



Architecture et ingénierie pour des systèmes ingéniérés soutenables

Architecture and engineering for sustainable engineered systems

CLAUDE Francis
Enseignant-chercheur
ESTP
Grande école d'ingénieurs de la
construction
Cachan, France
fclaud@estp.fr

RODRIGUES Patrice
Senior Expert Sûreté de Fonctionnement
Thales Corporate Engineering
Thales
Vélizy-Villacoublay
patrice.rodrigues@thalesgroup.com

GAUTHIER Éric
Senior Expert Architecting et Ingénierie des
systèmes
Thales Corporate Engineering
Thales
Vélizy-Villacoublay
eric.gauthier@thalesgroup.com

Résumé — Cet article s'interroge sur la prise en compte de la soutenabilité écologique par les ingénieurs dans les systèmes à ingénierer grâce aux outils conceptuels et méthodologiques de l'architecture des systèmes et de l'ingénierie des systèmes. En matière de sûreté de fonctionnement, la durabilité concerne l'aptitude d'un système technique à fonctionner tel que requis, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à sa fin de vie utile. En ce qui concerne le développement économique et social, depuis 1980, l'expression en anglais « *sustainable development* » a été traduite par « développement durable » et non par « développement soutenable ». Or, l'Union européenne (UE) souhaite à l'horizon 2050 « une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive, garantissant à horizon 2050 : la neutralité carbone, une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources et que personne ne soit laissé de côté ». Ainsi, au-delà d'un développement exprimé comme un état qui dure et qui plus est dans une vision intergénérationnelle, il est davantage attendu, aujourd'hui, un développement économique et social avec une utilisation soutenable des ressources (notamment énergétiques, minérales, biologiques et l'eau) ainsi qu'une décarbonation des activités humaines de production et de consommation. C'est le sens de la feuille de route de l'Union européenne avec le Pacte Vert et de la stratégie nationale bas carbone de la France (SNBC) pour atteindre, pour la France, la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français. L'architecture des systèmes et l'ingénierie des systèmes sont directement concernées par les enjeux de cette nouvelle économie.

Pour l'AFNOR, les normes volontaires, lancées à l'initiative d'acteurs de marché, offre un cadre de référence pour fournir des lignes directrices, des prescriptions techniques ou qualitatives pour des produits, services ou pratiques au service de l'intérêt général. Ainsi, il est possible de trouver des normes qui tiennent compte de principes d'architecture et d'ingénierie des systèmes. L'article, après un état de l'art de ce nouveau système réglementaire européen et de la SNBC, étudie des normes de différents secteurs dans leur prise en compte de la complexité, des impacts positifs et négatifs, des risques et opportunités ainsi que de la soutenabilité écologique toujours malheureusement exprimée dans la traduction de l'ensemble des textes par « durabilité » ou « facteurs de durabilité ». L'enjeu pour les auteurs étant de se placer du point de vue d'ingénieurs-managers qui souhaitent répondre aux enjeux de ces nouvelles réglementations grâce aux différents dispositifs normatifs étudiés et notamment dans leur prise en compte de la « double importance relative » où « double matérialité ». Ce nouveau concept d'importance relative est envisagée de deux points de vue : celui des risques et des opportunités pour l'entreprise (matérialité financière) et celui des incidences des activités de l'entreprise sur son environnement économique, social et naturel (matérialité d'impact) ainsi globalement, sur la manière dont les questions de durabilité influencent l'entreprise et celles dont elle dépend.

Mots-clés — *architecture des systèmes, ingénierie des systèmes, normes volontaires, double incidence relative*

Abstract — "This paper examines the integration of ecological sustainability into engineering design through the application of systems architecture and systems engineering concepts and methodologies. With regards to dependability, durability refers to a system's ability to operate as intended, under specified conditions of use and maintenance, until the end of its useful life. In terms of economic and social development, the English term 'sustainable development' has been translated into French as 'développement durable' since the 1980s. However, the European Union's vision for 2050 envisions a modern, resource-efficient, and competitive economy that guarantees carbon neutrality, decoupled economic growth from resource use, and leaves no one behind. Beyond a mere enduring state, contemporary development seeks to ensure the sustainable use of resources (particularly energy, minerals, biological, and water resources) and the decarbonization of human production and consumption activities. This is the essence of the European Union's Green Deal and France's low-carbon strategy, both aimed at achieving carbon neutrality by 2050. Systems architecture and engineering are directly implicated in the challenges posed by this new economy."

For AFNOR, voluntary standards, launched at the initiative of market players, offer a framework for providing guidelines, technical or qualitative requirements for products, services or practices in the service of the general interest. Thus, it is possible to find standards that take

into account the principles of architecture and systems engineering. The article, after a state of the art of this new European regulatory system, studies the system engineering standards of different sectors in their consideration of complexity, risks and opportunities as well as sustainability always unfortunately expressed in the translation of all texts by “durability” or “durability factors”. The challenge for the authors is to place themselves from the point of view of engineer-managers who seek to evaluate projects and portfolios of industrial projects from the angle of “double materiality” perspective according to which the notion of double materiality is considered from two perspectives: that of risks to the company and that of the impacts of the company's activities on people and the environment and how sustainability issues affect the company.

According to AFNOR, voluntary standards, initiated by market players, provide a framework for guidelines, technical or qualitative specifications for products, services, or practices that serve the public interest. As such, it is possible to find standards that consider principles of systems architecture and engineering. This article, following a state-of-the-art review of this new European regulatory system and the SNBC, examines standards from various sectors in terms of their consideration of complexity, positive and negative impacts, risks and opportunities, as well as ecological sustainability, which is unfortunately always expressed in the translation of all texts as “durability” or “durability factors”. The challenge for the authors is to adopt the perspective of engineer-managers who wish to address the challenges of these new regulations through the various normative devices studied, particularly in their consideration of “double materiality”. This new concept of materiality is considered from two perspectives: that of risks and opportunities for the company (financial materiality) and that of the impacts of the company's activities on its economic, social, and natural environment (impact materiality), as well as, overall, how sustainability factors issues influence the company and how it depends on them.”

Keywords — systems architecture, systems engineering, voluntary standards, double materiality

INTRODUCTION

Dans le cadre de la réindustrialisation et de la transition écologique des entreprises cet article se place du point de vue d'ingénieurs - managers qui souhaitent répondre aux enjeux de différentes régulations en matière de durabilité avec le nouveau concept de double matérialité avec des dispositifs normatifs reconnus de longue date. Il est supposé que ces dispositifs intègrent les outils conceptuels et méthodologiques que sont l'architecture et l'ingénierie des systèmes que des ingénieurs-managers utilisent au quotidien.

En effet, l'architecture des systèmes et l'ingénierie des systèmes sont aujourd'hui considérées comme les deux disciplines incontournables de l'ingénierie dès lors que l'entreprise souhaite ingénierier des installations ou des produits industriels manufacturés souvent considérés comme des systèmes complexes et eux-mêmes développés dans le cadre de projets et/ou de programmes complexes. Un programme est vu ici comme un ensemble de projets interconnectés et un portefeuille de projets comme un ensemble de programmes où de projets distincts. Par ailleurs, les risques associés à ces installations et/ou produits manufacturés doivent être acceptables des points de vue sociétal et environnemental. En parallèle, la prise de risque de l'entreprise, pour les développer, doit lui être profitable des points de vue économique, comptable et financier et contribuer positivement à la conservation, au maintien voire au renforcement de son avantage compétitif.

De plus, à la prise en compte de la complexité des systèmes, s'ajoute celle de l'incertitude quant à la réalisation des différents objectifs. Complexité et incertitude apparaissent comme des invariants à intégrer par les ingénieur-managers pour satisfaire à la fois l'ensemble des exigences d'une maîtrise d'ouvrage et celle de l'entreprise. Néanmoins, le changement climatique et la dégradation de l'environnement ayant été identifiés par l'Europe comme une menace existentielle pour elle-même et le reste du monde, le Pacte Vert a pour ambition de transformer « l'Union Européenne en une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive, garantissant : la neutralité carbone à horizon 2050, une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources et que personne ne soit laissé de côté » (UE, 2024). Pour réaliser l'ambition européenne d'être le premier continent neutre pour le climat, une importante vague de régulation a été engagée en Europe pour orienter les flux d'investissements afin de permettre aux activités humaines de production et de consommation de continuer à se développer dans ce nouveau cadre.

Bien que les disciplines de l'architecture des systèmes et de l'ingénierie des systèmes sont étroitement liées, nous pouvons préciser que si l'ingénierie couvre l'ensemble du cycle de vie d'un système, l'architecture système se concentre spécifiquement sur les exigences (d'une maîtrise d'ouvrage par exemple), la structure, les états, l'organisation et la dynamique du système (une brosse à dent électrique, un missile,,)

L'ingénierie des systèmes : une évolution historique et conceptuelle.

L'ingénierie des systèmes, discipline née de la complexification croissante des systèmes techniques, a connu une évolution marquée par des avancées théoriques et méthodologiques majeures. Son histoire est intimement liée à celle des grands projets du XXe siècle, tels que le projet Manhattan ou le programme Apollo. Ces mégaprojets ont mis en évidence la nécessité d'une approche systémique pour maîtriser la complexité et garantir leurs réussites. Initialement centrée sur les systèmes physiques, l'ingénierie des systèmes s'est progressivement étendue aux systèmes logiciels et aux systèmes sociotechniques. La création de l'IEEE Systems Engineering Committee en 1962, puis de l'INCOSE en 1990, a marqué des étapes importantes dans la structuration de cette discipline et dans la diffusion de ses bonnes pratiques. Nous avons identifié ci-dessous quelques périodes clés :

1930s: L'émergence de systèmes complexes tels que les avions, les centrales électriques et les réseaux de communication a nécessité une approche plus holistique de la conception et de la gestion. 1940s: Pendant la Seconde Guerre mondiale, le développement de projets massifs comme le projet Manhattan et le programme Apollo a mis en évidence l'importance d'une coordination et d'une intégration efficaces entre différentes disciplines d'ingénierie. 1950s: Le terme "ingénierie des systèmes" a été officialisé et des méthodologies formelles ont commencé à être développées pour guider la conception et la gestion de systèmes complexes. 1960s et 1970s: L'ingénierie des systèmes a gagné en importance avec l'avènement de l'informatique et des systèmes spatiaux qui ont introduit de nouveaux niveaux de complexité et d'interdépendance. Depuis les années 1980: L'ingénierie des systèmes s'est étendue à une large gamme de domaines, y compris le développement de logiciels, la gestion du cycle de vie des

produits et l'ingénierie des systèmes d'information. Il est important de noter que la naissance de l'ingénierie des systèmes n'est pas un événement unique avec une date de début précise, mais plutôt un domaine en constante évolution qui a émergé en réponse aux défis croissants de la conception et de la gestion de systèmes complexes.

Les principales organisations qui ont contribué à son essor sont :

1947: Création de la RAND Corporation, qui a joué un rôle pionnier dans le développement de méthodologies d'ingénierie des systèmes. 1950: Les Bells Labs développent le concept depuis plusieurs années et G.W. Gilman, Directeur de l'ingénierie des systèmes, donne probablement le premier cours universitaire dans le domaine au Massachusetts Institute of Technology telle qu'elle est comprise aujourd'hui (Blanchard, Fabrycky, 1998). 1962: Création de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Systems Engineering Committee, qui est devenu un forum important pour l'avancement de l'ingénierie des systèmes. 1990: Création de l'International Council on Systems Engineering (INCOSE), l'organisation professionnelle internationale pour l'ingénierie des systèmes. Le volet Français de l'INCOSE est assuré depuis 1998 par l'Association Française d'Ingénierie Système (AFIS). L'ingénierie des systèmes continue d'évoluer aujourd'hui pour répondre aux défis croissants de la conception et de la gestion de systèmes de plus en plus complexes et interconnectés.

A ce jour, en résumé, l'ingénierie des systèmes est une discipline qui vise à concevoir, développer, intégrer, gérer et mettre en œuvre des systèmes complexes. Ces systèmes peuvent être aussi bien des produits physiques (comme une voiture, un avion, un satellite) que des systèmes logiciels (comme un système d'information, une application mobile) ou encore des systèmes socio-techniques (qui combinent des éléments humains, techniques et organisationnels). Les attributs sur lesquels sont évalués les activités de l'ingénierie des systèmes sont : la performance du système technique, la qualité, le coût et les délais (Krob, 2009).

L'architecture des systèmes : le socle de l'ingénierie des systèmes.

Au cœur de l'ingénierie des systèmes se trouve l'architecture des systèmes. Celle-ci fournit une représentation structurée du système, en décomposant ce dernier en éléments constitutifs et en définissant leurs relations. Pour l'architecture des systèmes complexes, les travaux pionniers de H. A. Simon, prix de la Banque de Suède en sciences économiques en 1978 et qui a occupé la Chaire Richard King de la computation et de psychologie à l'Université Carnegie Mellon, ont été regroupés sous le vocable des sciences de l'artificiel. Les sciences de l'artificiel ou sciences de la conception s'appliquent aux "systèmes artificiels" pour les différencier des "systèmes naturels" (Simon, 1996). Ces sciences fondamentales d'ingénierie regroupent des "nouvelles sciences" comme la décision, l'organisation, l'information, la communication, la régulation, ... apparues à la fin des années quarante. Les bases théoriques ont pu introduire, entre autres, les concepts de complexité, d'émergence, de hiérarchie et d'environnement du système. Les travaux précurseurs étaient ceux qui avaient été produits lors des Conférences de Macy de 1942 à 1953, réunissant des mathématiciens, anthropologues, économistes, psychologues, ... à l'origine des sciences cognitives, des sciences de l'information et de la cybernétique (Pias, 2016). Pour cette dernière, qui est l'étude des mécanismes d'information des systèmes complexes, ils ont été décrits en 1947 par le mathématicien Norbert Wiener (Wiener, 1965) formant la théorie de l'information et de la régulation dans le vivant et la machine. Il a notamment contribué à formaliser les concepts de rétroaction et de régulation, essentiels à la compréhension du comportement des systèmes complexes. De cette théorie, deux courants de recherche et d'applications ont émergés, celles portant sur les comportements humains et notamment avec les travaux de l'École de Palo Alto à l'initiative de Gregory Bateson et celles sur les comportements des machines avec une première description mathématique des automates vu comme des systèmes.

Néanmoins, il est très difficile d'identifier un processus théorique linéaire qui permet d'aboutir aux outils conceptuels et méthodologiques existants. En effet, l'émergence de l'architecture des systèmes est un processus complexe, s'inscrivant dans l'évolution de nombreux domaines, de l'ingénierie à l'informatique en passant par les sciences sociales. Il est difficile d'attribuer à un seul auteur ou à une seule publication le mérite d'avoir "inventé" l'architecture des systèmes. Cependant, plusieurs courants de pensée et de pratiques ont progressivement contribué à structurer cette discipline :

Des racines historiques avec d'une part, les architectes et ingénieurs classiques déterminants depuis l'Antiquité les principes d'organisation spatiale et de construction qui sont des fondations essentielles pour comprendre l'architecture des systèmes modernes et d'autre part, les militaires, car les stratégies militaires ont toujours nécessité une organisation complexe de ressources et d'actions, anticipant ainsi certains principes de l'architecture des systèmes. Les approches théoriques de biologistes comme Ludwig von Bertalanffy (Bertalanffy, 1968), de sociologues comme Edgar Morin (Morin, 1990) et d'épistémologue comme Jean-Louis Le Moigne (Le Moigne, 1994) ont pu introduire les sciences du complexe au carrefour de plusieurs thématiques de recherche (la systémique comme sciences des systèmes, l'ingénierie, l'intelligence artificielle, l'organisation, l'information, la décision, la cognition et la communication). A ces racines historiques et théoriques s'est ajouté un aspect fondamental de l'architecture des systèmes qui est l'informatique. Les pionniers que sont Alan Turing et John VonNeumann avec leurs travaux fondamentaux sur les machines calculantes ont jeté les bases de l'architecture informatique moderne. L'épouse de John VonNeumann, Klari, est probablement la première « codeuse » de l'histoire (Bhattacharya, 2021). Nous pouvons associer, Edsger Dijkstra pour ses contributions à la programmation structurée et à la conception de systèmes d'exploitation qui ont eu un impact significatif sur l'architecture logicielle et David Parnas pour ses travaux sur la modularité et l'information cachée qui ont été essentiels pour la programmation orientée objet et la conception de systèmes complexes. Un autre aspect est celui des développements récents avec 1) la programmation orientée objet qui est un paradigme de programmation, popularisé dans les années 1980 et qui a profondément influencé la façon de concevoir les systèmes logiciels. 2) Les architectures en couches qui organisent les systèmes en plusieurs niveaux d'abstraction et qui sont devenues un standard dans le développement logiciel. 3) Les architectures microservices qui découpent les applications en petits services indépendants et révolutionne la manière de construire des systèmes distribués.

