AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 20, printemps 2020

Modélisation systémique de systèmes cyber-physiques

Res-Systemica, volume 20, article 05

Méthodologie "BISE" : Bio Inspired System Engineering

Olivia Penas, Régis Plateaux, Olivier Maurice

19 pages

contribution reçue le 14 mars 2020

Creative Commons

MÉTHODOLOGIE "BISE" : BIO INSPIRED SYSTEM ENGINEERING

A PREPRINT

Olivia PENAS
Department of Mechatronics
SUPMECA - Laboratoire QUARTZ EA7393
Saint Ouen, France
olivia.penas@supmeca.fr

Régis PLATEAUX
Department of Mechatronics
SUPMECA - Laboratoire QUARTZ EA7393
Saint Ouen, France
regis.plateaux@supmeca.fr

Olivier MAURICE
AFSCET-CESIR
Paris, France
olivier.maurice@e-nautia.com

March 14, 2020

ABSTRACT

Les systèmes cyberphysiques intègrent des propriétés provenant de leurs composantes électroniques, des comportements guidés par les logiciels qu'ils embarquent et interagissent avec l'humain, voire de manière plus générale avec le vivant. La conception de ces systèmes requiert une ingénierie système revisitée et s'inspirant de la nature, profitant ainsi d'organisations les plus complexes comme modèles. Nous présentons ici l'approche "*BISE*" pour *Bio Inspired System Engineering* qui a pour objectif d'intégrer les dimensions électroniques, informatiques et facteur humain.

***K*eywords** Ingénierie Système, Bio-inspiration, Conception multidisciplinaire, intégration E/E

1 Introduction

1.1 Contexte

L'intégration croissante de nouvelles technologies, notamment dans les domaines de l'électronique, de l'information et de la communication favorise le développement de systèmes de plus en plus « connectés ». Ces systèmes sont souvent identifiés comme systèmes mécatroniques évoluant vers des systèmes cyberphysiques (CPS). Même s'il existe de nombreuses définitions des CPS (Shi et al. 2011; Sanislav & Miclea 2012), qui dépendent généralement de la communauté d'où elles sont issues, leur point commun est qu'elles sont généralement basées sur l'intégration des processus physiques, informatiques et de réseau. Les CPS sont des systèmes intelligents couplés qui peuvent coopérer, s'organiser et prendre des décisions de façon autonome. Grâce à des capteurs, ces systèmes intégrés surveillent et reçoivent des données provenant à la fois de processus physiques et de systèmes en réseau, en mettant alors à disposition certaines données à la portée du monde entier. En effet, les applications logicielles peuvent directement interagir avec les événements du monde physique, notamment en les fusionnant avec des données et des services via l'internet des objets (IoT). Les CPS sont généralement conçus comme un réseau de composants informatiques en interaction avec des entrées et sorties physiques et non pas seulement comme des dispositifs mécatroniques autonomes en interaction (Luo et al. 2016). En effet, les CPS ont également des interactions dynamiques variables dans le temps qui peuvent être internes ou externes (notamment en considérant les interactions IoT) et affecter directement leur raisonnement intelligent. Cette variété d'interactions peut alors conduire à l'émergence de nouveaux phénomènes et comportements particulièrement intéressants (Derler et al. 2012; Horvath 2012). Finalement, les CPS sont des systèmes multidomaines qui s'appuient sur la mécatronique, à l'interface entre le monde physique (qui traite principalement des flux d'énergie et de matériaux) et le monde cybernétique (qui traite principalement des flux de données, d'informations et de connaissances) (Choley et al. 2016). Dès lors, la conception de ces systèmes « cyberphysiques » en devient plus complexe.

En parallèle, le contexte industriel évolue : face à la concurrence mondialisée, à la personnalisation des produits et à l'émergence rapide de nouvelles technologies innovantes, les délais de conception doivent être réduits tout en répondant aux besoins de flexibilité, d'agilité et de réutilisation de composants existants pour aussi permettre la réduction des coûts. Ainsi, comme il est généralement admis que les décisions dans les premiers stades de la conception (et notamment en phase de préconception) impactent environ 80% des coûts globaux de vie du système (Perry, Mauchand, and Bernard 2005; Saravi et al. 2008), les industriels désirant restés compétitifs doivent être en mesure de valider leur système dans les premières étapes de conception, notamment en facilitant les bonnes prises de décision autour de l'architecture du système.

Or ces systèmes sont aussi fortement multidomaines, ils s'appuient donc sur diverses disciplines qui doivent collaborer tout au long de la conception, afin d'obtenir un système multidomaine globalement optimisé. En effet, la différence d'objectifs entre les électroniciens, les mécaniciens, les informaticiens et les automaticiens est évidente, pour citer quelques exemples : tandis que les électroniciens se préoccupent plus de la fiabilité et de la redondance du contrôle, les mécaniciens s'attachent plutôt aux problématiques d'encombrement et de cinématique, alors que les informaticiens enfin s'intéressent davantage à l'aptitude et rapidité à la mise à jour de leur code. Comme ces équipes travaillent avec des outils, méthodes, langages/vocabulaires, compétences, objectifs différents, cela suppose que tous ces acteurs puissent accéder à une vue commune et partagée du système à concevoir, tout au long du processus. Aussi, afin de réduire ces difficultés et pouvoir plus facilement intégrer de nouvelles innovations technologiques, les ingénieurs et les architectes Système ont été amenés à reconsidérer leurs approches disciplinaires classiques et à se diriger vers une approche transversale multidisciplinaire comme l'Ingénierie Système (IS) (Kossiakoff et al. 2011). En remplaçant les documents papier par des modèles numériques et de données, l'utilisation de l'«Ingénierie de systèmes basée sur des modèles» (MBSE en anglais pour Model-Based System Engineering) s'est de plus en plus répandue dans les processus industriels, et a ainsi permis d'améliorer la réutilisation et la collaboration entre différents acteurs. En effet, les approches IS encouragent efficacement la communication et la collaboration d'experts disciplinaires au cours des différentes étapes de conception. L'intégration de ces différents points de vue multidisciplinaires dans les modèles numériques contribue alors à l'efficacité des arbitrages lors des prises de décision. Aussi, afin d'accroître la cohérence et le partage des données et des modèles entre les disciplines, une vue partagée peut se concrétiser par exemple par la disponibilité d'une maquette virtuelle 3D ou prototype physique, pour initier les discussions du choix de concept et faciliter les compromis ; ou encore en faisant en sorte que les exigences/contraintes du système soient disponibles sous une forme multi-vue, de sorte que chaque discipline puisse facilement filtrer les données qui la concernent. En parallèle, parmi les systèmes complexes connectés qui ont été particulièrement bien conçus et optimisés, nous retrouvons les systèmes vivants. Aussi, de nombreuses recherches actuelles sur des systèmes d'ingénierie cherchent à s'inspirer de ces systèmes biologiques. Dans un cadre d'ingénierie, la biomimétique peut être décrit comme « un processus créatif interdisciplinaire entre la biologie et la technologie, dans le but de résoudre des problèmes anthropocentriques par l'abstraction, le transfert et l'application des connaissances issues de modèles biologiques », tandis que la bio-inspiration est « un processus créatif puisant son inspiration dans un ou plusieurs systèmes vivants » (Fayemi et al. 2017). Toutefois, la norme ISO 18458 (relative à la terminologie, aux concepts et à la méthodologie) (ISO 2015) distingue ces deux termes : le biomimétisme est défini comme "philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable" et la bio-inspiration est une « approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques ». Autrement dit, le biomimétisme consiste à s'inspirer des propriétés d'un ou plusieurs systèmes biologiques afin de mettre au point des procédés et des organisations permettant un développement durable des sociétés, alors que la bio-inspiration devient un concept plus générique qui ne sous-entend pas forcément l'intégration du développement durable dans une approche créative s'inspirant de la nature. Dans les deux cas, ces notions font appel à une approche systémique interdisciplinaire qui semble prometteuse pour la conception des systèmes cyberphysiques.

Ainsi, il est facile d'imaginer d'aller plus loin dans cette démarche en proposant une méthode de conception d'ingénierie systèmes s'articulant autour des concepts et du fonctionnement des systèmes vivants, pour fournir un support simple et efficace aux concepteurs de systèmes complexes.

Cet article comprend six sections. Après avoir décrit le contexte qui nous amène aujourd'hui à coupler la conception de systèmes cyberphysiques à la biomimétique, nous présentons un état de l'art correspondant, ainsi que notre problématique. Dans la seconde partie, nous introduisons le principe de notre approche. La troisième partie donne les éléments terminologiques de notre approche et les hypothèses associées. La quatrième partie détaille le processus de définition de concept dans le contexte BISE, illustré sur l'exemple fil conducteur (trépied automatisé). La cinquième section analyse les avantages et limites de notre approche, avant la dernière section de conclusions.

1.2 État de l'art

La conception des systèmes mécatroniques et cyberphysiques met en jeu l'intégration de plusieurs disciplines dans le processus de conception d'une même solution technologique. Tandis que traditionnellement, chaque discipline était

traitée indépendamment puis intégrée pour générer le système final (Törngren et al. 2014), de nombreuses approches pour la conception de systèmes mécatroniques s'appuient désormais sur l'intégration de toutes les disciplines en amont (Hehenberger et al. 2010; Eisenbart, Gericke, and Blessing 2013; Barbieri, Fantuzzi, and Borsari 2014), s'appuyant sur le concept d'ingénierie simultanée (prise en compte simultanée de toutes les spécialités de l'ingénierie) (McCord 1993; Zheng et al. 2014) pour développer de nouveaux produits mécatroniques et cyberphysiques plus rapidement. Plus récemment, de nouvelles approches collaboratives, petit-à-petit outillées, permettent de prendre en compte ces différents points de vue et contraintes métiers, tout en facilitant les compromis sur les choix d'architectures (Caron 2016; Mhenni et al. 2018; Mcharek et al. 2018). La multitude et la variété des composants à intégrer demandent à des équipes de différentes spécialités de partager, travailler et collaborer régulièrement ensemble, afin de gérer efficacement les interfaces et autres difficultés liées à l'intégration de leurs disciplines (Maier et al. 2009). Pourtant, la communication entre les différentes équipes métiers reste parfois difficile car les différents acteurs de la conception travaillent encore souvent avec des outils spécifiques, limitant non seulement la compréhension des données/modèles par les autres disciplines (requise pour partager des informations communes), mais aussi la cohérence des données entre les parties prenantes, du fait notamment de la non-interopérabilité des outils disciplinaires.

