par les transformations socio-éco-
173 environnementales et les décisions afférentes des échelles locales aux échelles globales des territoires.

174 Ainsi, la capacité de résilience d'un méta-système peut dépendre de la disparition de l'un ou de plusieurs de ses sous-systèmes
175 défaillants, comme « Par exemple, le réseau de métro (méta-système) maintiendra son service malgré la non-reconstruction d'une
176 station (sous-système) détruite par un attentat ou une inondation. » ([12]: Reghezza-Zitt et Rufat, 2015, Résiliences: sociétés et
177 territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes. ISTE éd. p. 57)

178 Dans certains cas, le système proposera au final un service dégradé : la résilience entraînera alors la survivabilité par le
179 maintien des fonctions essentielles, quitte à arrêter des fonctions non essentielles.

180 C. Mécanismes de résilience

181 Nous avons défini le concept de résilience et expliqué son utilité. Plusieurs études ont cherché à déterminer les principaux
182 attributs des systèmes résilients. Nous proposons ici d'inventorier les critères de résilience les plus fréquemment proposés en
183 écologie ou en sciences sociales, et de justifier leur pertinence dans le cadre du système alimentaire. Les expressions reprises
184 entre guillemets dans la suite ont été extraites de la référence [13] (Critères de résilience des systèmes - Les Greniers
185 d'Abondance : resiliencealimentaire.org)
186

187

188 • Diversité

189 « Darwin postule dès 1859 qu'un écosystème est d'autant plus stable que le nombre d'espèces qu'il abrite est élevé. Depuis,
190 de nombreuses études ont démontré l'existence d'un lien entre la biodiversité d'un écosystème et sa résilience. Les explications
191 proposées à cette observation sont multiples : la diversité permet la redondance de certaines fonctions écologiques essentielles,
192 l'émergence d'interactions à de multiples échelles, la multiplicité des réponses consécutives à une perturbation donnée...

193 En matière de production agricole, la diversité s'avère être un critère essentiel de résilience à toutes les échelles. À l'échelle
194 génétique, la diversité permet une meilleure adaptation des espèces cultivées au terroir, à la nature et la richesse des sols, et aux
195 fluctuations climatiques locales.

196 Dans une parcelle agricole, la diversité des variétés et des espèces cultivées permet une moindre propagation des maladies et
197 des ravageurs. De nombreuses associations culturelles permettent de bénéficier de services mutuels entre espèces (protection,
198 échange de nutriments), qui améliorent la résilience de l'ensemble.

199 A l'échelle d'une ferme, la diversité des productions diminue la vulnérabilité de l'exploitation face aux fluctuations des
200 conditions extérieures (météo, parasites, prix de vente), qui affectent inégalement chaque récolte. Par exemple, la culture parallèle
201 de sorgho et de maïs est traditionnelle dans de nombreux pays du sud : le premier résiste bien à la sécheresse tandis que le second
202 attire moins les oiseaux. Plus généralement, la polyculture-élevage occupait la majeure partie du monde paysan jusqu'à la fin du
203 XIX^{ème} siècle et illustre bien l'importance de la diversité des activités du point de vue de la résilience.

204 A l'échelle d'une région, la diversité des filières agricoles permet à un territoire de ne pas être sinistré en cas de mauvaise
205 récolte. Spécialisation et concentration font courir des risques accrus d'épidémie ou de crise sectorielle, comme ce fut le cas dans
206 le sud-ouest de la France en 2017 lors de l'épidémie de grippe aviaire, qui a conduit à l'abattage préventif de 800 000 canards.

207 Enfin, à l'échelle d'un pays, la diversité des productions et des régimes alimentaires limite la gravité des pénuries lorsqu'elles
208 surviennent. La dépendance à une source de calories prépondérante compte parmi les causes principales des famines. Ainsi, la
209 famine de la pomme de terre, qui ravagea un million d'Irlandais (sur une population de 8 millions) entre 1845 et 1852, affecta
210 bien moins durement d'autres régions d'Europe, où le mildiou sévit pourtant dans des proportions similaires. Les paysans
211 irlandais tiraient en effet plus des trois quarts de leur ration calorique des pommes de terre, faute de tenures suffisantes pour
212 diversifier leurs cultures.