Aujourd'hui, Daniel Krob en a proposé une synthèse actuelle (Krob, 2014). La discipline a gardé le formalisme mathématique de la théorie des automates avec des vecteurs d'entrées, d'états et de sorties et les deux équations fondamentales qui sont :

l'équation de transition (comportement interne) qui décrit comment le système évolue dans le temps et l'équation d'action (comportement fonctionnel) qui décrit comment se déroule, dans le temps, l'action du système sur le monde extérieur. Pour représenter les architectures de systèmes, cette discipline a bénéficié depuis le début du siècle des progrès issus de la modélisation graphique à base de pictogrammes comme SADT (Structured Analysis and Design Technique), SA-RT Structure Analysis with Real Time extensions) ou encore le GRAFCET pour décrire graphiquement les différents comportements d'un automatisme séquentiel (David, Alla, 1989). Néanmoins, conçu comme une méthode normalisée de visualisation, le langage de modélisation unifié, *Unified modeling Language* (UML), initialement pour le développement logiciel avec une conception orientée objet, a permis une avancée significative pour l'architecture logicielle. Son principe appliqué à l'ingénierie s'est développé avec le projet Systems Modeling Language (SysML) de l'Object Management Group (OMG) qui permet l'ingénierie des exigences, les spécifications, l'analyse, la conception, la vérification et la validation de nombreux systèmes et systèmes de systèmes. Les diagrammes permettent les modélisations, des exigences, de la structure, des comportements et transverse notamment avec le diagramme paramétrique, les allocations et la traçabilité. SysML a permis une mise en pratique des vues opérationnelles, fonctionnelles et organiques, déjà présente dans le Grafcet, et inspiré de Le Moigne (Le Moigne, 1994, page 64 et de sa description simple d'un système complexe en neuf niveaux page 66, Fig. 2.7 et qui est davanatge détaillée dans Le Moigne, 1990). Les cadres de référence comme TOGAF (The Open Group Architecture Framework) qui fournit une approche globale pour l'architecture d'entreprise et MODAF (Ministry of Defence Architecture Framework) spécifiquement conçu pour les systèmes d'information des ministères de la Défense complète la boîte à outils méthodologique de l'architecture système. Le cadre théorique proposé par J. L. Le Moigne (Le Moigne, 1990), à la page 28, avait appelé cette démarche "la systémodigraphie" qui est pour l'auteur "la procédure par laquelle on construit des modèles d'un phénomène perçu complexe, en le représentant délibérément comme et par un système en Général".

Maintenant que les disciplines de l'architecture des systèmes et de l'ingénierie des systèmes ont été décrites en introduction, notre propos va être, dans un état de l'art, de faire le point sur les différentes régulations du Pacte Vert et d'en réaliser une synthèse sous forme graphique de façon à identifier leurs finalités et résultats attendus pour résoudre notre problématique qui est de pouvoir utiliser les normes d'ingénierie de façon à répondre à ce nouveau contexte législatif et notamment à tenir compte de ce nouveau concept de double importance relative où double matérialité. Il est supposé que ces normes respectent les principes de l'architecture et de l'ingénierie des systèmes compte tenu du constat empirique de leurs capacités depuis près d'un siècle à :

- être, en évolution constante, nourri par les avancées technologiques et les besoins changeants des organisations ;
- prendre en compte de nouvelles approches et de nouveaux concepts qui émergent régulièrement ;
- savoir garder une nature interdisciplinaire (ingénierie, informatique, sciences sociales) et
- rester fondamentalement collaborative dans la mesure où elles ont démontré leur vocation à impliquer de nombreuses organisations, disciples et personnes différentes (les projets spatiaux et aéronautiques, civils ou militaires pour ne prendre que ces exemples).

Le concept de double matérialité, quant à lui, est une approche élargie de la matérialité. Le concept de **double importance relative** est une évolution de la notion de **matérialité** dans le domaine de la responsabilité sociale des entreprises (RSE) et de la finance durable. Il s'agit d'une approche plus large et plus intégrée qui vise à identifier les enjeux qui sont significatifs, non seulement pour la performance financière d'une entreprise, mais aussi pour les impacts environnementaux et sociaux de ses activités. Contrairement à la matérialité traditionnelle qui se concentre principalement sur les impacts financiers, la double importance relative prend en compte à la fois les impacts financiers et les impacts environnementaux et sociaux. Les enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) sont donc au cœur de cette analyse pour une vision plus holistique de l'entreprise et en mesure de faciliter leur intégration. L'objectif est d'identifier les enjeux "matériels" qui sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur la valeur de l'entreprise à long terme, qu'il soit financier, environnemental ou social. La double importance relative cherche à favoriser une transparence accrue de l'information non financière, permettant aux investisseurs, aux parties prenantes et au grand public de mieux comprendre les impacts de l'entreprise. En identifiant les enjeux les plus importants, les entreprises peuvent prendre des décisions plus éclairées et mieux alignées avec leurs objectifs de développement durable. Ce concept est de plus en plus intégré dans les réglementations, comme la CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) en Europe, qui va imposer à environ 50 000 entreprises européennes ou qui opèrent sur le territoire de l'UE de rapporter sur leurs impacts ESG en utilisant une approche de double matérialité. En résumé, la double importance relative est un concept clé pour les entreprises qui souhaitent adopter une approche plus durable et transparente. En intégrant les enjeux ESG dans leur processus de décision, l'objectif est qu'elles puissent créer de la valeur à long terme tout en contribuant à un avenir plus durable.

En conséquence, après un état de l'art des principaux textes européens et de la SNBC réalisé dans la première section, à la recherche d'une solution exploitable, une seconde section, dans un premier temps, définira l'hypothèse retenue et explicitera la démarche suivie et, dans un second temps, se poursuivra par une analyse critique des connaissances existantes et des compétences directement exploitables par le biais de dispositifs normatifs professionnels. Ces normes, pour les auteurs, constituent un panel représentatif pour potentiellement traiter de points clés susceptibles d'être abordés par l'architecture et l'ingénierie des systèmes. Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau synthétique. Enfin, avant de conclure, une troisième, discutera des résultats obtenus ainsi que des perspectives de recherche envisagées.

I. ÉTAT DE L'ART

Pour cet état de l'art nous avons retenu quatre blocs correspondant à des règlements européens qui définissent un système de réglementations avec des interactions entre eux et dont le point de commun est d'être associé à la finance durable qui va impliquer à la fois les investisseurs (dans des entreprises, des projets, des produits financiers,...), les sociétés d'investissement et les

entreprises : MiFID (*Markets in Financial Instrument Directive*) II, la SFDR (*Sustainable Financial Disclosure Reporting*), la CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) avec les ESRS (*European Sustainability Reporting Standards*) et enfin, le règlement taxonomie et le règlement taxonomie climat. À ce système nous avons ajouté la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) de la France.

A. Préférences en matière de risques et préférences en matière de durabilité

Pour la protection des investisseurs, la réglementation MiFID II avait introduit une exigence clé à respecter par les institutions financières, que ce soit pour de la gestion de portefeuille pour le compte de tiers ou le conseil en investissement vis-à-vis de leurs prospects ou clients : le caractère approprié (*suitable*) des services d'investissement et des instruments financiers. L'article L.533-13 II et III du code monétaire et financier précise ainsi : "les informations nécessaires concernant les connaissances et l'expérience de leurs clients, notamment de leurs clients potentiels, en matière d'investissement en rapport avec le type spécifique d'instrument financier ou de service, leur situation financière, y compris leur capacité à subir des pertes, et leurs objectifs d'investissement, y compris leur tolérance au risque, de manière à pouvoir leur recommander les services d'investissement et les instruments financiers adéquats et adaptés à leur tolérance au risque et à leur capacité à subir des pertes". La CFB, la Commission Fédérale des Banques en Suisse, résumait le principe de l'exigence par : "il faut définir avec le client sa propension (subjective) au risque et sa capacité (objective) à le supporter et, par conséquent, son profil de risque" (CFB, 2008).

En 2021, un règlement délégué (UE) 2021/1253 (UE, 2021a) de la commission modifie le précédent règlement (EU) 2017/565 en ce qui concerne "l'intégration des facteurs de durabilité et préférences en matière de durabilité dans certaines exigences organisationnelles et conditions de fonctionnement des entreprises d'investissements" (OJEU, 2021). Ainsi, dans le processus de prise de décision, en sus des "préférences en matière de risque" s'ajoute des "préférences en matière de durabilité". L'exigence d'investissement approprié (*suitable investment*) est étendu à celle d'investissement soutenable (*sustainable investment*). Ces dernières s'expriment comme le choix d'un client, où d'un client potentiel, d'intégrer ou non, un ou plusieurs instruments financiers dans son investissement.

Un des objectifs du plan d'actions publié par la Commission en 2018 est de réorienter les flux de capitaux vers des investissements durables. Un autre objectif visé est que les entreprises d'investissements tiennent compte en permanence non seulement de tous les risques financiers pertinents, mais aussi de tous les risques pertinents en matière de durabilité qui, lorsqu'il surviennent, sont susceptibles d'avoir une incidence négative effective ou potentielle sur la valeur d'un investissement. Cette approche devant permettre de répondre aux craintes d'"écoblanchiment", une pratique qui consiste à obtenir un avantage concurrentiel déloyal en recommandant un instrument financier comme respectueux de l'environnement où durable alors qu'il n'en respecte pas les normes de base.

Cette évolution dans la prise en compte des préférences des investisseurs (Risques vs. Durabilité) met en lumière le fait que les réglementations financières ont longtemps mis l'accent sur la protection des investisseurs en exigeant que les produits financiers proposés correspondent au profil de risque de chaque client. Ainsi, la directive MiFID II a formalisé entre autres cette notion d'"investissement adapté". Cependant, les préoccupations environnementales et sociales grandissantes ont conduit à une évolution des attentes des investisseurs. Le règlement délégué (UE) 2021/1253 a introduit une nouvelle dimension : les "préférences en matière de durabilité". Désormais, les conseillers en investissement doivent non seulement s'assurer que les produits financiers proposés correspondent au profil de risque de l'investisseur, mais également qu'ils répondent à ses attentes en matière d'investissement responsable. Cette évolution répond à un double objectif : orienter les flux de capitaux vers des activités économiques plus durables et lutter contre l'écoblanchiment. Un investissement durable désigne un investissement qui prend en compte non seulement les critères financiers, mais aussi les critères extra-financiers (environnementaux, sociaux et de gouvernance).

B. Une classification de tous les produits financiers en matière de durabilité avec la SFDR

Les "acteurs des marchés financiers", "les conseillers" et "les produits d'investissements" sont précisés dans le règlement (UE) 2019/2088 du 27 novembre 2019 (UE, 2019) et, à ce stade, 12 000 acteurs sont concernés pour ceux établis ou faisant commerce au sein de l'UE. Le règlement propose en définition de "facteur de durabilité" : "des questions environnementales, sociales et de personnel, le respect des droits de l'homme et la lutte contre la corruption et les actes de corruption". À ce titre, pour une entreprise, une émission d'obligation, le titre en bourse,... sont des produits d'investissements pour des investisseurs.

Son objet est d'établir des règles harmonisées pour les acteurs des marchés financiers et les conseillers financiers relatives à la transparence en ce qui concerne l'intégration des risques en matière de durabilité et la prise en compte des incidences négatives en matière de durabilité dans leurs processus ainsi que la fourniture d'informations en matière de durabilité en ce qui concerne les produits financiers. Cette régulation dite SFDR pour *Sustainable Finance Disclosure Regulation* a introduit les concepts de :

- "risque en matière de durabilité" (*sustainability risk*) comme un événement ou une situation dans le domaine environnemental, social ou de la gouvernance qui, s'il survient, pourrait avoir une incidence négative importante sur la valeur de l'investissement ;
- les "principales incidences négatives" (*principal adverse impacts*) comme l'effet des décisions d'investissement qui pourraient avoir des impacts négatifs sur les facteurs de durabilité (*principal adverse impacts*).

En substance les articles 6, 8 et 9 permettent une nouvelle classification des produits financiers respectivement pour tous les produits qui ne sont pas axés sur le développement durable, ceux promouvant des investissements où des projets avec des caractéristiques sociales et/ou environnementales positives, pour autant que les investissements soient dans des entreprises avec

des pratiques de bonne gouvernance et enfin ceux ayant des objectifs de durabilité. Cette classification vise à aider les investisseurs à faire des choix éclairés. **Un investissement durable est considéré comme un investissement dans une activité économique qui contribue à un ou plusieurs objectifs environnementaux ou sociaux, à condition qu'il ne porte pas atteinte de manière significative à des objectifs environnementaux ou sociaux (absence de préjudice important – Do No Significant Harm – DNSH) et que les sociétés détenues suivent des pratiques de bonne gouvernance.** Les principes pour l'investissement responsable sont ceux soutenus par les Nations Unies. Ils tiennent particulièrement à tenir compte des questions ESG (Environnement, Social, Gouvernance) dans les décisions d'investissement, dans les politiques et pratiques d'actionnaires et dans les informations publiées.

Concernant les principales incidences négatives c.-à-d. des externalités négatives sur les décisions d'investissement, elles seront évaluées à partir d'indicateurs obligatoires et volontaires. Pour les indicateurs obligatoires, un premier thème regroupe 9 indicateurs pour les Gaz à Effet de Serre (GES), la biodiversité et les déchets et 5 pour un second thème tenant compte des aspects sociaux. Pour les indicateurs volontaires, 2 doivent être choisis sur une liste de 33, toujours avec les mêmes thèmes avec au moins un concernant le climat et l'environnement et autre pour la dimension sociale.

Ainsi, la SFDR va introduire une classification des produits financiers. Elle vise à améliorer la transparence sur les questions de durabilité dans le secteur financier. Elle introduit une classification des produits financiers en trois catégories : **Article 6** : Produits financiers qui ne promeuvent pas de caractéristiques environnementales ou sociales. **Article 8** : Produits financiers qui promeuvent des caractéristiques environnementales ou sociales. **Article 9** : Produits financiers ayant des objectifs de durabilité. Pour chaque produit, les gérants d'actifs doivent évaluer les **principales incidences négatives** (effets négatifs potentiels sur les facteurs environnementaux et sociaux) et les communiquer aux investisseurs. Ces évaluations sont basées sur des **indicateurs ESG** (Environnementaux, Sociaux et de Gouvernance), à la fois obligatoires et volontaires. Par exemple, un fonds d'investissement qui se concentre sur les énergies renouvelables serait classé en article 8 ou 9, tandis qu'un fonds indiciel classique serait classé en article 6.

Néanmoins, si la SFRD concerne les sociétés d'investissement, la CSRD concerne le reporting des entreprises à partir duquel les sociétés d'investissement vont récupérer les données par entreprise puis les agréer compte tenu de leur portefeuille d'actifs financiers.

C. Un renforcement des exigences de publications en matière de soutenabilité par les entreprises avec la CSRD

Le nouveau règlement (EU) 2022/2464 (UE, 2022) concerne la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises. Il amende principalement l'ancien règlement Non-Financial Reporting Directive (NFRD). Cette directive européenne imposait à plus de 11 000 entreprises de réaliser leur reporting extra-financier de façon à suivre et publier leurs performances ESG. Avec la CSRD, 50 000 entreprises européennes ou intervenantes au sein de l'Union Européenne (EU) seraient concernées au terme de son déploiement selon des niveaux de chiffres d'affaires et/ou de bilan. La directive entrée en vigueur au 1er janvier 2024 vise à **améliorer la qualité et la comparabilité des rapports non financiers et de durabilité** des entreprises. Les premiers reporting sont attendus par les entreprises qui vont clôturer leur exercice au 31 décembre 2024.