Comme les CPS sont des systèmes intelligents comprenant des réseaux interactifs de composants physiques et informatiques conçus conjointement, ils se composent de multiples systèmes, sous-systèmes, modules et composants. Le succès de tels systèmes repose sur leur comportement global supporté par un ensemble intégré. En effet, les exigences des clients concernent toujours et essentiellement l'ensemble du système et non celles des sous-systèmes, composants ou même des composants élémentaires. Or, de nombreuses contraintes apparaissent lors de la conception d'un système multidisciplinaire et nécessitent donc une compréhension mutuelle du système (Cabrera et al. 2010). Cette vision commune du système (objectifs définis, paramètres communs, priorités...) (Mhenni et al. 2014) doit s'accompagner d'une stratégie concourante de gestion de l'ingénierie (Oh and Sharpe 1995), tout en s'assurant que les prérequis " transversaux " (définition du vocabulaire utilisé, bases techniques, interopérabilité de la modélisation des données) sont suffisants pour permettre une interface adéquate entre les composants multidisciplinaires. S'appuyer sur une vision commune du système permet d'anticiper et d'atténuer les risques de conflits d'objectifs et de points de vue entre les disciplines, et ainsi de réaliser des compromis plus sereinement. D'autant plus que plus le système à concevoir est multidomaine, plus le processus décisionnel est complexe (Ben Hamida et al. 2015). Cela conduit à de nombreuses et longues itérations entre les différents acteurs et rend complexe la mise en œuvre de simulations numériques prenant en compte les domaines de toutes les disciplines impliquées. C'est pourquoi, afin de réduire ces difficultés et pouvoir plus facilement intégrer de nouvelles innovations technologiques, les ingénieurs et les architectes Système ont été amenés à reconsidérer leurs approches disciplinaires classiques et à se diriger vers une approche transversale et multidisciplinaire comme l'Ingénierie Système (Kossiakoff et al. 2011). Aujourd'hui, les approches d'ingénierie système permettent de proposer un cadre structurant pour organiser les activités de conception, faciliter la collaboration entre les acteurs impliqués, tout en prenant en compte tout le cycle de vie du système. L'ingénierie système basée sur les modèles met notamment à disposition des outils basés sur les modèles pour assurer la cohérence et traçabilité de toutes les données de conception au fur et à mesure que la conception avance.

En parallèle, la phase de préconception est la phase du projet où le plus grand nombre d'idées doit être exploré, particulièrement lors de l'étape d'exploration des concepts. Comme l'ont montré Starkey et al. (Starkey, Toh, and Miller 2016), la créativité est plus grande au tout début d'un projet, car plus la conception progresse, moins les décisions influencent la conception finale (Wang et al. 2002). C'est pourquoi, un nombre croissant de participants de divers domaines sont maintenant clairement impliqués dans le processus de conception, avec chacun son propre univers disciplinaire constitué de représentations, de langages et d'outils (Boujut and Laureillard 2002). Or, de nombreuses études soulignent la nécessité d'intégrer une description graphique et une visualisation 3D dès les premières étapes de la conception (Shah and Rogers 1988). Par exemple, Shen et Li expliquent que la modélisation CAO 3D améliore la communication entre les différents acteurs (Shen, Hao, and Li 2008). En effet, une représentation 3D est souvent plus expressive que la communication par mots (Boujut and Laureillard 2002; Maarten Bonnema and Van Houten 2006). En effet, elle permet d'aborder d'une part la gestion des interfaces entre les composants de domaines différents, que ce soit dans le monde physique (assemblage) ou virtuel (maquette numérique) mais aussi les compromis de conception entre les différentes disciplines qui peuvent avoir des objectifs et contraintes différents et parfois antagonistes (Chen et al. 2009). Concernant l'assemblage de composants multidomaines, certains auteurs proposent de prendre en compte les contraintes d'assemblages dès la phase de conception préliminaire, en utilisant notamment des approches Design For Assembly (DFA) (Simpson et al. 1995; S. Gupta and Okudan 2008; Demoly et al. 2009; 2010). La technique DFA est une méthode conceptuelle basée sur une architecture de produit, qui analyse la conception d'un produit afin d'améliorer sa facilité d'assemblage. Pour que la phase d'assemblage des sous-systèmes multidomaines puisse s'opérer sans entrave, il faut notamment être vigilant d'une part à la prise en compte, dès la phase de conception préliminaire, des contraintes des experts « câbles et connectique » (Isermann 2000; Schöner 2004) et d'autre part à l'émergence de couplages multiphysiques notamment lorsque l'intégration multidomaine s'accompagne d'un effort de réduction de volume (Ooshima and Masukata 2013). D'après Stone (Stone, Goel, and McAdams 2014), « bio-inspired design

(BID) is an emerging research area in design, biology, computing, and engineering that seeks to systematically mine biological knowledge to solve design problems ».

Les approches bio-inspirées pour la conception sont assez récentes (une vingtaine d'années) et pour autant, elles sont très variées. Ainsi, si les premiers développement étaient plutôt orientés dans le domaine de la biologie, avec la bionique, pour reconstruire artificiellement des parties du corps humain (Whang et al. 1999; Dittmar and Delhomme 2000; Ingber et al. 2006; Haidar 2010), pour soigner, réparer, remplacer des parties endommagées ou manquantes (Craelius 2002; Micera et al. 2006; Mannoor et al. 2013; Russell et al. 2014), elles se sont élargies aux matériaux pour développer des matériaux avec des performances aussi spectaculaires que celles des espèces animales ou végétales (Liu and Jiang 2011) et notamment pour les textiles intelligents (Singh et al. 2012) .

Naturellement, de nombreuses recherches ont porté sur le développement de robots (Hoover et al. 2010), équipements robotiques portables (Park et al. 2014) ou exosquelettes pour reproduire des systèmes avec des comportements vivants, on notera notamment l'engouement actuel des recherche pour les robots-animaux (Kato 2000; Cefalo, Lanari, and Oriolo 2006; Omagari and Taniguchi, n.d.; S. K. Gupta et al. 2014). Concernant l'imitation de l' « intelligence » de la nature, la communauté logicielle et des systèmes embarqués (Prodan et al. 2000) travaille aussi sur des algorithmes s'inspirant du vivant (Das, Venayagamoorthy, and Aliyu 2008; Sathya 2012; Kar 2016). L'étude des réseaux a aussi fait l'objet de recherches, notamment dans le développement de réseaux de capteurs (Barbarossa and Scutari 2007) ou d'internet (Balasubramaniam et al. 2011). Ainsi, l'utilisation des similitudes observées avec la nature pour résoudre un problème particulier à la conception peut se décliner en trois types différents : visuel, conceptuel, et algorithme informatique. Tandis que l'inspiration visuelle crée des systèmes d'ingénierie qui partagent le même aspect physique, l'inspiration conceptuelle utilise les connaissances que l'on trouve en biologie pour former des règles de conception, des heuristiques, des principes ou des modèles ; enfin la bio-inspiration algorithmique est une recherche à travers la nature pour trouver des algorithmes de raisonnement/fonctionnement pour représenter des stratégies d'adaptation, d'évolution ou de génération de connaissances/intelligence.

En se focalisant sur les méthodes de conception bio-inspirées portant sur l'architecture des êtres vivants (Venkataraman & Chakrabarti 2009; Srinivasan et al. 2013; Fernandez-Marquez et al. 2013; Fu et al. 2014), nous pouvons citer les travaux de Chakrabarti et ses collaborateurs (Chakrabarti et al. 2005) basés sur une approche qui décrit les systèmes naturels et artificiels et leurs fonctionnalités. Cette représentation est implémentée dans un logiciel intitulé Idea-Inspire qui permet de rechercher dans une base de données, des systèmes mécaniques complexes naturels et artificiels décrits avec un triplet fonction-comportement-structure, ou verbe-nom-adjectif. Le logiciel Idea-Inspire produit sept constructions comportementales définies dans le modèle SAPPhIRE - changement d'état, action, composants, phénomène, entrée, organe et effet - pour chaque résultat de recherche qui correspond au triplet fonction-comportement-structure choisi (Venkataraman and Chakrabarti 2009; Srinivasan, Chakrabarti, and Lindemann 2013). Fernandez-Marquez et al. proposent un modèle pour décrire les schémas de conception bio-inspirés, s'appuyant sur les interactions entre des « organismes » et leur « environnement ». L'environnement dynamique est décrit comme générateur de « ressources » et d' « évènements » provoquant des changements sur le système. Les organismes, autonomes et proactifs, collaborent et communiquent avec l'environnement en pouvant agir sur lui (Fernandez-Marquez et al. 2013). Fu et al. ont examiné et comparé un ensemble de méthodes et d'outils de conception bio-inspirés précurseurs à travers le spectre plus large de la conception par analogie. Ils posent des questions ouvertes afin de coupler la conception bio-inspirée à la conception par analogie, en postulant les défis et les orientations futures possibles (Fu et al. 2014).

Finalement, toutes ces études semblent montrer que le vivant est un système complexe connecté qui présente un énorme potentiel que les conceptions d'ingénierie actuelles, aussi sophistiquées et complexes soient-elles, n'arrivent pas encore à égaler.

2 Concept de BISE

2.1 Motivations & propositions

L'innovation des systèmes d'ingénierie actuels repose sur l'intégration croissante de fonctions et de nouvelles technologies. Cette intégration fonctionnelle peut se faire : (i) soit sous forme physique : avec l'ajout de capteurs, d'actionneurs, de modules de contrôle et de commande pour ajouter des fonctions de pilotage et de reconfiguration : cette intégration physique conduit à l'émergence de systèmes mécatroniques, (ii) soit sous forme logicielle : avec l'internet des objets, le réseau 5G, les microprocesseurs, cette dématérialisation génère des systèmes cyber-physiques, intégrant des fonctions de communication et d'intelligence. Concernant les processus de conception de tels systèmes multidisciplinaires, si les modèles de cycles de conception traditionnels (tels que le modèle en cascade, le modèle en spirale ou le modèle en V) peuvent soutenir un processus de conception à un niveau très macroscopique, ils ne traitent ni de la collaboration requise entre les concepteurs de disciplines différentes, ni de l'intégration multidomaine et notamment l'intégration hardware-software des systèmes actuels. Dans ce contexte, pour traiter ces lacunes, de nombreuses méthodes de

conception s'appuient désormais sur l'IS. En effet, l'ingénierie des systèmes est un processus interdisciplinaire de gestion de l'ingénierie qui évolue et vérifie un ensemble intégré et équilibré de solutions système qui répondent aux besoins des clients (DoD 2001). Elle s'appuie sur deux disciplines : (i) le domaine de connaissances techniques dans lequel opère l'ingénieur système (données, expertises, architecture système, modèles...), et (ii) la conduite de l'ingénierie système (processus, organisation, . . .).