213 La diversité compte donc parmi les critères de résilience importants du système alimentaire, à toutes les échelles. »

214

215 • Modularité

216 « Un système est dit modulaire lorsque ses différentes composantes possèdent une autonomie relative de fonctionnement. Ce
217 principe est couramment appliqué dans les procédés industriels complexes, pour éviter qu'une malfaçon n'entraîne l'arrêt de la
218 chaîne de production, ou dans l'architecture des systèmes informatiques.

219 Un système modulaire et diversifié a tendance à réagir graduellement et de manière prévisible aux perturbations extérieures,
220 alors qu'un système interconnecté et homogène tend au contraire à réagir de façon subite et imprévisible à une altération de son
221 environnement ; pour autant on ne peut préjuger de leur complexité comparative, du fait des degrés de liberté susceptibles d'être
222 présentés par chacun des modules.

223 Dans un système modulaire, chaque élément (ou sous-système) réagit inégalement aux contraintes extérieures. Le
224 basculement d'un élément vers un nouvel état n'a que peu d'incidence sur l'état global du système. Inversement, un système
225 homogène et interconnecté peut opposer un certain degré de résistance au changement, jusqu'au basculement soudain de

226 l'ensemble du système vers un nouvel état. Le système financier et le réseau électrique européen fournissent des exemples
227 typiques de systèmes qui présentent une vulnérabilité du fait de leur forte connectivité.

228 Appliqué au système alimentaire, nous pouvons distinguer :

- 229 - la modularité « verticale », qui désigne l'autonomie financière, technique et fonctionnelle des différents maillons
230 d'une filière ;
- 231 - la modularité « horizontale », ou spatiale, entre systèmes alimentaires régionaux.

232 Les circuits courts, qui correspondent à un type de commercialisation des produits alimentaires sans intermédiaire (AMAP-
233 « Association pour le Maintien de l'Agriculture Paysanne », marchés de producteurs) ou via un seul intermédiaire (coopérative
234 ou magasin de producteurs) présentent par exemple une grande autonomie verticale et parfois spatiale, même si par définition,
235 ils sont ancrés sur un territoire avec toutes leurs particularités d'éco systèmes à part entière.

236 • **Sous-optimalité**

237 La sous-optimalité d'un système caractérise la propriété d'un système de ne pas avoir été conçu, défini, développé ou
238 dimensionné de manière optimale, au regard d'enjeux économiques ou énergétiques par exemple...

239 La sous-optimalité peut être considérée comme une notion caractéristique d'une bio inspiration systémique.

240 En effet, la sous-optimalité en biologie met en avant : l'inefficacité, l'hétérogénéité, l'aléatoire, la lenteur, la redondance, les
241 incohérences...

242 Remarque : Il s'avère que ces caractéristiques qui peuvent sembler des handicaps au premier regard, peuvent rapidement se
243 transformer en atouts dans des perspectives de long terme et d'exposition multiple à des agressions environnementales ou issues
244 d'écosystèmes différents de celui où le système s'est développé initialement.

245 • **Duplication / Réplication / Transformation**

246 Le vivant met en jeu des processus de duplication / réplication / transformation permanentes.

247 Le vivant, continuellement imparfait, multiplie les variations dans ses mécanismes de reproduction, et seules les variantes
248 adaptées aux contraintes changeantes de l'environnement survivent générations après générations...

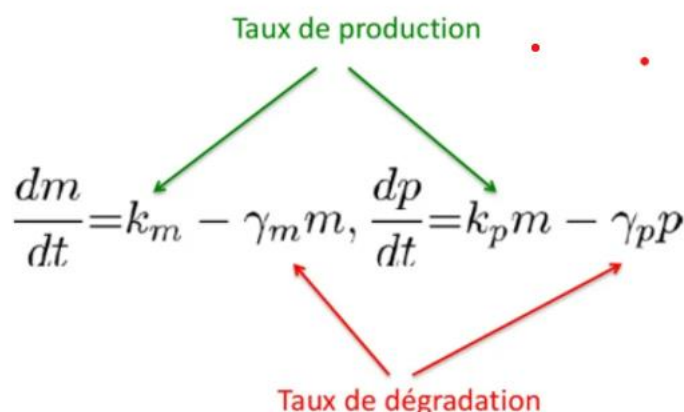
249 Dès Lamarck, la théorie du transformisme se façonne autour de la genèse et l'évolution des organes d'un système vivant :

- 250 - Les organes qu'un organisme utilise intensément vont se développer et se renforcer ;
- 251 - Les organes peu utilisés vont s'atrophier ;
- 252 - Ces caractéristiques acquises se transmettent aux descendants (hérédité).

