

Sûreté de fonctionnement soutenable : pour une intégration de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique

Sustainable dependability: for an integration of climate change mitigation and adaptation

CLAUDE Francis
Enseignant-chercheur
ESTP

Grande école d'ingénieurs de la
construction
Cachan, France
fclaude@estp-paris.eu

CHEVALIER Marcel
System Analytics & Reliability Senior
Group Expert, Schneider Electric
Grenoble, France
marcel.chevalier@schneider-electric.com

SIGNORET Jean-Pierre
TotalEnergies Professeurs associés
j-p.signoret@orange.fr

THING LEO Gilles
Enseignant-chercheur
ESTP
Grande école d'ingénieurs de la
construction
Cachan, France
gilles.thingleo@estp.fr

Résumé — Cette recherche restitue les travaux menés dans le cadre du GTR GiRC de l'IMdR (Gestion intégrée des Risques et de la Complexité). Dans un premier temps ils ont permis d'identifier différents métiers du risque au sein de l'entreprise industrielle associés aux systèmes techniques, sociotechniques et socio-économiques. Dans un second temps ils ont permis de faire émerger une nouvelle discipline comme une extension de la sûreté de fonctionnement pour tenir compte d'une nouvelle propriété des systèmes techniques : la soutenabilité écologique.

Après les premières publications en 2022, la présente communication, pour tenir compte de l'atténuation du changement climatique et de l'adaptation au changement climatique au modèle décisionnel initialement proposé, analyse les connaissances existantes issues de la stratégie nationale bas carbone de la France, du système de réglementation de l'Union européenne (pour financer une économie décarbonée, dissociée de l'utilisation des ressources et inclusive), des normes d'ingénierie des systèmes, des modèles d'évaluation des impacts environnementaux et des risques écologiques ainsi que celles issues du VI^{ème} rapport du GIEC.

Les résultats présentent le modèle décisionnel à jour tenant compte pour l'évaluation des systèmes sociotechniques de l'entreprise et pour elle-même en tant que système socioéconomique d'une nouvelle frontière : le système socio-écologique.

Mots-clefs — *sûreté de fonctionnement soutenable, changement climatique, impacts, adaptation, vulnérabilité, atténuation*

Abstract — This research presents the work carried out within the framework of the GTR GiRC of IMdR (Integrated Risk and Complexity Management). Firstly, they made it possible to identify different risk professions within the industrial company associated with technical, socio-technical and socio-economic systems. Secondly, they allowed the emergence of a new discipline as an extension of dependability to take into account a new property for technical systems: the ecological sustainability.

After the first publications in 2022, this communication, to take into account climate change mitigation and adaptation to climate change in the decision-making model initially proposed, analyzes existing knowledge from France's national low carbon strategy, of the European Union regulatory system (to finance a decarbonized economy, decoupled from the use of resources and inclusive), systems engineering standards, models for assessing environmental impacts and ecological risks as well as those resulting from the VIth IPCC report.

The results present the up-to-date decision-making model considering for the evaluation of the socio-technical systems of the company and for itself as a socio-economic system a new frontier: the socio-ecological system.

Keywords — *sustainable dependability, climate change, impacts, adaptation, vulnerability, mitigation*

INTRODUCTION

Lors du Congrès Lambda Mu 23, dont le thème était « Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable », deux communications ont introduit un nouveau concept, la sûreté de fonctionnement soutenable (*sustainable dependability*). En sus des Cindyniques, trois métiers du risque de l'entreprise industrielle était principalement mobilisés,

la sûreté de fonctionnement, la maîtrise des risques et le management intégré des risques respectivement aux échelles des systèmes techniques, socio-techniques et socioéconomiques. Le constat réalisé est que si l'environnement naturel est bien pris en compte dans le cadre des activités à haut risque il n'apparaît pas forcément de façon explicite et formelle dans les modèles de sûreté de fonctionnement (SdF) des systèmes techniques plus classiques. La maîtrise des risques industriels, quant à elle, à l'échelle des systèmes sociotechniques, tient compte d'aspects environnementaux que ce soient des points de vue de la sécurité et de la sûreté industrielle. Pour évaluer la performance des systèmes socio-économiques, le management intégré des risques tiendra compte de la performance du système socio-économique en sus généralement des critères de coûts et/ou de rentabilité et de délais ainsi que des préférences en matière de risque du ou des décideurs (donneur d'ordre interne ou externe) pour un projet donné ou plus globalement celle de l'entreprise.

Or, le risque de changement climatique est venu introduire une autre dimension au-delà du système socio-économique qui formait jusqu'alors l'environnement de l'entreprise. En effet, 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 concrétiser cette ambition, un système réglementaire (MiFID II, SFDR, CSRD, ESRS, règlement Taxonomie) a été déployé pour application par les sociétés d'investissement et les entreprises pour organiser le financement à long terme par des investisseurs de cette nouvelle forme de croissance. La Stratégie Nationale Bas Carbone de la France (SNBC) quant à elle, a quatre objectifs majeurs : décarboner complètement la production d'énergie à horizon 2050, réduire de moitié la consommation d'énergie dans tous les secteurs, réduire les émissions non énergétiques, augmenter et sécuriser les émissions négatives des puits de carbone naturels ainsi que celles issues des technologies de Capture et Séquestration du Carbone (CSC). De plus, le nouveau paradigme du reporting extra-financier pour les entreprises (CSRD), qui a désormais l'ambition d'être aussi fiable que le reporting financier avec les normes ESRS, vise une évaluation dans une perspective de « double importance relative » (*double materiality*) GRI. Autrement dit, les informations à publier portent à la fois sur les incidences des activités de l'entreprise sur la population et l'environnement (matérialité d'impact) et sur la manière dont les questions de durabilité influent sur l'entreprise (matérialité financière). Le terme du « durabilité » est volontairement employé ici car c'est la traduction choisie dans les textes européens pour « *sustainability* ».

La gouvernance, le modèle économique, la stratégie ainsi que les risques et opportunités doivent être pris en compte. Ainsi, au-delà du système socio-économique, la nouvelle frontière de l'entreprise apparaît comme étant celle de son système socio-écologique. Depuis, que le Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'évolution du Climat (GIEC) est rentré dans une démarche de prescription de gestion des risques, les deux axes de traitements proposés que sont l'atténuation du changement et l'adaptation au changement climatique devrait s'intégrer au modèle décisionnel. Le système réglementaire est dans les faits une transcription de la problématique planétaire évaluée par le GIEC à l'échelle de l'UE et des différents pays après retranscription dans les différents droits nationaux.

Toutefois, la normalisation, compte tenu du cloisonnement des comités techniques notamment au sein de l'ISO et de l'IEC, n'encourage pas cette intégration. Les normes sur le management de la sûreté de fonctionnement précisent qu'elles ne tiennent pas compte de l'environnement et de la sécurité ! Or, ce silotage normatif est contraire à l'esprit intégrateur de la sûreté de fonctionnement qui, depuis la seconde guerre mondiale, a ajouté des propriétés d'analyse et d'évaluation aux systèmes techniques (fiabilité, durabilité, disponibilité, maintenabilité, productivité, cybersécurité ...) pour tenir compte des nouvelles exigences de son environnement socio-économique. D'où notre proposition au Congrès Lambda Mu de faire émerger une nouvelle discipline tenant compte du constat ci-dessus : la *Sustainable Dependability*.

