



Titre de la thèse (acronyme) : FIDES

Directeur.rice.s de thèse : R. Vingerhoeds (DISC)

Montage financements : DGA-AID Projet FIDES

Candidat.e : tbd

Sujet de thèse : Forecasting pour l'Innovation Technologique dans les Ecosystèmes Stratégiques

Mots-clefs :

Ingénierie système, prédiction, approche holistique, prise de décisions, modélisation

Contexte :

Anticiper les évolutions et innovations techniques et prévoir les problèmes d'obsolescence sont des enjeux déterminant pour les organisations publiques et privées travaillant dans le domaine de l'innovation duale. Non seulement il s'agit d'une question vitale de compétitivité et de souveraineté mais c'est aussi un problème financier de première importance. La planification et les orientations à suivre en matière d'investissement dans la recherche et développement sont des enjeux centraux pour les organisations du domaine des innovations duales.

Anticipation Technologique Qualitatives et Quantitatives

Pour être les meilleurs, les entreprises ont pour nécessiter d'identifier et d'appréhender les tendances futures avant les autres.

Beaucoup d'entreprises s'appuient à la fois sur l'intuition des experts et des outils et méthodes comme la veille technologique et scientifiques. Les directions stratégiques et/ou les directions générales ont alors la charge d'analyser des scénarii potentiels et permettent ainsi d'alimenter mais surtout d'éclairer la prise de décision stratégique.

Un certain nombre de méthodes quantitatives d'anticipation technologique sont fondées sur l'analyse des données historiques et sont pensées pour permettre aux décideurs d'identifier un certain nombre d'évolutions types. A ce titre, on pense naturellement aux méthodes d'extrapolation des tendances. Ces méthodes ont, en effet, un avantage important par rapport aux méthodes purement qualitative d'anticipation : elles sont exemptes de biais subjectifs. Par ailleurs, pouvant être modélisé mathématiquement, ces méthodes peuvent faire l'objet d'outils automatisés à la portée des profils de décideurs non scientifiques.

Limites des méthodes quantitatives généralement employées

Bien que particulièrement développées dans le domaine industriel et de la défense, ces méthodes rencontrent un certain nombre de limites qui sont d'autant plus importantes que nous faisons face à un phénomène d'accélération des évolutions technologiques. L'inconvénient principal de ce type des méthodes réside dans sa simplicité. Tout d'abord, il y a toujours le risque (très fort) de l'émergence d'événements inconnus qui ont pour conséquence de faire changer de manière profonde les phénomènes d'évolutions technologique (les innovations de rupture, les crises économiques...). Pourtant, ces événements sont ignorés lorsqu'on automatise les modèles purement quantitatifs décrit précédemment. La solution, par nécessité, est alors l'intervention humaine pour ajuster le modèle mathématique. Ceci introduit, du même coup, de nouveaux biais...

Par ailleurs, les méthodes classiques d'extrapolation des tendances se concentrent sur des modèles où une technologie ou un système sera évalué principalement par un facteur de mérite (en anglais Figure of Merit ou FoM). L'évaluation de la performance d'une technologie ou d'un système ne saurait se limiter à un facteur de mérite.

Optimisation multi-dimensionnelle

Dans l'ingénierie, les enjeux et problèmes de conceptions sont formulées souvent comme des problèmes d'optimisation, où les choix de conception sont codés sous forme d'évaluations de variables de décision et les mérites relatifs de chaque choix sont exprimés via une fonction utilité/coût sur les variables de décision.

Dans la plupart des situations d'optimisation réelles, cependant, cette fonction de coût est multidimensionnelle.

Les problèmes d'optimisation multicritères ou multi-objectifs ont été l'objet de méthodes, dont certaines ont rencontré certains succès.

Une approche consiste à définir une fonction agrégée coût/utilité unidimensionnelle en prenant une somme pondérée des différents coûts. Chaque choix d'un ensemble de coefficients pour cette somme conduit à une solution optimale pour le problème unidimensionnel qui est une solution de Pareto pour le problème initial. D'autres modèles sont fondés sur la recherche heuristique et en particulier les algorithmes génétiques/évolutifs. Le principal problème de ces modèles repose sur la difficulté à trouver des éléments de mesures significatifs pour évaluer les solutions qu'ils se proposent de fournir.

Méthodes de forecasting et théorie des jeux

Les méthodes de forecasting (on utilise ici le terme d'anticipation comme l'approche holistique de l'anticipation stratégique et le forecasting comme les méthodes et outils quantitatifs permettant justement d'obtenir des résultats pour orienter l'anticipation stratégique) font l'objet de recherche dans différents domaines. Nous nous plaçons ici dans le management de projet et montrons comment optimiser les résultats par des méthodes plus efficaces et proches des réalités industrielles.