Un des principaux freins à l'utilisation des approches d'IS est lié au quiproquo quant à leur rôle. Elles sont souvent vues comme l'utilisation d'un nouveau langage de haut niveau incapable de répondre aux questions posées par les différents métiers devant travailler sur le système. Ce point de vue oublie que l'objectif principal est de définir les contraintes que devra satisfaire le système, impactant donc l'ensemble des métiers. En effet, il est nécessaire d'avoir un retour expert sur le modèle d'IS pour garantir une définition la plus juste possible de toutes les contraintes du système. Au-delà de la problématique d'outil et de l'interface associée qui peuvent aussi être une source de blocage quant à la diffusion de ces approches, les langages actuels d'IS ne semblent pas naturels pour une grande partie des acteurs de la conception. Face à l'hétérogénéité de ces acteurs, l'ingénierie système bio-inspirée (BISE), basée sur des systèmes connus de tous (systèmes naturels qui nous entourent) permet le partage de sens communs.

Des approches bioinspirées ont déjà été expérimentées en automatique (Figure 1) où deux typologies de réseaux avaient été identifiées : la chaîne d'action et la chaîne de mesure, images du système musculaire et du système nerveux.

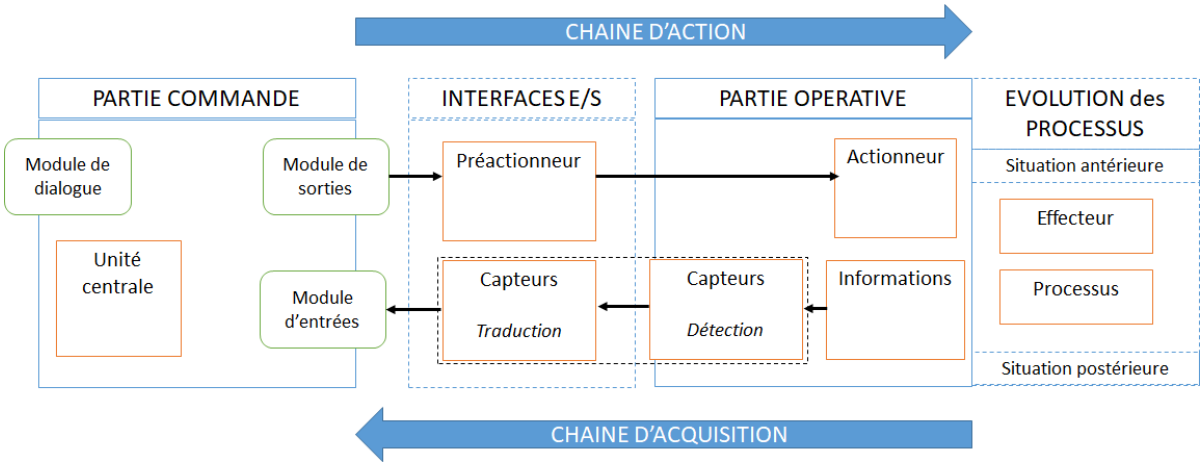

Fig.1 : Chaîne fonctionnelle classique d'un système automatisé.

Toutes deux ne permettaient pas de traiter des aspects multiphysiques précis comme la CEM, la thermique, etc. Le découpage organique distinguait la partie commande, les interfaces E/S et la partie opérative reprenant la structuration réseau des différents systèmes d'échanges des mammifères (le système sanguin, nerveux, lymphatique...) supportés par des réseaux physiques, en les généralisant pour intégrer toutes les dimensions nécessaires à la conception d'un système. Cette bioinspiration s'étend du découpage du système en organes jusqu'à la cellule. Les termes utilisés, les structures arborescentes décrivant les différents points de vue physiques sont de par leur bioinspiration des éléments devant faciliter leur acceptation et utilisation par une majorité de personnes, notamment pour faire émerger le besoin et les contraintes lors de brainstorming [Pidd, Michael].

Le concept de BISE est donc d'offrir une approche d'IS, qui soit simple et accessible pour tous les acteurs de la conception d'un système complexe, et ce dès les phases amont. En effet, il est important que chaque expert disciplinaire puisse exprimer ses idées et les faire partager au travers d'un support efficace, tout en conceptualisant les contraintes de chacun, et d'autant plus en phase amont, où le concept n'est pas encore définitivement figé. En effet, dans les entreprises, de nombreuses incompréhensions existent vis-à-vis des choix de conception réalisés, qu'il s'agisse de décisions liées à des contraintes de coûts, de marketing, des clients, de la concurrence ou encore à des contraintes technologiques. Ces choix peuvent générer des frustrations auprès de certains experts qui les considèrent non optimisés, risqués ou insuffisamment ambitieux. Pourtant, dans la réalité, les choix d'architecture résultent plus souvent de compromis que d'une pure optimisation. Par conséquent, il est crucial de comprendre les enjeux et contraintes de chacun dès les premières phases du projet. Enfin, une fois le concept choisi, les experts requièrent une approche quantitative rigoureuse pour évaluer les alternatives d'architecture et valider un choix de conception. Ainsi, BISE devra prendre en compte l'aspect multidisciplinaire des systèmes et notamment la distribution de la conception entre de nombreux métiers opérant sur des composants qui peuvent être distribués dans le système : le travail par périmètre « géographique » du système n'est plus possible, puisque les compétences doivent être réparties sur l'ensemble des sous-systèmes.

Par ailleurs, l'introduction de nombreux composants électriques et électroniques (E/E) rend crucial l'intégration de plan de tests dès la phase amont. En parallèle, l'analyse des caractéristiques recherchées des systèmes connectés (cybernétiques/cyberphysiques) démontre leur similarité avec les systèmes biologiques, bien connus de tous. Aussi, en appuyant notre approche sur une architecture structurelle bio-inspirée, le niveau de compréhension et d'appropriation deviennent plus importants, rendant la conception du système plus accessible à tous les acteurs. Enfin, contrairement aux machines, les humains ne traitent pas les données une par une : ils regardent la situation, conceptualisent le problème et le contexte du problème, pour finalement ne prendre en compte que les données qui les intéressent. Or leur moyen de capture le plus puissant et de plus large « bande passante » est leur champ visuel. Par conséquent, la mise à disposition dans BISE d'une maquette ou prototype 3D nous permettra de visualiser directement la situation et d'éliminer les étapes mentales intermédiaires consistant à alléger et traiter l'information pour parvenir plus rapidement à une information conceptuelle visuelle. Le partage d'un projet/concept commun nécessite un découpage multi-niveau pour que chacun puisse discuter à son niveau avec son expérience, sa connaissance, son niveau de compréhension et son expertise. La vue partagée de BISE devra donc aussi s'appuyer sur un concept partagé dès la phase amont avec une synthèse des contraintes (voire une ébauche comportementale) sous forme de cartographie et ainsi permettre aux disciplines expertes de discuter au plus tôt des risques de couplages multiphysiques. Afin de pouvoir très tôt évaluer quantitativement les alternatives d'architectures pour en évaluer les risques et valider un choix de concept, BISE intègrera une modélisation mathématique (basée sur le formalisme de Kron (Maurice 2016) tout au long du processus de conception.

3 Principes et terminologies

Les principes (hypothèses) et terminologies attachés à l'approche BISE sont les suivantes :

3.1 Cycle de développement CIPILV

Le cycle de développement associé à l'approche BISE est un processus d'élaboration passant des lignes du produit, aux tests, à l'adéquation système/besoin, aux contraintes métier jusqu'à la validation Ce cycle comprend plusieurs cycles internes fondamentaux (Figure 2) :

- un cycle (C) de lecture du cahier des charges et de "brainstorming" ayant pour objectif de dessiner les grandes lignes du système imaginé ;
- un cycle (I) d'identification de l'inadéquation de l'expression des souhaits « clients » par rapport à la capacité d'y répondre ;
- un cycle (P) d'élaboration des conditions de test du produit à livrer qui sera la référence de contraintes et exigences à tenir pour répondre au besoin ;
- un cycle (I) d'identification des risques d'intégration avec justification théorique de l'architecture système par la simulation ;
- un cycle (L) de "layout" où les outils et expériences métiers précisent le système défini préalablement et incorpore les contraintes de fabrication ;
- un cycle (V) de validation qui constitue la fin de la phase de R& D et le début de la remontée du cycle en V. L'ensemble de ces cycles successifs est nommé "C.I.P.I.L.V.".

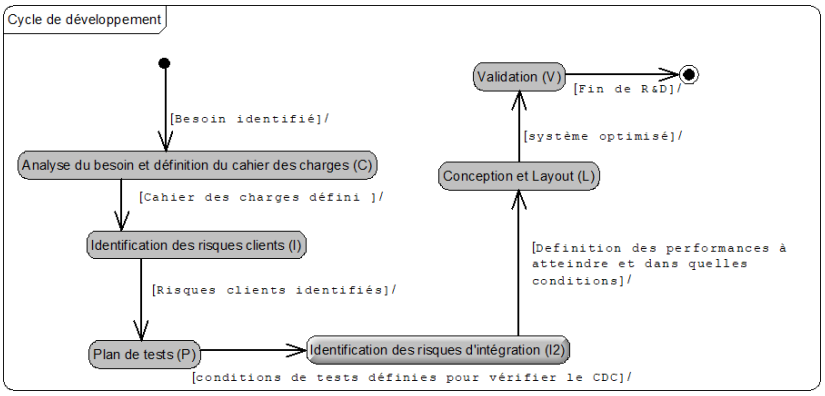

Fig. 2 : Cycle de développement de BISE

3.2 Terminologie de découpage du système par analogie au monde du vivant

Le système est découpé en 5 réseaux fonctionnels auxquels nous nous référons souvent :

1. un réseau de perception P ;
2. un réseau d'actionneurs A ;
3. un réseau de gestion de l'énergie G ;
4. un réseau associé à l'ossature O ;
5. un réseau pour le système nerveux S.