Les entreprises doivent assurer le reporting sur leur modèle d'affaires et la stratégie économique, les risques, les opportunités, leur gouvernance et leurs objectifs en matière de durabilité. Trois catégories sont prises en compte : les facteurs environnementaux, les facteurs liés aux droits sociaux et aux droits de l'homme et les facteurs de gouvernance rejoignant ainsi les indicateurs de la SFDR et aux trois dimensions de l'ESG. Les informations non financières et de durabilité devront être intégrées dans le rapport de gestion ou séparées mais, dans ce cas, publiées à la même date que le rapport annuel financier. Un rapport d'assurance sur l'information en matière de durabilité devra être effectué par un prestataire accrédité. Les données devront être fournies dans le langage XBRL (*eXtensible Business Reporting Language*) généralement utilisé pour décrire des données financières. Ce rapport d'assurance vise à garantir la fiabilité des informations fournies par l'entreprise.

L'European Financial Reporting Advisory Group (EFRAG) est un groupe consultatif européen sur l'information financière, dont une des ambitions est de rendre le reporting extra-financier aussi fiable que le reporting financier. Une marche a été franchie en juillet 2023 par l'adoption par la Commission des normes ESRS (*European Sustainability Reporting Standards*) (UE) 2023/2772 (UE, 2023) qui ont été publiées en France au Journal Officiel le 7 décembre 2023. Les principes d'un investissement responsable ayant été définis, il était naturel que les normes ESRS reposent sur les trois piliers classiques de la RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises). Elles couvrent 12 thématiques (deux générales, cinq concernant le volet environnemental, quatre le volet social et un avec la gouvernance). Une quarantaine de critères sectoriels devraient être prochainement publiés. Ce travail a été réalisé en concertation avec l'*International Sustainability Standards Board*, créé par la Fondation IFRS (*International Financial Reporting Standards*). Les IFRS sont un référentiel comptable qui définit des règles de comptabilisation avec un ensemble de normes. Le GRI (*Global Reporting Initiative*) a aussi été concerté.

Le point qui se retrouve néanmoins au cœur de notre problématique est la reprise et la précision apportée aux paragraphes 1 des articles 19 bis et 20 bis de la directive 2013/34/UE relative aux états financiers. En effet ils "imposent de publier non seulement des informations dans la mesure nécessaire à la compréhension de l'évolution des affaires, des résultats et de la situation de l'entreprise, mais aussi des informations nécessaires à la compréhension de l'incidence des activités de l'entreprise sur les questions environnementales, sociales et de personnel, le respect des droits de l'homme et la lutte contre la corruption. Ces articles obligent donc les entreprises à **publier des informations à la fois sur les incidences des activités de l'entreprise sur la population et l'environnement et sur la manière dont les questions de durabilité influent sur l'entreprise.** Il s'agit de la perspective de la "**double importance relative**" (*double materiality*), selon laquelle la notion d'importance relative est envisagée

de deux points de vue : celui des risques pour l'entreprise et celui des incidences de l'entreprise. Le bilan de qualité de la publication d'informations par les entreprises montre que ces deux points de vue sont souvent mal compris ou mal appliqués. Il est par conséquent nécessaire de clarifier le fait que les entreprises devraient tenir compte de chacun de ces points de vue particuliers et publier les informations qui, selon les deux points de vue ou un seul, présentent une importance relative”.

Cette perspective de “double incidence relative”, qui est le texte en français du Journal Officiel de l'UE de *double materiality* de la version anglaise, est rentrée dans le langage courant en France par : double matérialité. Du point de vue de la gestion intégrée des risques, cette double perspective est bien connue dès lors que l'on cherche à maîtriser les risques d'un système technique (installation ou produit manufacturé) à l'échelle sociétale. Une perspective tient compte des risques du système technique vers l'extérieur (*inside out*) et une perspective tient compte des risques de l'extérieur du système sur le système technique (*outside in*). Du point de vue de la gestion des risques ces perspectives sont respectivement couvertes par la sécurité industrielle et la sûreté industrielle pour lesquelles le site web de l'Institut de Maîtrise des Risques (IMdR, 2024) en donne des définitions pour l'industrie en général ainsi que pour le nucléaire en particulier.

Néanmoins, si dans le cadre de la sécurité industrielle, l'environnement est pris en compte en sus des travailleurs (pour une installation industrielle) ou un usager (pour un produit ou un service), du public et des biens (matériels et immatériels), dans le cas de l'environnement, c'est majoritairement les exigences en matière réglementaires que l'on va chercher à respecter. Dans le cadre de la sûreté industrielle, ce sont les dangers naturels (inondation, tempête, etc...) qui vont être pris en compte. Ici, le sujet est bien plus large car il s'agit finalement de retenir :

- les deux grands axes de traitement du risque de changement climatique proposé par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) depuis que ce dernier est clairement rentré dans une logique de management des risques avec les deux groupes de travail qui abordent l'atténuation et l'adaptation au changement climatique au GIEC qui sont respectivement le Groupe III (IPCC, 2022a) et le groupe II (IPCC, 2022b) ;
- le niveau de durabilité du système socio-écologique dans lequel l'entreprise où le projet évolue, système vu comme l'intégration du système technique, du système socio-technique et du système socio-économique (Claude et al., 2022) ;
- les impacts positifs et négatifs ainsi que les risques et les opportunités liés aux questions de durabilité ;
- les plans mis en œuvre dont les plans financiers et d'investissement pour assurer la comptabilité du modèle commercial de l'entreprise et de sa stratégie avec la transition vers une économie durable (au sens de l'UE).

La CSRD marque un tournant majeur dans la manière dont les entreprises sont tenues de rendre compte de leur impact sur la société et l'environnement. Elle impose aux entreprises d'adopter une approche plus stratégique et intégrée de la durabilité. Le nombre d'entreprises concernées est bien plus important que pour la SFRD, les exigences sont renforcées (modèle d'affaires, objectifs en matière de durabilité), intégration de la double matérialité, un reporting extra-financier normé au sens comptable avec les ESRS, une vérification des informations publiées par un tiers indépendant et un lien avec la finance durable.

Il reste à identifier dans cet état de l'art les derniers règlements européens qui complètent ce cadre réglementaire dédié à la finance durable mais qui est sa première brique : le règlement taxonomie et le règlement dit Taxonomie Climat.

D. Le reporting taxonomie

Le règlement (UE) 2020/852 du 18 juin 2020 (UE, 2020) porte « sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables ». Il modifie le précédent règlement (UE) 2019/2088. Ce règlement rentré dans le langage courant sous l'appellation « règlement taxonomie » a pour objet d'établir « les critères permettant de déterminer si une activité est considérée comme durable sur le plan environnemental aux fins de la détermination du degré de durabilité environnemental d'un investissement ». Il s'applique autant aux acteurs des marchés financiers ainsi qu'aux entreprises qui sont soumises à l'obligation de publier.

Six objectifs environnementaux sont fixés à l'article 9 avec des précisions apportées à différents articles du texte :

- l'atténuation du changement climatique (article 10) ;
- l'adaptation au changement climatique (article 11) ;
- l'utilisation durable et la protection des ressources aquatiques et marines (article 12) ;
- la transition vers une économie circulaire (article 13) ;
- la prévention et la réduction de la pollution (article 14) et enfin,
- la protection et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes (article 15).

Comme il a été abordé précédemment concernant la SFDR (I-B), pour la classification des actifs financiers, comme une action d'entreprise cotée par exemple, le règlement taxonomie aux fins de la détermination du degré de durabilité environnementale d'un investissement, une activité économique est considérée comme durable sur le plan environnemental si :

- elle contribue substantiellement à un ou plusieurs objectifs environnementaux énoncés ci-dessus ;
- ne cause aucun préjudice important à aucun de ces mêmes objectifs (article 17) ;

- est exercée dans le respect des garanties minimales (principes directeurs de l'OCDE et de l'ONU relatifs aux entreprises et aux droits de l'homme y compris ceux de l'organisation internationale du travail) ;
- est conforme aux critères d'examen technique établis par la Commission sur différents articles du règlement.

Une fois doté d'objectifs caractérisés permettant de définir le degré de durabilité d'un projet ou d'une activité le règlement (UE) 2021/2139 du 4 juin 2021 (UE, 2021b) est venu définir les critères d'examen technique permettant de déterminer à quelles conditions on peut considérer qu'une activité contribue substantiellement à l'*atténuation* du changement climatique et à l'*adaptation* au changement climatique et ne cause de préjudice important à aucun des autres objectifs environnementaux énoncés ci-dessus.

Le texte de 349 pages rentre dans le détail des *critères d'examen critique* pour les deux axes de l'atténuation et de l'adaptation par code d'activité NACE (Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne). Il couvre 70 activités économiques qui représentent 90% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) de l'UE.

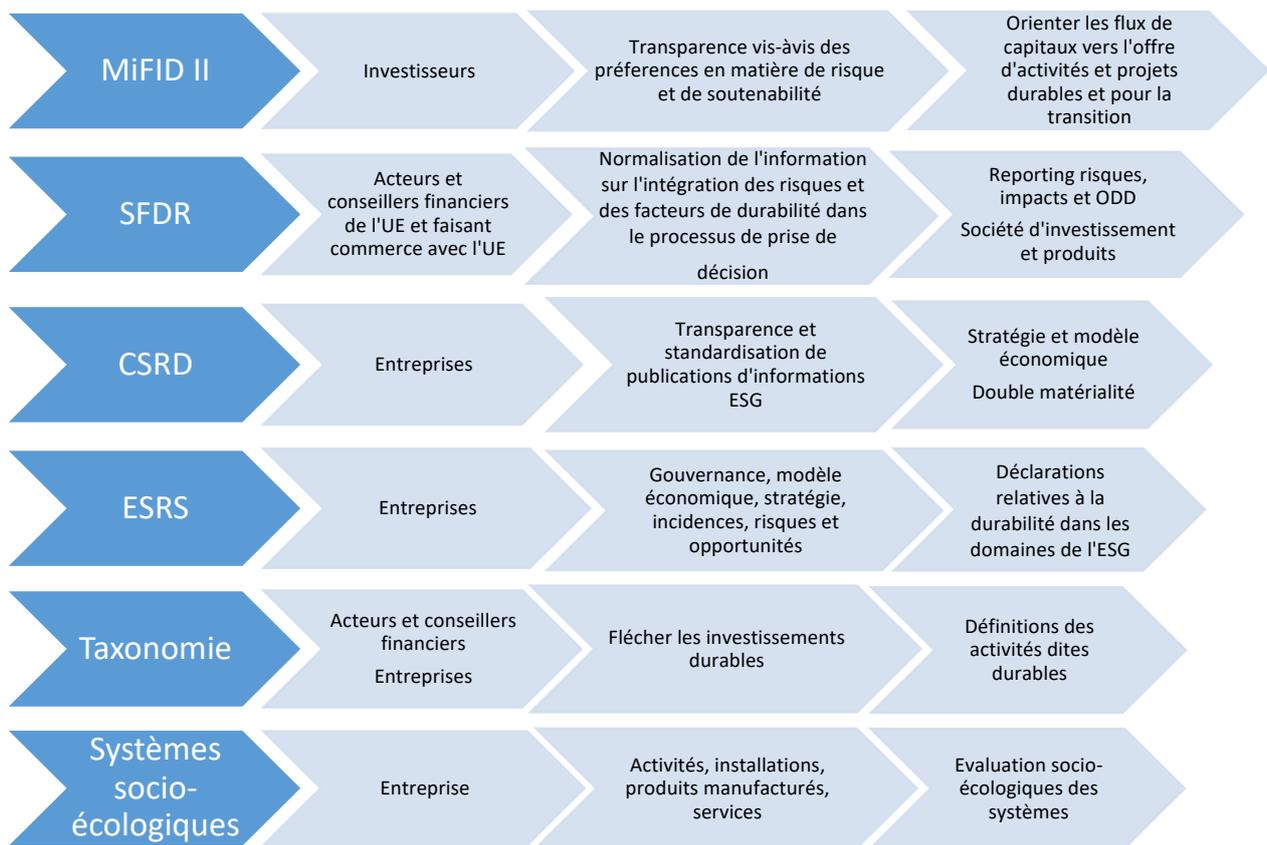
Deux projets de règlements délégués sont actuellement soumis à consultation en ce qui concerne les quatre autres objectifs du règlement taxonomie et sur des critères additionnels concernant les deux premiers objectifs.

La Figure 1 ci-dessous résume pour les cinq règlements principaux étudiés dans cet état de l'art le champ d'application (finance et/ou entreprises), la finalité ainsi que le résultat attendu. Ce « système » de réglementations vient dans les faits venir encadrer l'ensemble du processus décisionnel d'un investisseur et en bas de cette architecture vont se retrouver les systèmes techniques. Néanmoins, en bas de la Figure 1 est mentionné les « systèmes socio-écologiques », concept abordé ci-dessus (I.C). Le GIEC en propose la définition suivante : « *Systèmes intégrés qui comprennent à la fois les sociétés humaines et les écosystèmes, dans lesquels les êtres humains sont considérés comme faisant partie intégrante de la nature. Leurs fonctions sont définies par les relations d'interdépendance entre les sous-systèmes sociaux et économiques et les interactions entre ceux-ci. Leur structure se caractérise par des processus de rétroactions mutuels et met en avant le fait que les êtres humains doivent être considérés comme étant l'une des composantes de la nature, et non comme un élément à part* » (GIEC, 2018).

En effet, ce nouveau cadre réglementaire systémique va nécessiter que l'ingénierie des systèmes dépasse la prise en compte des aspects réglementaires traditionnels de la dimension environnementale associée à la sécurité et la sûreté industrielle (Claude et al., 2022) et qui peuvent s'évaluer de façon binaire conforme ou non-conforme. Dans ce nouveau cadre, il y a une gradation qui va dépendre des préférences en matière de soutenabilité d'une maîtrise d'ouvrage, potentiellement de celles de l'entreprise et de celles des financeurs. On observe déjà des banques, actionnaires non marginales de sociétés cotées qui refusent de financer certains projets. Ainsi, pour les entreprises qui auront des préférences en matière de soutenabilité, le concept de double matérialité devrait devenir la base de la gouvernance des entreprises puisqu'il s'agit *in fine* d'associer performance financière et extra-financière et par conséquent de disposer de processus et d'outils de management des décisions adaptés en ce sens. Les objectifs de cette nouvelle économie devraient permettre d'aboutir « à la neutralité carbone à horizon 2050, une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources et que personne ne soit laissé de côté » (UE, 2024).

Le règlement Taxonomie vise à orienter les investissements vers des activités économiques durables c.-à-d. qu'elles contribuent à au moins un des six objectifs mentionnés. Ce règlement a été complété de façon à établir des critères techniques, notamment pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, critères sur lesquels les entreprises doivent évaluer leurs activités et communiquer sur leur niveau de durabilité. Il vise à aligner les décisions d'investissements avec les objectifs environnementaux de l'UE et encourage une approche plus globale de la performance, intégrant à la fois les aspects financiers et extra-financiers

Fig. 1. Systèmes de réglementations pour le financement durable européen des futurs systèmes techniques et des entreprises



E. La stratégie nationale Bas Carbone de la France

À ce système réglementaire, il est possible d'ajouter la stratégie nationale bas carbone de la France (SNBC) mais que nous ne développerons pas ici. Cette dernière est édictée pour des décideurs publics (MTE, 2020). Néanmoins, pour ce Congrès Lambda Mu 24, un article a réalisé un travail de réduction à l'échelle d'une organisation qui souhaite se corréliser à ses hypothèses et objectifs (Claude et al., 2024). En effet, cette dernière est particulièrement structurante pour l'entreprise qui souhaite s'y conformer notamment en matière de taux de croissance, de population active, de réduction de la consommation d'énergie finale, de décarbonation, d'augmentation des capacités des puits de carbone naturels et, potentiellement selon l'activité, de technologies CSCV (Captage, stockage et valorisation du CO₂).

L'objectif de long terme est la neutralité carbone, elle propose une trajectoire pour y parvenir avec notamment des budgets carbone et des orientations.

La SNBC à 4 objectifs principaux : 1. décarboner la production d'énergie, 2. réduire de moitié les consommations d'énergie. 3. réduire les émissions non liées à l'énergie et 4. augmenter les puits de carbone. Ces objectifs ont été déclinés par secteur.

Au terme de cet état de l'art, comme cela était prévisible, il était peu probable que des règlements européens, même retranscrits en droit national puissent être directement exploitables pour des ingénieurs-managers qui souhaitent répondre aux enjeux de ces nouvelles réglementations avec notamment le nouveau concept de double matérialité.

Dans la seconde partie nous présentons donc plus en détail notre hypothèse de travail et la démarche suivie avant d'étudier plus en détail des normes volontaires associées à des démarches d'architecture et d'ingénierie des systèmes.