Les travaux de Heidenberger et Stummer (1999) donnent un aperçu des méthodes quantitatives de sélection des projets de R&D et d'allocation des ressources. Ils décrivent les approches de la théorie des jeux comme celles qui est la plus optimale pour appréhender une organisation dans un écosystème stratégique où les compétiteurs co-agissent et ont, par le fait même de leurs actions pour survivre et/ou l'emporter, un effet sur eux-mêmes, sur l'écosystèmes et donc leurs concurrents. Cependant, l'écart reste important entre la complexité de la prise de décision dans la vie réelle et ce modèle.

En 2017, Xiong et ses collègues ont proposé un modèle qui associe la théorie des jeux et le modèle de réseau afin d'appréhender la prise de décision stratégique en matière de système de systèmes d'armes (WSoS). En effet, avec le développement de l'armement, la planification en matière de systèmes de systèmes d'armes évolue dans un environnement de compétitions avec ce qu'on nomme la coévolution compétitive.

Dans le vocabulaire de la théorie des jeux, on considère qu'il n'existe pas de solution optimale unique mais plutôt qu'il existe un ensemble de solutions efficaces ou solutions de Pareto qui sont caractérisées par le fait que leur coût ne peut être amélioré dans une dimension sans être dégradé dans une autre. L'ensemble de toutes les solutions de Pareto, le front de Pareto, représente les compromis du problème.

Le fait de pouvoir échantillonner cet ensemble de manière représentative en tant que méthode de forecasting est un outil qui peut se révéler très précieux à l'anticipation stratégique.

Une nouvelle approche en mathématiques appliquées est proposée au management, fondée sur l'estimation stochastique de l'évolution des frontières efficaces de Pareto à n dimensions. Avec une combinaison d'approches basées sur l'optimisation stochastique et l'intelligence artificielle, nous pourrions obtenir des résultats optimaux.

La modélisation innovante prend en compte les interactions stimulées par la compétition inter-organisations dans un environnement stratégique ciblé. Nous prenons comme exemple principal le forecasting pour l'innovation dans les écosystèmes stratégiques de l'industrie aéronautique. Nous ciblons ainsi un écosystème avec lequel nous avons travaillé et avec des technologies duales que nous connaissons.

Au plus près des attentes opérationnelles et industrielles, nous proposons un modèle dynamique prenant en compte la pleine complexité d'un écosystème stratégique fondamental pour la souveraineté française.

La méthode interdisciplinaire se place dans le champ du management de projet et des outils qui y sont associés.

Références Bibliographique

- [1] Davison, P., Cameron, B., Crawley, E.F., 2015. Technology Portfolio Planning by Weighted Graph Analysis of System Architectures. *Systems Engineering* 18, 45–58. <https://doi.org/10.1002/sys.21287>
- [2] Heidenberger, K., Stummer, C., 1999. Research and development project selection and resource allocation: a review of quantitative modelling approaches. *Int. J. Manag. Rev.* 1, 197–224. <https://doi.org/10.1111/1468-2370.00012>.
- [3] Mankins, J.C., 2009. Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica* 65, 1216–1223. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>
- [4] Knoll, D., Golkar, A., de Weck, O., 2018. A concurrent design approach for model-based technology roadmapping, in: 2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon). Presented at the 2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2018.8369527>
- [5] Phaal, R., Farrukh, C.J.P., Probert, D.R., 2004. Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change* 71, 5–26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6)
- [6] Phaal, R., Farrukh, C.J.P., Probert, D.R., 2009. Visualising strategy: a classification of graphical roadmap forms. *International Journal of Technology Management* 47, 286–305. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.024431>
- [7] Yuskevich, I., Smirnova, K., Vingerhoeds, R., & Golkar, A. (2021). Model-based approaches for technology planning and roadmapping: Technology forecasting and game-theoretic modeling. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120761.
- [8] Yuskevich, I., Vingerhoeds, R., Golkar, A., 2018a. “Two-dimensional Pareto frontier forecasting for technology planning and roadmapping”, in: 2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon). Presented at the 2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2018.8369565>
- [9] Xiong, W., Ge, B., Zhao, Q., Yang, K., 2017. A game theory-based development planning approach for weapon system-of-systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*.