Dans cet article notre problématique va donc consister à intégrer l'atténuation du changement et l'adaptation au changement climatique dans le modèle décisionnel de la *Sustainable Dependability*. La première section – comme état de l'art – revient sur les deux articles initiaux et réalise un point sur le système de régulation mis en place par l'Union européenne en ce qui concerne la finance durable ainsi que sur la SNBC. La finance durable traduit une approche de l'investissement et de la gestion financière d'ensemble qui intègre dans les décisions des critères environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG).

En l'absence de solutions exploitables, une deuxième section présente, dans un premier temps, le verrou de cette recherche, l'hypothèse retenue ainsi que la démarche suivie. Dans un second, l'analyse des connaissances existantes porte principalement sur les travaux des trois groupes de travail du GIEC constitutif du 6ième rapport. Les résultats sont présentés dans une troisième section. Enfin, avant de conclure une quatrième section discute des résultats et envisage des travaux de recherche complémentaires.

I. ETAT DE L'ART (DU GIRC A L'EMERGENCE DES METIERS DU RISQUE ET A LA SUSTAINABLE DEPENDABILITY)

Pour resituer l'origine de la *Sustainable Dependability* nous pouvons identifier deux périodes. Initialement il y a la création d'un Groupe de Travail et de Réflexion (GTR) de l'IMdR : le GiRC pour Gestion intégrée des Risques et de la Complexité. ~~Initialement~~ Le projet était de réaliser des états de l'art et d'identifier les difficultés scientifiques et techniques dans l'architecture aux échelles des produits complexes, des projets et des portefeuilles de projets complexes et enfin dans la mise en place d'un cadre de référence d'appétit pour le risque (*Risk Appetite Framework*) à l'échelle d'une entreprise. Les difficultés rencontrées pouvant éventuellement à terme se concrétiser par des projets de R&D.

En parallèle, un projet collaboratif, RiD Project Management, dans le domaine de la construction étant en train de se clôturer dans la même thématique que le GTR avec en sus la réalisation d'un démonstrateur pour une entreprise générale

de construction. Les membres de l'Équipe N°5 de recherche à Cachan de l'ESTP souhaitait partager leurs résultats et éventuellement qualifier la technologie dans un autre secteur industriel. Ce projet a mobilisé vingt personnes à temps plein pendant trois années associant, des ingénieurs, des directeurs généraux de filiales, d'unités opérationnelles, des directeurs de département d'ingénierie, de travaux, de SAV, des mathématiciens et des actuaires. Associant deux groupes Bouygues Construction et Vinci Construction, deux PME et l'ESTP comme partenaire académique, le projet avait été labelisé par les pôles de compétitivité Finance Innovation et Cap Digital et avait obtenu le soutien de la Région Île-de-France et de la Banque Publique d'Investissement.

A. Émergence du concept de « métiers du risque »

Durant la première période, de juin 2017 à juin 2021, vingt-trois réunions de travail du GiRC ont pu se dérouler et elles ont pu réunir des experts métiers et des chercheurs dans des domaines variés comme la sûreté de fonctionnement, la maîtrise des risques, la gestion des risques projet, le management intégré des risques, le management des risques de l'entreprise, la gestion de crise, la direction des assurances, la direction financière, la compliance, la normalisation du management des risques. Néanmoins, dès la deuxième réunion (la première ayant été consacrée à la présentation et la discussion du programme de travail envisagé) des désaccords profonds sont apparus pour définir des termes clés comme « risque », « opportunité », sûreté », « sécurité »,...

L'approche a alors été d'appliquer le raisonnement systémique et de considérer les différentes expertises du groupe comme étant des systèmes puis d'utiliser le cadre universel d'analyse architectural d'un système réel (Krob, 2014). Ainsi, pour chacune d'entre elles, il a fallu définir, sa finalité – le POUR QUOI de l'expertise dans l'entreprise, les fonctions à réaliser – le QUOI, les ressources concrètes utilisées (sous la forme de méthodes notamment) – le COMMENT et enfin le glossaire de base utilisé par l'expertise. Une fois ce travail réalisé, une compréhension globale est naturellement apparue avec un respect mutuel des différents points de vues et que chacun, chaque expertise, chaque système se sentait appartenir à un tout cohérent organisé autour d'expert métier.

La clarification majeure a été finalement d'identifier un métier avec une fonction clé à réaliser par type de système appréhendé dans l'entreprise. La **sûreté de fonctionnement** adresse principalement les systèmes techniques afin qu'ils restent *dependable* (i.e. rendent les services pour lesquels ils ont été conçus) sous la contrainte de limite supérieure de probabilités d'occurrence et de conséquence des événements redoutés. La **maîtrise des risques industriels** adresse les systèmes sociotechniques, et le terme de « maîtrise » se concrétise dans le fait que, même dans le cas où les probabilités d'occurrence d'incidents ou d'accidents sont faibles voire extrêmement faibles, les conséquences (en termes de dommages aux personnes ou aux biens par exemple) ne devront jamais être supérieure à une limite supérieure acceptable fixée. En ce sens, sûreté de fonctionnement et maîtrise des risques sont deux métiers indissociables (ce sont deux manières différentes et complémentaires d'aborder le même problème). Le **management intégré des risques**, adresse les systèmes socio-économiques. La sûreté de fonctionnement et la maîtrise des risques permettent de définir les performances du système sociotechnique étudié et à ces attributs viennent s'ajouter généralement les coûts et/ou la rentabilité, ainsi que les délais de réalisation dans le cas des projets. Sa finalité est la coordination, sur l'ensemble du périmètre de management des risques déterminé, d'une part, des auteurs de décisions entre eux et, d'autre part, de ceux-ci avec les objectifs. Ceci implique que tout auteur de décision : 1. ait pleinement connaissance des conséquences de chacune des alternatives probabilisées et de leurs contributions au risque global de l'entreprise, 2. 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 desdits objectifs (IMdR, 2024). En ce sens, le management intégré des risques est un mode de gouvernance. Le management par la qualité est un autre mode possible mais la finalité est différente. Tel que formulé le management intégré des risques peut être vu comme un relais pour optimiser la prise de risques à l'interface, par exemple selon les organisations, entre le management des risques de l'entreprise (ERM) et l'ingénierie, la qualité et la RSE.

Le travail sur le vocabulaire de base par expertise a permis de réaliser, avec la contribution des autres GTR, un "glossaire" des "métiers" du risque publié sur le site de l'ImdR (ImdR, 2024). Au niveau du GTR un ouvrage collectif sur les métiers du risque dans l'entreprise industrielle est en cours de publication.

Pour initier la seconde période, l'événement déclencheur a été la publication par Jean Pierre Signoret de son ouvrage sur la sûreté de fonctionnement des systèmes de sécurité et de production. De notre point de vue, il y avait « le Villemeur » comme référence dans le domaine, mais qui commençait à dater, et cette dernière publication faisait non seulement une mise à jour des concepts et des méthodes mais était aussi appropriée aux systèmes de production (Signoret & Lannoy, 2021). Ainsi, si la sûreté de fonctionnement est depuis sa création fondamentalement adaptée aux produits manufacturés l'ouvrage démontre qu'elle est aussi parfaitement adaptée pour les systèmes de production.

À ce moment-là, l'Équipe N°5 à Cachan de l'Institut de Recherche de l'ESTP était sur un projet d'évaluation de la performance extra-financière d'un projet de construction. Dans le groupe d'experts du projet, le terme de "durabilité", au sens de la sûreté de fonctionnement (c'est à dire de la durée de fonctionnement dans le temps), était au centre de la grande majorité des actions potentielles. Dans la terminologie de la sûreté de fonctionnement, la durabilité est l'aptitude à fonctionner tel que requis, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à la fin de la vie utile (Electropedia, 2024). Repousser le temps de la vie utile apparaissait comme la bonne correspondance avec le développement durable.

