

*Proposition d'une méthodologie de coopération Humain-Robots :
Application à une cellule de désassemblage robotisée*

Date de début : Septembre 2023 (3 ans)

Inscription : Ecole Doctorale Polytechnique Hauts-de-France (ED PHF n°635)

Co-direction et co-encadrement : <i>M-Pierre Pacaux-Lemoine, Ingénieur de Recherche, HDR</i> <i>Jean-Jacques Santin, Maître de conférence</i> <i>LAMIH UMR CNRS 8201</i> <i>Campus du Mont Houy</i> <i>Université Polytechnique Hauts-de-France</i> <i>59313 Valenciennes Cedex 9</i> Email : marie-pierre.lemoine@uphf.fr Email : Jean-Jacques.Santin@uphf.fr Web : https://www.uphf.fr/lamih	Co-direction et co-encadrement : <i>Richard Béarée, Professeur</i> <i>Nathalie Klément, Maître de conférence</i> <i>Arts et Métiers Sciences et Technologies</i> <i>LISPEN EA 7515</i> <i>8 Boulevard Louis XIV 59046 Lille</i> Email : richard.bearee@ensam.eu Email : nathalie.klement@ensam.eu Web : https://lispen.ensam.eu/
--	---

Résumé du sujet de thèse

L'objectif du projet et de la thèse associée est d'exploiter la complémentarité des approches de la robotique fortement développée à l'ENSAM de Lille au LISPEN, et celles de la coopération humain-machine reconnue depuis de nombreuses années au LAMIH, pour proposer et mettre en application une méthode de conception et d'évaluation d'une équipe Humain-Robot. Le but commun de cette équipe serait de répondre aux exigences d'un procédé dynamique, en l'occurrence le process de désassemblage d'un produit dans un contexte de recyclage. La répartition de fonctions entre l'humain et le robot doit en effet s'adapter à la variabilité des produits et notamment aux incertitudes qui y sont liées comme l'usure. Le robot doit donc se comporter comme un partenaire pouvant répondre aux besoins de l'humain de par ses capacités complémentaires (coopération intégrative) ou en partageant des fonctions similaires à celles que l'humain peut réaliser mais pas seul (coopération augmentative). La mise en place de cette coopération s'assurera du respect des règles normatives en vigueur, mais aussi du confort et de l'intérêt que l'humain pourra y trouver. Ce projet s'inscrit dans les objectifs régionaux portant sur l'économie circulaire, dans les objectifs nationaux portant sur l'industrie 5.0 et la conception centrée sur l'humain et serait intégré au projet SDC2 (Smart Disassembly Cell for Circularity) soutenu par les Instituts CARNOT ARTS, CETIM et Energie du Futur.

1) Le sujet de recherche

Le monde n'a jamais produit autant de déchets et seule une minorité d'entre eux sont recyclés. La gestion des déchets a non seulement une incidence au niveau environnemental, avec un volume de déchets à traiter toujours croissant, mais également en termes de commerce et de géopolitique. La France tente de répondre à cette problématique par la mise en place de lois, telles que la loi AGECE concernant l'Anti Gaspillage pour l'Économie Circulaire (2021) et la mise en place de Responsabilités Étendues des Producteurs (REP) pour définir les obligations des metteurs de produits sur le marché à s'impliquer dans les filières de traitements des produits en fin de vie et orienter vers des voies de ré-usage, de réparation ou de recyclage. C'est avec des objectifs similaires que la région Hauts-de-France a déployé la Stratégie Recherche Innovation pour le développement économique des Hauts-de-France (2021-2027) et notamment une piste de spécialisation dédiée à l'« Economie circulaire et nouvelles fonctionnalités des matériaux ». C'est dans ce cadre que nous positionnons notre sujet de recherche avec une problématique portant sur le désassemblage de moteurs électriques ou d'appareils électro-ménagers.

