

CIGI QUALITA MOSIM 2023

De la collaboration vers la coopération Humain-Robot : exemple du désassemblage

MARIE-PIERRE PACAUX-LEMOINE¹, NATHALIE KLEMENT², JEAN-JACQUES SANTIN¹, RICHARD BEAREE²,
YVES SALLEZ¹

¹ Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 - LAMIH,
F-59313 Valenciennes, France
{marie-pierre.lemoine, jean-jacques.santin, yves.sallez}@uphf.fr

² Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN, HESAM Université,
Lille 59046, France
{nathalie.klement, richard.bearee}@ensam.eu

Résumé – La Coopération Humain-Machine est étudiée depuis plus de trente ans dans de nombreux domaines dont le transport, la gestion de crise ou encore les systèmes manufacturiers et hospitaliers. Les principes de la coopération humain-machine sont aujourd’hui appliqués à des procédés industriels complexes pour répondre aux besoins croissants des opérateurs humains dans la supervision et le contrôle de ces procédés, tout en profitant des capacités croissantes des systèmes « intelligents » autonomes, dont les robots. L’intérêt d’utiliser les modèles proposés par la coopération humain-machine est de pouvoir analyser finement les fonctions devant être réalisées par l’opérateur humain et/ou la machine, pour ensuite opérer une planification de ces fonctions et leur allocation à chacun de ces acteurs. La planification peut être simulée, proposée à l’opérateur humain, redéfinie si besoin, puis implémentée. Elle peut cependant être remise en question au cours de l’exécution de la tâche, puis réadaptée en cas d’événements imprévus, tels qu’ils peuvent apparaître dans un procédé aussi peu prévisible que celui du désassemblage. Cette communication a donc pour objectif d’apporter des briques méthodologiques sur la conception d’un tel système humain-robot pour répondre aux contraintes liées aux opérations de désassemblage qui sont exposées. Deux dispositifs expérimentaux sont ensuite présentés.

Abstract – Human-Machine Cooperation has been studied for more than thirty years in many domains such as transport, crisis management or manufacturing and hospital systems. Human-Machine Cooperation principles are now applied to complex industrial processes to address the increasing Human needs to keep their abilities to supervise and control such processes, when taking advantages of the increasing capacities of autonomous “intelligent” systems, including robots. The interest in using the models proposed by Human-Machine Cooperation is the ability to conduct a precise analysis of the functions that have to be performed by human operators and/or machines, in order to construct a planning based on those functions and their allocation to each of those actors. Planning can be simulated during task execution, and then adapted according to unexpected events, as they could appear with a process as little predictable as the disassembly process. The present communication aims at bringing some methodological bricks to design such a Human-Robot system managing constraints linked to the disassemble operations presented in this paper. Two experimental systems are then presented.

Mots clés - Coopération Humain-Robot, Robot collaboratif, Aide à la décision, Désassemblage.

Keywords – Human-Robot Cooperation, Collaborative robot, Decisional support, Disassembly

1 INTRODUCTION

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.

Le démontage ou désassemblage est une étape essentielle dans bon nombre des stratégies de gestion de fin de vie des produits. Le processus de désassemblage se concentre sur l’extraction des sous-ensembles et des composants individuels des produits de manière à ce qu’ils puissent être modifiés / reconditionnés. Il existe, par exemple, un potentiel important de réutilisation des composants d’un équipement électroménager tels que les moteurs électriques. Ces derniers ont une durée de vie moyenne de plus de 30 ans comparé à la durée de vie opérationnelle de 10 à 15 ans de l’ensemble de la machine à laver.

C’est dans ce cadre que se positionnent nos travaux de recherche visant à développer des approches de coopération

Humain-robot pour le désassemblage de produits. La suite du papier est organisée comme suit. La section 2 dresse un état de l'art des problématiques associées au processus de désassemblage et met en évidence l'intérêt d'une coopération Humain-robot. Un modèle permettant de supporter cette coopération est proposé dans la section 3. Deux cas d'étude seront ensuite proposés pour valider cette proposition dans la section 4. Enfin, une conclusion et quelques perspectives sont présentées en section 5.