Or, dans la vision initiale d'un développement soutenable (UICN, 1980) préalable de près de dix ans à celle du rapport Brundtland, l'approche faisait ressortir le fait que le "développement" concerne les humains et qu'il doit permettre

d'atteindre les objectifs de bien-être social à la suite d'activités de production et de consommation de biens et de services, qui utilisent inéluctablement et largement les ressources de la biosphère et de l'énergie pour les transformer.

Classiquement, la sûreté de fonctionnement, la maîtrise des risques et le management intégré des risques font en sorte que ce développement se fasse sous la condition que les systèmes techniques (installations, produits manufacturés) soient *dependable*, que les risques à l'échelle du système sociotechniques risques soient acceptables et qu'à l'échelle du système socio-économique la prise de risque soit créatrice de valeur pour l'entreprise. Dans la perspective d'un développement soutenable ces approches devraient être associées à une boucle de rétroaction visant à atteindre les objectifs ~~du~~ avec des actions de préservation et de conservation de l'environnement naturel pour que cette utilisation puisse perdurer, donc soit "soutenable" c'est à dire en équilibre avec le « bien-être des écosystèmes naturels » en référence à leur capacité à se renouveler, à conserver leur diversité et leur qualité.

L'UICN avait alors trois objectifs : 1. ~~de~~ maintenir les processus écologiques essentiels et les systèmes de support à la vie (*life-support systems*), 2. ~~de~~ préserver la diversité génétique et 3. garantir l'utilisation soutenable des espèces et des écosystèmes. En rapport à la notion de capital naturel, pour W. Rees et W. Wackernagel, la soutenabilité signifie que le capital de la nature ne doit pas être utilisé plus rapidement qu'il ne peut être remplacé (Rees & Wackernagel, 2018).

À l'évidence ces dimensions sont différentes de la "durabilité" au sens usuel du terme et s'il est impensable de sortir la durabilité de l'analyse de système, ce que nous nommons la "soutenabilité écologique" doit être intégrée, au moins pour les entreprises qui le souhaitent et des besoins se sont exprimés en ce sens. Face à ce constat, une discussion a été organisée avec Jean-Pierre Signoret afin d'avoir ses avis d'expert sur la prise en compte de la soutenabilité écologique par la sûreté de fonctionnement et notamment en tant qu'ancien project leader de divers comités de normalisation du TC 56 de l'ISO, du cloisonnement de la normalisation en matière de sûreté de fonctionnement (aspects économiques) et sécurité. Sur la premier point sa réponse a été que la soutenabilité fait maintenant l'objet des préoccupations de l'IEC aussi bien que de l'ISO et qu'elle devrait être prise en compte à plus ou moins court terme. Sur le second, le cloisonnement actuel de la normalisation apparaît complètement antinomique avec l'esprit intégrateur de la sûreté de fonctionnement pour tendre au but industriel de "produire de manière sûre et rentable". Y ajouter une troisième dimension pour "produire de manière sûre, rentable et soutenable" risque d'empirer encore plus la situation si le lobbying du "soutenable" vient défendre son pré-carré face aux tenants de la "*dependability*" (focalisés sur la seule l'économie") et de la "safety" (focalisé sur la seule sécurité).

Ainsi, la définition durable du rapport Brundtland (Brundtland, 1987) peut être gardée comme vision politique du développement, d'ailleurs c'est ce qu'elle a toujours été et principalement pour les pays dits occidentaux. C'est d'ailleurs aussi, puisqu'elle est politique que, même à l'échelle d'un pays comme la France, il n'existe pas depuis près de 40 ans de consensus de l'ensemble des partis politiques pour savoir comment il faut le concrétiser.

Le développement « durable » a été modélisé depuis le rapport Brundtland comme étant à l'interaction de trois sphères : environnementale, sociétale et économique. Or, comme nous l'avons abordé le bien-être social n'est pas une constituante du développement, c'est son objectif. Ainsi, dans cette modélisation le développement « durable » est une pure expérience de pensée. Il est d'ailleurs impossible de définir le concept de développement à partir de celui de développement « durable ». Il est possible d'en inférer ce que n'est pas le développement durable mais pas ce qu'est le développement.

Ainsi, du point de vue des auteurs, le développement durable sera une émergence qui dépendra de deux conditions : 1. modifier les comportements des systèmes techniques, les machines, afin de rendre les services qu'ils offrent de façon soutenable du point de vue des capacités des services écosystémiques et énergétiques. Ce travail est essentiellement le rôle des investisseurs, des dirigeants des entreprises et des ingénieurs et des managers et de leurs équipes respectives. 2. Modifier les comportements des humains pour les rendre compatibles avec les trois objectifs précédemment définis par l'UICN.

B. *Émergence de la Sustainable Dependability*

Ces points de vue étant partagés, une deuxième période des travaux du GiRC a débuté en juillet 2022 pour se clôturer en juin 2023 après...vingt-trois réunions de travail. Ces travaux ont associé les auteurs de cette communication et ont été initialement valorisés par trois communications au Lambda Mu 23 à EDF Lab Saclay.

La première visait à faire le point depuis leurs débuts sur quatre disciplines, quatre métiers du risque de l'entreprise industrielle : les Cindyniques, la Sûreté de Fonctionnement, la Maîtrise des Risques Industriels, le Management intégré des Risques (Claude & Signoret, 2022). Le résultat est une représentation systémique qui met en relation les composants au système socio-économique et passant par le système socio-technique.

La deuxième, a cherché à construire un modèle décisionnel en s'affranchissant des silos normatifs. Une des grandes difficultés dans le raisonnement systémique dès lors qu'il intègre plusieurs niveaux systèmes et de toujours se poser la question de savoir sur quel niveau on raisonne. Ainsi, niveau logique par niveau logique au sens de G. Bateson (Bateson, 1977), ou niveau système par niveau système, au sens de l'architecture système (la deuxième étant fondée sur la première elle-même issue d'une application de la théorie des types de Bertrand Russel de 1908), nous avons identifié les propriétés attendues à chaque niveau logique du point de vue des risques. Ainsi, dans une première approche, nous avons constitué un modèle décisionnel qui permet de déterminer la valeur d'un système socio-économique, aux risques socialement acceptables et en conformité avec la réglementation environnementale. Les quatre attributs en amont sont la performance

du système socio-économique, le couple coût/rentabilité, les délais de mise à disposition ainsi que l'impact environnemental (impact global avec une Analyse de Cycle de Vie et impact local pour les écosystèmes locaux). On retrouve ici le concept de bien contingent développé dans le cadre de la théorie de la valeur qui est une extension du concept de bien pour tenir compte de l'incertitude. Un bien contingent tient compte des caractéristiques physiques du produit ou service, d'un délai de mise à disposition et de « risques » qui peuvent continger la livraison. Nous avons gardé la notion d'impact environnemental et non performance environnementale car à ce jour les Analyses de Cycle de vie (AVC) permettent de quantifier des impacts et non des risques. Pour ce faire, puisque l'expérience le montre depuis l'après-guerre, si l'on souhaite que le système socio-technique dispose de propriétés dans son fonctionnement global, il est nécessaire que ces propriétés soient embarquées dès l'échelle composants. Une extension est proposée (Fig.11), par l'ajout de la propriété de soutenabilité écologique, symboliquement représenté par un panneau de mise à la Terre, des systèmes techniques à cette échelle.