Une première étude bibliographique portant sur la problématique du désassemblage souligne que le désassemblage manuel n'est pas efficient et n'est pas justifié d'un point de vue économique. De plus, de par la nature complexe et incertaine des tâches de désassemblage, une automatisation complète de ces tâches n'est que rarement envisageable. Il est donc souhaitable d'étudier la possibilité de mettre en place une coopération Humain-Robot pour exploiter les capacités du robot pour les tâches répétitives et précises, et celles de l'humain pour l'innovation, sa flexibilité face à la complexité, à la variabilité et aux incertitudes. Cette littérature montre cependant que la notion de coopération entre l'humain et le robot se réduit souvent à une simple interaction physique, l'humain étant souvent très peu considéré. En effet, les mesures effectuées sur l'opérateur humain sont principalement liées à sa fatigue physique, sans considérer l'intérêt qu'il porte à la tâche à réaliser ou ses capacités d'adaptation ou d'innovation. L'humain est principalement considéré comme un agent auquel on dicte des procédures à réaliser [1]-[2].

Différents aspects de la coopération entre l'humain et le robot peuvent être considérés tels que les aspects normatifs de sécurité, les modes de collaboration/coopération, les modalités d'interaction/communication, ainsi que la conception du processus de désassemblage [3]. Le produit à désassembler est composé d'un ensemble de composants mécaniques et électroniques interconnectés, dont les connexions ne sont pas toujours connues (pas d'information concernant l'assemblage), ou ont évolué avec le temps (e.g. usure). Les opérateurs humains associés aux tâches de désassemblage se doivent donc de procéder par étapes successives. Si le produit est connu, des composants ou modules d'intérêt sont identifiés afin d'être extraits puis recyclés. De même, des procédures de désassemblage peuvent alors permettre de séquencer les étapes de désassemblage. Si le produit n'est pas connu, son état se découvre progressivement et l'opérateur doit s'adapter et redéfinir les étapes du désassemblage. Selon que ces étapes nécessitent du perçage, du dévissage, ou d'autres actions, l'opérateur humain va devoir gérer des situations non prévues telles que la manipulation de pièces trop lourdes ou encombrantes, ou nécessitant plus de forces ou l'aide d'un autre opérateur humain (type troisième main). Ces différentes situations peuvent notamment entraîner des traumatismes musculo-squelettiques.

Pour répondre aux situations de blocage ou pour éviter les situations à risque, une solution est d'assister l'opérateur humain dans ses tâches de désassemblage par un robot. Les capacités et compétences du robot doivent être identifiées, voire adaptées en fonction des types de produit à désassembler ou du profil de l'opérateur humain. Les capacités du robot sont liées à ses besoins en énergie, à sa charge admissible, à sa répétabilité et à sa portée maximum. Ses compétences sont liées aux fonctions qu'il est capable de remplir telles que savoir capter et analyser l'information sur le produit, savoir prendre une décision et réaliser une action. Dans le cadre d'une interaction avec un opérateur humain, ces compétences individuelles se doivent d'être assorties de compétences pour coopérer avec un autre agent, qu'il soit humain ou artificiel. Nous appelons cette compétence le « savoir-coopérer », c'est un savoir complémentaire au savoir-faire de l'agent [4]. Le « savoir-coopérer » permet aux agents de se construire un modèle de l'agent partenaire pour comprendre, reconnaître les intentions ou actions en cours de cet autre agent. Ce savoir particulier permet également aux agents d'interagir de façon coopérative pour planifier l'activité (e.g. quelles fonctions partager, quelle organisation) et gérer des interférences potentielles, i.e. conflits pouvant apparaître, aux niveaux physiques ou cognitifs, entre les fonctions des agents (e.g. partage d'espace physique, d'outils, d'accès au produit).

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil.

Les deux laboratoires, le LAMIH et le LISPEN travaillent sur la thématique et sont reconnus dans le domaine depuis de nombreuses années au niveau régional, national et international. Des travaux sur la coopération Humains-Machines dans le cadre de l'industrie 4.0 ont notamment été financés dans le cadre de deux projets ANR dans lesquels étaient impliqués le LAMIH (projet HUMANISM : HUMan-MACHines cooperation for flexIble production SystemeS) et le LISPEN (projet HECTOR : L'Humain Engagé par la Cobotisation dans les Transformations du Travail et des Organisations dans les usines du futur). D'autres projets ont également contribué à mener sur la réflexion sur les nécessaires transformations de l'industrie au regard des enjeux écologiques, économiques et surtout de l'implication de l'humain dans une industrie du futur qui pourrait bénéficier de nouvelles technologies.