2 ETAT DE L'ART

Après avoir décrit les différents problèmes soulevés par un processus de désassemblage, l'intérêt d'une coopération Humain-robot est mis en évidence.

2.1 *Problématique du désassemblage*

Le désassemblage non destructif d'un produit est formellement défini comme étant la séparation systématique des composants et reste un processus hautement dépendant de la conception et de l'assemblage d'origine du produit [Chang et al., 2017]. Ce processus ne se résume cependant pas à son processus d'assemblage inversé. Certains liens entre composants (par exemple, emboîtement, collage, rivetage), rendent difficile, voire impossible, le démontage d'un produit de manière non destructive.

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. vieillissement). Le séquençage doit donc pouvoir s'adapter dynamiquement à l'état des composants découvert au fur et à mesure du démontage du produit. Cela peut conduire à un arrêt du processus ou à l'utilisation d'autres moyens pour poursuivre le démontage.

2.2 Robotisé ou non ?

Bien que les techniques de planification du démontage deviennent de plus en plus efficaces, le démontage manuel s'avère non efficient et devient de moins en moins soutenable d'un point de vue économique en raison des réglementations environnementales et de la quantité croissante de produits à démonter [Parsa et Saadat, 2019].

Si le produit est connu, des composants ou modules d'intérêt sont identifiés afin d'être extraits puis recyclés. L'opérateur peut alors s'appuyer sur des procédures de désassemblage. Si le produit n'est pas connu, tout se découvre progressivement et l'opérateur doit s'adapter et définir les séquences. Selon que ces étapes nécessitent du déclipsage, du dévissage, ou d'autres actions, l'opérateur humain va devoir gérer des situations non prévues tels que des composants collés ou grippés nécessitant l'usage d'outils spécifiques, ou nécessitant plus de forces ou l'aide d'un autre opérateur humain (type troisième main). Ces différentes situations peuvent notamment entraîner des troubles musculo-squelettiques.

Dans ce contexte, les procédés de démontage automatisés / robotisés semblent proposer une piste de solution intéressante. Les premières applications industrielles dans ce domaine ont visé le démontage de téléphones [Liu et al., 2022]. Si la robotique est connue pour être particulièrement intéressante dans le monde manufacturier pour l'exécution précise de tâches répétitives, elle trouve ses limites dans les processus de démontage.

De par la diversité importante des produits, la nature complexe et incertaine des tâches de désassemblage, une automatisation complète de ces tâches n'est que rarement envisageable. Ces caractéristiques font que l'utilisation d'un robot standard sans aucune capacité cognitive est très vite limitée (Survey Disassembly Robotics) [Foo et al., 2022].

Cependant, comme souligné dans [Poschmann et al., 2020], les derniers développements de l'industrie 4.0 et en particulier des robots collaboratifs et des technologies de l'Intelligence artificielle sont à même de faire évoluer cette situation. [Gil et al., 2007] ont utilisé des robots coopératifs pour développer un système multisensoriel flexible dans un processus de démontage autonome.

Une piste intéressante dans le secteur du démontage et du démantèlement réside dans la mise en œuvre de procédés de démontage hybrides exploitant la coopération Humain-robot. Cette coopération permet d'exploiter les capacités du robot pour les tâches répétitives et précises, et celles de l'humain pour son inventivité, 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 [Lee et al., 2022 ; Huang et al., 2021 ; Li et al., 2021 ; Parsa et Saadat, 2021 ; Quenehen et al., 2022, Belhadj et al., 2022]. Au contraire des types de collaboration présentés dans ces travaux, la coopération humain-robot a pour objectif non seulement de s'assurer de la sécurité de l'humain, mais aussi d'étendre les échanges entre l'humain et le robot sur l'analyse de la situation et la prise de décision. Les objectifs portent donc aussi et surtout sur des tâches cognitives communes. De même, les travaux sur la collaboration ne remettent que rarement en question un partage de tâches humain-robot prédéfini, alors que pour le désassemblage les planifications risquent d'être fortement réévaluées du fait de situations non prévues, voire non prévisibles.