Le troisième article est né du besoin, dès la conception, de disposer d'outils prospectifs à utiliser dès l'expression du besoin et permettant de travailler dans un environnement multi parties prenantes et tenant compte, dans le même modèle, des dimensions écologique, économique, d'ingénierie, comptable, démographique... (Thing Leo & Claude, 2022). La méthodologie développée est issue de méthodes de prospectives (exploratoire et décisionnelle) et de dynamique de systèmes. Le fait étonnant a été d'obtenir en grille de lecture finale, les mêmes qualificateurs que les Cindyniques avec l'hyperespace du danger. C'est à croire que Georges-Yves Kerven connaissait une des méthodes utilisées. C'est aussi un besoin exprimé 2017 par le *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* (COSO), qui détermine le référentiel de management des risques et de contrôle interne (ERM), dont l'objet était de mieux introduire la stratégie de l'entreprise et la performance au management des risques. D'ailleurs durant les travaux du GiRC, cet outil a été utilisé pour contribuer à l'analyse stratégique de l'IMdR avant de déterminer sa nouvelle stratégie.

C. Du GiRC aux Chaires de Recherche et d'Enseignement

Compte tenu, de l'ambition de l'approche de la *Sustainable Dependability* les auteurs ont alors émis le souhait de poursuivre ces travaux notamment dans le cadre de Chaires de Recherche et d'Enseignement. En effet, il y a un défi en matière de recherche et développement mais aussi en matière d'enseignement que ce soit en formation initiale ou formation continue. Depuis le dernier Congrès Lambda Mu 23, une Chaire de Recherche et d'Enseignement de l'ESTP – Grande École d'ingénieurs de la construction a été ouverte et une autre est en projet. La première qui a été ouverte porte principalement dans les domaines du bâtiment (résidentiel et tertiaire) et celui de l'industrie-construction, avec la Chaire *Sustainable Buildings for the Future (SBF)*, portée par Socotec. La seconde, en cours de montage est dans le domaine spécifique de la sûreté de fonctionnement soutenable avec la Chaire *Sustainable Dependability*. D'autres programmes sont en cours d'études avec des industriels.

Préalablement à la création de ces deux Chaires, les auteurs ont travaillé sur une extension de la dernière version du modèle décisionnel (Claude et al, 2022, Fig.11) pour tenir compte des deux axes d'actions proposé par le GiEC que sont:

- l'atténuation du changement climatique et
- l'adaptation au changement climatique

En effet, il ne s'agit plus seulement de considérer ce que l'on nomme « environnement » des points de vue de la sécurité et de la sûreté industrielle au sens des définitions proposées (IMdR, 2024) et encore moins de l'approche réductrice Qualité, Sécurité et Environnement (QSE) qui regarde la sécurité uniquement sous l'angle de l'hygiène et de la sécurité au travail et l'environnement sous l'angle de la conformité aux réglementations et normes en vigueur. « Les projections climatiques se distinguent des prévisions climatiques par le fait qu'elles sont liées aux scénarios d'émissions, de concentration ou de forçage radiatif utilisés, lesquels reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socio-économique et technologique qui peuvent ou non se réaliser » (GiEC, 2018). Les projections sont donc issues de simulations et force est de constater que toutes les trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP) (*Shared Socio-economic Pathways*) qui décrivent différentes évolutions futures du développement socio-économique vont influencer d'une façon plus ou moins importantes toutes les activités humaines de production et de consommation ainsi que tous les écosystèmes naturels. Les trajectoires SSP ont été élaborées pour compléter les trajectoires représentatives de concentration RCP par divers enjeux socio-économiques en matière d'adaptation et d'atténuation. Le nombre associé au scénario SSP indique donc le niveau de forçage radiatif attendu pour 2100.

Ainsi, pour les métiers du risques, le cadre d'analyse systémique n'est plus seulement le(s) système(s) sociotechnique(s) de l'entreprise (installations, produits manufacturés, services) dans leur environnement de référence – son système socio-économique – mais ce dernier dans un nouvel environnement de référence – son système socio-écologique (*Social-ecological systems*). Ce sont pour le GiEC, des « systèmes intégrés qui comprennent à la fois les sociétés humaines et les éco-systèmes, 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. Cette définition s'inspire de Conseil de l'Arctique (2016) et Berkes et Folke (1998) » (GiEC, 2018).

II. VERROU, HYPOTHESE, DEMARCHE SUIVIE ET ANALYSES DES CONNAISSANCES EXISTANTES

A. Problématique à résoudre, verrous, hypothèse et démarche suivie

La problématique à résoudre a été définie de la façon suivante :

- industrialiser ou ré-industrialiser dans un contexte de transition écologique avec des solutions incluant celles fondées sur la Nature telles que définies par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) ;
- créer de la valeur tout en tenant compte au sein d'un secteur particulier d'activité de la réalité de la limitation des ressources et de la capacité de charges des écosystèmes naturels et donc, ajouter la propriété de soutenabilité écologique aux caractéristiques des systèmes techniques à concevoir ;
- définir la gouvernance externe et interne pour y parvenir dans le cadre d'une démarche de management intégrée des risques et des opportunités qui au-delà de la seule définition d'instance de gouvernance doit s'attacher à définir des indicateurs clés de risque pragmatiques en relation avec les objectifs des ingénieurs-managers et de leurs équipes.

Pour résoudre cette problématique les verrous suivants ont été identifiés :

Extension des critères d'évaluation de performance utilisés dans les industries à risque :

- de la sûreté de fonctionnement (*dependability*) à l'échelle des systèmes techniques à la soutenabilité des stocks et des flux énergétiques, de matériaux ainsi que des puits de carbone naturels ;
- de la Maîtrise des risques à l'échelle des systèmes sociotechniques à la sobriété et à l'atténuation du changement climatique ;
- du Management Intégré des Risques à l'échelle des systèmes socio-économiques à la performance extra-financière des systèmes socio-environnementaux ;

Pour ce faire, les équipes de R&D ainsi que les professionnels dans le cadre d'une recherche intervention (David, 2000) devront :

- identifier/acquérir les données nécessaires et suffisantes et les valoriser pour l'entreprise ;
- concevoir un modèle décisionnel en matière de performances et opérationnel à l'échelle d'un projet, d'un portefeuille de projets et à celui de l'entreprise sur la base des méthodes d'analyses du type des Modèles d'Évaluation Intégré (IAM) ;
- construire ledit modèle décisionnel au niveau conceptuel (prévisionnel) ou opérationnel (temps réel) en mesure d'anticiper, modéliser, apporter une aide à la décision multicritères (e.g. par la modélisation probabiliste, la simulation stochastique, l'intelligence artificielle...), intégrer les nouvelles informations et structurer le reporting en fonction des attentes des différentes parties prenantes internes et externes.

L'hypothèse retenue était que nous allions exploiter, dans un premier temps, dans :

- la stratégie nationale bas carbone de la France (SNBC) et l'analyse prospectives sur les Futurs énergétiques de RTE ;
- le système réglementaire associé au Pacte Vert européen pour définir les contours d'une finance durable auprès des différents secteurs économiques ;
- les principales normes d'ingénierie systèmes ;
- une revue des modèles de quantification d'impacts environnementaux et de risques écologiques ;
- le VI^{ème} rapport du GIEC,

des éléments clés pour structurer une ingénierie des exigences pour notre modèle décisionnel. Pour ce faire, notre démarche a alors consisté à étudier différentes ressources clés associées à notre hypothèse. Ce travail est restitué dans la sous-section suivante d'analyse des connaissances existantes.