II. DEMARCHE SUIVIE ET PRESENTATIONS DES RESULTATS

A. Hypothèse et démarche suivie

En l'absence de solutions directement exploitables, dans un premier temps, notre étude se poursuit par la formulation de notre hypothèse de travail puis présente la démarche suivie. Dans un second temps, l'analyse des connaissances existantes est basée sur les compétences exploitables directement par l'intermédiaire de dispositifs normatifs professionnels disponibles pour l'architecture et l'ingénierie des systèmes.

L'hypothèse de cette recherche est que l'on va trouver des réponses dans les principales normes et référentiel d'architecture et d'ingénierie des systèmes pour satisfaire aux enjeux des nouvelles réglementations, étudiées dans la première partie, grâce à différents dispositifs normatifs et notamment dans leur prise en compte de la « double importance relative » où « double matérialité ». La lecture concerne leur prise en compte effective de la complexité à l'échelle du système socio-écologique qu'une entreprise influence et duquel elle dépend, de la propriété de soutenabilité écologique des systèmes techniques. des risques et opportunités, des impacts positifs et négatifs, de la double matérialité, du système réglementaire européen et enfin de la SNBC.

La propriété de soutenabilité écologique des systèmes techniques a été introduite au Congrès Lambda Mu 23, (Claude, Signoret, 2022) de façon à ce que le système embarque avec lui cette propriété, au même titre que la fiabilité, la disponibilité, la durabilité,...., et qu'elle puisse être identifiable dès l'échelle des composants et matériaux. Elle vise notamment à évaluer la soutenabilité du système technique en termes de flux et de stocks de matières premières, d'énergie et des puits de carbone naturels au regard de la disponibilité, de la maintenabilité et de la durabilité des services écosystémiques (Claude et al, 2022).

Les normes et manuel étudiées sont les standards militaires (MIL-STD) aux États-Unis, celles du Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE), celles d'applications générales du comité technique de l'ISO/IEC JTC/SC7 pour l'ingénierie du logiciel et des systèmes, celles de l'*European Cooperation for Space Standardization* (ECSS) et celles pour le secteur de la construction.

1) Les MIL-STD

a) Présentation générale

Nées dans les années 1960 aux États-Unis pour les besoins du Département de la Défense (DOD) et de la NASA, les premières normes dans le domaine sont probablement celles du DOD, les MIL-STD ou normes militaires américaines de façon à normaliser les plans de gestion de l'ingénierie des systèmes et valider les capacités des contractants. Néanmoins la finalité de l'ingénierie système dans la première norme MIL-STD-499 publiée le 17 juillet 1969 est claire. "Objectifs du gouvernement : cette norme est destinée à répondre aux principaux objectifs suivants :

- définition technique efficace d'un système complet qui reflète les objectifs gouvernementaux pour le système ;
- planification et contrôle efficaces du programme technique pour la conception, le développement, le test et l'évaluation du système.

b) Prise en compte de la complexité

Les MIL-STD sont les premières normes dès les années 1970 à avoir considéré les produits à concevoir et à fabriquer comme des systèmes par l'intermédiaire de programme eux-mêmes considérés comme des systèmes. Aujourd'hui elles ont pris le virage de l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles (ISBM) – Model Based Systems Engineering (MBSE) plutôt que sur des documents. Pour la NASA, elle reste à la pointe dans le développement des approches *Model-Based Systems Analysis and Engineering* (MBSA/E) où d'Architecture dirigée par les modèles avec des approches pour la sécurité des systèmes et dans l'utilisation d'outil comme SysML et maintenant SysML 2.

c) Prise en compte des risques et des opportunités

Concernant les risques, c'est le DOD qui avait introduit l'obligation d'étude de fiabilité auprès des contractants qui souhaitaient répondre aux appels d'offres et qui a donné naissance en France au métier de fiabiliste puis avec l'augmentation des attributs de performance à prendre en compte (disponibilité, durabilité,...) à celui d'ingénieur en sûreté de fonctionnement des systèmes. Mais plus généralement, c'est dans la norme MIL-STD-882B du 30 mars 1984, pour les exigences de sécurité des systèmes, que l'on voit apparaître les premières matrices pour restituer des analyses préliminaires de dangers (*Preliminary Hazard Analysis*). On note, que ces matrices restituaient des risques pour des systèmes techniques statiques (dont la défaillance ne dépend pas de l'ordre de défaillance de ses composants) et sur la base notamment d'étude par arbre de défaillances où arbres de fautes qui permet d'avoir un niveau de confiance relativement élevé dans le niveau de probabilité calculé des événements redoutés. Plus tard, ces matrices seront même étendues pour la gestion des risques dans les phases du programme.

Aujourd'hui, pour les systèmes techniques l'approche tient compte d'une approche globale du point de vue de leur sûreté de fonctionnement (*dependability*). Pour les programmes, l'approche tient compte de la gestion des risques (permet de respecter le « coût souhaité » et le « devrait coûter ») et de la gestion des opportunités (permet d'atteindre le « devrait coûter »). Les phases sont intégrées avec une traçabilité organisée entre les activités d'atténuation des risques et le *Work Breakdown Structure* (WBS), l'*Integrated Master Plan* (IMP) axé sur les événements qui présentent chaque étape et les réalisations connexes nécessaires à l'achèvement du programme, l'*Integrated Master Schedules* (IMS) pour la planification et enfin l'*Earned Value Management* (EVM) pour intégrer les objectifs du périmètre de travail technique, les coûts et le calendrier dans un plan unique et cohérent. Différents outils de gestion des risques sont proposés et la représentation sous la forme de matrices reste la norme. Les portefeuilles de risques de programmes ne sont pas abordés. (DoD, 2017).

d) Prise en compte de la propriété de soutenabilité écologique

Nous n'avons trouvé aucune ressource pour cette partie.

2) Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace

a) Présentation générale

Le BNAE travaille sur des recommandations générales pour soutenir les métiers liés au domaine de l'aéronautique et de l'espace. Certaines sont complètement dédiées au management de programme. On peut citer des recommandations qui abordent le sujet de l'ingénierie des systèmes complexes, de leur sûreté de fonctionnement et de leur soutien, ainsi que le management des risques :

- La RG AERO 00050 : « Management de programme - Maîtrise technique de la définition et de la réalisation d'un produit. Concepts, processus, méthodes et système documentaire », créée en 2023, cette RG est dédiée au développement de bout-en bout d'un produit.

- La RG AERO 00039 : « Management de programme – Recommandation pour la mise en œuvre du management des risques et des opportunités », mise à jour en 2021
- La RG AERO 00027 : « Management de programme – Guide pour la maîtrise de la Sécurité de Fonctionnement », mise à jour en 2023
- La RG AERO 00076 : « Management de programme - Recommandations pour la mise en œuvre du soutien logistique intégré », mise à jour en 2023.

Ces deux dernières sont théoriquement en support de la première.

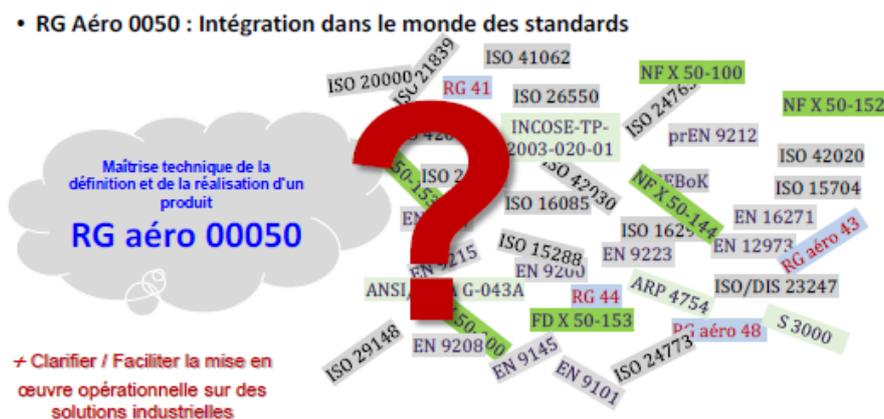
Au sein du BNAE la commission “Management de Programme et Ingénierie des systèmes” couvre les domaines suivants : le management de programme sur l’ensemble du cycle de vie du produit l’ingénierie des systèmes et la qualité des produits.

b) Prise en compte de la complexité

Pour le BNAE la complexité ne se maîtrise pas, elle s’organise pour être maîtrisée. Cette assertion implique des itérations et des remises en question systémiques. Les RG Aéro offrent un cadre qui doit permettre de gérer la complexité d’un programme et de son ingénierie tout au long de son cycle de vie. La gestion de la complexité organisationnelle ne dépend pas seulement du cadre proposé. C’est pourquoi les RG sont un outil pour la maîtriser au mieux, à haut niveau, compte tenu des intérêts de chacune des parties prenantes : le Client acquéreur, l’Industriel et l’Utilisateur.

La RG 00050 a été pensée par la Commission de Branche (CB PRO) « management de programme et ingénierie des systèmes » pour chapeauter le cadre normatif national et international, comme le présente la Figure 2 ci-dessous. Elle décrit les processus et activités techniques qui interviennent sur une partie du cycle de vie d’un produit et de systèmes qui en dépendent, c’est-à-dire de l’expression initiale du besoin jusqu’à la production en intégrant les processus transverses liés aux qualifications et certifications. La complexité intervient dès que les parties prenantes sont en interactions.

Fig. 2. RG Aéro 00050 du CB PRO management de programme et ingénierie des systèmes



c) Prise en compte des risques et des opportunités

Les risques sont abordés par le programme, mais pas du point de vue produit. La Sécurité de Fonctionnement et son Soutien Logistique sont des réponses à certains risques orientés essentiellement produit, solutions. Néanmoins, il existe la recommandation pour la mise en œuvre du management des risques et du management des opportunités avec la RG Aero 00039. Les risques et opportunités sont traités de façon distinctes par l’intermédiaire de « matrice de criticité des risques » et de « matrice d’amplitude des opportunités ». La criticité comme le produit des conséquences et probabilités est proposée pour mesurer les risques. Au-delà du fait de continuer à utiliser des matrices de risques conçues pour restituer des analyses par arbre de défaillance sur des événements redoutés associés à des systèmes techniques, cette approche est étonnante, car traditionnellement le concept d’opportunité dans la littérature concerne le niveau stratégique du projet où de l’entreprise. La recherche d’opportunités permet dans ce cadre de maintenir voire renforcer l’avantage compétitif de l’entreprise. Dans le cadre proposé par le BNAE, comment va faire une entreprise pour saisir une opportunité qui comporte des risques ? Faut-il intégrer une matrice de criticité des risques dans une matrice d’amplitude des opportunités ?

Les concepts de « portefeuille de risques » et de « portefeuille des opportunités » se réfèrent respectivement comme des collections des fiches des risques et d’opportunités identifiés pour le programme. Remplacer « collection des fiches » par « portefeuille » n’est-il pas réducteur quant aux concepts de portefeuille de risque qui, dans la finance, l’assurance et la réassurance sont associés aux principes de diversification et de mutualisation des risques qui eux ont un sens en gestion intégrée des risques. De plus, dans le cadre de l’assurance et de la réassurance, ses principes sont mobilisés car, dans un environnement compétitif, il vise à obtenir le coût du financement du risque le plus faible. Ainsi, disposer de la capacité de déterminer le risque d’un programme ou d’un portefeuille de programmes pourrait être davantage utile aux utilisateurs de cette norme.

Le phasage et le planning ne sont pas pris en compte de façon aussi approfondie que dans les MIL-STD.

Lors de la présentation de cette norme lors de la matinée du 5 octobre 2021 organisé par l'IMdR, un des architectes principaux de cette norme avait évoqué sans ambiguïté que ce travail se plaçait dans un cadre d'Assurance Qualité. Or, dans les principes de l'ISO 9000 :2015 ne figure-t-il pas celui de « prise de décision fondé sur des preuves ». En quoi le processus de décision et l'outillage proposé se fondent sur des preuves ? Les Qualiticiens devraient vraiment relire les fondateurs de la Qualité comme W.A. Schewhart, W.E. Deming, J. M. Juran, A.V. Feigenbaum, K. Ishikawa et P. Crosby par exemple pour s'apercevoir que les principes et les méthodes qu'ils ont définis n'ont aucun rapport avec ceux du management des risques (Dehouck & Munier, 2011). Leur objet de gestion était avant tout les défauts des produits et les anomalies dans les processus identifiés comme des non-conformités. D'ailleurs dans l'ISO 9001 :2015 il est bien précisé que « l'approche par les risques qui comprend, par exemple, la mise en œuvre d'une action corrective pour éliminer des non-conformités potentielles... la prise en compte à la fois des risques et des opportunités sert de base pour améliorer l'efficacité d'un système de management de la qualité, obtenir de meilleurs résultats et prévenir les effets négatifs ». Ainsi, le management de la Qualité, en voulant traiter des risques et opportunités, au-delà de non-conformité de produit ou processus, sur des aspects de sécurité et de sûreté industrielle, de performance économique, comptable et financière représente un vrai danger pour les entreprises. C'est l'exemple parfait d'un management des risques par le management de la Qualité.

On constate que toutes les références du document sont uniquement des normes, il n'y a aucune référence scientifique et aucune référence associée aux normes pourtant antérieures, notamment pour le management des risques, dans le domaine de la Coopération européenne pour la normalisation spatiale (ECSS).

d) Prise en compte de la propriété de soutenabilité écologique

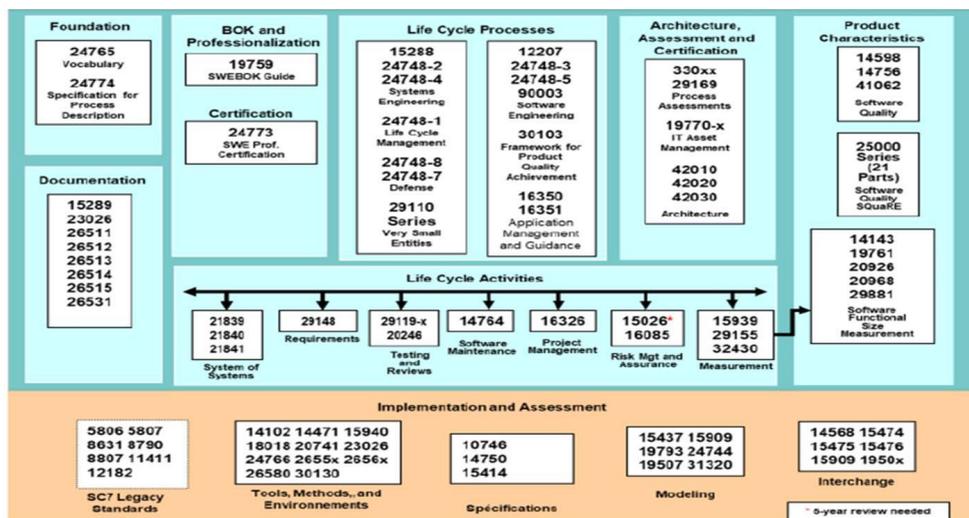
Aujourd'hui la soutenabilité écologique n'est pas prise en compte dans les référentiels. L'environnement et la RSE sont couverts par la commission « Management des organisations » avec la qualité et la navigabilité. La CB Environnement contribue à soutenir la réglementation liée à la sécurité, la santé et l'environnement. On retrouve dans ce cadre l'approche Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement (QHSE) qui vise principalement à prévenir et éliminer des non-conformités potentielles par la mise en œuvre d'actions correctives.

3) Cadre normatif: ISO-IEC JTC1/SC7 de l'ingénierie des systèmes et logiciel

a) Présentation générale

L'ISO-IEC JTC1/SC 7, Ingénierie des logiciels et des systèmes est un sous-comité de normalisation du comité technique mixte ISO/IEC JTC1. La Figure 3 ci-dessous présente le corpus documentaire de l'ISO/IEC JTC1/SC7. Ce corpus se veut être un cadre de travail complet, un référentiel, pour les ingénieries systèmes et logiciels.