Le réseau de perception P regroupe toutes les fonctions liées à la capture et acquisition des informations et données, et est donc associé aux technologies de capteurs. Le réseau d'actionneurs A traite de l'actionnement de mécanismes (partie opérative), que ce soit pour les émissions externes, par des surfaces fonctionnalisées ou des actionneurs. Le réseau de gestion de l'énergie G fait référence à des phénomènes de dissipation ou création d'énergie, mais aussi de transformation et d'adaptation de l'énergie ou encore de gestion des déchets. Le réseau associé à l'ossature O est constitué de toutes les fonctions de structure porteuse (exosquelette, endosquelette, structure mécanique...). Enfin, le réseau pour le système nerveux S englobe les fonctions de transmission, distribution et d'analyse, que remplissent les calculateurs, les réseaux d'informations et unités de stockage. L'ensemble de ces 5 réseaux est appelé P.A.G.O.S., acronyme de leurs lettres d'identification (Figure 3).

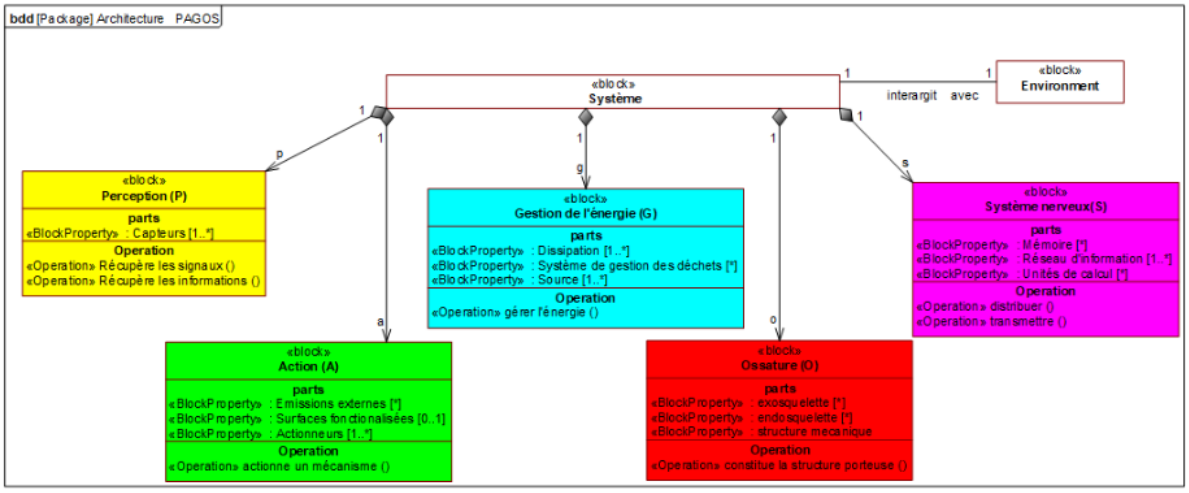

Figure 3 : Décomposition fonctionnelle du système en réseaux PAGOS.

3.3 Terminologie des composants du système

La terminologie bio-inspirée choisie intègre les différentes échelles présentes dans un système complexe. Nous avons 5 niveaux de composants :

1. le système, l'échelle la plus haute. Un système de système est composé de systèmes ;
2. des appareils : ce sont des chaînes (nous pensons en biologie à l'appareil digestif par exemple) qui assurent des fonctions globales au sein du système ;
3. des organes : équipements reliés entre eux au sein des réseaux et assurant une fonction spécialisée ;
4. des tissus : ce sont les enveloppes, interfaces ou en électronique, les circuits imprimés et boîtiers des équipements ;
5. des cellules : ce sont les plus petits composants considérés du système. En électronique, il s'agit des composants électroniques eux-mêmes.

La modélisation des cellules fait appel à des éléments plus petits encore mais le premier niveau d'équation considéré dans l'analyse tensorielle des réseaux est la cellule. Les équations sous-jacentes sont utilisées pour établir leurs modèles, mais ne sont pas intégrées en tant que tel.

Nous pouvons retenir ces échelles par un acronyme : Sy.Ap.Or.Ti.Ce. Chacun de ces composants, quel que soit son niveau structurel, peut réaliser des fonctions PAGOS (Figure 5).

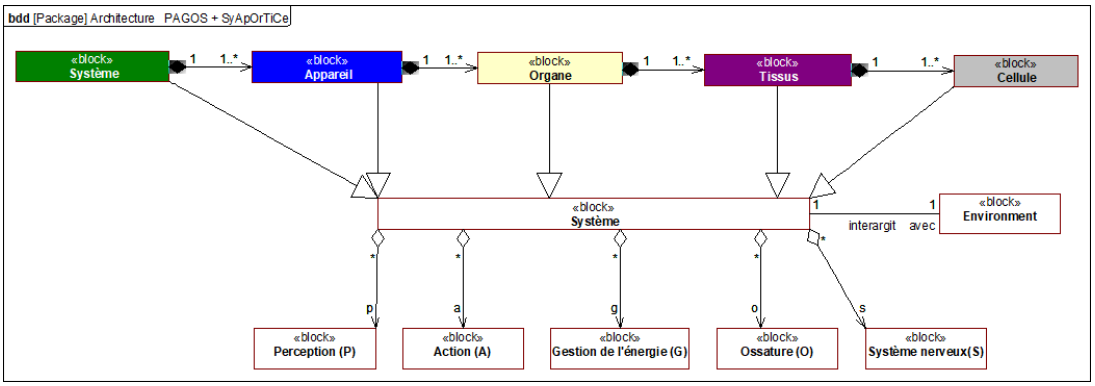

Fig. 4 : Décomposition structurelle du système : Sy.Ap.Or.Ti.Ce

3.4 Logique organisationnelle

Chaque réseau fonctionnel PAGOS a un responsable, chargé de discuter avec les autres parties prenantes (Figure 5). Le rôle des responsables de réseau est d'avoir une vue d'ensemble sur son réseau à l'échelle du système, d'animer le partage d'idées correspondant et de formaliser toutes les contraintes associées au réseau pour permettre le débat sur les différentes alternatives de solutions et converger vers des compromis de choix de conception.

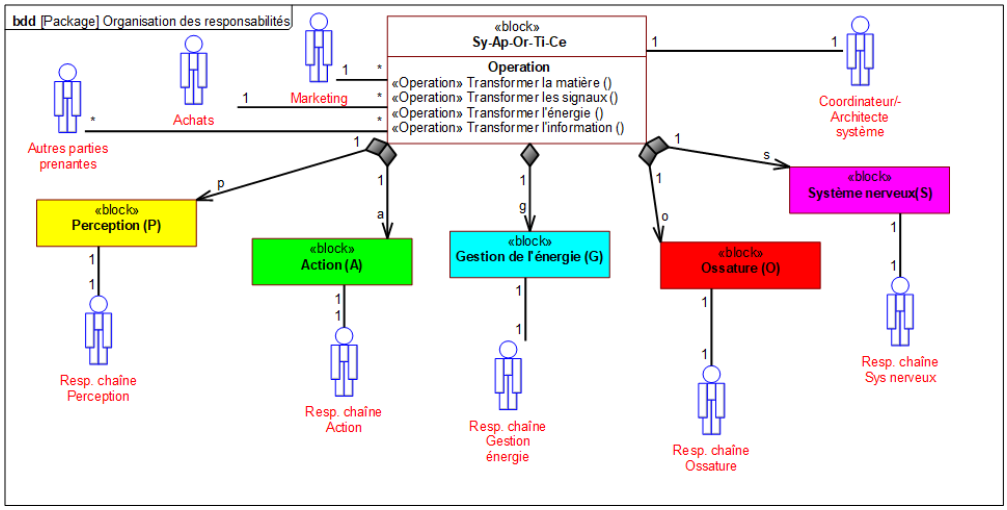

Fig. 5 : Logique organisationnelle de BISE au travers des responsables PAGOS.

3.5 Vues du système

Les vues du système dans les différentes phases de développement se décomposent en 5 vues fondamentales (Figure 6) :

- la spécification technique de besoin décrit les missions que doivent réaliser le système et ses environnements ou utilisateurs : STB ;
- la vue structurelle où le synoptique du système et de ses composants est le graphe multiphysique qui décrit le système : VS ;
- La vue d'architecture électrique électronique qui comprend les modèles multiphysiques décrivant mathématiquement le système : VA ;
- La vue fonctionnelle décrit le système par le biais des fonctions qu'il réalise : VF ;
- La vue "ressources humaines" décrit les rôles de chacun dans la conception du système : VH.

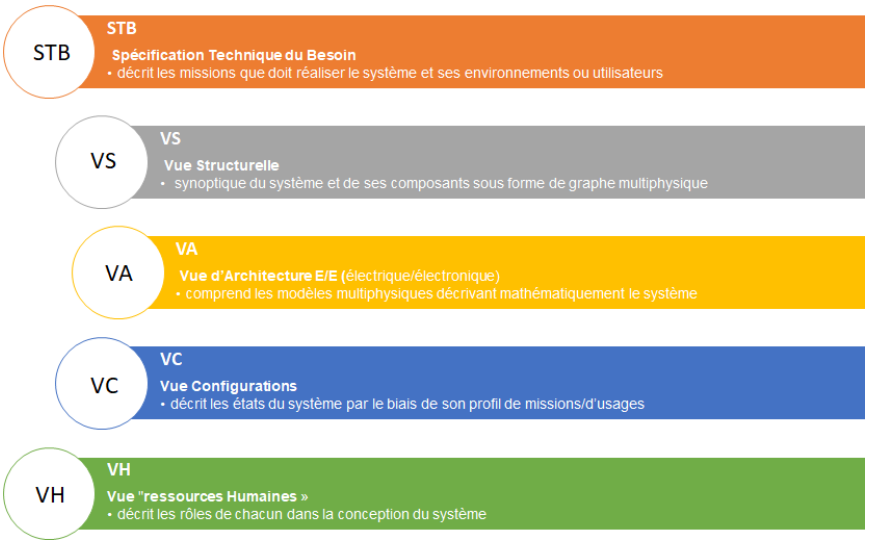

Fig. 6 : Vues du système dans BISE

3.6 Synthèse

Prenant exemple sur les techniques de qualité Japonaises, les processus rattachés à BISE se déclinent en 5 mots clés. En phase de réponse à un appel d'offresou lors de la première pente du cycle en V, le processus C.I.P.I.L.V. guide les étapes de conception. Le système est conçu autour de 5 réseaux : P.A.G.O.S. Chacun de ces réseaux a un responsable qui a une vue à l'échelle du système et échange avec les autres responsables réseaux. Le système est constitué de composants à diverses échelles dénommés par un ensemble de 5 catégories Sy.Ap.Or.Ti.Ce. Le système enfin, est représenté par 5 vues intégrant les divers métiers : STB, VS, VA, VF, VH. Les processus CIPILV, le découpage PAGOS, les vues STB-VS-VA-VF-VH existent à toutes les échelles Sy.Ap.Or.Ti.Ce. Nous pouvons représenter l'ensemble de la démarche par une représentation de la premier pente du cycle en V. C'est à cette pente que s'intéresse la méthodologie que nous proposons. Une synthèse graphique de la méthodologie BISE et de ses principaux mécanismes est présentée à la Figure 7.