253 • **Aléatoire / Stochasticité / Redondance**

254 Le vivant, dans ses stratégies de reproduction et d'adaptation, s'avère être en fait un véritable jeu de hasard bien représenté
255 par la notion de stochasticité.

256 Cette stochasticité est appliquée au dogme central de la génétique : les équations dynamiques de variation des populations
257 d'ARNm et de protéines en interaction associent un taux de production et un taux de dégradation dans chaque équation
258 différentielle du système d'évolution globale, comme représenté en figure 2 :



259 Figure 2 : équations d'évolution des populations lymphocytaires au sein du thymus où m désigne la population en ARNm et
260 p la population de protéines, avec leurs taux de production et dégradation respectifs k_m , k_p et γ_m , γ_p .

262 A travers ces variantes produites de manière stochastique, le vivant génère de puissantes stratégies de redondance, qui ne
263 privilégient pas le confort ou la performance individuelle de telle ou telle espèce, mais ouvre la variabilité des représentants

264 générés sur des périmètres de sauvegarde les plus larges possibles, quelles que soient les trajectoires d'avenir qui se présenteront,
265 quitte à essayer des variantes moins appropriées au contexte courant.

266 • **Cyclicité / Circularité**

267 « Dans un écosystème, la production de chaque espèce est la ressource d'une autre : la cyclicité des flux de matières est le
268 mode d'organisation spontané.

269 Les sociétés humaines sont capables de modifier à leur profit – et parfois à leurs dépens – les flux géochimiques et organiques
270 terrestres :

- 271 - Elles prélèvent des ressources non renouvelables à leur échelle de temps (hydrocarbures, minerais) ;
- 272 - Elles prélèvent des ressources naturelles (bois, eau, animaux) à un rythme potentiellement supérieur à celui auquel
273 ces ressources se renouvellent ;
- 274 - Elles rejettent des déchets, c'est à dire des matières qui s'accumulent faute de pouvoir être recyclées par
275 l'environnement ou la société.

276 Le pétrole, principale source d'énergie des sociétés industrielles modernes, est une ressource non renouvelable à l'échelle
277 humaine.

278 L'histoire environnementale est une science visant à étudier les impacts de l'Homme sur son environnement, et le rôle de
279 l'environnement dans l'Histoire humaine. Comme le montrent les adeptes de cette discipline, cette interaction joue un rôle
280 fondamental dans l'histoire de toutes les civilisations passées et modernes. L'altération des cycles naturels provoquée par une
281 surexploitation des sols compte parmi les principales causes du déclin des sociétés humaines.

282 Ainsi, la cyclicité du système alimentaire est un critère important de résilience :

- 283 • tout système reposant sur une extraction de matières supérieure aux capacités de renouvellement se rend par
284 définition vulnérable à leur pénurie ou à toute fluctuation affectant leur disponibilité (cours mondiaux,
285 géopolitique) : le sevrage de l'agriculture cubaine suite à l'effondrement du bloc soviétique en constitue un très bon
286 exemple ;
- 287 • parallèlement, toute matière non « recyclée » s'accumule et exerce une pression supplémentaire sur
288 l'environnement, jusqu'à précariser certains équilibres indispensables au maintien du système (climat, qualité de
289 l'eau, pollinisateurs, etc.). »

290 III. METHODOLOGIES

291 Afin de simuler les mécanismes de résilience précédemment cités sur les systèmes ciblés par notre projet (un site de
292 production d'H2 et un système de transport automatisé), différentes méthodes sont envisagées dans la production des
293 modèles dont les caractéristiques respectives sont rassemblées dans le tableau suivant :

294

	Site de production H2	Système de transport automatisé
Entrées	Architectures Fonctionnelles, Dysfonctionnelles, Physique Modes de défaillances Equations d'états et de transfert Modes opératoires Modèles de Dangers	Architectures Fonctionnelles, Dysfonctionnelles, Physique Modes de défaillances Equations d'états et de transfert Trajectoires de circulation Environnement
Sorties	Analyses de Risques Indicateurs de Résiliences et Cyber résilience Indicateurs Sûreté de Fonctionnement Analyses de Danger Analyse de Dispo de Production	Analyses de Risques Indicateurs de Résiliences et Cyber résilience Indicateurs Sûreté de Fonctionnement Analyse de Sécurité Prise en compte de l'IA
Apports spécifique	Adressage commun de la Performance Opérationnelle, de la Sûreté de Fonctionnement, Cyber sécurité, du Risque Industriel et en même temps des indicateurs de Résilience	Adressage commun de la Performance Opérationnelle, de la Sûreté de Fonctionnement, Cyber sécurité, du Risque Industriel et en même temps des indicateurs de Résilience