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 [Hjorth et Chrysostomou, 2022]. Ces aspects sont abordés dans le paragraphe suivant par le biais des approches de la Coopération Humain-Machine.

3 PROPOSITION

L'objectif de l'étude est donc d'associer les recherches portant sur les méthodes de conception et d'évaluation de systèmes humain-machine qui permettent d'identifier les modes de coopération les plus efficaces et souhaités par l'humain pour répondre à ses attentes [Pacaux-Lemoine et al., 2021], aux recherches portant sur les normes de sécurité à respecter dans le cadre d'une collaboration humain-robot. Le modèle de coopération humain-machine est donc proposé, puis il est augmenté et contraint par les normes de sécurité dans une dernière partie.

3.1 Modèle de coopération humain-machine

Le modèle de coopération humain(s)-machine(s) a été défini au cours de travaux menés dans le cadre du contrôle de trafic aérien, mais il a évolué de par son application dans de nombreux cas d'étude très variables selon les objectifs à atteindre (sécurité, performance, résilience, etc.), le nombre d'agents humains impliqués et l'organisation associée, le nombre d'agents artificiels impliqués et leur capacité, mais aussi le type de coopération entre l'ensemble de ces agents, qu'ils soient humains ou artificiels [Pacaux-Lemoine, 2020].

Dans ce projet, la première étape consiste donc à identifier les agents impliqués, leur capacité et compétence, pour ensuite proposer des types de coopération. Les capacités et compétences des agents peuvent être amenées à être adaptées en fonction des objectifs ou de la situation à contrôler. Dans le cas du désassemblage, comme mentionné dans l'état de l'art, la situation est très variable de par les types de produit à désassembler (adaptation à la demande client), le type de problème rencontré dans le désassemblage (pièce abîmée, corrosion, etc.) et le profil de l'agent humain (habileté, expérience, etc.). Les capacités du robot sont liées à ses besoins en énergie, à sa charge utile, sa répétabilité et à son volume atteignable. 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, ce que nous appelons « le savoir-faire », mais également savoir coopérer avec l'humain ce que nous appelons « le savoir-coopérer ». De même, le savoir-faire de l'humain est lié à ses capacités cognitives et physiques pour réaliser une tâche sur le produit à désassembler ; son savoir-coopérer consiste à interagir avec le robot et des outils d'aide à la décision pour planifier, allouer les fonctions à réaliser, à lui-même et au robot, puis, si nécessaire, à replanifier les fonctions suite à des événements imprévus, *e.g.* manque de capacité physique de l'humain pour démonter une pièce, manque de dextérité du robot pour manipuler une pièce.

Dans le cadre du désassemblage, le savoir-faire des agents peut ainsi se décliner en fonctions simples, même si leur combinaison peut conduire à des tâches plus compliquées. La difficulté réside donc surtout dans la définition du savoir-coopérer, *i.e.* comment les deux agents vont pouvoir « faciliter la tâche de l'autre », tout en étant capable de « détecter et gérer de potentiels conflits, appelés interférences, avec l'autre ».

