A fournir au format WORD exclusivement

Titre : Digitalisation et résilience de l'usine dans son évolution vers l'Industrie 4.0

Directeur(s) de Thèse : Virginie GOEPP, PR et Patrick SONDI, PR (IMT Nord Europe)

Unité(s) d'Accueil(s) : ICube Equipe CSIP

Établissement de rattachement : INSA de Strasbourg

Collaboration(s) (s'il y a lieu) : IMT Nord Europe Equipe ARTS

Rattachement à un programme (s'il y a lieu) :

Résumé (1500 caractères au maximum) :

Cette thèse s'intéresse à la transformation de système de production (SP) en système de production cyber-physique (SPCP) dans le contexte de l'industrie 4.0 et interroge ce processus sous l'angle de la résilience. En effet, cette transformation conduit à intégrer au SP initial des composants 4.0: l'Internet des objets pour la collecte de données, la commande à distance et la maintenance prédictive ; la blockchain pour la traçabilité ; le Cloud pour le stockage de données et les services Big Data nécessaires à l'optimisation des services, etc. Nonobstant les améliorations apportées par ces composants 4.0, ces derniers sont à l'origine d'une hausse de la dépendance à Internet et au Cloud, de l'exposition aux risques de cybersécurité, de la consommation d'énergie et du bilan carbone. Les récentes difficultés d'approvisionnement en matières premières et en énergie mettent en péril les usines et poussent les industriels à mettre en place des plans de continuité de leur activité sans réel cadre. L'objectif de cette thèse est de proposer en amont une démarche de transformation du SP vers un SPCP intégrant à tous les niveaux un découplage entre son fonctionnement avec ou sans chacun des composants 4.0 considérés. Les résultats attendus sont à la fois une approche méthodologique qui cadre ce découplage, ainsi que des solutions techniques qui permettent de le mettre en œuvre à tous les niveaux de la transformation.

Digitalisation et résilience de l'usine dans son évolution vers l'Industrie 4.0

1) Contexte scientifique

Le développement de l'Internet à très haut débit a rendu possible l'émergence du Cloud computing qui permet la mutualisation des moyens de stockage et de traitement de volumes de plus en plus importants de données dans de nombreux domaines d'activités. La production industrielle déjà fortement automatisée lors de la troisième révolution industrielle dans les années 70, n'échappe pas à cette tendance et entre dans cette nouvelle ère de numérisation et de connectivité intenses grâce aux nouvelles technologies, baptisée Industrie 4.0 [Kagermann & al., 2013]. Ainsi, en plus des initiatives des industriels et des organismes de normalisation, de nombreux travaux académiques se sont attelés à proposer des cadres pour piloter la transformation de système de production (SP) ainsi que le système d'information associé en système de production cyber-physique (SPCP) [Wu & al., 2021] vers l'Industrie 4.0.

Dans le contexte de ces dernières années où les technologies de communication convergeaient vers une solution adaptée à tous les usages en offrant des débits de plus en plus élevés et une couverture de plus en plus large, où de grandes entreprises de l'Internet investissaient massivement dans des infrastructures Cloud avec l'ambition d'offrir un hébergement mutualité à tous les applicatifs et toutes les données, et où l'essor des techniques issues de l'intelligence artificielle (IA) permettaient enfin de traiter efficacement les données massives (Big Data) pour toute sorte d'optimisation, tous les voyants étaient au vert pour amorcer cette révolution industrielle sereinement et accompagner la transformation des usines. Par conséquent, la question de la résilience de l'usine et sa capacité à maintenir son fonctionnement face à une défaillance de tout ou partie de ces éléments de transformation est souvent abordée comme un risque transitoire, mais pas dans la perspective d'un retour en arrière bien cadré et durable du système de production vers un état antérieur à tout ou partie de ces transformations [Attajer & al., 2022].