Utilisations déjà réalisées	Sûreté de Fonctionnement	Sûreté de Fonctionnement
-----------------------------	--------------------------	--------------------------

295

296 *A. Méthodes MBSE / MBSA*

297 Il s'agit de « virtualiser » tous les points de vue de description d'un système en utilisant des langages dédiés susceptibles
298 d'être soumis à des traitements pertinents :

- 299 • Les exigences et contraintes performantielles ;
- 300 • Les aspects 3D, géométriques de distribution dans l'espace ;
- 301 • Les connaissances de simulation « multi physique » ;
- 302 • Les informations de simulation comportementale fonctionnelle et dysfonctionnelle ;
- 303 • Les perspectives de maintenance et de soutien logistique.

304 On aboutit à une maquette qui paraît complète : « virtual mock up ».

305 Cette méthode aboutissant à des maquettes numériques fonctionnelles pourrait être utilisée dans les domaines liés à
306 l'organisationnel, sociétal, etc.

307 Entrées : modèles CAO 3D et modèles de simulation physiques, fonctionnels et dysfonctionnels ;

308 Les contenus (modèles, systèmes d'équations...) sont fastidieux à produire en amont mais la capitalisation des connaissances
309 et la réutilisation sont à attendre de la notion de bibliothèque.

310 Sortie : simulations ciblées, visualisation physique des comportements statiques, cinétiques ou dynamiques... animation du
311 système à travers des scénarios prévus ou redoutés ;

312 Les apports spécifiques de la méthode concernent les aspects simulation de multiples points de vue : géométrique, cinétique,
313 dynamique, physique, fonctionnels, dysfonctionnels.

314 De très nombreux outils et langages existent et couvrent différents aspects de cette méthode de virtualisation générale de la
315 connaissance, ainsi que de la production de jumeaux numériques.

316 Les exemples d'applications concernent les domaines de l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire et l'industrie.

317 Ce concept de « jumeau numérique » est de plus en plus expérimenté en couplage avec les outils et environnements
318 informatiques développés au titre de l' « usine 4.0 » (« factory 4.0 »).

319 Les industriels attendent beaucoup de la notion de bibliothèque : capitalisation des connaissances, réutilisation modulaire des
320 modèles, etc.

321 *B. Méthode STPA*

322 La méthode STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processes) incluant la méthode d'analyse STPA (Systems
323 Theoretic Process Analysis), a été initiée dans les années 2000 avant de connaître un développement au cours de la dernière
324 décennie. La méthode est apparue suite à l'analyse de différents accidents (plus de 500 accidents) ayant mis en cause une erreur
325 de procédés et non une défaillance matérielle.

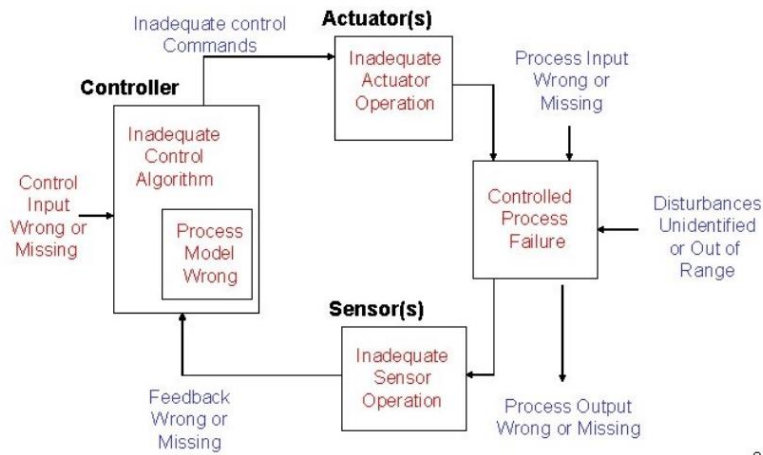
326 Citons l'évolution de STPA vers STPA-Sec en 2013 pour inclure dans l'analyse les actes de malveillance, principalement
327 dans le domaine cyber (cf. Limitation and Improvement of STPA-Sec for Safety and Security Co-analysis de Schmittner et al.).