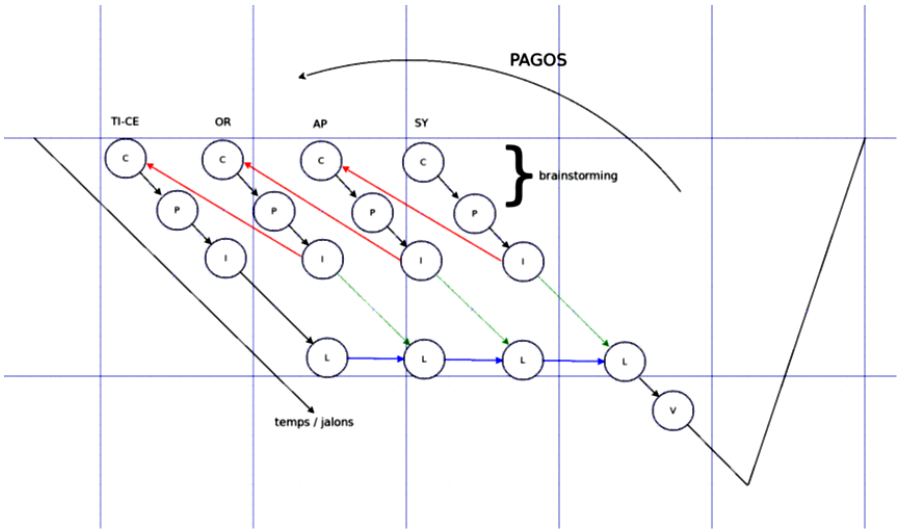

Fig. 7 : Synthèse de BISE

Dans le référentiel de l'intégrateur, les échelles « Tissus » (circuit imprimé) et « Cellules » (composant) sont souvent résumées à une échelle regroupant les deux entités. Lors des actions d'identification des risques, les informations de calculs prédictifs, analyses de co-conceptions sont communiquées à l'échelle sous-jacente. A l'issue de sa propre étude, cette échelle renvoie à son tour les informations de layout pour être intégrée dans l'échelle supérieure. Notons que

lorsque deux éléments des ensembles Sy.Ap.Or.Ti.Ce. ont un élément commun, ce dernier est forcément d'une échelle inférieure. Ainsi l'intersection entre deux systèmes ne peut-elle être qu'un appareil, ou éventuellement une échelle encore inférieure, comme un organe.

4 Processus appliqué au trépied

Nous considérons un trépied constitué de trois pieds motorisés et d'une plateforme équipée d'un capteur niveau à bulles. Nous imaginons un trépied qui a pour mission de maintenir une plateforme horizontale sur des terrains en pente. Le dispositif retenu après un *brainstorming* est un système avec trois pieds équipés de moteurs actionnant une vis sans fin qui permet de régler la longueur des pieds. Le plateau est équipé d'un niveau à bulles électronique qui est un capteur. Un microcontrôleur équipe une carte électronique, fixée sur la plateforme et une batterie alimente l'ensemble de l'électronique du système.

Le schéma équivalent d'un moteur est un circuit RL. Le sens de rotation du moteur est lié au sens du courant circulant dans l'inductance. Le niveau à bulles renvoie trois niveaux de tensions. Plus la plateforme penche dans une direction d'un pied (p_1, p_2, p_3), plus la tension du pied correspondant est élevée. Lorsque la bulle est au centre, le capteur renvoie $0, 0, 0$ volts.

4.1 Système trépied

Le trépied est composé d'un organe de perception : le niveau à bulles. Il est muni de trois actionneurs : les trois moteurs. L'énergie est apportée par une batterie et les liaisons associées, ainsi que les électroniques comprenant des régulateurs de tension des condensateurs, etc. L'ossature est constituée par les trois pieds et la plateforme. Enfin le microprocesseur qui asservit les moteurs, les liaisons vers le capteur et les commandes des moteurs; tout cet ensemble constitue le système nerveux du trépied. Mais avant d'arriver à ce niveau, il a fallu construire le trépied en partant d'organes séparés et en y ajoutant des réseaux. Fabriquons une jambe du trépied.

4.2 Jambe du trépied

Une équation électrique modélise le moteur. Une équation mécanique relie la longueur du pied au mouvement du moteur. Enfin une équation thermique traduit les échanges thermiques entre ces éléments et avec l'environnement. La commande moteur incorpore l'alimentation. L'équation du moteur est alors :

$$0 = (R + Lp)\, k^1 \tag{1}$$

La longueur du pied x dépend du courant moteur. Suivant le signe de ce courant, la longueur augmente ou diminue. Ainsi :

$$x^2 = \alpha k^1 \tag{2}$$

D'où l'on extrait :

$$0 = \alpha p k^1 - v^2 \tag{3}$$

Enfin une troisième équation décrit les échanges thermiques entre le moteur et son environnement :

$$t_3 = R_{33} Q^3 \tag{4}$$

Q^3 étant la puissance électrique dissipée par le moteur : $R(k^3)^2$. Nous pouvons alors préciser les intervalles d'appartenance des variables : $[k^1]$, $[v^2]$, ... Nous avons alors pour définition de la variété ζ_p associée au pied:

$$\zeta_p = \begin{cases} 0 = (R + Lp)\, k^1 \\ 0 = \alpha p k^1 - v^2 \\ t_3 = R_{33} Q^3 \\ \left[k^1\right], \left[v^2\right], \ldots \end{cases} \tag{5}$$

4.3 Plan de test

Le plan de test est la référence commune qui permet de valider les solutions retenues et d'élaborer les solutions de conception. Nous allons nous intéresser ici à une famille particulière de tests, mais la démarche s'applique à tous les essais : thermique, mécanique, etc.

Les tests peuvent être imaginés car ils sont avant tout imposés par les environnements que verra le système, et ces environnements sont eux-mêmes décrits par le cahier des charges. Intéressons-nous au plan de test pour la compatibilité électromagnétique. Ces tests pour ce type de produit incluent trois types d'essais :

- émissions conduites et rayonnées
- immunité conduite et rayonnée
- décharges électrostatiques

Le plan de test doit décrire la façon dont serons menés les tests et les contraintes appliquées. C'est à partir de ces définitions qu'il est possible de conduire ensuite les calculs prédictifs en conception pour développer les solutions de protection ou design adéquats pour que le produit soit conforme aux exigences.

En émissions, la définition des exigences est assez simple. Il faut donner les gabarits d'émissions conduites ou rayonnées autorisés dans l'environnement concerné. Ces gabarits dépendent de l'environnement et de ses composants mais pas du produit à tester. Il reste juste à définir comment mener le test. En général le bruit est mesuré sur les liaisons alimentation, éventuellement via un dispositif qui simule le réseau d'alimentation; puis mesuré en rayonné avec des antennes placées face au produit en fonctionnement.

Pour l'immunité, la difficulté réside dans l'exercice de déclinaison des contraintes. En immunité rayonnée, l'application des contraintes en champ électromagnétique sous condition de champ lointain permet de fixer assez facilement le niveau de champ à appliquer. En champ proche ou en conduit, la question est plus compliquée.

Nous décidons par exemple de mesurer le bruit conduit sur l'alimentation, donc en entrée de batterie avec un gabarit limite de 1 V crête dans toute la bande de 100 Hz à 100 MHz. Pour couvrir la bande de 100 MHz à 1 GHz, nous mesurons le champ électromagnétique rayonné à 3 mètre de distance avec une limite à 40 dBμV.

En immunité, nous injectons par l'intermédiaire d'une pince de couplage 100 mA entre 100 kHz et 100 MHz sur les liaisons alimentation et capteurs, commandes : tous les signaux. En rayonné, nous soumettons le système à un champ électromagnétique de 100 V/m avec l'antenne à 3 mètres.

Les décharges électrostatiques sont réalisées sous hypothèse d'un contact humain direct. Le générateur est réglé à 30 kV, avec une résistance de 1 kΩ et un condensateur de 150 pF. Les injections sont réalisées sur toutes les parties accessibles.

Ces exigences sont gravées comme étant les exigences à atteindre par le système. Les interfaces étant définies, nous pouvons modéliser le système et ses contraintes, incluant la compatibilité électromagnétique.

4.4 Identification des risques

Cette étape a pour objectif de modéliser et effectuer des calculs sur le système pour converger vers une première version de définition. De cette première définition nous pourrons déduire une architecture qui permettra de décliner les exigences vers les appareils, et eux-mêmes, suivant le même processus vers les organes, etc.

Nous allons explorer, avant décision, différentes hypothèses d'architectures. Pour fabriquer le système nous devons d'abord réaliser la somme directe des trois trépieds : $\zeta_p \oplus \zeta_q \oplus \zeta_r$. Il faut ensuite rajouter les couplages qui traduisent le partage du même système par les éléments. Précédemment, il faut rajouter la partie processeur et le capteur.

Le capteur est un circuit à trois sorties, chaque sortie correspondant à l'inclinaison dans la direction d'un trépied. Son schéma équivalent est un ensemble de trois branches avec trois générateurs asservis sur la pente.

Le microprocesseur est modélisé par une machine de Turing basée sur des gamma matrices [Maurice 2018]. Une tension proportionnelle à l'inclinaison est fournie par le capteur actif qui est alimenté. L'asservissement du moteur du trépied correspondant va donc compenser la pente en augmentant sa longueur. Le microprocesseur a trois entrées correspondant aux trois signaux capteurs et trois sorties pilotant les moteurs. Une fois établies les valeurs aux entrées du microprocesseur, il faut un temps processeur de traitement avant que la réponse de son activité soit transmise en sortie. Ainsi les entrées processeur sont des circuits électroniques frontières et les sorties sont des composantes du covecteur des sources. Entre l'étape de calcul des valeurs d'entrée et la fourniture des sorties se passe un temps qui est le temps processeur qui s'intercale entre les instants de calculs des circuits électroniques.