B. Analyse des connaissances existantes

1) La stratégie nationale bas carbone de la France

Les résultats de cette étude font l'objet d'une publication spécifique dans le cadre de ce Congrès (Claude et al, 2024a). En synthèse, la SNBC qui est définie pour des décideurs publics a été mise à l'échelle d'une entreprise qui souhaite se corréliser à cette stratégie. L'étude retient l'hypothèse de croissance du PIB en volume jusqu'en 2050 (et donc de la valeur ajoutée brute en ce qui concerne les entreprises), l'hypothèse de croissance démographique ainsi que celle de la population active, la trajectoire de décarbonation avec comme base l'année 1990, la réduction de la consommation d'énergie associée à l'électrification des usages, les consommations non-énergétiques ainsi que les puits de carbone naturels et les technologies de capture et de stockage du carbone.

La compréhension du volet énergétique de cette stratégie a nécessité l'étude en profondeur de différentes ressources sur le sujet et notamment le rapport complet de Réseau de Transport d'Électricité (RTE) sur les Futurs Énergétiques 2050 publié en 2022 (RTE, 2022).

2) Le système réglementaire associé au Pacte Vert européen pour définir les contours d'une finance durable

On attribue très volontiers la notion de système pour cet ensemble de texte dans la mesure où chacun à une finalité spécifique, des fonctions à réaliser particulières et mobilise des ressources différentes. De plus, elles sont à des degrés divers toutes en interactions. Ce système réglementaire a été décrit dans une communication pour ce Congrès (Claude et al, 2024b).

Le premier niveau de ces règlements est MiFID II (UE) 2021/125 qui, après avoir introduit le concept de préférences en matière de risque de façon à ce que les conseillers en investissements proposent à leurs prospects et clients des investissements adaptés à leur profil de risque, cette mise à jour introduit le concept de *sustainable preferences* traduit dans le texte du Journal officiels de l'UE par **préférences en matière de durabilité**. Il 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. Autrement dit, la prise en compte des préférences en matière de durabilité et de risques des investisseurs vont modifier substantiellement l'organisation des sociétés d'investissement qui commercialisent des produits financiers. Les produits financiers peuvent être tout type d'actifs financiers (action et obligation d'entreprise, etc...) où des projets d'investissements (bâtiment, infrastructure, installation industrielle,...).

Le deuxième niveau de règlement est celui de la *Sustainable Financial Disclosure Reporting* (SFDR) qui concerne tous les acteurs et conseillers financiers de l'UE ainsi que ceux faisant commerce avec l'UE. Il vise à normaliser l'information sur l'intégration des risques et des facteurs de durabilité dans le processus de prise de décision selon trois degrés de durabilité des produits financiers (pour simplifier : aucune, modérée et forte prise en compte). Une **catégorisation des produits financiers** devra être effectuée sur la base de 9 indicateurs pour les Gaz à effet de serre (GES), la biodiversité et les déchets, 5 pour un second thème tenant compte des aspects sociaux et 2 volontaires.

En 2008, la FINMA qui est l'autorité de surveillance indépendante du marché financier suisse, pour accompagner les acteurs dans la mise en œuvre de la première version de MiFID II avait résumé l'exigence de proposer des investissements adaptés de la façon suivante : « les objectifs de placement dépendent de la définition du profil de risque du client. Il s'agit d'une part de définir l'appétit (subjectif) au risque du client et sa capacité (objective) à le supporter. Après avoir défini le profil de risque du client, le gérant de fortune fixe avec lui les objectifs de placement » (CFB, 2008). Malgré les connaissances scientifiques dans le domaine des sciences de la décision, qui représente toujours un effort pour être exploitable pour une application particulière, aujourd'hui, il est possible de se rendre compte de ce que cela a entraîné très concrètement dans les relations entre les banques et leurs clients dès lors qu'un placement « risqué » est envisagé et ne serait-ce en France pour un Livret A. Pléthore de documents à lire et signer pour le client qui *in fine* se servent absolument pas le conseiller financier à connaître son profil de risque et à lui proposer des investissements adaptés en conséquence. De la conformité réglementaire à l'état pur qui prend du temps, coûte et qui ne sert que la protection du risque juridique pour les institutions financières. Dans le cas présent, avec les préférences en matière de durabilité se sera beaucoup plus complexe.

Évaluer un projet d'investissement par exemple sur 9 indicateurs extra-financiers c'est 510 variables qu'il faut au préalable estimer pour tenir compte des interactions et éviter la méthode élémentaire de type somme pondérée entre indicateurs. Ceci est valable pour un projet. Au niveau de leurs portefeuilles, comment vont faire les acteurs des marchés financiers pour agréger ne serait-ce que quatre actifs qui disons, pour deux, n'ont aucune caractéristique de durabilité et pour les deux autres des caractéristiques modérée et forte ? Ce sera purement discrétionnaire et ce point n'est pas négligeable pour les entreprises puisque cette classification va entraîner un fléchage vers des investissements dits durables. De plus, les investisseurs ne vont-ils pas tenir compte, en sus de leurs préférences en matière de durabilité, de leurs préférences en matière de risques ? a priori non. Dans ce cas, les meilleures pratiques consistent à définir l'attitude par rapport au risque d'un investisseur par l'établissement de son profil de risque en tenant compte, sur une distribution de résultats qui tient compte des gains et pertes extrêmes et un point de référence (en général le rendement), de son aversion au risque et de son aversion aux pertes. Dans ce cas, il faudra tenir compte pour une approche globale des préférences en matière de risques et des préférences en matière de soutenabilité.

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 agréger compte tenu de leur portefeuille d'actifs financiers.

Le troisième niveau de règlement est celui qui concerne la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises (EU) 2022/2464. 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. Toutefois, les informations à publier devront porter « 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 ». Autrement dit, cette approche Inside Out et Outside In rappelle

l'approche de la sûreté de fonctionnement et de la maîtrise des risques à l'échelle du système sociotechnique, respectivement pour la prise en compte de la sécurité et de la sûreté industrielle, sauf qu'ici c'est à l'interaction entre le système socioéconomique de l'entreprise et son système socio-écologique.

Dans la mesure où il existe une ambition de comparabilité entre les entreprises de façon à ce que les investisseurs puissent discriminer plus facilement les produits financiers et/ou les projets d'investissement, le fait qui sera de notre point de vue le plus structurant à terme est que ce nouveau reporting extra-financier soit aussi fiable que le reporting financier. Pour ce faire, la Commission a adopté les normes ESRS (*European Sustainability Reporting Standards*) (UE) 2023/2772 qui ont été publiées en France au Journal Officiel le 7 décembre 2023. En référence aux principes d'un investissement responsable, elles couvrent 12 thématiques (deux générales, cinq concernant le volet environnemental, quatre le volet social et un avec la gouvernance) et reposent en conséquence sur les trois piliers classiques de la RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises). Le projet d'une quarantaine de critères sectoriels a été retardé mais devraient être publiés.

Enfin, le quatrième niveau est celui avec les règlements Taxonomie (UE) 2020/852 du 18/06/2020 et le premier acte délégué sur son volet climatique (UE) 2021/2139 du 4/06/2021 qui établit les critères d'examen technique. Ils visent à flécher les investissements durables par la définition des activités dites durables (UE) 2020/852 du 18 juin 2020. Il 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. Le règlement Taxonomie vise 6 objectifs : 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). Ainsi, désormais tous les systèmes sociotechniques peuvent être évalués sur le volet climatique à l'aune de ces critères d'examen technique pour 70 activités économiques qui représentent 90% des émissions de GES.