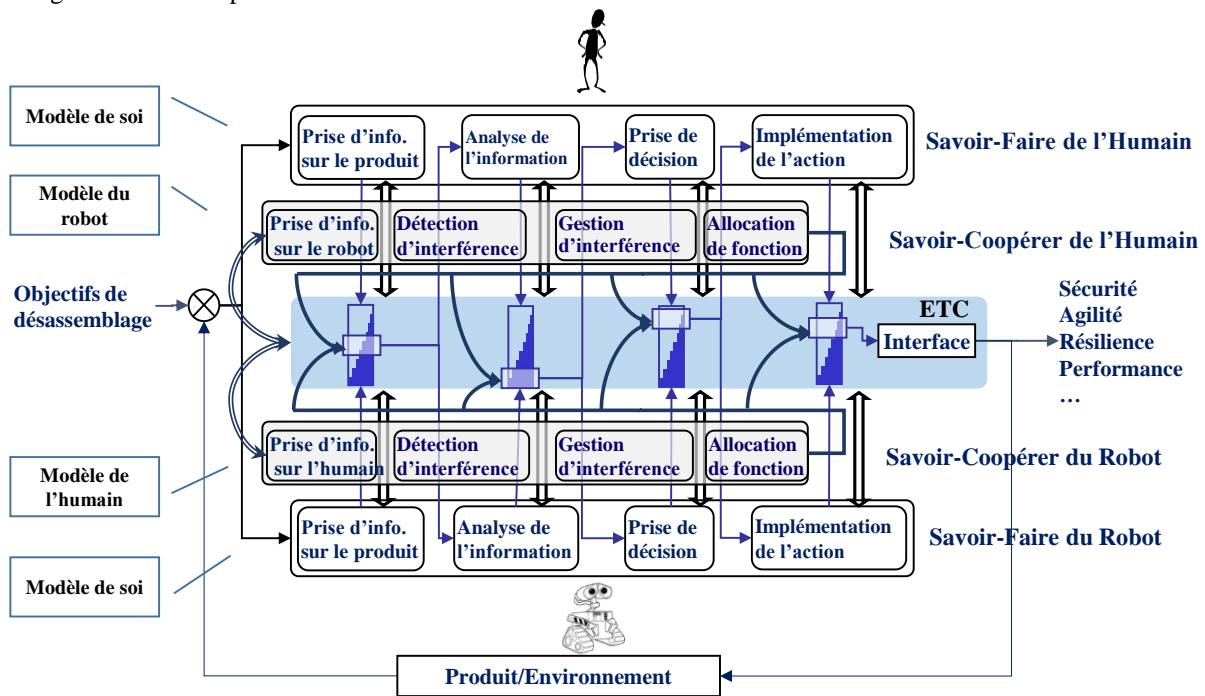


Figure 1 : Modèle de coopération Humain-Robot

Une synthèse des fonctions du savoir-faire et du savoir-coopérer des agents est proposée sur la figure 1.

Dans le cas d'une interaction entre l'humain et le robot pour le désassemblage, les deux agents vont partager l'accès au produit à désassembler, pour agir en même temps ou en alternance, selon la situation et les besoins de l'équipe humain-robot. Des informations sur le produit sont partagées par le biais d'un **Espace de Travail Commun** (ETC sur la figure 1). Cette interface partage en effet des informations sur le procédé ou l'environnement dans lequel les agents sont impliqués pour le contrôle. Mais elle partage également les fonctions qui doivent être réalisées, de même que leur allocation à l'humain, au robot ou aux deux. L'ETC dispose ainsi d'échelles sur lesquelles le décideur, l'agent humain ou artificiel suivant le niveau d'automatisation, positionne un curseur (cf. échelles sur

la figure 1). Une fonction de désassemblage peut être partagée, comme par exemple dans le cas du maintien du produit par le robot dans une certaine position, alors que l'humain intervient dessus. Le partage de l'action peut varier si par exemple le robot (R) doit exercer une force contre celle exercée par l'humain (H) pour compenser (H : 50% R : 50%) ou repousser (H : 40% R : 60%), ou encore l'absorber (R : 30% H : 70%) suivant les situations.

Concernant le **savoir-faire**, la première fonction est la **prise d'information**. L'humain peut utiliser plusieurs sens pour prendre de l'information sur le produit ; la vue, mais également l'ouïe (par exemple le bruit anormal d'un roulement lors de son fonctionnement), le toucher (rugosité d'une surface fonctionnelle), l'odorat (odeur résultant d'une surchauffe).

Mais le robot peut aussi disposer de capteurs, quelquefois plus précis ou complémentaires aux sens de l'humain. Ses capteurs sont à définir en fonction des objectifs à atteindre.

La deuxième fonction du savoir-faire consiste à **analyser l'information** issue de la prise d'information issue de l'un ou des deux agents. Les informations sont disponibles dans l'ETC et chaque agent peut en profiter. Récupérer l'information issue des capteurs des robots est aisé, par contre renseigner l'ETC est une tâche supplémentaire pour l'humain. Il est donc nécessaire de s'assurer de la pertinence de cette fonction qui est liée au savoir-coopérer. Ce peut être pertinent si le robot (ou un autre système d'aide) est capable de proposer un diagnostic à partir de l'ensemble des informations, dont celles issues de l'humain. Si c'est l'humain qui fait l'analyse, cette fonction supplémentaire n'est peut-être pas nécessaire.