Ce travail de modélisation permet de répondre aux questionnements de levées de risque provenant des interactions entre divers acteurs (électroniques, mécaniques, ..., utilisateurs, etc.) du système. Pour organiser le travail, le suivre et identifier les calculs à effectuer, un outil simple et très efficient est la matrice d'interaction.

4.5 Matrice d'interactions

La matrice d'interactions représente l'ensemble des entités intervenant dans le système et son environnement et les interactions entre ces entités. Il s'agit simplement dans le principe d'inscrire en titres de lignes et colonnes les organes composants le système. Aux intersections entre ces lignes, on inscrit de façon symbolique le niveau de risque de l'interaction entre une source de bruit en ligne et un récepteur en colonne.

Dans les sources de bruit, nous pouvons inclure les sources appartenant à l'environnement (foudre, ...). Dans les récepteurs sensibles nous pouvons inscrire les utilisateurs ou des structures vivantes ou autres de l'environnement. Chaque intersection donne lieu à modélisation et calcul pour préciser le niveau de risque associé à l'interaction. Notons que diverses informations comme le rôle de la fonction, sa criticité etc., peuvent accompagner chaque titre de colonne. Comme illustration, nous considérons un petit système constitué de quelques capteurs, d'une électronique moteur et qui peut être soumis à une ambiance radio-radar. La matrice d'interaction de ce système est présentée à la Figure 8. A ce stade la matrice permet de mettre en évidence les interactions à risque. Des calculs viendront derrière confirmer ou lever le risque, sous des hypothèses précisées de configuration système.

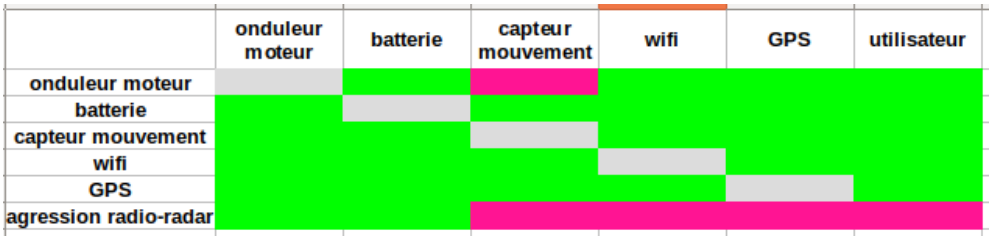

Fig. 8 : Matrice d'interaction

Pour modéliser et effectuer des calculs sur le système, nous allons réaliser la somme directe des trois entrées capteurs avec les circuits moteurs, les sorties processeur intervenant pour les commandes. Mais auparavant, nous devons un peu modifier l'expression des variétés manipulées.

4.6 Tenfolds

La somme directe des variétés telle que l'équation (5) ne réordonne pas correctement les équations pour regrouper celles de la même physique. Cela va complexifier la position des couplages extra-diagonaux. Il peut être préférable de pouvoir décomposer la variété en divers sous-systèmes d'équations par type pour ensuite les grouper ensembles lors d'une somme directe. C'est l'objet des tenfolds : un formalisme réorganisant les tenseurs en *feuilles superposées* par type de physique (ainsi la variété 5 peut être décomposée en trois physiques, électronique ζ, mécanique $\mathcal{M}$ et thermique $\mathcal{T}$: $(\zeta, \mathcal{M}, \mathcal{T})$). Nous nous dotons alors de la règle suivante : soit un premier tenfold $T_1 : (\zeta_1, \mathcal{M}_1, \mathcal{T}_1)$ et un second $T_2 : (\zeta_2, \mathcal{M}_2, \mathcal{T}_2)$ nous avons :

$$T_1 \oplus T_2 = (\zeta_1 \oplus \zeta_2, \mathcal{M}_1 \oplus \mathcal{M}_2, \mathcal{T}_1 \oplus \mathcal{T}_2) \tag{6}$$

Le capteur est un circuit de trois résistances :

$$z_c = \begin{bmatrix} R_c & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \tag{7}$$

Ce circuit a aussi ses composantes mécanique et thermique m, q. Nous faisons :

$$T_1 \oplus T_2 \oplus (z_c, m, q) \tag{8}$$

Sous ce nouvel algèbre il devient beaucoup plus simple de rajouter les couplages pour chaque physique. Nous allons illustrer ce mécanisme pour le seul cas de l'électronique et pour un seul trépied. La symétrie du problème entre les trois

trépieds fait qu'il est suffisant de mener cette seule analyse pour en déduire les résultats sur les deux autres trépieds. La somme directe trépied plus capteur conduit au système suivant :

$$\begin{cases} 0 = (R + Lp)\, k^1 \\ V_1 = R_c J^1 \end{cases} \tag{9}$$

La source de courant J^1 est issue du mouvement du niveau à bulle qui engendre la tension V_1. Cette tension est envoyée en entrée du processeur. Notons que dans le design des équipements, les interfaces ont été imposées (au sens choisies bilatéralement par les équipementiers et intégrateur en s'appuyant sur des standards). De fait ici, les impédances R_c sont fixées.

4.7 Processeur

Le processeur a trois entrées et trois sorties. Étudions la réponse à une entrée. Une fonction de type gamma matrice [Reineix 2012] assure la modélisation. Dans notre cas le modèle peut être très simple : la tension en entrée provenant d'un capteur est multipliée par un facteur et envoyée en commande moteur. La matrice gamma qui modélise le processeur agit sur le covecteur des sources avec pour la composante du premier moteur - première sortie de capteur :

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

A chaque application de l'opérateur γ au covecteur $(0, V_1)$, le facteur α multiplié par la valeur de V_1 est transmis en commande du moteur correspondant. Dans la modélisation, deux temps caractéristiques interviennent :

1. le temps du calcul du circuit électronique ;
2. le temps de l'activité du processeur.

4.8 Couplages

Les entrées du processeur sont d'impédance Z_p et les sorties R_0. Considérons un seul trépied avec son moteur $R + Lp$, son capteur R_c et son processeur Z_p, R_0. Pour brancher la sortie capteur à l'entrée processeur, nous utilisons une ligne qui est un élément du réseau perception. Dans une première étape nous "branchons" le capteur sur l'entrée processeur et la sortie processeur sur le moteur. La somme directe pour les impédances respectivement du moteur (m), capteur (c), et entrée - sortie du processeur est (μp est le tenseur associé au microprocesseur) :

$$m \oplus c \oplus \mu p = \begin{bmatrix} R + Lp & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

La connexion voulue est traduite par la connectivité suivante :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

En calculant $C^T\,(m \oplus c \oplus \mu p)\,C$ nous trouvons l'opérateur du circuit constitué de dimensions 2x2. A ce circuit intermédiaire il faut ajouter les inductances des lignes (nous négligeons leurs résistances). Les propriétés d'inductances appartiennent à l'espace des mailles. Soit l'opérateur d'inertie :

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix} \tag{13}$$

L'opérateur du système est finalement $C^T\left(m \oplus c \oplus \mu p\right) C + \mathcal{L}$. Le vecteur des flux est $k = \left[\begin{array}{cc} k^1 & J^1 \end{array}\right]$. Le covecteur des sources est

$$\gamma^n \left[\begin{array}{c} 0 \\ \\ V_1 \end{array}\right] \tag{14}$$

La valeur de n démarre à zéro où le premier calcul consiste en la détermination de V_1. L'opérateur gamma transmet ensuite cette valeur comme commande en source du circuit moteur, etc.

4.9 Choix d'architecture et déclinaison des contraintes

Dans notre petit système illustratif, les correspondances de réseaux sont les suivantes :

1. ligne $L_1 \rightarrow$ réseau action ;
2. ligne $L_2 \rightarrow$ réseau perception.

Les autres liaisons que nous n'avons pas décrites appartiennent aux réseaux gestion de l'énergie, ossature et système nerveux. Suivant les longueurs des lignes, les variables L_1 et L_2 vont évoluer. Elles vont aussi changer si la hauteur des lignes à la structure change. Nous voyons par notre illustration que différentes architectures peuvent être analysées par le biais d'exploration de ces variables (dans des cas réalistes, leur nombre est bien sûr plus important).

La phase d'optimisation de l'architecture électrique électronique (AEE) consiste à explorer différentes hypothèses qui conviennent au mieux à tous les métiers (recherche de compromis). Pour chaque hypothèse on calcule la réponse du système fonctionnellement (incluant la CEM fonctionnelle) et vis-à-vis de contraintes comme la CEM. Prenons l'exemple de la tenue aux environnements électromagnétiques externes.

Pour un champ magnétique externe incident B_0, la force électromotrice e (force EM) induite dans la boucle entre le câble de longueur l à une hauteur h de la structure et cette dernière est :

$$e = -plhB_0 \tag{15}$$

et la tension induite u_c en entrée de capteur est :

$$u_c = \frac{R_c}{R_c + Z_p} e \tag{16}$$

La déclinaison, du fait que les impédances sont connues (et sous l'hypothèse ici que la longueur d'onde du champ est grande devant la longueur de ligne. Dans le cas contraire le modèle se complique un peu mais reste complètement constructible) devient immédiate. Le générateur équivalent de la contrainte envoyé au fournisseur du capteur (ou à l'ingénieur en charge de sa validation pour le système) est de tension de circuit ouverte e et d'impédance propre Z_p. Alors que côté processeur, le modèle équivalent de la contrainte est de tension de circuit ouvert e et d'impédance interne R_c. Le test doit reprendre la même longueur de ligne pour reproduire l'inductance équivalente à celle qui sera présente sur le système. Évidemment, la déclinaison se fait quand l'architecture - c'est-à-dire l'installation du câble ici - est choisie pour fixer h et l.

L'architecture est choisie en parcourant les possibilités d'installations. Chaque spécialiste de chaque métier s'accapare la variété décrivant une hypothèse pour la tester et la noter. Au final, un bilan détermine l'architecture qui se présente comme étant le meilleur compromis (les valeurs données dans le tableau 1 sont uniquement illustratives).

	hypot. 1	hypot. 2	hypot. 3
thermique	12	9	5
mécanique	7	8	10
électronique	9	8	2
CEM	6	8	3
total	34	33	20

Tableau 1

Ici c'est l'hypothèse 1 qui serait retenue. Les générateurs équivalents décrivant la contrainte pour cette architecture constituent la déclinaison des contraintes (les exigences) au niveau organes et est envoyée aux équipementiers. Un processus similaire se déroule alors chez l'équipementier qui retourne la version quasi-définitive de l'organe et ainsi de suite.