328 Elle a été développée par Nancy Leveson et al. à UCLA et au MIT à partir des années 2005. Publication de l'ouvrage en
329 décembre 2016 : les références énumérées dans la liste suivante développent les enjeux de cette méthode et déroulent de
330 nombreux cas d'application, notamment en mettant en évidence ses bénéfices pour des systèmes empilant de nombreux
331 mécanismes de régulation :

- 332 - [14] NANCY LEVESON : Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety, décembre 2016
- 333 - [15] MARTÍNEZ, Rodrigo Sotomayor. System theoretic process analysis of electric power steering for automotive
334 applications. 2015. Thèse de doctorat. Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division.
- 335 - [16] ALVAREZ, Stephanie, PAGE, Yves, et GUARNIERI, Franck. Analyse des risques pour la conception d'un système
336 de conduite automatisée avec STAMP. Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, 11-13
337 Octobre 2016, Saint Malo, France, 2016.
- 338 - [17] OUEIDAT, Dahlia et EUDE, Thibaut. Apport de la modélisation STAMP dans l'analyse des risques et la prévention
339 des accidents: le cas des opérations d'enlèvement sur les FPSOs. Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté
340 de Fonctionnement, 11-13 Octobre 2016, Saint Malo, France, 2016.
- 341 - [18] ALLISON, Craig K., REVELL, Kirsten M., SEARS, Rod, et al. Systems Theoretic Accident Model and Process
342 (STAMP) safety modelling applied to an aircraft rapid decompression event. Safety science, 2017, vol. 98, p. 159-166.

343 La méthode consiste en une analyse de risques qui se concentre sur l'étude des process à l'œuvre au sein d'un système, aux
 344 conséquences auxquelles ils peuvent mener en cas de mauvaise exécution. La recherche des causes est essentielle. Les causes
 345 que recouvre une mauvaise exécution sont par exemple une exécution trop précoce ou trop tardive, une exécution incomplète...
 346 Similairement aux analyses classiques de sûreté de fonctionnement, la méthode permet d'identifier les fonctions les plus
 347 critiques, d'évaluer les contrôles inappropriés et de mettre en œuvre les actions de maîtrise des risques nécessaires pour prévenir
 348 les futurs risques et leurs conséquences. Cette méthode met l'accent sur les processus de contrôle, et toutes les anomalies et
 349 dysfonctionnements susceptibles de les affecter : la figure 2 suivante montre comment une analyse STPA spécule aussi bien sur
 350 les dysfonctionnements et anomalies concernant les flux que sur ceux concernant les process.

351



9

352 Figure 2 : exemple de représentation STPA adressant une analyse de risques des process et des flux

353 La méthode complète les approches classiques de la sûreté de fonctionnement et d'analyse du retour d'expérience, en ajoutant
 354 aux défaillances matérielles les erreurs de procédés. L'apparition du software et l'automatisation de nombreux procédés par le
 355 biais de contrôleurs informatiques ouvrent la possibilité que le système agisse de manière non sûre par conception, bien que tous
 356 ses composants fonctionnent comme attendu. Il est nécessaire d'analyser le système pour s'assurer qu'il est fonctionnellement
 357 sûr en plus d'être robuste aux défaillances matérielles.

358 La méthode s'applique dans divers domaines industriels (aérien, défense, énergie) reposant sur des procédés automatisés et
 359 pour lesquels il existe un enjeu de sûreté.

360 La méthode s'avère appropriée pour tenir compte de la complexité croissante des fonctions embarquées dans les systèmes
 361 tels que les systèmes interconnectés ou autonomes. La nécessité d'un fonctionnement sûr de ces systèmes est d'autant plus
 362 critique qu'ils contiennent de moins en moins de barrières humaines auxquelles on délègue habituellement la supervision du
 363 système.

364 La méthode permet également d'adresser conjointement sûreté de fonctionnement et cybersécurité, les attaques malveillantes
 365 pouvant être vues comme cause potentielle d'un mauvais contrôle du système, dont les effets se rejoignent avec ceux induits par
 366 les défauts de conception.