La troisième fonction du savoir-faire consiste à **prendre une décision**, à partir de l'analyse préalablement effectuée. La décision peut être imposée par l'un des agents ou faire suite à une négociation. Par exemple, le robot ou un système d'aide peut être capable de simuler une commande proposée par l'humain, la refuser et proposer une commande alternative. Une décision est imposée en affectant **l'autorité** à l'un des agents. Si la situation risque d'entraîner une collision entre l'humain et le robot, alors un système d'aide peut être mis en place de façon à bloquer la décision de l'agent qui risquerait de ne pas respecter des règles établies, sciemment ou non. L'humain peut commettre une erreur de façon consciente (violation) ou non. Le robot peut ne pas connaître la règle. L'autorité peut donc être affectée à l'un des agents, par contre **la responsabilité** reste bien souvent à l'humain, que ce soit l'utilisateur ou le concepteur d'un système [Flemisch et al., 2012].

La quatrième et dernière fonction du savoir-faire est **l'implémentation de l'action**. Il s'agit de l'application de la décision ou encore une action qui se déclenche directement car l'expertise ou l'expérience a permis d'éviter les étapes d'analyse et/ou de prise de décision (comportement basé sur des règles ou des habiletés [Rasmussen, 1983]).

Le **savoir-coopérer** se compose également de quatre fonctions principales. La première fonction, **la prise d'information** porte cette fois sur le partenaire et non sur le procédé, en l'occurrence le produit à désassembler. Dans le cas d'étude ici proposé, l'humain est à proximité du robot, il peut ainsi observer son comportement, mais il peut aussi bénéficier d'un système d'aide l'informant des états et fonctions du robot passé, actuel ou encore futur. Par exemple, l'état du robot (e.g. en arrêt, en attente d'un ordre) peut être indiqué via des dispositifs lumineux montés sur le poignet du robot. De cette façon l'humain se construit un modèle du robot, *i.e.* un modèle de son comportement (cf. Figure 1). De même, le robot dispose d'un modèle de lui-même, utilisé pour la commande (*e.g.* son

jumeau numérique), qu'il exploite pour calculer ses trajectoires et coopérer avec l'humain. Si le robot est capable d'apprendre alors ce modèle pourrait évoluer après validation de l'utilisateur ou du concepteur. Par contre, il est plus difficile pour le robot de se construire un modèle de l'humain. Il est cependant possible de fournir les fonctions que l'humain peut être amené à réaliser, souvent appelées les tâches prescrites. Cependant, dans notre cas d'étude, des événements imprévus peuvent survenir, nécessitant la réalisation, voire la création de nouvelles fonctions. Un apprentissage peut donc être proposé, peut-être pas en ligne car la fonction apprise par le robot notamment doit être vérifiée et validée.

Les deuxième et troisième fonctions du savoir-coopérer traitent de la **détection et gestion d'interférence**. La prise d'information sur le partenaire a pu mettre en évidence une interférence, *i.e.* un désaccord entre l'humain et le robot, sur une ou plusieurs fonctions du savoir-faire. L'humain peut se rendre compte, par le biais de l'ETC, que le robot n'a pas détecté une des caractéristiques du produit, *e.g.* à cause d'un défaut de capteur ou une perturbation lumineuse. L'humain peut renseigner le robot en alimentant l'ETC pour gérer l'interférence. Une interférence au niveau de l'analyse d'information souligne des diagnostics ou des pronostics différents entre l'humain et le robot. Le robot pourrait par exemple réaliser un meilleur diagnostic en cas de besoin de grande précision pour vérifier le positionnement d'un composant. Le robot pourrait gérer l'interférence si l'humain saisit son diagnostic sur l'ETC et que le robot fait remarquer une erreur à l'humain. La détection et la gestion d'une interférence sur la prise de décision consisteraient à ce qu'il y ait des échanges entre l'humain et le robot sur le choix de l'action à entreprendre. La décision peut par exemple porter sur une décision de dévissage ou de perçage d'une vis suivant son état d'oxydation. L'interférence sur l'action est plus compliquée à gérer car elle doit notamment s'assurer de la sécurité de l'humain vis-à-vis des mouvements du robot. Quand le robot touche l'humain alors que ce n'est pas planifié, il doit stopper son mouvement. Un autre type de gestion d'interférence, moins binaire, serait par exemple de laisser l'humain positionner le robot dans la posture souhaitée pour ensuite redéclencher l'action, comme dans le cas d'une programmation par apprentissage.