3) *Prise en compte de la soutenabilité écologique par les principales normes d'ingénierie des systèmes*

L'étude qui a été réalisée fait ressortir que la propriété de soutenabilité n'est pas prise en compte dans les principales normes du Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace, de l'ISO-IEC JTC1/SC 7 pour l'ingénierie des logiciels et des systèmes et les ECSS (*European Cooperation for Space Standardization*) que ce soit pour des aspects de sûreté de fonctionnement (*dependability*) ou de sécurité (*safety*). La dimension sûreté n'est pas évoquée. Les ECSS ont néanmoins ouvert une quatrième branche dans le domaine, en sus du management de projet, de l'assurance qualité et de l'ingénierie mais elles ne sont pas au niveau des disciplines de chacune de ces branches.

Dans les phases prises en compte dans l'ingénierie des systèmes l'économie circulaire n'est pas prise en compte. Une première proposition a été effectuée en ce sens.

L'INCOSE qui promeut l'ingénierie des systèmes sur un plan international dans le cadre son programme FUSE pour *Future of Systems Engineering*, affine et fait évoluer la vision de l'ingénierie systèmes 2035 à travers les compétences, la recherche, les outils et l'environnement, les pratiques et les applications. Sa publication de décembre 2022 (Incose, 2022) n'a pas abordé notre problématique.

4) *Revue des modèles de quantification d'impacts environnementaux et de risques écologiques*

Même si des progrès substantiels ont été réalisés notamment dans le domaine de la construction (bâtiment et infrastructure) dans le domaine sur un plan méthodologique et sur le recueil initial des données pour les Analyses de Cycle de Vie, nous avons attiré l'attention (Claude et al., 2022) sur le fait que les ACV quantifiaient uniquement des impacts et ne permettaient pas encore de quantifier des risques écologiques. Dans le cadre de notre analyse des connaissances existantes, une étude davantage approfondie a été réalisée sur ce point (Thing Leo & Claude, 2024).

En effet, d'une part les ACV ne concernent uniquement à ce jour que des impacts globaux. Par exemple, les déchets d'un chantier ne peuvent être alloués à un écosystème local dans la mesure où, lorsque l'ACV est réalisée, le modélisateur ne sait pas où vont être déposés ces déchets. Notre modèle décisionnel devra donc couvrir pour évaluer la performance écologique à la fois les impacts globaux et les impacts locaux.

Toutefois, pour parvenir à une évaluation en termes de risques des impacts environnementaux, il serait nécessaire de disposer d'une retranscription, par exemple, des travaux menés par le WWF sur le jour de dépassement (WWF, 2024) et/ou les limites planétaires initialement proposé par (Rockström et al., 2009), révisé par (Steffen et al., 2015) et repris plus récemment par (Richardson et al., 2023) à une échelle géographique qui reste à définir. (Claude et Maire, 2024) ont proposé, pour la France, celle de « pays » pour « définir un territoire d'étendue limitée ayant des caractéristiques physiques homogènes en raison de sa situation, son climat ou son paysage naturel, ou du fait de son économie, son histoire et ses caractères humaines, culturelles ou ethnologiques ».

1) *Le VI^{ème} rapport du GIEC*

Dernier bloc de cette analyse des connaissances existantes : le VI^{ème} rapport du GIEC. Ce dernier est en fait constitué de trois rapports chacun issu d'un groupe de travail :

- le Groupe de travail I : les bases scientifiques du changement climatique (IPCC, 2021) ;

- le Groupe II : Impacts, Adaptation et Vulnérabilité (*Impacts, Adaptation and Vulnerability*) (IPCC, 2022a)
- le Groupe III : atténuation (*mitigation*) du changement climatique (IPCC, 2022b).

D'un point de vue de la gestion des risques ce qui est frappant est l'ancrage du GIEC dans une démarche classique de gestion des risques avec deux axes de traitement identifiés que sont : l'atténuation du changement climatique et l'adaptation au changement climatique. Concernant le Groupe II il utilise même le modèle classique associant enjeux, exposition et vulnérabilité.

Pour ce qui concerne l'axe atténuation du changement climatique : une intervention humaine visant à réduire les émissions ou à renforcer les puits de GES est très largement pris en compte par la SNBC et le règlement taxonomie. D'un point de vue de la sûreté de fonctionnement et de la maîtrise des risques cela ne pose aucune difficulté particulière surtout qu'il n'est pas attendu, au moins à horizon 2050, de rupture technologique majeure. En ce sens, la réduction de 40% de la consommation d'énergie finale par les principales activités, la réduction des consommations non énergétiques, l'électrification des usages, l'augmentation des émissions négatives des puits de carbone naturels ainsi que celles issues des technologies CSC, sont des axes d'actions qui peuvent rentrer dans notre modèle décisionnel pour évaluer la performance des systèmes sociotechniques. Nous pouvons y associer aussi l'attribut « sobriété » qui peut couvrir de nouveaux usages, de nouveaux comportements et l'efficacité et l'efficacités des techniques énergétiques. Que ce soit pour l'atténuation du changement climatique avec les trois degrés pris en compte dans le règlement Taxonomie ou la SFDR ainsi que pour la sobriété ce sont des seuils à respecter. Ainsi, que ce soient des points de vue des limites supérieures de probabilité d'occurrence et/ou de limites en termes de conséquences, ce sont des types d'actions bien connues de la sûreté de fonctionnement et de la maîtrise des risques.

En revanche, ce qui est plus délicat c'est l'adaptation au changement climatique. En effet, ce dernier est de nature fondamentalement stratégique pour l'entreprise dans la mesure où jouer le scénario SSP5 8.5 disons, « on ne change rien », avec une fourchette "très probable" de réchauffement de +1.9 à 3°C entre 2041-2060 et en accroissement significatif sur 2081-2100 et le scénario « à très faibles émissions respectivement très fortes réductions des émissions de GES », le SSP1 1.9 avec une fourchette "très probable" de réchauffement de +1.2 à 2.0°C entre 2041-2060 et de +1.0 à 1.8°C sur 2081-2060, le modèle d'affaire de l'entreprise ne sera pas le même et les exigences de haut niveau qu'elle fixera pour évaluer ses systèmes socio-techniques (installations, produits manufacturés, services) ne seront pas les mêmes.

Ce qui va fondamentalement changer pour les entreprises qui vont jouer par exemple le scénario SSP1 1.9 c'est la conception qu'elle se fait de son secteur professionnel et notamment des nouvelles règles de création de valeur compte tenu de l'ambition européenne d'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).

Ainsi, du point de vue de l'architecture système appliquée à la stratégie d'entreprise et au paradigme de la croissance rentable de Michael Porter (Magretta, 2011), dans lequel la performance de l'entreprise s'évalue dans sa capacité à extraire plus de valeur que ses concurrents d'un secteur professionnel donné, mesuré généralement par le résultat net rapporté aux capitaux propres qui appartiennent aux actionnaires, devrait évoluer avec la prise en compte formelle de l'environnement naturel dans son modèle d'affaire. Ces dimensions pour concrétiser l'environnement naturel devrait être, la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère qui serviront de variables du système socio-écologique pour l'évaluation avec le concept de double incidence relative ou double matérialité. La Figure 1 ci-dessous schématise ce qui vient d'être évoqué.

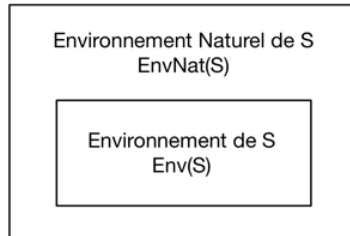
Fig. 1. Environnement naturel de l'environnement concurrentiel



Ce nouveau cadre d'analyse systémique sera d'autant plus prépondérant si l'entreprise vise à être Net-zéro sur l'ensemble de sa chaîne de valeur car si la rivalité entre firmes devrait perdurer, cette dernière s'effectuera dans un contexte de coopération renforcée et en conséquence de plus grande dépendance avec les fournisseurs et les clients.