De récents travaux au LAMIH ont abordé le pilotage de systèmes de production reconfigurables [5]. Les problématiques de sécurité de l'opérateur dans un tel système reconfigurable ont notamment été étudiées et ont abouti au développement d'une méthodologie de déploiement d'équipements de sécurité adéquats.

La problématique des systèmes de production reconfigurable est également abordé par le LISPEN, qui a développé une démarche de conception pour ces systèmes [6]. Au sein du LISPEN, la conception de cellules de production robotisées/cobotisées sûres de fonctionnement est un axe historique et mature. Les développements récents portent notamment sur l'optimisation de la répartition des tâches et de l'équilibrage de postes associant humain et robot [3]. Dans le cadre d'un projet aidé par la région Hauts de France, en partenariat avec SNCF Réseau (Projet STIMulE FORMAugEST : Capitalisation du geste métier pour l'aide à la formation) l'exploitation d'un cobot pour l'aide à la formation et au détournement du geste est investigué. Cette nouvelle modalité d'interaction humain-robot pourra venir en appui de l'étude proposée.

3) Les objectifs visés, les résultats escomptés.

Nous proposons donc de travailler sur une méthode de conception et d'évaluation d'un système Humain-Robot dédié au désassemblage de produits de taille et complexité variables. La méthode s'appuyant sur des travaux issus d'autres domaines d'application (robotique en gestion de crise, en supervision de systèmes manufacturiers, en défense militaire) sera adaptée au cas particulier du désassemblage, pour identifier les savoir-faire et savoir-coopérer des opérateurs humains et des robots pour répondre ensemble aux besoins associés à un produit précis. La méthode mettra notamment en avant les phases de formation des agents, de préparation de l'activité (planification et répartition des fonctions), de supervision et contrôle de l'activité jusqu'à la fin du désassemblage (interface multimodale de coopération, Espace de Travail Commun), puis de capitalisation des connaissances sur le produit et les compétences et capacités individuelles et coopératives des agents.

Deux cas d'usage seront étudiés. La méthode sera déployée au LISPEN (Arts et Métiers Lille) avec l'objectif de : 1) réaliser une analyse comparative de l'influence de différents niveaux d'exploitations du savoir-faire humain sur les indicateurs de performances (en phase de formation et d'exploitation) pour un cas de désassemblage de vérins pneumatiques et/ou de moteurs électriques, 2) ouvrir la méthodologie au cas d'étude de produits complexes de grande taille (grand électroménager) sans connaissance a priori des modalités de désassemblage. Elle sera également appliquée au LAMIH (UPHF) dans le cadre d'une coopération humain-robot (Yumi) au sein d'une cellule robotisée reconfigurable pour désassembler de petits moteurs électriques [5].

Le LISPEN et le LAMIH ont une expertise dans l'étude de la reconfigurabilité des systèmes de production [5]-[6]. Les produits considérés ici suivent une forte variabilité de par leur caractéristique produit (type de produit considéré), mais également l'âge du produit ou son usure [7]. Des chercheurs au sein des deux laboratoires travaillent sur le développement d'outils d'aide à la décision, en particulier pour de la planification d'activités ou de l'affectation de tâches entre un robot et un humain [3]-[4]. En particulier, une approche multi-agents pourrait être considérée, afin d'intégrer les caractéristiques des différentes ressources envisagées : humain ou robot et leurs potentielles interactions. L'outil envisagé permettrait :

- d'aider l'opérateur à prendre des décisions au quotidien dans l'exécution des tâches notamment les opérations à faire par lui-même ou le robot,
- d'aider le décideur au choix de démonter tel ou tel produit. En effet, certains produits ne seront peut-être intéressants à démonter d'un point de vue rentabilité (le temps investi sera moindre que la revente des pièces démontées). Le décideur pourra également être aidé dans la planification du démontage des produits sélectionnés.
- de capitaliser les décisions prises (futurs apprentissages, prédictions à évoquer)

Les développements sur démonstrateur s'appuieront sur l'expertise reconnue du LISPEN dans le domaine de la robotique industrielle et plus particulièrement de la conception de cellules cobotiques, s'appuyant sur différents scénarios d'interactions, de communication et intégrant notamment la démarche d'analyse de risques associées aux standards normatifs de sécurité [8]. De même, l'expertise du LAMIH sur les méthodes de conception et d'évaluation de systèmes humains-machines permettront d'identifier les modes de coopération les plus efficaces et souhaités par l'humain pour répondre à ses attentes [9]-[10].