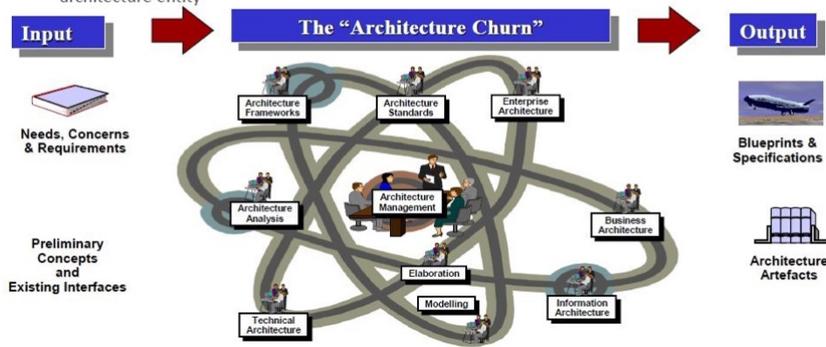
Fig. 3. Corpus documentaire de l'ISO/IEC JTC 1/SC 7



Deux ensembles concernent essentiellement les programmes d'ingénierie : le cycle de vie processus et le cycle de vie des activités. Concernant l'architecture, les ISO-IEC 42010/20/30 proposent des processus permettant la description des architectures logicielles, systèmes et entreprise, leur management et leur évaluation. La 42024 est en cours d'écriture, elle a pour objectif de définir les fondamentaux de l'architecture. Son périmètre est extrêmement ambitieux car il vise à préciser le vocabulaire fondamental, les concepts et les principes associés à une architecture et utilisés dans la pratique de l'architecture pour diverses entités, y compris les logiciels, les systèmes, les entreprises, les missions, les systèmes de systèmes, les familles de systèmes, les infrastructures, les produits (biens ou services), lignes de produits, lignes de services, technologies et domaines d'activité (ISO, 2024).

Fig. 4. Architecting the « Architecture Churn »

- Architecting:
 - Conceiving, defining, expressing, documenting, communicating, certifying proper implementation of, extracting, applying, maintaining and improving an architecture throughout the life cycle for an architecture entity



b) Prise en compte de la complexité

Pour l'ISO-IEC JTC1/SC7 la pensée architecturale doit permettre de maîtriser la complexité de l'ingénierie des systèmes et logiciel.

Cette vue nécessite un effort d'abstraction, cela est inhérent à toute forme de modélisation avec tout ce que cela implique. L'état de l'art normatif actuel nous permet d'énumérer quelques principes clé pour soutenir la pensée architecturale. C'est ce qu'on appelle les fondamentaux de l'architecture à l'ISO-IEC.

c) Prise en compte des risques

Dans ce cadre, les risques sont restreints dans les 15026-x et la 16085 pour les « assurances cases » : assurance du logiciel et des systèmes, et distribués implicitement dans les activités d'ingénierie. Il n'y a pas de liens explicites, notamment avec les risques vus du programme ou de l'architecture.

d) Prise en compte de la propriété de soutenabilité écologique

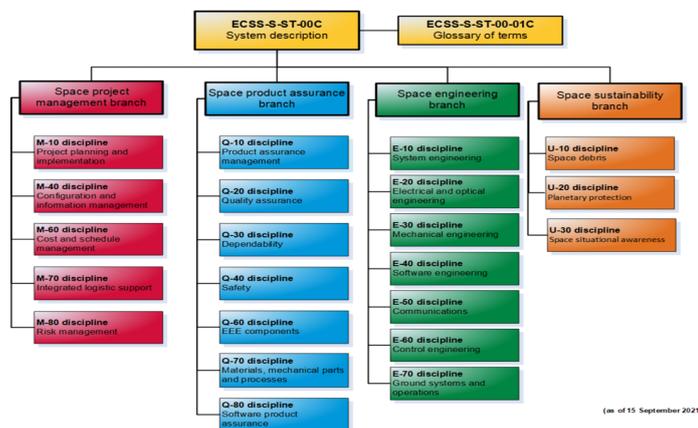
Aujourd'hui la soutenabilité écologique n'est pas prise en compte dans les référentiels. Bien que la durabilité n'est pas explicitement mentionnée dans le champ d'application du comité des normes et activités peuvent contribuer indirectement aux objectifs de durabilité : l'efficacité et l'optimisation des ressources, la sécurité et la résilience et la gestion du cycle de vie.

4) Les ECSS

a) Présentation générale

La Coopération européenne pour la normalisation spatiale est une initiative créée pour développer un ensemble cohérent et unique de normes conviviales à utiliser dans toutes les activités spatiales européennes. Il est assumé par les ECSS que ce qui forme système se sont les normes. Nous apportons cette précision car pour l'ISO, il existe le concept de système de management avec lequel, l'entreprise peut croire, qu'en le mettant en place elle disposera d'un système de management intégré. Comme pour les ECSS ce qui forme "système de management" à l'ISO ce sont les normes et leurs interactions. C'est aussi le cas avec le système de management intégré QSE qui va s'appuyer sur les normes respectives en matière de qualité, de santé et sécurité aux travail et d'environnement. Cette précision peut-être utile pour l'entreprise qui souhaite définir le management intégré des risques comme mode de gouvernance interne dans le cadre d'un système complexe : l'entreprise. Le système normatif des ECSS est consacré aux projets spatiaux. L'ensemble des normes est consacré d'une part, aux utilisateurs : management de projet dont celui des risques, à l'assurance produit, à l'ingénierie et à la soutenabilité et d'autre part, à la définition et au développement du système ECSS avec la politique, le description des systèmes et la gestion et configuration de l'information. Les ECSS propose une architecture sous la forme de quatre branches et de vingt-deux disciplines (ECSS, 2024).

Fig. 5. Architecture des ECSS par branches et disciplines



Toutes ces normes sont publiques et téléchargeables sur le site web des ECSS.

b) Prise en compte de la complexité

Nous n'avons pas trouvé d'approche formelle de la complexité. L'European Space Agency (ESA) semble toutefois dans la transformation qui vise à passer d'une approche basée sur les documents à une approche MBSE. Néanmoins, la norme ECSS-E-TM-10-21A dédiée à la modélisation et la simulation du système tient en compte dès 2010 de SysML et dans la Table 1 page 17, interface les modélisations et simulations possibles dans les différentes phases du projet et activités d'ingénierie (Cf. figure 6 ci-dessous). De plus, toutes les relations entre les normes qui relient les disciplines de l'organisation entre elles pour assurer leur coordination sont mentionnées.

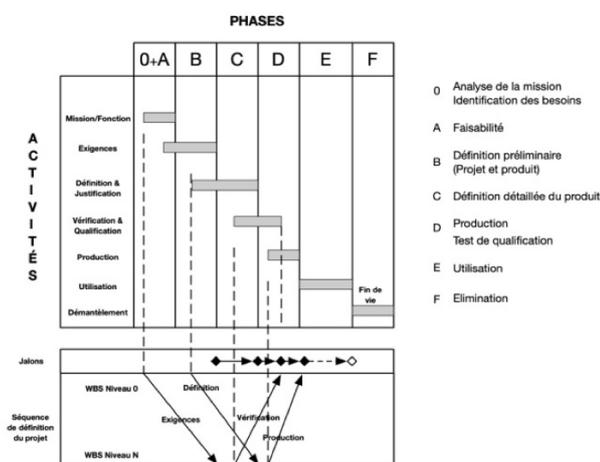
c) Prise en compte des risques

En fonction du niveau logique système système les risques sont abordés respectivement par la norme Q-30 (*dependability*) et la norme Q-40 (*safety*) qui ne sont pas dans la branche Ingénierie mais dans la branche Assurance Produit.

Concernant la gestion de risque du projet, la norme ECSS-M-00-03A a été publiée le 25 avril 2000 et traite du concept, du processus, de son implémentation dans un projet ainsi que de sa documentation. Publié huit ans avant la première norme de l'ISO consacrée aux management du risque (ISO 31000:2009) elle a été mise à jour en 2004 et la version actuelle est la version C (ECSS-M-ST-80C). Depuis près de vingt-cinq ans le management des risques est associé au management de projet et notamment dans sa planification et sa mise en œuvre. Depuis l'édition initiale, le processus de management des risques est complétement intégré aux phases du projet (voir Figure 6 ci-dessous axe horizontal) et aux activités d'ingénierie (voir Figure 6 ci-dessous axe vertical). Il est vu comme un processus systématique (application du processus à toutes les phases) et itératif (répétition de toutes les étapes et tâches à chaque phase) pour optimiser les ressources en accord avec la politique de management des risques du projet. Il est intégré aux rôles et responsabilités dans tous les domaines du projet et à tous ces niveaux. Depuis la dernière version le risque résiduel est pris en compte. Même si le mode de représentation des risques reste les matrices de risques, les ECSS ont été parmi les premiers standards à savoir associer des mesures qualitatives numériques pour les risques à des seuils de performance. Ces bases constituent les briques élémentaires d'un management intégré des risques tel que défini dans le glossaire de l'IMdR (IMdR, 2024). La gestion des risques à l'échelle du portefeuille de projets n'est pas abordée.

La Figure 6 ci-dessous restitue de façon simplifiée un cycle de vie typique d'un projet vu de son ingénierie. La version complète est celle de la page 17 de la norme ECSS-M-30A publiée le 19 avril 1996 est consacrée au phasage et à la planification du projet.

Fig. 6. Cycle de vie typique d'un projet vu par l'ingénierie des systèmes



Sur ce graphique il est bien visible que c'est dans le développement des phases 0+A à la phase F que se déroule les activités de l'ingénierie des systèmes. Le cycle en V apparaît en bas de la Figure 6.

d) Prise en compte de la propriété de soutenabilité écologique

Une branche est dédiée à la soutenabilité (Cf. Figure 5 à droite en orange). Les disciplines concernées sont les débris spatiaux, la protection de la planète ainsi que la connaissance de l'environnement spatial. Compte tenu de l'état de l'art, il est probable que la branche « sustainability » se distribue à terme dans toutes les autres disciplines des trois autres branches (management, assurance produit et ingénierie).

5) Le génie civil

a) Présentation générale

Le génie civil comprend l'ensemble du domaine de la construction que ce soit le bâtiment ou les infrastructures. Il couvre principalement la conception des ouvrages et leur construction. Néanmoins, si pour les autres domaines industriels, le concept d'architecture système est relativement récent, pour la construction, l'architecture est reconnue depuis les premiers travaux de G.W.F. Hegel en matière de distinction des arts, comme le premier des arts majeurs. Ainsi, si le point de départ a été de satisfaire

des besoins fonctionnels (se loger, travailler, traverser un fleuve...) l'architecte attribue à l'ouvrage des dimensions esthétique, sociale, environnementale voire philosophique.

b) Prise en compte de la complexité

Dans une première approche, la prise en compte de la finalité, des principes fonctionnels, des ressources méthodologiques...et normatives... de l'architecture dans le domaine de la construction pourrait faire l'objet d'un traité surtout si nous l'appliquons à tous les types d'ouvrages. Néanmoins, Bernard Dubuisson a réalisé un travail remarquable sous la forme d'une encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment (Dubuisson, 1962) et il proposait la définition suivante de l'architecture : « ***L'architecture est l'organisation du milieu physique où vit l'homme*** ». Cette définition est en droite ligne avec le chapitre quatre de Jean-Louis Le Moigne sur la modélisation des systèmes complexes qui discute de l'organisation comme propriété des systèmes complexes (Le Moigne, 1990). B. Dubuisson poursuit « *c'est en effet, non seulement, l'organisation du logis, ..., mais l'organisation de tout ce que nous construisons pour abriter, pour envelopper et pour faciliter toutes nos activités, donc de tout notre milieu physique* ». Ainsi, l'architecture, tient compte de l'organisation de l'objet mais aussi de ce dernier dans son milieu environnant. En revanche, si la finalité sociale et sociétale est évidente pour le génie civil, concrétisant la définition des ethnologues et des anthropologues d'une technique : « ***une technique est une action socialisée sur la matière mettant en jeu les lois du monde physique*** » (Bonte, Izard, 1991), dans les autres secteurs industriels, cette finalité n'est pas lisible dans les normes que nous avons parcourues. Pourtant, c'est le cas aussi par exemples pour un radar à impulsions où un radar à balayage électronique actif ou encore d'un réacteur EPR (European Pressurized Reactor).

Toutefois, et surtout en France, différentes réglementations ont entraîné pour une opération déterminée une distinction des rôles et responsabilités entre maître d'ouvrage, maître d'œuvre et réalisateur. Le réalisateur pouvant être considéré comme l'entreprise générale et ses sous-traitants. Ainsi, si l'« architecte » diplômé d'État (DE) potentiellement qui a acquis l'Habilitation à l'exercice de la Maîtrise d'Œuvre en son Nom Propre (HMONP), l'équivalent du DPLG aujourd'hui, garde cette activité de programmation architecturale et technique, selon les contrats (travaux, conception-réalisation, conception-réalisation-maintenance,...) la conception pourra être partagée. Les sociétés d'ingénierie ont le rôle de maîtrise d'œuvre voire d'assistance à maîtrise d'ouvrage et des entreprises générales disposent aussi de direction de l'ingénierie.

Cela peut paraître étonnant mais il n'existe pas à notre connaissance de « norme » d'ingénierie des systèmes propre au génie civil. Pour l'architecture, nous venons d'en discuter brièvement néanmoins, pour les outils de l'architecture système dans le domaine, on peut souligner le développement spectaculaire qu'a connu le développement des jumeaux numériques ou du *Building Information Modelling* (BIM) qui est devenu une méthode incontournable, en conception intégrée des bâtiments et des infrastructures sur leur cycle de vie, grâce à une maquette digitale 3D et qui reste un champ de recherche très actif (ESTP, 2024). Néanmoins, l'intégration du BIM dans un cadre d'architecture système et d'ingénierie système ne semble pas, pour l'instant en tout cas, une voie sélectionnée par les praticiens pour industrialiser la conception dans le domaine.

Sur un plan organisationnel et c'est notamment le cas des entreprises générales, nous pouvons noter qu'elles ont toujours gardé, par nature, une organisation en mode projet avec pour les différents décideurs des projets, business unit et filiale, une responsabilité réelle dans la fixation, le contrôle et la réalisation des objectifs avec le pouvoir de décision associé. Dans d'autres domaines, depuis les années 1980, nous avons pu observer un transfert du pouvoir décisionnel réel des niveaux opérationnels aux niveaux fonctionnels. Or, dans le même temps, probablement pour s'adapter à leur environnement actif, nous avons pu observer une explosion des ressources fonctionnelles *corporate* (qualité, audit, management des risques de l'entreprise, développement durable, RSE, digital,...) aux côtés des ressources traditionnelles (ressources humaines, production, marketing-vente, informatique, finance, R&D). Associé à une quantité d'informations à gérer de plus en plus importantes par l'organisation, cette augmentation des ressources a fait exploser le nombre d'interactions (*complexité structurelle*) et le nombre d'actions qu'elle est susceptible de permettre et de réaliser (*complexité fonctionnelle*). Enfin, comparé à d'autres secteurs industriels, et c'est notamment le cas pour les entreprises générales, nous trouvons des personnes qui ont la responsabilité des flux de revenus et de coûts. La différence positive entre les deux étant associée à un niveau de performance économique à réaliser et comptable si l'on doit tenir compte de la livraison des résultats à une date déterminée. Dans d'autres industries, cette répartition est parfois assurée par des directions différentes (la direction de la stratégie définit les investissements et contrôle les flux de revenus du projet et la direction de l'ingénierie est garante du respect des coûts programmés). Dans la culture du risque d'une organisation, cette distinction n'est pas neutre dans la mesure où aujourd'hui un profil de risque s'apprécie en tenant compte des gains, des pertes (dont les extrêmes) et de l'objectif. Cette distinction a donc par nature une influence considérable sur la gouvernance interne, non pas sur les instances de gouvernance mais sur la manière de prendre des décisions en tenant compte de l'ensemble du risque.

c) Prise en compte des risques

Pour les questions propres au système techniques de fonction porteuse, de limitation des déformations et de durabilité sur le cycle de vie du bâtiment (50 ans) où d'une infrastructure (100 ans) il existe une batterie de textes réglementaires desquels le concepteur ne peut se soustraire. Dans le domaine de la recherche, c'est probablement cette échelle qui mobilise encore le plus de ressources en France avec toujours en finalité la maîtrise des risques en matière de sécurité et de sûreté (Breysse, 2009).