Ce paragraphe a présenté une utilisation du modèle de coopération humain-machine pour identifier les fonctions individuelles et coopératives de l'humain, du robot, encore d'un autre type d'agent artificiel qui pourrait apporter son soutien pour la planification des tâches à réaliser sur un produit particulier, notamment avec des outils de simulation. Ce type de coopération est dit multi-niveau, *i.e.* qu'il intègre plusieurs niveaux décisionnels, comme présenté dans le paragraphe suivant.

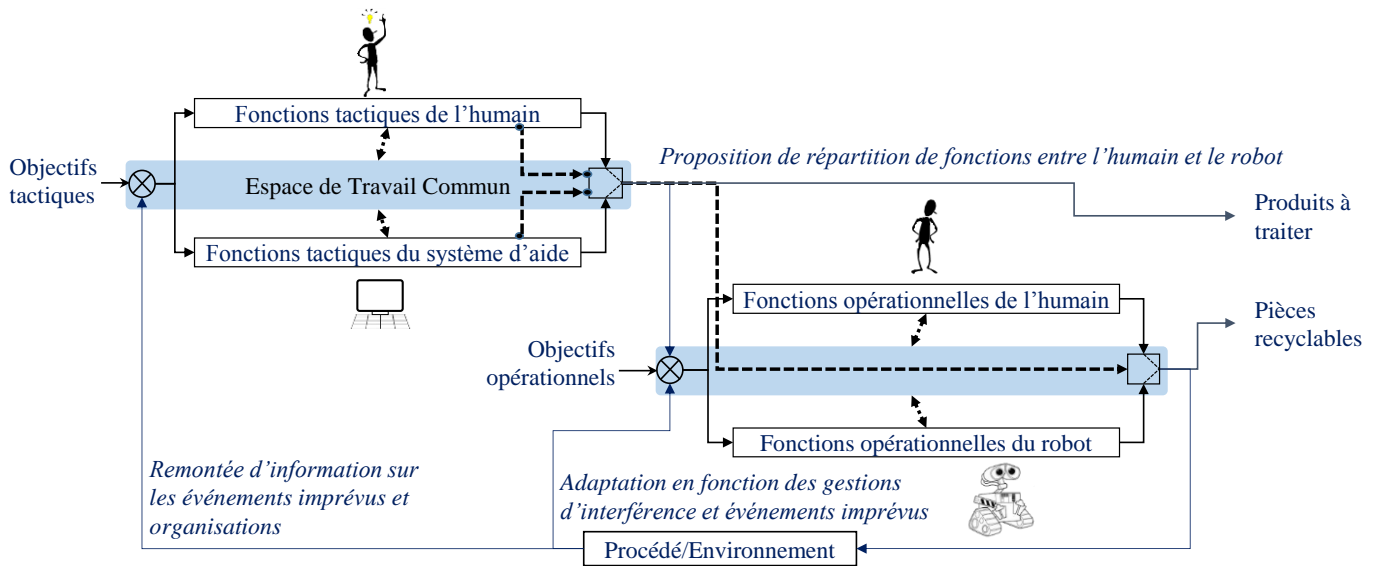


Figure 2 : Coopération multi-niveau

3.2 Coopération multi-niveau

La coopération entre humains ou entre humains et agents artificiels peut être étudiée par niveau décisionnel, dans notre cas : — le niveau stratégique définit les objectifs de désassemblage à atteindre, *i.e.* les types et nombre de produits à traiter, des critères performances comme le rapport temps / qualité des pièces recyclées et construit un plan d'activité ; — le niveau tactique intègre les objectifs et met en œuvre le plan proposé par le niveau stratégique. Le niveau tactique est cependant souvent amené à reconsidérer le plan en l'adaptant aux contraintes temps réel liées aux capacités et compétences des agents, ou aux événements imprévus liés à l'environnement de travail ou au produit traité ; — le niveau opérationnel engage les actions demandées par le niveau tactique. Cette description des niveaux décisionnels souligne principalement la descente des informations du niveau d'abstraction le plus haut (niveau stratégique) vers le niveau d'abstraction le plus faible (niveau opérationnel). Cependant, la coopération entre les niveaux se construit également dans l'autre sens, notamment dans le cas de perturbations répétées au niveau opérationnel ou tactique. Un exemple type serait le cas d'un produit dont le plan de désassemblage serait reconnu comme fiable et rapide, il serait donc fourni aux niveaux tactique, puis opérationnel avec des contraintes temporelles et types de pièce recyclée ; or, ces niveaux remontent de plus en plus d'inadéquation entre le plan de désassemblage et les difficultés rencontrées par les agents pour démonter le produit et extraire les pièces recyclées. Dans ce cas, le plan initial doit être réajusté et/ou les contraintes adaptées.

La coopération multi-niveau implique donc que les niveaux coopèrent, autrement dit que les niveaux d'abstraction les plus bas appliquent les demandes des niveaux d'abstraction supérieure, mais aussi que les niveaux d'abstraction les plus hauts prennent en compte les informations et difficultés remontées par les niveaux d'abstraction inférieure.