4.10 Approche pour la notation des AEE au niveau système ou à d'autres échelles

Durant la phase d'optimisation des solutions, les différentes hypothèses d'AEE sont regardées au travers de leur positionnement dans un diagramme protection - prévention. La liaison étudiée peut être laissée telle quelle en changeant sa hauteur à la structure, ou bien torsadée avec un fil de masse, ou encore blindée, etc. Ces différentes solutions sont différentes solutions de protection. En face, diverses possibilités de prévention sont accessibles. Il s'agit ici de jouer sur la proximité entre les fonctions perturbables et les sources de perturbations. Pour chaque couple de solutions en prévention et protection, une probabilité de défaillance y est associée. Connaissant l'objectif de défaillance visé au niveau du cahier des charges, il devient possible sur le graphe PP (prévention versus protection) de tracer la limite acceptable au-delà de laquelle le système ne répond plus à l'exigence. Entre les solutions possibles, les critères de coûts, disponibilités, etc., permettent de faire le choix final. La Figure 9 montre la démarche d'utilisation du graphe PP.

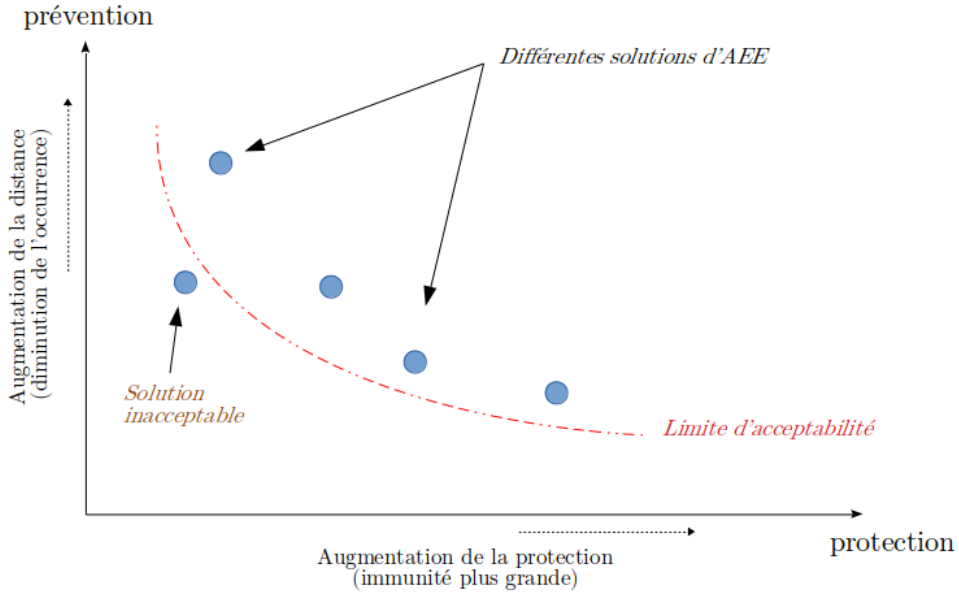

Fig. 9 : Graphe prévention protection

4.11 "Layout" & validations

Les informations disponibles aux différentes échelles permettent à ce niveau du développement de déterminer les détails de construction et fabrication du système. Les appareils peuvent alors être maquettés de façon représentative, des simulations numériques peuvent être conduites pour confirmer les performances et recouper les résultats d'essais sur maquette. À l'issue de ces opérations, le système est maîtrisé et le début du cycle de fabrication peut commencer.

5 Discussions

L'approche BISE proposée s'appuie sur le couplage des principes d'ingénierie système et d'une approche bio-inspirée. En effet, conscients de l'émergence croissante des systèmes cyberphysiques et de la forte intégration multidisciplinaire requise pour leur conception, nous proposons de mettre à disposition un ensemble d'éléments terminologiques et méthodologiques pour favoriser le partage et la compréhension d'une vue commune du système dès les premières phases de la conception. Parmi les avantages de cette approche couplée par rapport aux approches MBSE classiques, on peut noter (i) l'importance donnée à une représentation 3D du concept dès la phase amont, (ii) une terminologie basée sur un système connu de tous (les êtres vivants) limitant les problèmes de sémantique propre à chaque discipline, (iii) une vue systémique native, matérialisée par les différents réseaux et leurs interactions sous-jacentes, permettant de gérer plus facilement la complexité des CPS, (iv) un formalisme mathématique rigoureux fournissant des éléments objectifs pour les premiers choix de conception. En parallèle, une telle approche requiert maintenant d'être validée sur des

exemples suffisamment variés (en terme d'organisation d'entreprise, de périmètre du système, de secteur/cycle de vie de développement, etc) pour s'assurer de sa généricité. Une autre limite actuelle est l'absence d'outillage pour faciliter son appropriation et l'accompagnement du changement au sein des équipes de développement. Cela introduit naturellement nos perspectives de recherche sur ces deux points : l'expérimentation de BISE dans différents contextes (académique, industriel), mais aussi le prototypage d'outils d'aide à la conception (ex : profil SysML BISE, visualisation 3D/outil de réalité virtuelle . . .).

6 Conclusion

Une approche d'ingénierie système bioinspirée, BISE (Bio-Inspired System Engineering), a été proposée et illustrée sur un exemple de système mécatronique. Ses principes reposent sur les objectifs suivants : (i) s'inspirer du vivant : "Bio inspiration", (ii) avoir des définitions fondamentales compréhensibles par tous : "partage des idées", (iii) pourvoir retenir facilement ses principes et processus : "comprendre les idées", (iv) baser la conception amont du système sur des modèles mathématiques : "avoir un développement au plus rigoureux possible", (v) être multidisciplinaire et positionner tous les métiers au même niveau, avec des porosités importantes entre métiers : "systèmes cybernétiques" et (vi) gérer les aspects multi-niveaux entre le système et son environnement, notamment pour l'adaptation à l'échelle N des interfaces imposées par l'environnement à l'échelle N+1.

L'approche BISE tente de concilier des inspirations à la nature avec les capacités comparativement simplistes des fabrications artificielles. Paradoxalement, ces inspirations sont introduites dans des processus définis de la façon la plus synthétique possible pour que tout un chacun puisse s'accaparer la démarche. L'application directe de BISE représenterait un saut culturel très probablement trop important et embarquant de nombreuses erreurs et déconvenues. Il faut envisager une technique de transition avec des applications partielles de ces propositions, de façon à les corriger, les améliorer et parvenir en final à une méthodologie effective et éprouvée.

References

[Balasubramaniam, S. and Leibnitz, K. and Lio, P. and Botvich, D. and Murata, M.] 2011-07, IEEE Communications Magazine, *Bio-Inspired Sensor Network Design*,

[Barbarossa, S. and Scutari, G.] 2007-05, IEEE Signal Processing Magazine, *A Model-Based Design Methodology for the Development of Mechatronic Systems*,

[Barbieri, Giacomo and Fantuzzi, Cesare and Borsari, Roberto] 2014, Mechatronics, *Towards a Decision Support Framework for System Architecture Design*,

[Ben Hamida, Sonia and Jankovic, Marija and Callot, Martine and Monceaux, Anne and Eckert, Claudia] 2015-07-27/2015-07-30, *A Co-Operation Framework for Product–Process Integration in Engineering Design*,

[Boujut, Jean-François and Laureillard, Pascal] 2002, Design studies, *Towards Automation of Control Software: A Review of Challenges in Mechatronic Design*,

[Cabrera, AA Alvarez and al.] 2010, Mechatronics, *Leveraging Tradeoff, Bridging the Gap among Disciplines*,

[Caron, Françoise] 2016-07-01, INCOSE International Symposium, *Energy-Based Control of the Butterfly Robot*,

[Cefalo, Massimo and Lanari, Leonardo and Oriolo, Giuseppe] 2006-01-01, IFAC Proceedings Volumes, *A Functional Representation for Aiding Biomimetic and Artificial Inspiration of New Ideas*,

[Chakrabarti, Amaresh and Sarkar, Prabir and Leelavathamma, B. and Nataraju, B. S.] 2005, Ai Edam, *A Framework for Integrated Design of Mechatronic Systems*, Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing,

[Chen, Kenway and Bankston, Jonathan and Panchal, Jitesh H. and Schaefer, Dirk] 2009, Springer London, *Topology-Based Safety Analysis for Safety Critical CPS*,

[Choley, Jean-Yves and Mhenni, Faïda and Nguyen, Nga and Baklouti, Anis] 2016-01-01, Procedia Computer Science, *The Bionic Man: Restoring Mobility*,

[Craelius, William] 2002-02-08, Science, *Bio-Inspired Algorithms for the Design of Multiple Optimal Power System Stabilizers: SPPSO and BFA*,

[Das, T. K. and Venayagamoorthy, G. K. and Aliyu, U. O.] 2008-09, IEEE Transactions on Industry Applications, *Assembly-Oriented Product Structure Based on Preliminary Assembly Process Engineering*, DS 58-7: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 7, Design for X/Design to X, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009,

[Demoly, Frédéric and Gomes, Samuel and Eynard, Benoît and Rivest, Louis and Sagot, Jean-Claude] 2009, *Multiple Viewpoint Modelling Framework Enabling Integrated Product–Process Design*,

[Demoly, Frédéric and Monticolo, Davy and Eynard, Benoît and Rivest, Louis and Gomes, Samuel] 2010, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), *Modeling Cyber–Physical Systems*,

[Derler, Patricia and Lee, Edward A. and Vincentelli, Alberto Sangiovanni] 2012, Proceedings of the IEEE, *Living Tissue Mechanisms and Concepts as Models for Biomedical Microsystems and Devices*, 1st Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Proceedings (Cat. No.00EX451),

[Dittmar, A. and Delhomme, G.] 2000-10, *System Engineering Fundamentals*,

[DoD , Departement of Defense] 2001-01, *An Analysis of Functional Modeling Approaches across Disciplines*,

[Eisenbart, Boris and Gericke, Kilian and Blessing, Luciënne] 2013, AI EDAM, *Le Biomimétisme - Infographie*,