À l'interface entre sûreté de fonctionnement, maîtrise des risques et management des risques, un projet de recherche associant une entreprise générale (Vinci Construction), des sociétés d'ingénierie (Artelia, Egis, Tractebel) et des laboratoires de recherche (Universités de Paris-Est Marne-la-Vallée, Bordeaux I et le Groupe de Recherche sur l'Information et la Décision (GRID) associant l'ENSAM, l'ESTP et l'IAE de Paris avaient obtenu le soutien financier de l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR). Son objet la Gestion des risques lié aux management et à la maîtrise des risques des projets complexes de génie civil et urbain (acronyme GeRMA. Contrat PBCU 2007 du 17/09/2009 labélisé par le pôle de compétitivité Advancity et appuyé par Syntec-Ingénierie). Ainsi, l'objet du projet était moins de s'interroger sur les questions de résistance des matériaux que sur la manière

qu'avait les managers et les équipes de gérer les risques d'un projet ainsi que sur leurs outils et notamment de représentation des risques (Germa, 2012). Les principaux résultats ont été : 1. de contextualiser la démarche de l'ISO : avec le Guide 73 (vocabulaire du management des risques), l'ISO :31000 (management du risque) et l'ISO 31010 (techniques d'évaluation du risque) à un projet de construction. 2. d'identifier les pratiques en matière d'utilisation des métriques de risques. 3. de tenir compte des biais cognitifs dans le processus de management des décisions.

Pour ce deuxième point, ce sont celles de niveau 1 et 2 qui sont en usage avec respectivement l'usage du langage parlé et l'usage du langage parlé auquel on ajoute des règles logiques. Ces deux cas, sont ceux que nous venons de parcourir dans la prise en compte des risques et des opportunités par le BNAE par exemple car ils sont en majorité retranscrits dans des matrices de risques et/ou d'opportunités. Le projet a démontré que les niveaux 1 et 2 ne permettaient pas de répondre aux questions quotidiennes que se pose un gestionnaire du type : « dois-je consacrer deux fois plus de ressources à l'action préventive X qu'à l'action préventive Y pour rendre les risques acceptables ? » Le 3^{ème} niveau, qui permet l'utilisation d'échelles d'intervalles et qui correspond en application pratique, par exemple, à ce que le COSO, qui définit le référentiel international de management des risques de l'entreprise (ERM) sur un plan international, appelle l'appétence pour le risque dans le contexte de la création, la préservation et la concrétisation de la valeur. Ce profil de risque, une fois qu'il est déterminé, permet d'apporter une aide à la décision aux managers et leurs équipes (COSO, 2017) surtout si la décision repose sur des dimensions et des grandeurs d'analyse différentes (performance, qualité, coût et délais par exemple). Le 4^{ème} niveau est celui qui permet des mesures de distance sur des distributions de probabilités avec des applications de type *Quantitative Risk Analysis* (GRA) où *Probabilistic Risk Analysis* (PRA).

Ce projet a eu et continue d'avoir une perception positive au sein de la profession que ce soit dans le bâtiment et les infrastructures et du point de vue des maîtres d'ouvrage, de l'ingénierie et des entreprises générales. Néanmoins, un projet ANR reste sur des niveaux de maturité technologiques relativement bas (TRL). Des professionnels ont alors exprimé le souhait, un fois le projet livré en 2012, de disposer d'un outil permettant de concrétiser le projet GeRMA. Un projet permettant de partir de TRL bas pour aboutir à un prototype a été initié avec un projet collaboratif du Fond Unique Interministériel N°19 avec Bouygues Bâtiment Ile-de-France, Vinci Construction France, l'ESTP et deux PME : *RiD Project Management*. Le projet a été labellisé par les pôles de compétitivité Cap Digital (à la suite de la reprise d'Advancity) et par Finance Innovation et a obtenu le soutien financier de la Région Ile-de-France et de la Banque Publique d'Investissement. Il s'est déroulé de 2015 à 2018 et à associé une trentaine d'équivalent temps plein concernés par la performance économique, comptable et financière des projets et des portefeuilles de projets.

Du point de vue de la complexité, ce projet a eu l'ambition de considérer l'entreprise comme un système complexe qui tient compte de son projet d'entreprise dans son environnement actif et de l'ensemble de la hiérarchie. Dans ce contexte il a été nécessaire d'utiliser les outils conceptuels et méthodologiques de l'architecture d'entreprise (TOGAF, BPMN) et de l'architecture système (SysML) de façon à connecter via un réseau digital l'ensemble des propriétaires de risques, des experts et des managers aux différentes échelles de décisions (projets, portefeuille de projets, business unit, filiale, groupe). Du point de vue des risques, pour tenir compte des résultats des points 2 et 3 de GeRMA, pour le point 3, compte tenu de progrès réalisés par la recherche de façon à disposer de l'appétence au risque de l'entreprise en tenant compte conjointement des trois dimensions de son analyse (l'aversion aux risques, l'aversion aux pertes et un point de référence – l'objectif à réaliser) sur une distribution qui intègre les gains et pertes extrêmes potentielles, une fonction de performance court et moyen terme a pu être modélisée pour être spécifiable à chaque entreprise et à chacun de ses niveaux décisionnels. Pour le point 2, une démarche structurée de définition, de justification et de validation des matrices de risque a été réalisée. Autrement dit, il a été appliqué la démarche IVVQ de l'IS à une méthode qui, pour l'ISO 31010, a pour objectifs de déterminer des classes de risques (une case de la matrice) et des catégories de risques (les couleurs par groupe de cases). **Un état de l'art de plus de 1 000 heures de travail, sur les matrices probabilités-impact ou matrices de risques, n'a permis d'identifier aucune preuve dans les meilleures revues à comité de lecture à l'international de leur capacité à analyser, évaluer, traiter et financer les risques.** En conséquence, sur la base, de l'extraction de 10 risques d'un projet en cours de construction de bâtiment à Saclay, il a été démontré qu'une matrice de risque ne permettait pas de répondre aux deux objectifs pourtant énoncés par l'ISO. Ces matrices ne définissent pas sans ambiguïté des classes et des catégories de risques. De plus, il a été démontré que l'utilisation de la criticité comme mesure de risque (que l'on peut retrouver aussi dans la méthode AMDEC) et donc comme base de l'évaluation des risques pour la prise de décision entraînait une attitude de neutralité par rapport au risque qui entraîne de facto l'acceptation d'une variance infinie (au sens mathématique) des risques. Ce résultat paradoxal a été publié lors d'un précédent Congrès Lambda Mu (Claude & Nouet, 2016). Il est d'autant plus paradoxal que **dans l'ingénierie, le cycle IVVQ vise à qualifier des technologies et qu'il utilise pour évaluer les risques de cette technologie une technique qui n'a jamais été qualifiée** autrement que pour restituer des événements redoutés issus d'analyse par arbre de défaillance ou similaires. En tout cas, pour le secteur de la construction cette méthode n'a pas été validée pour les risques projet, portefeuille de projet et entreprise. Au-delà du secteur de la construction, un auteur (Cox, 2008) a démontré que, même si le décideur est averse au risque, il vaut mieux qu'il prenne ses décisions de façon totalement aléatoire pour avoir une chance d'atteindre l'objectif plutôt que de se baser sur les matrices de risques.

Pour disposer néanmoins d'un processus structuré de quantification des risques (technique, économique, comptable et financier), le projet a pu lever le verrou qui consistait à utiliser la métrique de niveau 4 proposée par Germa. En ce sens, il est désormais possible d'évaluer les risques des projets et portefeuilles de projets avec les mesures de risques et mesures de la dépendance entre les risques sur lesquelles nous avons désormais une littérature conséquente sur leurs avantages et limites à la suite de la mise en œuvre des régulations fondées sur les risques dans la banque avec le processus de Bâle et pour l'assurance et la réassurance avec le processus de Solvency. Cette approche a d'ailleurs ouvert un nouveau champ de recherche : *l'actuariat industriel*. Qui pour le secteur de la construction était important dans la mesure où il est confronté à des risques longs (garanties décennale, garantie de performance énergétiques) pour laquelle la comptabilité des sociétés non-financières n'est pas adaptée pour financer le risque. En financement d'entreprise (non-financière) il existe deux financements : les investissements et le besoin en

fonds de roulement. Un article a ouvert la voie pour ajouter un troisième financement : le financement des risques de l'entreprise (Claude, 2020).

d) *Prise en compte de la propriété de soutenabilité écologique*

Pour la prise en compte des impacts sur le cycle de vie des ouvrages la profession a réalisé des efforts importants pour réaliser des Analyses de Cycle de Vie (ACV) et les expertises ne cessent de progresser depuis une vingtaine d'années. Néanmoins, un article pour ce Congrès discute du fait que si les ACV parviennent à quantifier des impacts, aujourd'hui par manque d'information disponibles, il est très difficile de les interpréter en termes de risques de durabilité comme il est demandé dans les différentes réglementations abordées dans notre état de l'art (Thing Leo & Claude, 2024). De plus, les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) qui présente les résultats d'une ACV sur un produit de construction et, par extension, de réaliser celle d'un bâtiment, ne renseigne pas sur les indicateurs sociaux et de gouvernance.

La nouvelle réglementation RE 2020, pour la construction de logements neufs) est calibrée pour le secteur du bâtiment et la part de la construction comprise dans l'industrie pour réaliser les objectifs de la SNBC. Autrement dit, un bâtiment neuf qui respecte la RE 2020 sera classé article 9. Pour donner un ordre de grandeur des efforts à réaliser par le secteur, en termes de décarbonation, si en 2019, pour le secteur de la construction, la consommation de GES était de 153 millions de tonnes équivalent gaz carbonique (Mt CO_{2e}) répartie en 83, 20 et 50 Mt CO_{2e} respectivement pour l'exploitation des bâtiments en émissions directes, indirectes et celles associées aux produits de construction et équipements, elles sont attendues à 5, 1 et 10 Mt CO_{2e} en 2050. En termes de consommation finale d'énergie il est attendu une baisse de 60% à 2050 par rapport à 2020.

B. *Présentation des résultats*

Les résultats sont présentés dans un premier temps en termes de distinction et de complémentarité entre l'architecture des systèmes et l'ingénierie des systèmes et dans un second, en termes de prise en compte par les normes étudiées de la complexité des systèmes, de la propriété de soutenabilité écologique des systèmes techniques, des risques et opportunités, des impacts positifs et négatifs, de la performance financière des projets, de la double matérialité, du système réglementaire européen, et enfin des objectifs de la SNBC.

1) *Distinction et complémentarité entre architecture système et ingénierie système*

Nous ne sommes pas trop favorable à amalgamer ces deux disciplines. Une fusion trop hâtive (AFIS, 2009) pourrait conduire à une perte de spécificité de chacune des disciplines, à des difficultés de communication entre les chercheurs, entre les chercheurs et les praticiens et entre les praticiens eux-mêmes ou à une complexification excessive des modèles théoriques. *At last but not least...* ces disciplines doivent pouvoir être enseignées afin d'apporter des compétences à des ingénieurs-managers dans le cadre des contraintes programmatiques des grandes écoles de commerce ou d'ingénieurs ou des différentes formations universitaires.

Dans la Table I ci-dessous nous avons choisi de ne pas utiliser les définitions apportées par les différentes normes.

TABLE I. ARCHITECTURE DES SYSTEMES VERSUS INGENIERIE DES SYSTEMES

	Architecture des systèmes	Ingénierie des systèmes
Définition	L'architecture des systèmes se concentre sur la conception globale d'un système. Elle fournit une vue d'ensemble des composants, de leurs interactions et des principes qui guident son fonctionnement.	L'ingénierie des systèmes est un processus plus large qui englobe l'architecture, mais va au-delà. Elle couvre toutes les phases de développement d'un système, de la conception, la production et la maintenance.
Rôle	L'architecte des systèmes conçoit les plans généraux d'un système, s'assure de l' intégration du système produit par la robustesse des interfaces techniques et la convergence du système projet par la robustesse des interfaces humaines	L'ingénieur des systèmes est responsable de la réalisation du système en suivant les spécifications définies par l'architecte.
Objectif	L'objectif est de parvenir au modèle systémique du système réel notamment en définissant le référentiel d'analyse systémique avec la hiérarchie systémique, les visions architecturales et les comportements	L'objectif est de transformer la vision architecturale en un produit concret, en gérant les contraintes techniques, budgétaires et temporelles.
Focus	Conception globale	Processus complet produit et projet
Méthodes	UML, SysML, TOGAF notamment	Méthodologies agiles, cycle en V, ingénierie des exigences, IVVQ
Compétences	Vision systémique, conception, modélisation	Gestion de projet, techniques d'ingénierie, connaissances techniques

2) Prise en compte par les normes étudiées des points clés retenus

La **complexité** des systèmes techniques et socio-techniques est considérée ainsi que des risques associés, notamment par le biais des attributs de performance pris en compte par la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, durabilité, récupérabilité, maintenabilité) et par la maîtrise des risques industrielle, les précédents auxquels s'ajoute la sécurité et la sûreté (industrielle ou nucléaire). En raison des limites constatées par les méthodes traditionnelles en ce qui concerne la prise en compte d'interactions, de comportements complexes et des risques, les solutions de type Model-Based Safety Assessment (MBS) se développent.

Fig. 7. Risques associés aux système technique et socio-technique

Caractéristiques	Système technique	Système socio-technique
Nature	Matériel	Matériel + social
Focus	Fonctionnalité technique et confiance fondée dans le fait qu'il fonctionne comme voulu et qu'il satisfait aux attentes des parties prenantes. Sa sûreté de fonctionnement exprime ses attributs fondamentaux de fiabilité, de disponibilité, de durabilité et de maintenabilité notamment	Interactions homme-machine, impacts sociaux et sociétaux et risques liés à la sécurité industrielle (risques du système technique sur les biens, les personnes et respect de la réglementation environnementale) et la sûreté vis-à-vis d'actes de malveillance, de terrorisme, de cybercrimes, de dangers naturels, technologique et sanitaires
Exemples	Une brosse à dent électrique	Les systèmes techniques dans leur environnement de référence (une brosse à dents électrique dans une salle de bain)

La **propriété de soutenabilité écologique** n'est pas prise en compte dès l'échelle du système technique dans les études de sûreté de fonctionnement. Autrement dit, à ce jour, il n'est pas considéré comme utile de tenir compte explicitement des flux et stocks de matières premières, d'énergie et des puits de carbone naturels. Nous concevons, qu'il est possible avec SysML de pouvoir en tenir compte étant donné son niveau d'abstraction. Néanmoins, *The Devil is the details*, et l'utilisation de SysML ne serait-ce que pour une analyse MBSA est loin de faire consensus. De plus, en termes de concrétisation, nous n'avons jamais rencontré dans le monde réel, d'ingénieurs-managers qui ont livré un système technique sans utiliser de matières premières et sans énergie.

Les matrices probabilités – conséquences, où probabilités – impacts où encore matrices de risque restent la norme de représentation des écarts entre les objectifs et les réalisations probables (les risques du point de vue de leur gestion). Ainsi les **impacts positifs et négatifs** et les **risques et opportunités** sont évalués avec ces matrices. Or, si ces modes de représentation ont un sens dès lors qu'elles servent d'outils de communication sur les événements redoutés issus d'études de sûreté de fonctionnement pour des risques associés aux systèmes techniques et socio-techniques, ils sont inadaptés pour les systèmes socio-économiques et socio-écologiques. Ne serait-ce que sur les coûts et les délais, il est très réducteur de les modéliser par des variables aléatoires discrètes. De plus, notamment pour les risques de coûts et de délais, qui ne peuvent se résumer pour chacun à une seule conséquence et pour lesquels une modélisation par le biais de variables continues serait davantage appropriée, c'est la question de l'usage du terme de « probabilité » qui est en jeu. Une probabilité, en mathématique, est une mesure. En usage, un décideur peut manipuler des probabilités objectives s'il dispose de probabilités statistiques sur les événements futurs incertains et pour lesquelles il existe une axiomatique (Kolmogorov, 1950). Dans l'autre cas, s'il n'en dispose pas, il peut manipuler des probabilités subjectives et pour lesquelles il existe aussi une axiomatique (Machina, Schmeidler, 1992). Très majoritairement, ni l'une et ni l'autre ne sont utilisées. Pour les premières c'est justifié car, supposons une entreprise qui accumule de façon historique des retards dans la livraison de ses produits, compte tenu de l'expérience acquise et des actions mise en place pour y remédier, elle se pénaliserait dans son prix de vente si elle maintenait les délais historiques. A ce titre, un expert peut donner un nombre entre 0^+ et 1^- , mais ce nombre est une mesure de croyances mais pas une probabilité au sens mathématique du terme.

De cette considération technique il ressort des difficultés pratiques à évaluer les risques et à les agréger au niveau d'un système socio-économique. La performance financière d'une entreprise peut être assimilée à celle de la performance d'un système socio-économique. A ce titre, il est difficile de comprendre pleinement la contribution effective de l'ingénierie des systèmes à la matérialité financière et à la création de valeur.