Un exemple de coopération multi-niveau est illustré sur la figure 2. Les niveaux tactique et opérationnel se distinguent par les agents artificiels impliqués, *e.g.* le robot capable d'agir directement sur le produit au niveau opérationnel, le système d'aide à la décision au niveau tactique, capable de proposer des plans de désassemblage et de les tester par simulation. Les agents humains sont soit différents, soit il s'agit du même agent selon l'organisation de l'atelier. Il peut être judicieux de

garder le même agent humain pour les deux niveaux de façon à ce qu'il gère plus facilement son interaction avec le robot et qu'il soit responsable d'une cellule de désassemblage. L'acceptation et la motivation n'en seront que renforcées.

3.3 Outil d'aide à la décision

Plusieurs décisions sont à considérer dans cette organisation multi-niveau : désassembler ou pas, décomposer le désassemblage en plusieurs opérations, allouer ces opérations aux différentes ressources disponibles (Humain et robot) en tenant compte de la durée des opérations, en fonction de la ressource, d'une potentielle précedence et de l'effort relatif à cette opération.

Dans le cas de l'assemblage, un tel outil d'aide à la décision a été proposé par [Quenehen et al., 2022] en considérant des critères économiques, relatifs au temps, et ergonomiques, en intégrant un facteur de difficulté sur chaque opération. L'objectif de cet outil était d'affecter les opérations à l'humain, au robot ou aux deux ressources (mode collaboratif du type 3^{ème} main ; forme intégrative ou augmentative selon [Schmidt, 1991]). Dans le cas de l'assemblage, les opérations sont connues à l'avance.

Dans le cas du désassemblage, les opérations ne sont pas connues à l'avance. Ce cas de figure correspond à un système de production reconfigurable, pour lequel une méthodologie de conception a été précédemment développée [Beauville dit Eynaud et al., 2022]. L'outil d'aide à la décision proposé doit donc être un outil en ligne qui se devra réactif en fonction de l'avancée du désassemblage. Deux options s'offrent à nous :

- Un outil qui s'adapterait à l'avancement du désassemblage, auquel cas l'opérateur humain indiquerait l'avancement au fur et à mesure, en utilisant une interface dédiée ; ou avancement renseigné automatiquement via un système de vision.
- Un outil prédictif, qui serait au préalable alimenté par une base de données régulièrement complétée par les précédentes expériences.