4) Le programme de travail.

Le programme de travail serait le suivant. Le doctorant sera dans un premier temps formé par ses encadrants sur le domaine étudié, soit l'industrie 4.0 et la coopération Humain-Robot. Il approfondira ensuite cette formation par des lectures sur le domaine, en ciblant plus particulièrement les besoins concernant le désassemblage. Quelques travaux commencent à être publiés sur cette thématique ; le doctorant devra donc réaliser une recherche bibliographique, puis analyser les références identifiées, pour ensuite identifier les réponses que sa recherche peut apporter sur les méthodes de conception de coopération Humain-Robot pour le désassemblage. Des objectifs de recherche seront ainsi définis d'un point de vue scientifique mais aussi applicatif, puisqu'il devra définir les systèmes à concevoir pour répondre aux besoins des futurs opérateurs humains impliqués dans le processus de désassemblage de produit. De par les incertitudes liées à ce type de processus, les besoins des opérateurs humains seront variables et les outils d'aide à la coopération, comme la planification de la répartition de fonction entre l'Humain et le robot, devront être adaptables. La méthode de conception et d'évaluation proposée sera appliquée à deux environnements expérimentaux, *i.e.* deux environnements robotisés, l'un au LISPEN et l'autre au LAMIH. Des expérimentations seront menées pour obtenir des résultats en termes de performance sur les capacités de désassemblage de produit par l'équipe Humain-Robot, mais surtout en termes de qualité de la coopération de cette équipe. Des données objectives de performance pourront ainsi être complétées par des données subjectives issues de la perception de la coopération par les opérateurs humains, que ce soit en terme de sécurité, d'acceptabilité ou encore de souhait de travailler avec ce type de partenaire. Les résultats seront progressivement mis en forme, soumis dans des conférences et journaux, pour ensuite être présentés dans le mémoire et la soutenance de doctorat.

Les livrables s'appuieront donc sur les soumissions ainsi réalisées, ainsi que des rapports à rédiger dans le cadre du projet Institut CARNOT SCD2, support de recherche sur l'économie circulaire.

Le calendrier serait le suivant :

	Formation sur le domaine	Recherche biblio.	Définition des objectifs de recherche	Définition et mise en œuvre des systèmes	Implémentation sur plateformes expérimentales	Réalisation des exp.	Analyse des données expérimentales	Mise en forme des résultats	Rédaction de la thèse	Soutenance de thèse
Dates	01/09/2023	01/02/2024	01/04/2024	01/08/2024	01/11/2024	01/04/2025	01/08/2025	01/12/2025	01/07/2026	01/09/2026
	3	2	2	4	3	5	4	4	7	2

Cinq livrables sont envisagés. Le livrable 1 serait une publication de type revue de littérature proposant des axes prospectifs (vers fin 2024). Les livrables 2 et 3 présenteraient les démonstrateurs de concepts au sein des deux laboratoires (mi 2025). Le livrable 4 serait une revue diffusant les contributions au domaine (mi 2026) et le livrable 5 s'appuierait sur le mémoire de thèse.

5) Les collaborations prévues

Les collaborations au niveau international se feront par le biais des sociétés savantes IEEE (*e.g.* Systems, Man and Cybernetics), IFAC par l'organisation de sessions spéciales telles qu'elles ont déjà pu être organisées par le passé (*e.g.* "Towards Human-Machine Cooperation in Industrial Socio-Cyber-Physical Systems", 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems ICPS2018). Cette recherche pourra également se discuter au cours de séminaires de recherche organisés dans le cadre du laboratoire CNRS international France-Australie, l'IRL CROSSING, sur le Human-Autonomous Agents Teaming, ou des échanges dans un groupe de recherche de l'OTAN sur le "Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems". Dans ces groupes de travail internationaux les collaborations sont transdisciplinaires, intégrant les sciences de l'ingénieur, les sciences humaines et sociales et notamment la psychologie et l'ergonomie cognitives, sociales, ainsi que le droit.