À l'échelle d'un système socio-écologique, le rapport du 1er groupe de travail du GIEC (IPCC, 2021) est un bon exemple de quantification probabiliste et d'incertitude associée à cette quantification.

Dans la mesure où la matérialité financière n'est pas pleinement prise en compte ainsi que la matérialité extra-financière, la **double matérialité** ne peut l'être.

Dans la continuité de la remarque précédente, le **système réglementaire du Pacte vert européen** n'est pas un sujet pour l'ingénierie des systèmes. L'INCOSE étant une organisation internationale ce n'est peut-être pas un enjeu de diffuser des

connaissances et des compétences pour seulement 50 000 entreprises européennes ou qui opèrent sur le territoire de l'UE. Cela peut se comprendre.

En ce qui concerne les objectifs de la SNBC c'est le même constat d'absence de prise en compte. En prenant uniquement le secteur des bâtiments, ce dernier a comme objectif de réduire la demande d'énergie de 66% entre 2022 et 2050. L'architecture et l'ingénierie des systèmes devraient être concernées par ces objectifs et pourtant aucune norme ne discute du sujet.

En synthèse nous pouvons dresser avec la figure 8 ci-dessous une synthèse de l'analyse critique des connaissances existantes.

Fig. 8. Synthèse de l'analyse critique des connaissances existantes

	Complexité	Soutenabilité écologique	Risques et opportunités	Impacts positifs et négatifs	Double matérialité	Système réglementaire (EU)	Objectifs SNBC
Systèmes socio-écologiques							
MIL-STD							
BNAE							
ISO-IEC JTC1/S C7							
ECSS							
Génie civil							

Le remplissage de ce tableau pourrait surprendre mais selon les auteurs au terme de l'analyse critique des connaissances existantes aucune approche ne paraît à ce jour calibrée pour répondre pleinement à la question. En effet, l'hypothèse de cette recherche qui consistait à trouver dans les principales normes d'architecture et d'ingénierie des systèmes une réponse afin de disposer d'une solution exploitable pour répondre aux enjeux des nouvelles réglementations et notamment avec la prise en compte de la double matérialité n'a pu être vérifiée.

III. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

Cette recherche a abordé les textes européens principaux du Pacte vert qui cherche à orienter les investissements au sein de l'UE vers des activités dites durables. Pour la mise en œuvre au sein des entreprises, un des concepts centraux est celui de double matérialité qui reflète, par essence, la nouvelle dimension pratique de la communication sur le développement durable et la reconnaissance de l'interdépendance entre les impacts d'une entreprise et sa situation financière. Idéalement, ces deux aspects devraient être intégrés dans un processus de reporting holistique. Cette communication devrait permettre aux investisseurs et financeurs de disposer d'informations en mesure d'évaluer globalement la performance financière et extra-financière d'une entreprise ou d'un projet et de faire leurs choix d'investissements en conséquence.

À ce jour, les premières communications devraient être disponibles début 2026 lors de la présentation de la clôture des exercices comptables au 31 décembre 2024. Les installations, les produits manufacturés et l'ensemble des chaînes de valeur industrielle, de l'extraction des matières premières jusqu'à la consommation finale seront directement concernés et potentiellement profondément transformés pour s'y conformer. Or, si l'architecture système et l'ingénierie système ont été, notamment depuis la seconde guerre mondiale, à la base de la conception globale des systèmes ainsi que de leur fabrication, leur exploitation et leur maintenance, l'étude de normes représentatives fait ressortir les discussions suivantes.

A. Discussions des résultats

La **complexité** est abordée aux échelles des systèmes techniques et socio-techniques mais reste de notre point de vue encore à approfondir pour l'échelle du système socio-économique (un projet, un portefeuille de projets et l'entreprise). À l'échelle du projet ou du programme du point de vue de l'ingénierie des systèmes, les interfaces, voire le cloisonnement, entre « le management » et « l'ingénierie » (Cf. Figure 5) pourraient bénéficier des apports de la programmation orientée objet, des architectures en couches et microservices retenues dans le cadre du projet RiD Project Management pour le génie civil afin de tenir compte à la fois de la complexité des systèmes mais aussi de celle de l'organisation ainsi que des risques encourus.

Tenir compte des six objectifs de la Taxonomie nécessite de disposer de modèles en mesure d'analyser la complexité du système socio-écologique avec ses interactions avec les sous-systèmes (socio-économique, socio-technique et technique). Ce cadre dépasse les missions classiques du management des risques de l'entreprise mais aussi de celles du développement durable, de la RSE, de la finance et de l'ingénierie notamment. Les stratégies d'entreprise les plus populaires sont centrées sur un secteur professionnel (un système socio-économique) et la performance s'évalue majoritairement sur l'acteur qui dégage le meilleur retour en termes de bénéfices sur fonds propres. Le changement climatique dans sa capacité à influencer durablement les sociétés humaines et les écosystèmes naturels desquelles elles dépendent modifie le niveau logique d'analyse stratégique des systèmes socio-économiques (qui incluent les systèmes socio-techniques et techniques) au niveau socio-écologique. A la lecture des

dispositifs étudiés il semble manquer une interface entre ses différentes ressources qui est : le management intégré des risques. Sur le site web de l'IMdR, la définition proposée est la suivante :

“Coordination, sur l'ensemble du périmètre de management déterminé, d'une part, des auteurs de décisions entre eux et, d'autre part, de ceux-ci avec les objectifs, ce qui implique que tout auteur de décision :

- ait pleinement connaissance des conséquences de chacune de ses alternatives probabilisées et de leurs contributions au risque global de l'entreprise,

- qu'il ait la possibilité de hiérarchiser les résultats probables par rapport aux objectifs généraux et les préférences en matière de risque de l'entreprise, de manière à prendre ses décisions compte tenu de ces derniers”.

La **propriété de soutenabilité écologique** pourrait être prise en compte, notamment avec SysML, étant donné son niveau d'abstraction. Néanmoins, *The Devil is the details*, et l'utilisation de SysML ne serait-ce que pour une analyse MBSA est loin de faire consensus. De plus, en termes de concrétisation, nous n'avons jamais rencontré dans le monde réel, d'ingénieurs-managers qui ont livré un système technique sans utiliser de matières premières et sans énergie. Ainsi, l'étude de cette propriété ne devrait-elle pas se généraliser dans la mesure où les matières premières et l'énergie sont des invariants.

Même si les ACV ne permettent pas d'évaluer des risques (Thing Leo, Claude, 2024) elles constituent de bons outils pour quantifier des impacts environnementaux globaux et les évaluations environnementales (EE) des impacts locaux (Thing Leo, 2020). Ces analyses permettent de commencer à concrétiser les généralités normatives et permet de limiter le débat sur les systèmes ouverts dans la mesure où, selon différentes normes, les mesures sont spécifiées.

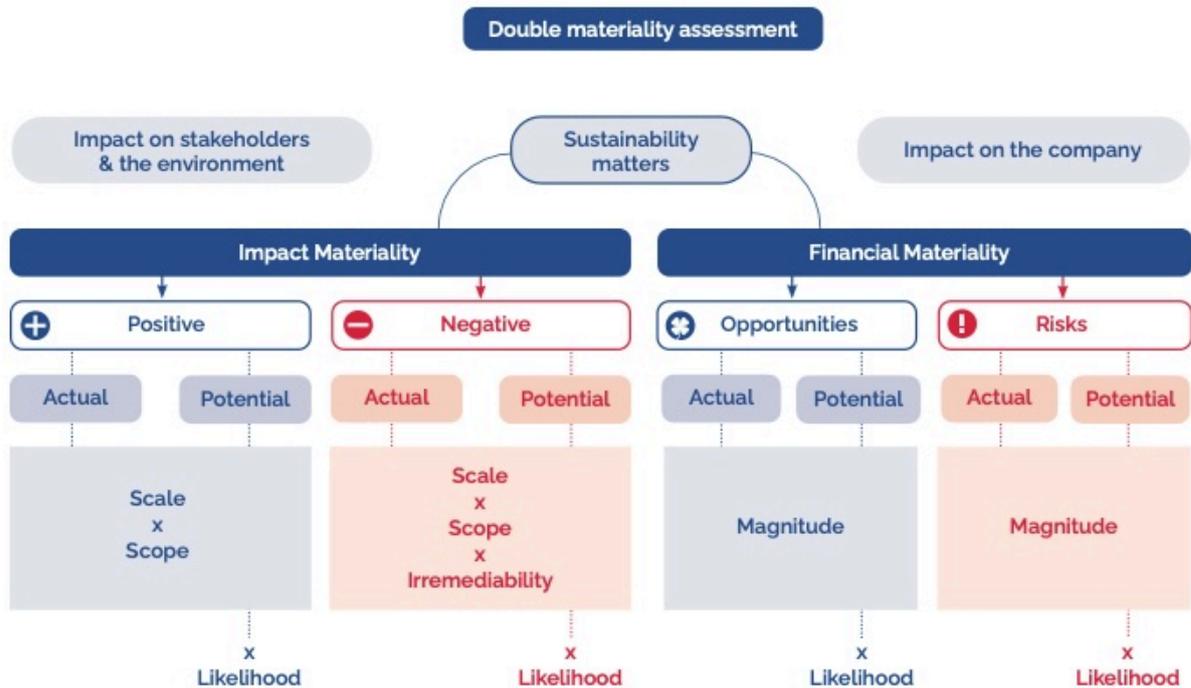
La prise en compte des **risques et des opportunités** (actuel et potentiel) est associée à la **matérialité financière**. Or, l'ingénierie des systèmes évalue la performance de ses activités, par projet ou programme, au regard des attributs de performance technique du système, de qualité, de coût et de délais. Si les coûts sont une composante de la rentabilité économique d'un projet, ne doivent-ils pas être mis en correspondance avec les flux d'investissements et/ou de revenus pour en avoir une vision précise au niveau économique. De plus, dès lors, qu'il est important pour l'entreprise de tenir compte des dates auxquelles ces flux économiques doivent être réconciliés avec les publications comptables, le système d'information de l'ingénierie ne devrait-il pas être configuré en conséquence surtout s'il faut tenir compte des risques.

La prise en compte des **impacts positifs et négatifs** (actuel et potentiel) est associée à la **matérialité extra-financière ou matérialité d'impact**. Même si nous considérons que l'entreprise n'a aucune préférences en matière de durabilité et que seules compte celle d'une maîtrise d'ouvrage cliente, il faudra produire le reporting pour savoir si le projet rentre dans le cadre de l'article 6, 8 ou 9 de la SFDR. Est-ce qu'il va falloir revenir à une ingénierie basée sur les documents pour cette partie ou intégrer ces nouvelles exigences à un modèle MBSE ? De plus, en termes de réduction des émissions de Gaz à effet de serre (GES) et d'empreinte carbone l'ingénierie devrait être concernée. En effet, si Scope 1 tient compte des émissions directes (combustion de combustibles fossiles, émissions liées aux processus industriels,...), Scope 2 des émissions indirectes (électricité, vapeur achetée pour alimenter les bâtiments et équipements) et Scope 3 (des émissions liées à la chaîne de valeur – matière première – transformation de produits achetés, aux déplacements professionnels, à la fin de vie des produits et celles liées aux investissements, l'ingénierie sera normalement en première ligne pour fournir de la donnée de qualité pour le reporting CSRD. Une entreprise qui n'aura pas de préférences assumées en matière de durabilité devra tout de même transmettre ses informations si une entreprise cliente a décidé de développer son modèle d'affaire sous le périmètre de Scope 3. Si les normes d'ingénierie des systèmes n'intègrent pas ces aspects, sans pour autant perdre de leur intérêt général, l'intérêt pour les praticiens en charge de ses activités sera limité.

Dans la mesure où la matérialité n'est pas pleinement prise en compte ainsi que la matérialité extra-financière, la **double matérialité** ne peut l'être. Le Global Reporting Initiative qui est un organisme indépendant en charge de normalisation au niveau international en ce qui concerne la performance en développement durable. Ci-dessous, Figure 9, (GRI, 2024) présente une grille de lecture en mesure d'évaluer la matérialité des données de durabilité.

La Figure 9 ci-dessous illustre bien les deux matérialités (financière et d'impact) avec pour chacune respectivement, à renseigner, les risques et opportunités et les impacts positifs et négatif (actuel et potentiel) en tenant compte du périmètre Scope 1, 2 ou 3 et des différentes échelles de l'analyse. L'étude, *in fine*, se termine par une évaluation des vraisemblances et des conséquences. Notre avis est que si pour cette année 2024 la priorité a été de s'organiser pour fournir, à la publication des résultats, des informations de qualité. Nul doute que dans les années qui viennent, l'ingénierie sera sollicitée par les directions financières (en charge en général de la supervision du processus de publication) pour fournir des données de plus en plus précises dans la mesure où ces reporting seront discriminant pour les investisseurs et/ou les financeurs.

Fig. 9. Évaluation de la matérialité des données de durabilité



si l'usage des matrices probabilités – impacts où matrices de risques à un sens dès lors qu'elles servent d'outils de communication sur les événements redoutés issus d'étude de sûreté de fonctionnement, il est paradoxal de constater que l'ingénierie système considère des probabilités et des conséquences pour évaluer les systèmes techniques et socio-techniques mais qu'elles ne les utilisent pas à l'échelle du système socio-économique (le projet où l'entreprise). En effet, il ne semble pas d'intérêt pour les normes étudiées de permettre aux ingénieurs-managers de connaître a probabilité qu'ils ont de réaliser « leurs » objectifs avec leurs équipes respectives et la manière qu'ils ont de le faire, à savoir conforme où non avec l'appétence pour le risque de l'entreprise. De plus, ces outils ne permettent aucune agrégation des risques à l'échelle d'un programme où d'un portefeuille de projets industriels et par extension à celle de l'entreprise. Sur ce plan, les progrès réalisés par le génie civil pourraient être étudiés pour envisager une qualification pour d'autres domaines industriels.

B. Les perspectives possibles

En termes de perspectives, si nous ne sommes pas favorables, dans un premier temps, à une fusion des deux disciplines, l'alternative consisterait peut être d'engager des moyens de favoriser les échanges et les collaborations entre les deux disciplines sans pour autant les fusionner complètement, par exemple en créant des programmes de recherche interdisciplinaires, voire transdisciplinaire, en organisant des séminaires communs, ou en développant des outils théoriques communs.

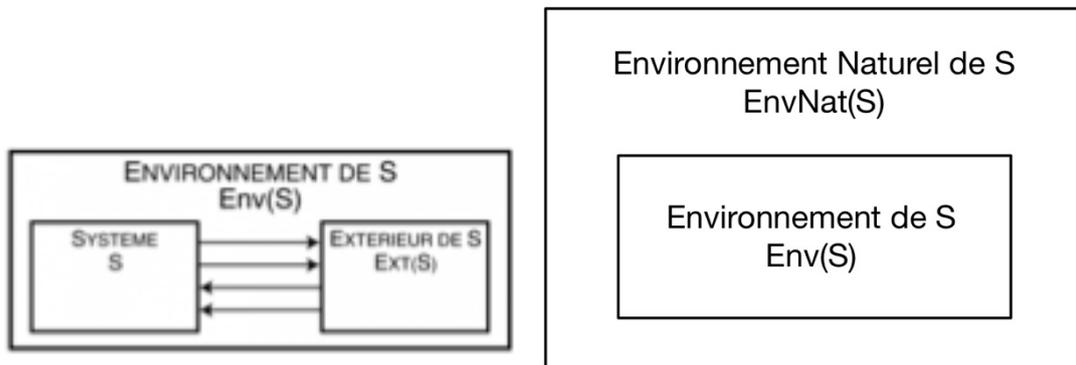
Néanmoins, les avantages potentiels d'une fusion permettrait de meilleures synergie entre les deux disciplines et pourrait conduire à de nouvelles découvertes, à une meilleure compréhension des phénomènes étudiés, ou à des applications plus efficaces. A ce titre, une intégration structurée des systèmes techniques, socio-techniques, socio-économiques et socio-écologiques avec les impacts positifs et négatifs, les risques et opportunités pourraient redéfinir le management de projet. Le principe de l'ingénierie des systèmes reste basé sur la framework du Project Management Body of Knowledge (PMBOK) et le concept de convergence de l'architecture des systèmes qui vise la robustesse des interfaces humaines reste à approfondir. Dans tous les cas, le management des risques par le management de la qualité est à questionner. D'une façon plus générale c'est le cas pour le management de la qualité. Si à la sortie de la seconde mondiale le besoin était évident. Aujourd'hui, il est étonnant qu'aucun PDCA ait pu réaliser les constats que nous venons de faire. C'est notamment le cas du A de PDCA comme ACT sensé améliorer et corriger avec l'identification des points d'amélioration de la solution en place, le suivi de la performance et l'identification des améliorations.