367 Le résumé des critères nécessaires au fonctionnement de la méthode :

368 Entrées : Architecture fonctionnelle, lois de contrôle ;

369 Sorties : Analyse des risques procédés et actions de maîtrise des risques.

370 Référentiel théorique : Contrôle-commande, sûreté de fonctionnement, maîtrise des risques.

371 Les types de données requises :

372 La méthode s'appuie sur les données permettant de comprendre le fonctionnement attendu du système et de ses procédés afin
 373 de pouvoir identifier où les écarts pourraient survenir et quels en seraient les effets sur le système. Ces données incluent l'analyse
 374 fonctionnelle, permettant d'explicitier l'architecture des fonctions, la logique de contrôle du système et les lois de commande
 375 visant à être implémentées. Les données d'étude sont complétées par le retour d'expérience d'accidents portant sur des systèmes
 376 similaires, sur lesquels il faut déterminer les causes directes, techniques et profondes. Ce retour d'expérience permet de consolider
 377 la démarche vis-à-vis de vulnérabilités potentielles déjà identifiées et adressées spécifiquement.

378 Dans de nombreux cas, on a besoin d'analyser un retour d'expérience d'accidents, dont il faut déterminer les causes directes,
 379 techniques et profondes.

380 La méthode produit un tableau d'analyses des risques induits par les procédés, récapitulant en particulier les causes des
 381 erreurs, leurs effets et le scénario menant aux conséquences sur le système et ses utilisateurs. Ceci permet ensuite d'évaluer la

382 criticité des risques identifiés afin de pouvoir ajuster si nécessaire la conception des fonctions pour contribuer à maîtriser les
383 risques et garantir un système fonctionnellement plus sûr.

384 La méthode permet, par l'analyse des procédés, d'inclure les aspects fonctionnels d'un système dans la démarche d'évaluation
385 et de maîtrise des risques. Elle permet de compléter celle-ci qui initialement, se concentrait uniquement sur les aspects
386 dysfonctionnels, les conséquences sécuritaires émergeant suite à des défaillances matérielles.

387 La méthode prend tout son intérêt lorsque le contrôle automatisé du système et le logiciel embarqué deviennent
388 prépondérants, ce que l'on observe avec la digitalisation croissante des systèmes, leur interconnexion et l'augmentation de leur
389 degré d'automatisation. L'analyse devient alors nécessaire pour démontrer autant que possible l'innocuité du système, tant dans
390 sa conception que dans le processus de validation permettant d'explicitier les scénarios de tests pertinents à exécuter. On retrouve
391 par ailleurs des démarches similaires, par exemple le standard ISO 21448 (ou SOTIF _Safety Of The Intended Functionality).

392 La méthode requiert avant tout une bonne connaissance du fonctionnement du système étudié. Une certaine expérience est
393 utile pour bien s'approprier la méthode et faire une évaluation des risques au plus juste et éviter les biais d'interprétation menant
394 à sous-estimer ou surestimer les effets. Cependant, il s'agit d'une démarche relativement systématique qui est facile à mettre en
395 place.

396 Les analyses peuvent se faire avec des outils génériques type Excel. Un outillage spécifique se développe progressivement
397 pour permettre d'assister l'application de la méthode en balisant les éléments. Les recherches sont également en cours pour
398 introduire la méthode au sein d'outils MBSE permettant de compléter la description de la conception du système avec les
399 analyses ; l'aéronautique militaire US semblent particulièrement bien avancée sur cet aspect.

400 La méthode a été notamment utilisée et documentée dans l'industrie automobile sur des fonctions d'assistance à la conduite
401 (direction assistée, pilote automatique en embouteillage) ou dans l'industrie pétrolière (opérations sur plate-forme offshore de
402 chargement), dans l'aérien (Allison et al , 2017), dans la défense . Les applications citées sont documentées en références : elle
403 présente également des références dans l'industrie militaire, notamment avec la société THALES, elle est régulièrement utilisée
404 par les industriels sur diverses applications, par exemple EDF.