Or, on observe que cette transformation qui conduit à intégrer au système de production initial des composants 4.0 tels que l'Internet des objets pour la collecte de données, le pilotage à distance et la maintenance prédictive ; la blockchain pour la traçabilité ; le Cloud pour le stockage de données et les services Big Data nécessaires à l'optimisation des services, etc., expose le système de production à des fragilités et risques accrus. Ces nouveaux composants 4.0 ont importé dans les usines les risques liés aux nouvelles technologies. Ils sont à l'origine d'une dépendance accrue à Internet dont la coupure entraîne inexorablement la perte de l'accès au Cloud qui peut causer des arrêts dans la production. Ils entraînent également une exposition massive aux risques de cybersécurité du fait de la connexion à Internet et de l'introduction dans les lignes de productions d'objets connectés à faible niveau d'administration et de sécurisation. Dans le contexte actuel de crise climatique, énergétique et géopolitique, on peut ajouter parmi les conséquences de cette numérisation la hausse de la consommation d'énergie et du bilan carbone interne de l'usine, la dépendance aux services Cloud opérés majoritairement par des acteurs non nationaux, ainsi que les tensions sur les matières premières et les composants électroniques qui peuvent rendre certains composants 4.0 irréparables ou indisponibles.

La plupart des propositions opérationnelles abordent la résilience sous l'angle particulier de la cybersécurité [Espinoza-Zelaya & Moon, 2021], tandis que celles provenant des institutionnels s'attèlent davantage à la

souveraineté des données dans le Cloud [<https://gaia-x.eu>]. Ainsi, les travaux de [Mullet & al., 2021] proposent une synthèse des principales approches développées pour la cybersécurité dans l'Industrie 4.0 et pourraient être revisités sous le prisme de la résilience.

Cependant très peu de travaux abordent la résilience comme un sujet plus large qui pourrait aboutir à une transformation plus profonde du système de production cyber-physique allant jusqu'à un retour en arrière qui impliquerait le retrait de certains composants 4.0. Cela semble pourtant la solution ultime, notamment face aux pénuries d'énergie et de matières premières. On observe par exemple que plusieurs entreprises déclenchent en ce moment des plans de continuité de l'activité pour tenter de maintenir le plus possible un certain niveau d'activité dans les usines, là où d'autres usines ferment purement et simplement leurs portes pour une durée indéterminée. Malheureusement, en l'absence de cadre méthodologique et de réelles analyses en amont sur la résilience, ces plans de continuité se font à tâtons sans réelle visibilité sur l'impact réel et la pérennité des mesures mises en place, ni sur la nouvelle situation de l'usine vis-à-vis de ses obligations légales, normatives, contractuelles et qualité.

Un premier travail qui tente réellement d'aborder la résilience à un niveau le plus global possible est proposé dans [Goepp & al., 2022]. Les auteurs tentent de mettre faire correspondre des caractéristiques, des phases et des stratégies de la résilience aux différents composants 4.0. Néanmoins, les fragilités et les risques y sont encore abordées comme exceptionnelles et non comme durables tel que nous l'avons souligné dans le cas des risques énergétiques, géopolitiques ou sur les matières premières, ce qui ramènera inévitablement aux solutions transitoires actuelles en matière de résilience.

2) **Contenu scientifique**

Ce projet de thèse vise à développer une approche qui intègre à la fois des apports méthodologiques ainsi que des considérations et solutions techniques qui prennent en compte la résilience de l'usine dès le départ dans le processus de transformation de son système de production en système de production cyber-physique. L'idée est de définir à chaque étape de la transformation les aspects à prendre en compte pour que l'intégration de tout composant 4.0 soit accompagnée d'une définition des conditions dans lesquelles il peut être intégré, maintenu ou retiré du fonctionnement de l'usine en fonction des risques encourus. Afin que ces opérations se déroulent dans un cadre maîtrisé, cette définition doit s'accompagner d'une description des impacts associés à la décision prise pour chaque composant 4.0 particulier et des conséquences de ces impacts sur la situation de l'usine vis-à-vis de ses contraintes légales, normatives, contractuelles et qualité. De cette façon, il devient relativement simple pour une entreprise de mettre en place et de faire évoluer un plan de continuité de business dans un cadre maîtrisé, peu importe que les fragilités et les risques encourus soient transitoires ou durables.