1) Perspectives pour l'architecture des systèmes

Indépendamment d'une attente dans la concrétisation du concept de convergence et de robustesse des interfaces humaines, une perspective pour l'architecture système, serait de définir un environnement naturel qui englobe l'environnement de référence des systèmes artificiels. H. A. Simon dans son ouvrage sur les sciences de l'artificiel (Simon, 1996) considérait un artefact "comme un point de rencontre – une "interface", pour utiliser un mot à la mode – entre un environnement "interne", la substance et l'organisation de l'artefact lui-même, et un environnement externe, les alentours dans lequel il est mis en œuvre. Si l'environnement interne est adapté à l'environnement externe – ou vice versa -, l'artefact servira les buts assignés ». Dans le langage de D. Krob (Krob, 2004) les alentours dans lequel l'artefact (le système technique S – une brosse à dents électrique par exemple) est mis en œuvre, s'associe avec un « Extérieur de S » (Ext.(S) de S - la prise de courant pour recharger la brosse à dents électrique par exemple) et les deux font partie d'un environnement de référence.

Si l'entreprise souhaite dorénavant considérer une performance globale financière et extra-financière comme résultat de son modèle d'affaire et de sa gouvernance dans sa mise en œuvre, ne faudrait-il pas considérer un Environnement Naturel de S (Env. Nat. (S) qui englobe l'environnement de référence du système (Environnement E(S) de S. Une proposition a été réalisée en ce sens (Claude et al, 2022) et elle est représentée de la façon suivante.

Fig. 10. Environnement formel d'un système (formel) et Environnement Naturel d'un environnement formel d'un système (formel)

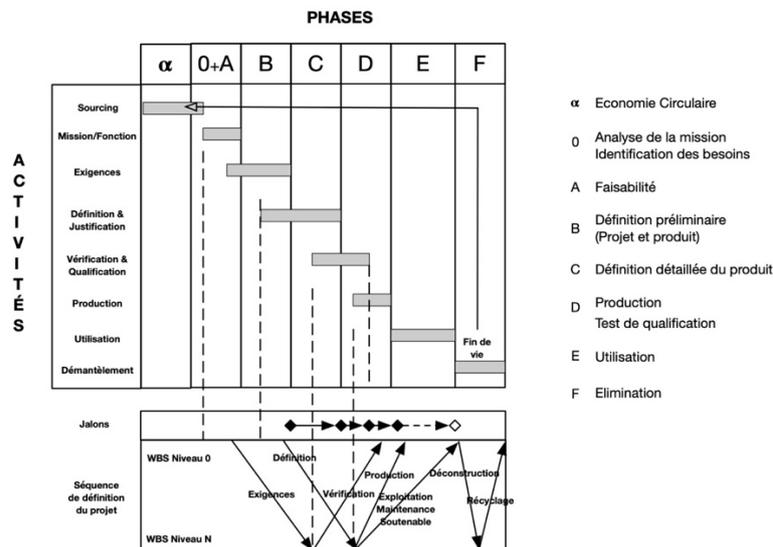


Le schéma classique de gauche se retrouve à l'intérieur de celui de droite. Cette approche paraît nécessaire car elle est différente de la seule prise en compte de l'environnement naturel par le biais des réglementations environnementales avec les approches actuelles de la sécurité et de la sûreté industrielle (où sécurité et sûreté nucléaire). Le choix pour l'entreprise d'être associé à un actif financier éligible à l'article 6, 8 ou 9 de la SFDR devrait favoriser cette approche. Il y aura probablement un frein culturel à considérer désormais que le système socio-économique (l'entreprise) qui crée de la valeur grâce à la commercialisation de systèmes socio-techniques et à la fois dépendante et influente du système socio-écologique qui l'entoure.

2) Perspectives pour l'ingénierie des systèmes

Une autre perspective pour l'ingénierie des systèmes cette fois, compte tenu de l'ambition européenne garantissant : la neutralité carbone à horizon 2050, une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources et que personne ne soit laissé de côté » (UE, 2024) est de proposer d'ajouter une phase à la Figure 6 qui est l'économie circulaire. Dans la Figure 11 ci-dessous, pour des systèmes existants, la phase α agit comme boucle de rétroaction après le cycle en V classique, après l'utilisation et l'élimination (*disposal*) pour se retrouver avant la phase 0+A. Pour des nouveaux systèmes, le processus veille à utiliser ses ressources et/ou faire appel à l'économie circulaire.

Fig. 11. Ajout de la phase « économie circulaire » aux cycle de vie du projet de l'ingénierie des systèmes



Cependant cette prise en compte de l'économie circulaire dans l'analyse en neuf niveaux de J.L Le Moigne (Le Moigne, 1990) correspond au 3^{ème} niveau de description des systèmes. Le 9^{ème} est celui où le système se finalise notamment dans le cas où « le réel projeté » (scénarios du GIEC, système réglementaire EU, SNBC,...) est très différent du « réel perçu » de l'environnement actif actuel de l'entreprise compte tenu de son modèle économique et de sa stratégie. Ce niveau est celui, par exemple, d'une entreprise qui souhaite s'engager dans cette nouvelle forme de développement économique et social. L'entreprise qui ne le souhaite pas restera à des niveaux inférieurs selon ses croyances et valeurs. Néanmoins, il faut bien mesurer le fait que l'objectif de ces réglementations est de faire en sorte que l'UE, vue comme un système socio-écologique, soit régulé du point de vue du changement climatique. Ce niveau correspond au 3^{ème} niveau pour J. L Le Moigne : compte tenu de variables d'entrées et de sorties et des états possibles du système, le système est régulé. Autrement dit, toutes ces réglementations ne visent qu'à faire en sorte de limiter la

probabilité d'un réchauffement global au-delà de 1,5°C à l'échelle de la planète (il était de 2°C en France et de 1,15°C au niveau mondial en 2022) à horizon 2100 de façon éviter que le forçage radiatif (à l'échelle du système Terre dans son environnement), qui est la variation du rayonnement net entre le flux émis et le flux reçu exprimé en Wm^{-2} au sommet de l'atmosphère due à la variation d'un facteur du changement climatique (modification de la concentration de CO₂ ou du rayonnement solaire) ne continue de s'accroître sachant qu'entre le scénario « accord de paris » du GIEC, le SSP1 1.9 et le scénario « on ne change rien », le SSP5 8.5 il y a 6 Wm^{-2} d'écart.

CONCLUSION

Lors de la clôture du Congrès Lambda Mu 23 à EDF Lab à Saclay, le Président du Comité de Programme du Congrès, M. Emmanuel Arbaretier avait conclu en disant que si le XX^{ième} siècle avait été celui où les métiers du risque, notamment la sûreté de fonctionnement et la maîtrise des risques avaient permis de rendre les systèmes techniques fiables, disponibles, durables sur leur cycle de vie et maintenables avec des risques en termes de sécurité et de sûreté industriels acceptables, le XXI^{ième} sera celui où les métiers du risque les rendront soutenables d'un point de vue écologique. L'ingénierie des systèmes a contribué largement à réaliser les objectifs du XX^{ième} siècle. Associée à l'architecture système, l'ingénierie des systèmes devrait se sentir concernée par ces enjeux surtout que ce ne sera pas de nouvelles exigences d'une maîtrise d'ouvrage à prendre en compte mais le nouveau système dans lequel les nouveaux systèmes « artificiels » aux sens de H.A Simon (Simon, 1996) devront être développés et les anciens re-finalisés en tenant compte de préférences en matière de durabilité et dans une perspective de double matérialité.

Des initiatives de rapprochement entre l'AFIS, chapitre français de l'INCOSE et l'École Nationale d'Architecture de Paris Val de Seine de façon à identifier les caractéristiques d'une architecture soutenable sont en cours. Des recherches complémentaires seront aussi réalisées notamment dans le cadre des Chaires de Recherche et d'Enseignement de l'ESTP – Grande École d'ingénieurs de la construction, dans les domaines du bâtiment (résidentiel et tertiaire) et celui de l'industrie-construction, respectivement avec les Chaire *Sustainable Buildings for the Future (SBF)*, portée par Socotec et *Sustainable Dependability* en cours de configuration.

Un Groupe de Travail de Réflexion (GTR) de l'IMdR pourrait être l'organisation pour assurer la coordination entre les entreprises concernées par cette problématique et d'autres acteurs comme l'Incose et ses chapitres nationaux comme l'AFIS en France.

REFERENCES

- AFIS (2009). Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système. V3.
- Bertalanffy, L. von (1968). *Théorie générale des systèmes*. Paris : Dunod.
- Bhattacharya, A. (2021). *The Man from the Future: The visionary Life of John von Neumann*. Allen Lane.
- Blanchard, B.S., Fabrycky, W.J. (1998). *Systemes Engineering and Analysis*. 3rd edition. Prentice Hall, 738 pages
- Bonte, P., Izard, M. (1992). Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie. 2^{ème} édition. Presses Universitaires de France.
- Breysse, D. (2009). *Maîtrise des risques en génie civil*. Tome 1, 2 et 3. Hermes. Lavoisier.
- CFB. (2008). *Règles cadres pour la gestion de fortune. Rapport de la CFB*. Sept. 2008. Commission Fédérale des Banques.
- Claude, F., Nouet, S. (2016). Les matrices conséquences-probabilités pour décider de l'acceptabilité du risque : un paradoxe économique. In : Congrès Lambda-Mu 20 « Maîtriser les risques dans un monde en mouvement ». 20^{ème} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct. 2016. Saint-Malo. France. DOI: 10.4267/2042/61714
- Claude, F. (2020). Le finement du risque d'entreprise, un must pour placer le risque au coeur des transitions ? In : Congrès Lambda Mu 22 " *Les risques au cœur des transitions* " (e-congrès) - Congrès Lambda Mu 21 de l'institut de Maîtrise et de la Sûreté de Fonctionnement, Oct. 2020, Le Havre, France. hal-03483624
- Claude, F., Signoret, J-P. (2022). La sûreté de fonctionnement soutenable : motivations. Etat de l'art, verrous et hypothèses scientifiques (1). Congrès Lambda Mu 23 " *Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable* " - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03877915v3
- Claude, F., Signoret, J-P., Thing leo, G. (2022). La sûreté de fonctionnement soutenable : motivations. Etat de l'art, verrous et hypothèses scientifiques (2). Congrès Lambda Mu 23 " *Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable* " - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03877927v2.
- Claude, F., Garatti, A., Thing Leo, G. (2024). Stratégie Nationale Bas Carbone de la France à l'échelle d'une organisation . In : Congrès Lambda Mu 24 « *Les métiers du risque, clés de la réindustrialisation et de la transition écologique* ». 24^{ème} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Bourges, France.
- COSO. (2017). *Le management des risques de l'entreprise. Une démarche intégrée à la stratégie et à la performance*. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission.
- Cox Jr, L. A. (2008, April). What's Wrong with Risk Matrices? . *Risk Analysis*, 18(2), 497-512.
- Davis, R. Alla, H. (1989). *Du Graficet au réseaux de Petri*. Hermès. 500 p.
- Dehouck, L., Munier, B. (2011). "How integrated should risk management and quality management be ?" Conférence ICASP.
- Dubuisson, B. (1962). *Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment*. Tome 1. Librairie Aristide Quillet. Paris.
- DoD. (2017). *Risk, issue, and Opportunity Management Guide for Defense Acquisition Programs*. January 2017. Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering. Washington, D.C.
- ECSS. (2024). *Document Tree. ECSS Disciplines*. <https://ecss.nl/standards/ecss-document-tree-and-status/>
- ESTP. (2024). *BIM : conception intégrée et cycle de vie du bâtiment et des infrastructures*. <https://www.estp.fr/bim-conception-integree-et-cycle-de-vie-du-batiment-et-des-infrastructures>
- Germa. (2012). *Management des Risques des Projets Complexes de Génie Civil et Urbain*. Le Moniteur n° 5682 cahier détachable.

- GIEC (2018). *Annexe I: Glossaire* [Matthews, J.B.R. (éd.)]. Dans: Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Sous presse.
- GRI (2024). CSRD Essentials. The Definitive Guide to the EU Corporate Sustainability Reporting Directive. Glonal Reporting Initiative.
- IMdR. (2024). Glossaire. Management intégré des risques. https://www.imdr.eu/818_p_57387/management-integre-des-risques.html
- IPCC (2021).: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- IPCC. (2022b). *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. ISBN 978-92-9169-160-9*
- ISO. (2024). *ISO/IEC/IEEE AWI 42024*. <https://www.iso.org/fr/standard/87510.html>
- Kolmogorov, A. (1950). *Foundations of the Theory of Probability*. (N. Morrison, Trad.) New York: Chelsea Publishing Company.
- Krob, D. (2009). *Eléments d'architecture des systèmes complexes*. ResearchGate.
- Krob, D. (2014). *Eléments de systémique. Architecture des systèmes*. in : Complexité - Simplesité. Collège de France. Paris : Collège de France: OpenEdition books.
- Le Moigne, J.-L. (1990). *La Modélisation des Systèmes Complexes*. Paris: Dunod.
- Le Moigne, J.-L. (1994). *La théorie du système général, théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France. 352 p
- Machina, M. J., & Schmeidler, D. (1992). A More Robust Definition of Subjective Probability. *Econometrica*, 60 (4), 745-780.
- Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF Éditeur.
- MTE. (2020). *Stratégie Nationale Bas-Carbone : la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. Mars 2020. Ministère de la transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. 192 p.
- OJEU. (2021). *Règlement délégué (UE) 2021/1253*. 21 avril 2021. Official Journal of the European Union.
- Pias, Claus. (2016). *Cybernetics. The Macy Conferences 1946-1953. The Complete Transactions*. Edited by Claus Pias, diaphanes.
- Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial*. Massachussets Institute of Technology.
- Thing-Leo, G., Claude, F. (2020). De l'importance de la décision multi-critères pour accompagner le développement durable : Application dans l'industrie du bâtiment. *Congrès Lambda Mu 22 « Les risques au cœur des transitions » (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques*, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France. Hal-03483615.
- Thing Leo, G., Claude, F. (2024). *Sûreté de fonctionnement soutenable : revue des modèles de quantification d'impacts environnementaux et de risques écologiques*. In : *Congrès Lambda-Mu 24 « Les métiers du risque, clés de la réindustrialisation et de la transition écologique »*. 24^{ième} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct . 2024. Bourges. France.
- UE (2019). *Règlement (UE) 2019/2088 du Parlement Européen et du Conseil du 27 novembre 2019 sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*
- UE (2020). *Règlement (UE) 2020/852 du Parlement européen et du Conseil du 18 juin 2020 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables et modifiant le règlement (UE) 2019/2088 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*
- UE (2021a). *Règlement délégué (UE) 2021/1253 de la Commission du 21 avril 2021 modifiant le règlement délégué (UE) 2017/565 en ce qui concerne l'intégration des facteurs de durabilité et des risques et préférences en matière de durabilité dans certaines exigences organisationnelles et conditions d'exercice applicables aux entreprises d'investissement (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*
- UE (2021b). *Règlement délégué (UE) 2021/2139 de la Commission du 4 juin 2021 complétant le règlement (UE) 2020/852 du Parlement européen et du Conseil par les critères d'examen technique permettant de déterminer à quelles conditions une activité économique peut être considérée comme contribuant substantiellement à l'atténuation du changement climatique ou à l'adaptation à celui-ci et si cette activité économique ne cause de préjudice important à aucun des autres objectifs environnementaux (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*
- UE (2022). *Directive (UE) 2022/2464 du Parlement européen et du Conseil du 14 décembre 2022 modifiant le règlement (UE) no 537/2014 et les directives 2004/109/CE, 2006/43/CE et 2013/34/UE en ce qui concerne la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*
- UE (2023). *Règlement délégué (UE) 2023/2772 de la Commission du 31 juillet 2023 complétant la directive 2013/34/UE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les normes d'information en matière de durabilité*
- UE. (2024). *Le pacte vert pour l'Europe. Notre ambition : être le premier continent neutre pour le climat*. Commission européenne. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr
- Wiener, N. (1965). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press.