Ce qui vient d'être évoqué pour la transformation de l'entreprise en tant que système socio-économique dans un environnement socio-écologique devrait aussi se vérifier par nature pour les systèmes socio-techniques de l'entreprise avec le principe architectural de la Figure 2 ci-dessous qui avait été présenté une première fois dans (Claude et al, 2022).

Fig. 2. Environnement naturel d'un environnement formel d'un système (formel).

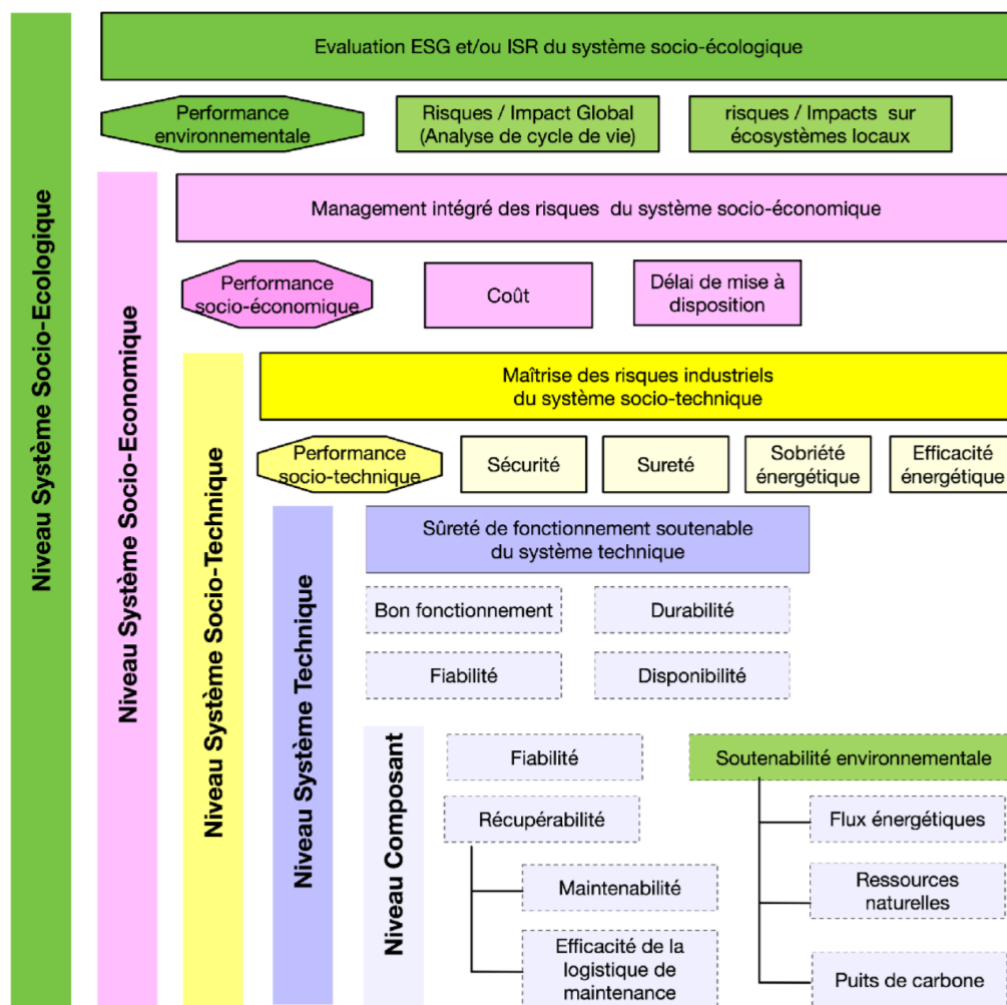


La Figure 2 représente le nouveau paradigme de l'évaluation d'un système socio-technique avec le règlement Taxonomie.

III. RESULTATS

Dans une forme simplifiée la mise à jour de notre modèle décisionnel est résumé avec la Figure 3.

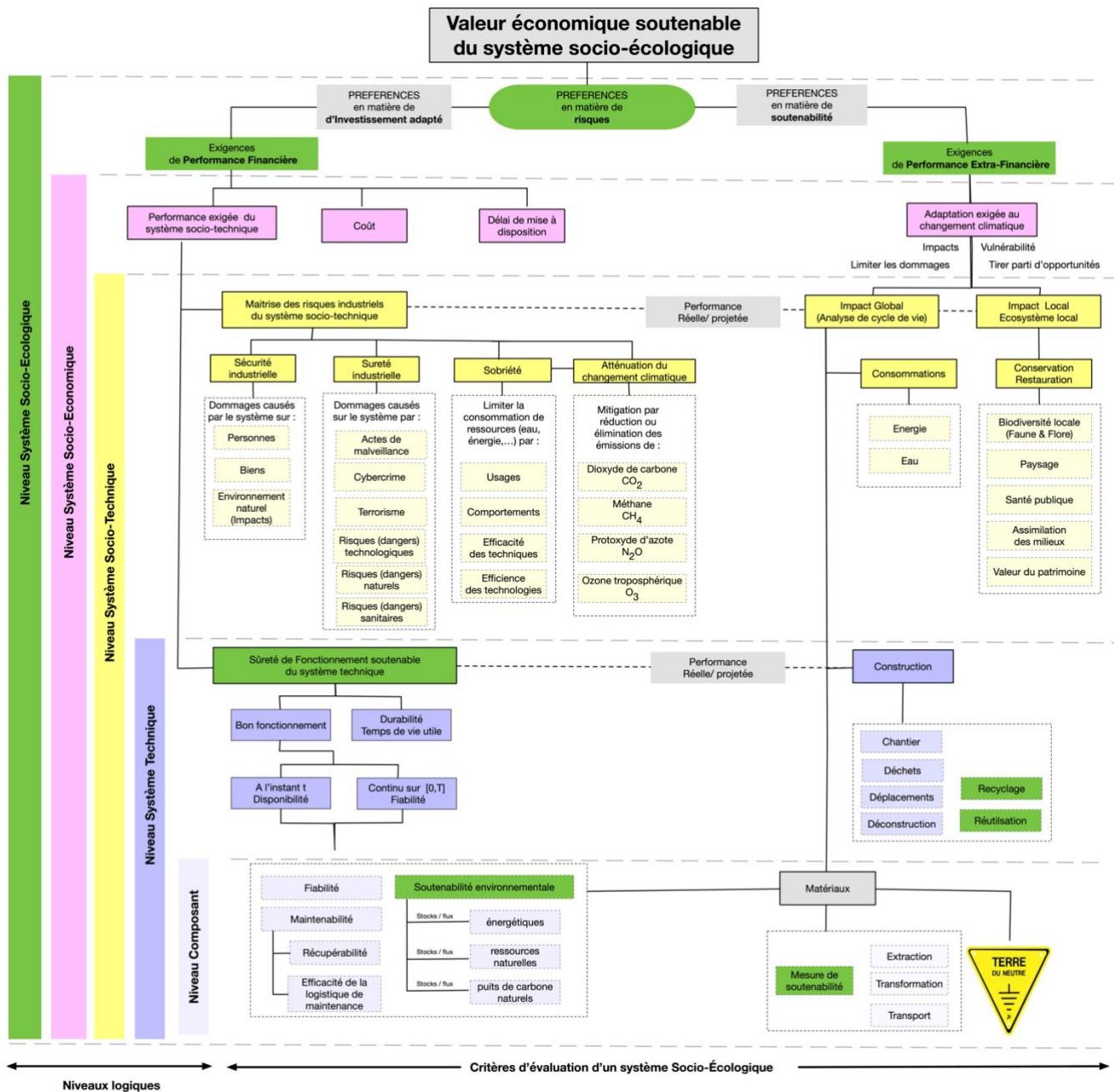
Fig. 3. Environnement naturel d'un environnement formel d'un système (formel).