Démarche :

La thèse démarrera en octobre 2023 et consiste en gros en 3 étapes pour adresser les verrous identifiés :

1. La première étape consistera en un état des lieux sur les approches existantes, l'état de l'art en ingénierie systèmes et ses fondamentaux, en MBSE, et le forecasting au sens large. Le doctorant aura démarré une comparaison des travaux faits auparavant avec ce qu'il aura trouvé dans la littérature. De plus, il aura commencé avec la prise en main des logiciels existants issues des travaux précédents, ainsi qu'une reproduction des études de cas précédents, afin de vérifier le bon fonctionnement.
2. Dans un deuxième temps, une approche sera proposée, qui s'appuiera sur les travaux réalisés auparavant et l'état de l'art, afin de les modèles les plus intéressantes, pour permettre de structurer la prise de décisions. En parallèle, les possibilités d'optimisation ainsi que de perfection des approches mathématiques seront analysées, avec pour but d'avoir année une base mathématique stable et utilisable pour faire des études de cas, qui permettront de valider l'approche.
3. La recherche se poursuivra dans l'adoption des techniques et méthodes « basées connaissance » pour adresser les besoins identifiés, ce qui permettra de proposer et implémenter des améliorations sur les approches étudiées auparavant. Une telle intégration de ces méthodes avec les approches mathématiques ouvrira des nouvelles opportunités. Pour concrétiser cela, l'impact de ces solutions sur les pratiques de l'ingénierie système sera abordé.

Perspectives pour le doctorant :

Le doctorant, au-delà des formations (scientifiques, linguistiques ou relatives à l'insertion dans le monde du travail...) proposées par l'école doctorale et des séminaires proposés par les laboratoires, bénéficiera de formations complémentaires proposées dans les établissements sous forme de stages courts (coordination d'une équipe, ...). Enfin, il aura la possibilité de suivre les enseignements de master dans les établissements partenaires (processus en ingénierie système, modélisation système, théorie de la décision, théorie du vote).

Nous envisageons par ailleurs un séjour de trois mois à l'étranger dans des universités avec lesquelles les équipes entretiennent de fortes collaborations : TU Delft, MIT, TUM ...

Sur le plan de son intégration dans des communautés scientifiques, il sera encouragé à participer et à présenter ses travaux lors du séminaire doctoral et du forum académique annuel de l'AFIS (région parisienne), ainsi qu'à candidater au prix de la meilleure thèse en Ingénierie Système. Le doctorant aura aussi la possibilité d'intégrer les groupes de travail AFIS et INCOSE.

Le doctorant aura d'excellentes perspectives au vu de la connaissance qu'il aura au niveau de la modélisation des systèmes complexes, leur analyse en s'appuyant sur des méthodes formelles, et leur optimisation. Le jeune docteur pourra aisément poursuivre sa carrière dans le domaine de la conception des systèmes complexe (autant dans l'industrie que dans un établissement de recherche).

Ce projet de recherche constitue pour lui/elle donc une étape importante afin de déployer ces compétences pluridisciplinaires et de concrétiser ses savoirs au travers d'une thèse.

L'équipe ISAE-SUPAERO :

Le Département d'Ingénierie des Systèmes Complexes (DISC, 41 personnels permanents, 26 enseignants-chercheurs, dont 17 HDR) regroupe les activités de recherche menées dans les domaines de l'ingénierie des systèmes complexes dans le but de développer des méthodes, techniques et outils permettant de maîtriser (c'est-à-dire comprendre, analyser, évaluer, contrôler et concevoir) le comportement fonctionnel, opérationnel et les performances de ces systèmes. Afin d'aborder cet objectif scientifique le DISC développe à travers sa composante Mathématique une expertise transverse en méthodes d'analyse, d'optimisation et de modélisation stochastiques servant de support formel non seulement au développement de modèles rigoureux mis en œuvre dans les domaines automatique et informatique mais également dans l'ensemble des domaines scientifiques ayant trait aux sciences pour l'ingénieur.

L'équipe DISC couvre les domaines des Mathématiques et de l'Informatique. Une équipe technique transverse fournit un support de haut niveau dans le domaine du développement et de la maintenance de plateformes expérimentales réalisées dans le cadre des activités de recherche ou d'enseignement. Au sein du DISC, l'équipe Systèmes Connectés se compose de 9 enseignants-chercheurs permanents développant des compétences en Systèmes Complexes Connectés, Systèmes Temps-Réel, et Réseaux de Communication.

Le doctorant sera accueilli et encadré au sein du DISC par Rob Vingerhoeds, Professeur à l'ISAE-SUPAERO et animateur de l'équipe de recherche Systèmes Connectés, et dont l'activité de recherche aborde entre autres les questions de d'Ingénierie de Systèmes Complexes.