405 Cette méthode s'avère assez peu coûteuse à mettre en place, exigeant peu d'outillage spécifique ou de connaissances a priori.
406 L'effort le plus important à fournir reste un effort de process pour intégrer ces analyses au cycle de vie du produit, de manière
407 similaire à la sûreté de fonctionnement. Une bonne analyse exige que les concepteurs en soient parties prenantes, ce qui alourdit
408 la phase de conception et tend à faire négliger la bonne implication dans ces analyses. Dans certains contextes, la collecte des
409 informations en entrée peut s'avérer coûteuse si les processus en place ne permettent pas facilement d'y avoir accès naturellement
410 ou par simple interview des différents acteurs.

411 *C. Méthodes à base de graphes*

412 La théorie topologique des graphes remonte aux années 80. Cependant, les applications les plus récentes se sont développées
413 au cours de la décennie écoulée, notamment suite à l'essor de la data science.

414 Cette méthode s'appuie sur la construction d'un réseau sous de forme de graphes et l'analyse de ses propriétés topologiques
415 (proximité, centralités, « clustering »...). L'étude de la distribution des points du réseau permet d'explicitier certaines propriétés
416 du système ou d'anticiper certaines relations implicites entre les nœuds du réseau : elle s'appuie sur les dernières technologies
417 en matière d'analyse de données pour effectuer l'analyse de la topologie du réseau, en particulier en ce qui concerne les
418 algorithmes de classification pour étudier le partitionnement du réseau; elle a été appliquée récemment dans le domaine de la
419 sûreté nucléaire, en modélisant par un réseau les systèmes de sûreté et les séquences accidentelles potentielles pour ensuite en
420 analyser les propriétés topologiques dans le but de déterminer le facteur de risque que présentent les défaillances potentielles.
421 Elle peut s'étendre à de nombreux domaines où les interactions au sein d'un système et avec les éléments extérieurs s'expriment
422 sous forme de réseau complexe sur lequel il est possible d'en étudier la topologie. Cette méthode peut s'appliquer aux analyses
423 de risque de la sûreté de fonctionnement, mais aussi pour la maintenance prédictive, la cybersécurité dans divers domaines
424 technologiques.

425 Les références [19] RIFI, Mouna, HIBTI, Mohamed, et KANAWATI, Rushed. « A Complex Network Analysis Approach for
426 Risk Increase Factor Prediction in Nuclear Power Plants. » in : COMPLEXIS. 2018. p. 23-30, et [20] J.L. Gross and T.W.
427 Tucker, "Topological graph theory, Wiley" in Interscience, 1987 montrent comment les langages de modélisation à base de
428 réseaux sont susceptibles de servir de nombreux cas d'application.

429 Le résumé des critères nécessaires au fonctionnement de cette méthode sont les suivants : les « inputs » sont essentiellement
430 les modèles « système » incluant les interactions (architecture, séquences...), les « outputs » sont les graphes et indicateurs
431 topologiques sur ce graphe, les référentiel théoriques s'appuyant sur la topologie, la théorie des graphes, ainsi que le clustering.

432 Cette méthode requiert les données permettant de caractériser les dépendances au sein d'un système et avec son environnement
433 pour en construire le réseau complexe associée. Ces données peuvent prendre la forme de modèles d'ingénierie système tels
434 que les schémas d'architecture, les diagrammes de séquence ou machines à états : elle produit des indicateurs calculés à partir

de la topologie du graphe, tels que les centralités. Ces indicateurs peuvent ensuite être interprétés pour en déduire des propriétés du système ; elle propose d'exploiter les données d'interactions au sein d'un système en profitant des capacités de la data science pour analyser des réseaux complexes. Il s'agit d'essayer de montrer l'existence de propriétés ou de dépendances que l'on ne peut déduire à partir des connaissances métiers ou des propriétés physiques du système.

Cette méthode offre enfin de nombreuses perspectives de valorisation puisque nombreux sont les systèmes complexes et les relations entre les paramètres de ce système à pouvoir s'exprimer sous forme de graphes dont on peut tirer des informations de l'analyse topologique. Cela peut concerner notamment des propriétés de sûreté de fonctionnement, de maintenance prévisionnelle ou de cybersécurité ; la construction et l'étude topologique d'un graphe est une tâche qui requiert de solides connaissances dans le domaine, et il est nécessaire de posséder une expertise sur le sujet même si certaines étapes peuvent être systématisées par les algorithmes.

Cette analyse topologique s'appuie sur divers algorithmes et outils de visualisation développés pour la data science. Il n'existe pas d'outil spécifique clé en main pour des applications précises : ces algorithmes renvoient par exemple aux graphes de similarité, aux critères de communauté locale, aux approches basées sur la reconnaissance des structures de groupes ou communautés globales, etc...