Les collaborations se feront au niveau national par l'intermédiaire des groupes de recherche du GDR MACS, du GDR Robotique et de la SAGIP, mais aussi de par l'implication des laboratoires LAMIH et LISPEN dans le projet SDC2 (Smart Disassembly Cell for Circularity) porté par les Instituts CARNOT ARTS, CETIM et Energie du Futur.

Au niveau régional, l'étude proposée est en soi fondée sur la collaboration entre deux unités de recherche de la région. Des échanges pourront se faire par l'intermédiaire du GRAISyHM (Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine).

Financement : Bourse co-financée région Hauts-de-France – UPHF - ENSAM

Compétences/Profil du candidat : Issus d'une école d'Ingénieur ou d'un Master, les candidats devront posséder de solides compétences en Automatique, Robotique et Informatique Industrielle. Une première expérience sur la conception et l'évaluation de systèmes d'aide à l'humain serait un plus. Les candidats devront maîtriser l'anglais.

Candidature : Les candidats intéressés devront déposer leur candidature sur la plateforme ADUM : <https://adum.fr/candidature/index.pl?site=UPHF>

Les dossiers de candidature devront comporter les éléments suivants :

- Un CV d'une page,
- Une lettre de candidature en Français expliquant la motivation,
- Les relevés des notes des deux dernières années (école d'ingénieur ou master) et si possible, le classement dans la promotion,
- Un avis d'un ou plusieurs enseignants dont la matière est en lien avec la thématique du sujet de thèse.

6) Références

[1] J. Huang et al., "An experimental human-robot collaborative disassembly cell," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 155, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107189.

[2] S. Hjorth and D. Chrysostomou, "Human-robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 73, p. 102208, 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2021.102208.

[3] Quenehen, A., Klement, N., Abdeljaouad, A. M., Roucoules, L., & Gibaru, O. (2022). Economic and ergonomic performance enhancement in assembly process through multiple collaboration modes between human and robot. *International Journal of Production Research*, 1-15.

[4] Pacaux-Lemoine M.-P., Trentesaux D., Zambrano rey G., Millot P. (2017). Designing Intelligent Manufacturing Systems through Human-Machine Cooperation Principles: A Human-Centered Approach. *Computers & Industrial Engineering*, 111, pp. 581-595. [IF=2.623] [DOI=10.1016/j.cie.2017.05.014] (244 citations).

[5] Y. Sallez and T. Berger, "How to Build a 'Cooperative' Safety Bubble for a Reconfigurable Assembly System?" *Stud. Comput. Intell.*, vol. 762, pp. 187-197, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-73751-5_14.

[6] Beauville dit Eynaud, A., Klement, N., Roucoules, L., Gibaru, O., & Durville, L. (2022). Framework for the design and evaluation of a reconfigurable production system based on movable robot integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(7), 2373-2389

[7] Klement, N., & Silva, C. (2020). A generic decision support tool to planning and assignment problems: Industrial applications and industry 4.0. In *Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing* (pp. 167-192). Springer, Cham.

[8] M. Bounouar, R. Bearee, A. Siadat, T.-H. Benchekroun, On the role of human operators in the design process of cobotic systems, *Cognition, Technology and Work*, 2021.

[9] Pacaux-Lemoine M.-P., Berdal Q., Guérin C., Rauffet P., Chauvin C., Trentesaux D. (2021). Designing Human-Systems Cooperation in Industry 4.0 with Cognitive Work Analysis: a first evaluation. *Cognition, Technology & Work*, 24, pp. 93-111.

[10] Pacaux-Lemoine M.-P., Flemisch F. (2022). Human-Industrial Cyber-Physical System Integration: Design and Evaluation Methods. In Olivier Cardin, William Derigent, Damien Trentesaux, *Digitalization and Control of Industrial Cyber-Physical Systems Concepts, Technologies and Applications*, ISTE-Wiley, pp. 171-188, ISBN 9781789450859