Pour ce faire, ce travail s'inspirera des travaux de [Wu & al., 2021] menés sous la direction de Virginie Goepp (INSA Strasbourg). Ces travaux proposent une méthode qui permet de guider l'évolution d'un système de production avec son système d'information vers un système de production cyber-physique en vue de l'évolution vers l'Industrie 4.0. L'idée est d'y coupler la dimension « résilience ». Afin de faire la preuve de concept de la méthodologie proposée et de permettre aux industriels de se projeter sur le potentiel de cette approche dans leur usine, nous définirons une étude de cas portant sur le composant Industrie 4.0 associé à l'Internet des objets, à laquelle nous appliquerons la méthodologie développée dans la thèse. Ainsi, la thèse sera l'occasion de développer des solutions techniques de résilience pour faire face aux différents risques impactant l'Internet des objets, notamment :

- en proposant des architectures de réseaux qui permettent la continuité de service des composants 4.0 fournis via l'infrastructure formée par les objets connectés, notamment dans le cas d'une coupure d'Internet ou de cyberattaques;
- en spécifiant des équipements réseau de substitution, notamment basés sur des solutions libres montées sur des équipements banalisés, lorsque les fournisseurs d'équipements commerciaux sont incapables ou dans le refus de réparer ou remplacer les équipements défectueux suite à une panne, ou qui ont été dénoncés pour des raisons de sécurité;
- en définissant des solutions de substitution des objets connectés commerciaux en cas de rupture d'approvisionnement de composants électroniques finis ou constituants, par des solutions alternatives logicielles ou matérielles, y compris non électroniques.

Ces solutions de substitution constitueront des alternatives lors de la mise en oeuvre des plans de continuité de service dans le cadre de l'application de la méthodologie développée dans la thèse avant un possible retrait pur et simple du composant 4.0 correspondant. Par conséquent, une analyse technique des impacts associés à chacune des solutions alternatives devra être produite par les concepteurs du composant 4.0 concerné.

Références

- [Kagermann & al., 2013] Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster et Johannes Helbig. « Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 » – Securing the Future of German Manufacturing Industry. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. München : acatech – National Academy of Science et Engineering, 2013 (cf. p. 1)
- [Wu & al., 2021] Xuan Wu, Virginie Goepp, Ali Siadat, François B. Vernadat, «A method for supporting the transformation of an existing production system with its integrated Enterprise Information Systems (EISs) into a Cyber Physical Production System (CPPS) ». *Comput. Ind.* 131: 103483 (2021)
- [Attajer & al., 2022] Ali Attajer, Sondes Chaabane, Saber Darmoul, Yves Sallez, Fouad Riane, «Evaluation of Operational Resilience in Cyber-Physical Production Systems: literature review, IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 10, 2022
- [Espinoza-Zelaya & Moon, 2021] Espinoza-Zelaya, Carlos & Moon, Young. (2022). Resilience Enhancing Mechanisms for Cyber-Manufacturing Systems against Cyber-Attacks. *IFAC-PapersOnLine*. 55. 2252-2257. 10.1016/j.ifacol.2022.10.043.
- [Mullet & al., 2021] Valentin Mullet, Patrick Sondi, Éric Ramat: «A Review of Cybersecurity Guidelines for Manufacturing Factories in Industry 4.0». *IEEE Access* 9: 23235-23263, 2021
- [Goepp & al., 2022] Virginie GOEPP, Lamia BERRAH, Emna DRIRA, Sondes CHAABANE, Towards a framework to position resilience and Industry 4.0, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 55, Issue 10, Pages 2258-2263, ISSN 2405-8963, 2022
- [Sondi, 2010] Patrick Sondi Obwang, "Le Routage à Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc", Thèse de doctorat en Informatique de l'Université de Valenciennes, 2010.
- [Cohin & Sondi, 2015] O. Cohin and P. Sondi, "Internet of Things for smart factory", *IEEE COMSOC MMT C E-Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 21-23, Sep. 2015
- [Clavier & al., 2020] L. Clavier, T. Pedersen, I. Larrad, M. Lauridsen and M. Egan, "Experimental Evidence for Heavy Tailed Interference in the IoT," in *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 3, pp. 692-695, March 2021.