Cette méthode a été utilisée dans le cadre d'une thèse portant sur l'application de l'analyse des réseaux complexes à la sûreté nucléaire, comme en atteste la référence [21] RIFI Mouna « Modélisation et Analyse des Réseaux Complexes: application à la sûreté nucléaire. 2019. Thèse de doctorat. Sorbonne Paris Cité ».

La mise en œuvre de la méthode est complexe pour la construction du réseau et la recherche des indicateurs pertinents. Une fois cette phase initiale exécutée, les indicateurs produits peuvent être facilement utilisés comme outils d'aide à la décision afin d'optimiser le système. Le réseau peut également être enrichi plus facilement de nouvelles connaissances.

IV. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Le projet étant pour l'instant à peine initialisé, cet article fera l'objet d'une actualisation ultérieure.

REFERENCES

- [1] PHILIPPE KOURILSKY: « Immunologie moléculaire » ou « Le jeu du hasard et de la complexité : la nouvelle science de l'immunologie »
- [2] CYRULNIK BORIS (2010). Resilience (pp. 207-216). ERES Odile Jacob 2012
- [3] TISSERON SERGE (2009). La résilience. Presses universitaires de France
- [4] REES JANICKE, M., Month, H., Ranneberg, T. and U. Simonis, 1998, Economic Structure and Environmental Impact: Empirical Evidence on Thirty-One Countries in Eus/ und West, Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung GmbH
- [5] PRIGOGINE et STENGERS, 1996, « La fin des certitudes : temps, chaos et les lois de la nature »
- [6] JANICKE (Janicke, M., Month, H., Ranneberg, T. and U. Simonis, 1998. Economic Structure and Environmental Impact: Empirical Evidence on Thirty-One Countries in Eus/ und West, Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung GmbH
- [7] DAUPHINE et PROVITOLLO, 2007, La résilience: un concept pour la gestion des risques. In Annales de géographie (No. 2, pp. 115-125). Armand Colin
- [8] LALLAU, 2009, La résilience, moyen et fin d'un développement durable?
- [9] PRIGOGINE, 1997 Les lois du chaos, Flammarion, Champs, Paris
- [10] WALKER and al, 2004, Resilience, adaptability and transformability in socio-ecological systems. Ecology and Society, vol. 9, 2004
- [11] AUBIN, 2010, La mort du devin, l'émergence du demiurge. Essai sur la contingence, la viabilité et l'inertie des systèmes, Beauchesne Paris
- [12]: Reghezza-Zitt et Rufat, 2015, Résiliences: sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes. ISTE éd. p. 57
- [13] Critères de résilience des systèmes - Les Greniers d'Abondance (resiliencealimentaire.org)
- [14] NANCY LEVESON : Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety, décembre 2016
- [15] MARTÍNEZ, Rodrigo Sotomayor. System theoretic process analysis of electric power steering for automotive applications. 2015. Thèse de doctorat. Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division.
- [16] ALVAREZ, Stephanie, PAGE, Yves, et GUARNIERI, Franck. Analyse des risques pour la conception d'un système de conduite automatisée avec STAMP. Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, 11-13 Octobre 2016, Saint Malo, France, 2016.
- [17] OUEIDAT, Dahlia et EUDE, Thibaut. Apport de la modélisation STAMP dans l'analyse des risques et la prévention des accidents: le cas des opérations d'enlèvement sur les FPSOs. Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, 11-13 Octobre 2016, Saint Malo, France, 2016.
- [18] ALLISON, Craig K., REVELL, Kirsten M., SEARS, Rod, et al. Systems Theoretic Accident Model and Process (STAMP) safety modelling applied to an aircraft rapid decompression event. Safety science, 2017, vol. 98, p. 159-166.
- [19] RIFI, Mouna, HIBTI, Mohamed, et KANAWATI, Rushed. A Complex Network Analysis Approach for Risk Increase Factor Prediction in Nuclear Power Plants. In : COMPLEXIS. 2018. p. 23-30.
- [20] J.L. Gross and T.W. Tucker, Topological graph theory, Wiley Interscience, 1987
- [21] RIFI, Mouna. Modélisation et Analyse des Réseaux Complexes: application à la sûreté nucléaire. 2019. Thèse de doctorat. Sorbonne Paris Ci