[Fayemi, Pierre-Emmanuel and Chekchak, Tarik and Bersano, Giacomo and Maranzana, Nicolas and Aoussat, Améziane] 2017, Techniques de l'ingénieur, *Description and Composition of Bio-Inspired Design Patterns: A Complete Overview*,

[Fernandez-Marquez, Jose Luis and al.] 2013-03-01, Natural Computing, *Bio-Inspired Design: An Overview Investigating Open Questions From the Broader Field of Design-by-Analogy*,

[Fu, Katherine and Moreno, Diana and Yang, Maria and Wood, Kristin L.] 2014-10-08, Journal of Mechanical Design, *Biologically Inspired Design*, 2014, Springer London, *Computer-Aided Generation of Modularised Conceptual Designs with Assembly and Variety Considerations*,

[Gupta, Saraj and Okudan, Gül E.] 2008-12-01, Journal of Engineering Design, *An Engineering Approach to Utilizing Bio-Inspiration in Robotics Applications*, Biologically Inspired Design,

[Gupta, Saytandra K. and Bejgerowskiand al.] 2014, Springer, *Bio-Inspired/-Functional Colloidal Core-Shell Polymeric-Based NanoSystems: Technology Promise in Tissue Engineering, Bioimaging and NanoMedicine*,

[Haidar, Ziyad S.] 2010-09, Polymers, *Hierarchical Design Models in the Mechatronic Product Development Process of Synchronous Machines*,

[Hehenberger, P. and Poltschak, F. and Zeman, K. and Amrhein, W.] 2010-12-01, Mechatronics, *Bio-Inspired Design and Dynamic Maneuverability of a Minimally Actuated Six-Legged Robot*, 2010 3rd IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics,

[Hoover, A. M. and Burden, S. and Sastry, and S. Shankar and Fearing, R. S.] 2010-09, *Beyond Advanced Mechatronics: New Design Challenges of Social-Cyber-Physical Systems*, Proceedings of the ACCM-Workshop on "Mechatronic Design,

[Horvath, Imre] 2012, *Tissue Engineering and Developmental Biology: Going Biomimetic*,

[Ingber, Donald E. and al.] 2006-12-01, Tissue Engineering, *Mechatronic Systems: Concepts and Applications*,

[Isermann, Rolf] 2000, Transactions of the Institute of Measurement and Control, *ISO 18458: 2015: Biomimetics–Terminology, Concepts and Methodology*,

[ISO, ISO] 2015, AFNOR *Bio Inspired Computing – A Review of Algorithms and Scope of Applications*,

[Kar, Arpan Kumar] 2016-10-15, Expert Systems with Applications, *Control Performance in the Horizontal Plane of a Fish Robot with Mechanical Pectoral Fins*,

[Kato, N.] 2000-01, IEEE Journal of Oceanic Engineering, *Systems Engineering Principles and Practice*,

[Kossiakoff, Alexander and Sweet, William N. and Seymour, Samuel J. and Biemer, Steven M.] 2011, John Wiley & Sons, *Bio-Inspired Design of Multiscale Structures for Function Integration*,

[Liu, Kesong and Jiang, Lei] 2011-04-01, Nano Today, *A Kernel Machine-Based Secure Data Sensing and Fusion Scheme in Wireless Sensor Networks for the Cyber-Physical Systems*,

[Luo, Xiong and Zhang, Dandan and Yang, Laurence T. and Liu, Ji and Chang, Xiaohui and Ning, Huansheng] 2016, Future Generation Computer Systems, *Use of Models in Conceptual Design*,

[Maarten Bonnema, G. and Van Houten, Fred JAM] 2006, Journal of Engineering Design, *Reflecting Communication: A Key Factor for Successful Collaboration between Embodiment Design and Simulation*,

[Maier, Anja M. and Kreimeyer, Matthias and Lindemann, Udo and Clarkson, P. John] 2009, Journal of Engineering Design, *3D Printed Bionic Ears*,

[Mannoor, Manu S. and al.] 2013-06-12, Nano Letters, *Modelling the Management of Failed Test in EMC*,

[Maurice, Olivier and Reineix, Alain] 2012, *Adaptation of Kron's Tensorial Analysis of Network for the EMC Design and Analysis of Systems*,

[Maurice, Olivier] 2016-10, *Quelques exemples d'analyses théoriques en compatibilité électromagnétique*,

[Maurice, Olivier] 2018-10-05, *Managing the Integration Problem in Concurrent Engineering*,

[McCord, Kent R. (Kent Richard)] 1993, *Knowledge Sharing for Mechatronic Systems Design and Optimization*,

[Mcharek, Mehdi and Azib, Toufik and Hammadi, Moncef and Choley, Jean-Yves and Larouci, Cherif] 2018, *A SysML-Based Methodology for Mechatronic Systems Architectural Design*,

[Mhenni, Faida and Choley, Jean-Yves and Penas, Olivia and Plateaux, Régis and Hammadi, Moncef] 2014, Advanced Engineering Informatics, *Collaborative Mechatronic Design and Systems Engineering: An Educational Experiment with KARREN*, 2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE),

[Mhenni, Faida and Choley, Jean-Yves and Caron, Françoise and Munck, Antoine] 2018, *Hybrid Bionic Systems for the Replacement of Hand Function*,

[Micera, S. and Carrozza, M.C. and Beccai, L. and Vecchi, F. and Dario, P.] 2006-09, Proceedings of the IEEE, *Conflict Management in an Interdisciplinary Design Environment*,

[Oh, Vincent and Sharpe, John] 1995, AI EDAM, *Jumping Cat Robot with Kicking a Wall*,

[Omagari, Masaki Yamakita Yasuhito and Taniguchi, Yasuaki] *Design Methodology for Miniaturization of Motor Equipped in a Fluid Intermittent Control System*, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),

[Ooshima, M. and Masukata, S.] 2013-10, *Design and Control of a Bio-Inspired Soft Wearable Robotic Device for Ankle–Foot Rehabilitation*,

[Park, Yong-Lae and al.] 2014-01, Bioinspiration & Biomimetics, *Costs Models in Design and Manufacturing of Sand Casting Products*, Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering,

[Perry, Nicolas and Mauchand, Magali and Bernard, Alain] 2005, Springer, *Tools for Thinking—Modelling in Management Science*,

[Pidd, Michael] 1997, Journal of the Operational Research Society, *Biology Meets Electronics: The Path to a Bio-Inspired FPGA*, Evolvable Systems: From Biology to Hardware,

[Prodan, Lucian and Tempesti, Gianluca and Mange, Daniel and Stauffer, André] 2000, Springer Berlin Heidelberg, *Modèle de Gamma Matrices Pour La Prise En Compte d'interactions Rayonnées Entre Réseaux*, 16ème Colloque International et Exposition Sur La Compatibilité Electromagnétique-CEM 2012,

[Reineix, Alain and Maurice, Olivier] 2012, *Outpatient Glycemic Control with a Bionic Pancreas in Type 1 Diabetes*,

[Russell, Steven J. and al.] 2014-07-24, New England Journal of Medicine

[Russell, Steven J. et al.] 2014. "Outpatient Glycemic Control with a Bionic Pancreas in Type 1 Diabetes." New England Journal of Medicine 371 (4): 313–25. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1314474.

[Sanislav, Teodora, and Liviu Miclea] 2012. "Cyber-Physical Systems-Concept, Challenges and Research Areas." Journal of Control Engineering and Applied Informatics 14 (2): 28–33.

[Saravi, Mohammad, et al.] 008. "Estimating Cost at the Conceptual Design Stage to Optimize Design in Terms of Performance and Cost." In Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World, 123–130. Springer.

[Sathya, S. Siva] 012. "A Survey of Bio Inspired Optimization Algorithms."

[Schöner, Hans-Peter] 004. "Automotive Mechatronics." Control Engineering Practice 12 (11): 1343–1351.

[Shah, Jami J., and Mary T. Rogers] 988. "Functional Requirements and Conceptual Design of the Feature-Based Modelling System." Computer-Aided Engineering Journal 5 (1): 9–15.

[Shen, Weiming, Qi Hao, and Weidong Li] 008. "Computer Supported Collaborative Design: Retrospective and Perspective." Computers in Industry 59 (9): 855–862., Julien Le Duigou, and Benoît Eynard.

[Simpson, Timothy W., et al.] 995. "Implementation of DFA in Conceptual and Embodiment Design Using Decision Support Problems." In Proceedings of the 1995 ASME Design Engineering Technical Conferences, 119–126. Citeseer.

[Singh, Ajay V. et al.] 012. "Bio-Inspired Approaches to Design Smart Fabrics." Materials & Design (1980-2015), Sustainable Materials, Design and Applications, 36 (April): 829–39. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.061.

[Srinivasan, V., Amaresh Chakrabarti, and Udo Lindemann] 013. "Towards an Ontology of Engineering Design Using SAPPhIRE Model." In CIRP Design 2012, edited by Amaresh Chakrabarti, 17–26. Springer London.

[Starkey, Elizabeth, Christine A. Toh, and Scarlett R. Miller] 016. "Abandoning Creativity: The Evolution of Creative Ideas in Engineering Design Course Projects." Design Studies 47: 47–72.

[Stone, Robert B. et al.] 014. "Charting a Course for Computer-Aided Bio-Inspired Design." In Biologically Inspired Design: Computational Methods and Tools, London: Springer London.

[Törngren, Martin, et al.] 014. "Integrating Viewpoints in the Development of Mechatronic Products." Mechatronics, 1. Model-Based Mechatronic System Design 2. Model Based Engineering, 24 (7): 745–62. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.11.013.

[Venkataraman, Srinivasan, and Amaresh Chakrabarti] 009. "Sapphire – an Approach to Analysis and Synthesis." DS 58-2: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 2, Design Theory and Research Methodology, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009. 2009.

[Wang, Lihui, Weiming Shen et al.] 002. "Collaborative Conceptual Design—State of the Art and Future Trends." Computer-Aided Design 34 (13): 981–996.

[Whang, K., K.e. Healy, et al.] 999. "Engineering Bone Regeneration with Bioabsorbable Scaffolds with Novel Microarchitecture." Tissue Engineering 5 (1): 35–51. https://doi.org/10.1089/ten.1999.5.35.

[Zheng, Chen, Matthieu Bricogne et al.] 014. "Survey on Mechatronic Engineering: A Focus on Design Methods and Product Models." Advanced Engineering Informatics, Multiview Modeling for Mechatronic Design, 28 (3): 241–57. https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.05.003.