Cette représentation permet de faire correspondre les niveaux logiques d'intervention de la sûreté de fonctionnement, de la maîtrise des risques et du management intégré des risques aux différents niveaux systèmes. La Figure 4 ci-dessous

est davantage détaillée pour faire ressortir la connexion entre, en amont les préférences en matière de soutenabilité et de risques et en aval les informations en matière de soutenabilité écologiques des inputs. Il ressort une mise à la Terre des systèmes techniques.

Fig. 4. Valeur économique soutenable d'un système socio-écologique



IV. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

En l'absence de prise en compte des aspects de soutenabilité par l'ingénierie des systèmes complexes ainsi que par l'architecture système des systèmes ingénierés et compte tenu du cloisonnement normatif, il n'existe pas actuellement de modèle décisionnel permettant d'envisager :

- d'une part, le nouveau paradigme de l'évaluation des systèmes socio-techniques (qui certes devraient être davantage soutenables d'un point de vue écologique si les entreprises visent les meilleures évaluations avec le prisme du règlement Taxonomie) et,
- d'autre part, le paradigme existant de systèmes qui devront garder leurs propriétés de sûreté de fonctionnement, de sécurité et de sûreté,

la *sustainable dependability* est une réponse en ce sens.

De plus, par expérience, l'intégration est une réponse à la complexité. En ce sens, la *sustainable dependability* est une contribution à la discussion actuelle entre les ressources fonctionnelles de l'entreprise : management des risques de l'entreprise (ERM), l'ingénierie, la qualité, le développement durable, la RSE, l'architecture d'entreprise pour résoudre les problèmes posés dans les Figures 1 et 2 et quelles devraient contribuer à résoudre de façon à ce que le management conjoint des performances financières et extra-financières constitue un relai pour la gouvernance interne et ne reste pas un concept abstrait en termes de gestion et notamment de gestion intégrée des risques.

CONCLUSION

Cette recherche est au carrefour de plusieurs disciplines. La sûreté de fonctionnement est une discipline scientifique, et depuis, l'après-guerre elle a toujours fait face aux défis qui lui ont été présentés et ces défis ont toujours été initialement de nature stratégique pour les organisations. Historiquement, l'expérience le montre, si une propriété n'est pas intégrée dès l'échelle composant, le système finalisé ne pourra l'embarquer. Ce point de départ a été à la base de notre démarche.

Le fait d'associer des métiers du risque à des niveaux systèmes de l'entreprise permet d'identifier le fait qu'aujourd'hui il n'y a pas de métier qui dispose des connaissances et des compétences pour mettre en œuvre au niveau opérationnel le pilotage conjoint des performances financières et extra-financières.

Des travaux complémentaires sont bien entendus nécessaires pour lever les verrous identifiés précédemment. En deux ans, deux Chaires de recherche et d'enseignement de l'ESTP ont pu être créées dans le domaine : la Chaire *Sustainable Buildings for the Future (SBF)*, portée par Socotec. La seconde, dans le domaine spécifique de la sûreté de fonctionnement soutenable avec la Chaire *Sustainable Dependability*, portée par Sector et Risk intelligence & Decisions (RiD). Nous pouvons aussi citer la Chaire Génie Civil et Écologique portée par l'ESTP et AgroParisTech ; soutenue par l'Union professionnelle du génie écologique, VINCI Construction Terrassement et Eiffage Construction Gestion et Développement.

D'autres programmes sont en cours d'études avec des industriels et le point commun de ces discussions est d'arriver à des solutions pragmatiques pour les ingénieurs-managers et leurs équipes.

REFERENCES

- Bateson, G. (1977). *Vers une écologie de l'esprit*. Tome 1 et Tome 2. Paris: Editions du Seuil.
- Berkes, F. et Folke, C. (1998). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique, 459 p.
- Brundtland, G. H. (1987). *Notre avenir à tous*. Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies. Oxford University Press.
- CFB. (2008). *Règles cadres pour la gestion de fortune. Rapport de la CFB*. Sept. 2008. Commission Fédérale des Banques.
- Claude, F., Signoret, J-P, Thing Leo, G. (2022). La sûreté de fonctionnement soutenable : motivations. Etat de l'art, verrous et hypothèses scientifiques (1). In : 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-03877915v2
- Claude, F., Signoret, J-P, Thing Leo, G. (2022). La sûreté de fonctionnement soutenable : motivations. Etat de l'art, verrous et hypothèses scientifiques (2). In : 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. (2024a). 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* ». 24e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Bourges, France.
- Claude, F., Maire, S. (2024). *Résilience des territoires : la soutenabilité des régions face aux défis écologiques*. Working paper de l'ESTP
- Claude, F., Rodrigues, P., Gauthier, E. (2024b). Architecture et ingénierie pour des systèmes ingénierés soutenables. In : Congrès Lambda Mu 24 « *Les métiers du risque, clés de la réindustrialisation et de la transition écologique* ». 24e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Bourges, France.
- COSO. (2017). *Enterprise Risk Management : Integrating with Strategy and Performance*. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission.
- David, A. (2000). *La recherche intervention, un cadre général pour les sciences de gestion ?* IXème Conférence Internationale de Management Stratégique. Montpellier: Association Internationale de Management Stratégique.
- Electropedia. (2024). *Dependability – Sûreté de fonctionnement*. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-01-22>
- GIEC, 2018: *Annexe I: Glossaire*. 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]. Matthews, J.B.R. (éd.). Sous presse.
- Incose. (2022). *Insight. This Issues's Feature: Archimedes initiative*. Décembre 2022. Vol. 24 (4). International Council on Systems Engineering.
- 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. Alegría, 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. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- Magretta, J. (2011). *Comprendre Michael Porter*. Paris, France: Groupe Eyrolles.
- UICN. (1980). *World Conservation Strategy. Living Resources Conservation for Sustainable Development*. Union for Conservation of Nature and Natural Resources.
- IMdR. 2024. *Glossaire*. https://www.imdr.eu/818_p_57385/maitrise-des-risques.html
- Krob, D. (2014). Eléments de systémique. Architecture des systèmes. in : *Complexité - Simplicité. Collège de France*. Paris : Collège de France: OpenEdition books
- Rees, W., Wackernagel, M. (2018). *Notre empreinte écologique: Comment réduire les conséquences de l'activité humaine sur Terre*. Editions Ecosociété
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Driike, M., Fetzer, I., Bala, G., Von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). *Earth beyond six of nine planetary boundaries*. <https://www.science.org>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. (2009). *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*. *Nature*, 461, 472-475, doi:10.1038/461472a.
- RTE. (2022). *Futurs énergétiques 2050. Rapport complet*. Février 2022. Réseau de Transport d'Électricité. 992 p.
- Signoret, J.-P., & Leroy, A. (2021). *Reliability Assessment of Safety and Production Systems : Analysis, Modelling, Calculations and Case Studies*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2021.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Thing Leo, G., Claude, F. (2022). Prospective environnementale et stratégies d'innovations industrielles pour la sûreté de fonctionnement soutenable. In : 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-03865662v2
- 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* ». 24e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Bourges, France.
- 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
- WWF. (2024). *Le Jour du dépassement*. <https://www.wwf.fr/jour-du-depassement-2023>. WWF France.