L'outil d'aide à la décision générique proposé par [Klement et Silva, 2020] serait repris dans les travaux actuels. L'outil précédemment développé est générique au sens où il peut

adresser différents problèmes. Aujourd'hui, l'outil d'aide à la décision proposé doit être en plus multi-niveaux : le niveau opérationnel pour guider l'opérateur dans son démontage pas à pas ; le niveau tactique alimenté par l'apprentissage du modèle. Les décisions prises au niveau opérationnel rempliraient la base de données du niveau tactique. Le niveau tactique proposerait des solutions à l'opérateur humain, solutions affinées par l'augmentation de la base de données grâce aux décisions du niveau opérationnel.

Ces développements doivent également s'accompagner de la prise en compte d'aspects normatifs pour assurer la sécurité des opérateurs, comme explicité dans la prochaine section.

3.4 Aspects normatifs

Le domaine applicatif de la robotique collaborative est encadré par les normes NF EN ISO 10218 (1 et 2) et ISO/TS 15066 qui distinguent globalement quatre modalités de collaboration : a) l'arrêt nominal de sécurité contrôlé (le robot est en arrêt dès qu'une présence est détectée dans une zone interdite ou en deçà d'une distance définie), 2) le guidage manuel (aucun mouvement autonome du robot), 3) le contrôle de la vitesse et de la distance de séparation (l'espace de travail commun est surveillé par un/des capteurs qui conduisent le robot à moduler sa vitesse d'évolution en fonction de la position et de l'évolution de la vitesse de déplacement de l'opérateur humain), 4) la limitation de la puissance et de la force (l'opérateur humain peut collaborer en interaction directe avec le robot dont les organes de sécurité assurent une surveillance des risques de collision et une limitations stricte de l'intensité, du type et de la localisation corporelle du contact, si il se produit). La mise en œuvre certifiable d'un ou de plusieurs de ces modes de collaboration passe nécessairement par une analyse de risques préliminaire. Actuellement les trois premiers modes de collaboration sont les plus fréquemment rencontrés (pas d'interaction directe en autonomie entre Humain et robot). Le dernier mode est celui qui ouvre la voie à des interactions plus poussées, mais qui nécessite de fait une analyse de risque très étayées [Bounouar et al., 2021 ; Safeea et al, 2019 ; Safeea et al, 2019]. L'absence de simulateur dynamique « normée » de robot, ne permet pas d'anticiper finement cette analyse lors de la conception de la cellule collaborative. Dans ce cas, la validité de l'analyse ne pourra être confirmée qu'après une campagne de mesures « certifiées » sur le système, dans son environnement d'évolution réel.

Qu'il s'agisse d'une coopération sur un seul niveau décisionnel, ou de la coopération multi-niveau, qu'il s'agisse de la définition de l'aide à la décision ou du respect des normes, ces différents aspects de la coopération humain-robot vont être mis en place et testés sur deux cas d'étude présentés ci-après.

4 CAS D'ETUDE

Les deux cas d'études s'inscrivent dans le cadre du projet Inter-CARNOT SDC2 (Smart Disassembly Cell for Circularity). Ce projet vise à développer une série de briques technologiques pouvant être utilisée pour constituer un système de désassemblage « intelligent ». Ce système devra être apte à traiter plusieurs typologies de produits (moteurs électriques, gros électroménagers, convertisseurs de puissance) pour récupérer des modules ou composants à forte valeur résiduelle. Dans ce projet, le LISPEN et le LAMIH s'intéressent plus particulièrement aux problématiques de coopération Humain-Robot au travers de deux cas d'étude

avec des produits différents et des robots de différentes capacités.

4.1 Cas d'étude du LISPEN

La méthode sera déployée au LISPEN (Arts et Métiers Lille) sur un pas de ligne cobotisé (robot collaboratif de type UR5) avec deux objectifs principaux. Le premier objectif est de 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. La Figure 3 illustre une application dans le cas de l'assemblage de vérin en mode collaboratif de type surveillance des efforts.



Figure 3 : Poste applicatif envisagé montrant une interaction entre Humain et cobot manipulateur (LISPEN/ENSAM Lille).

Le second objectif est d'ouvrir la méthodologie et le modèle de coopération associé au cas d'étude de produits complexes de grande taille (grand électroménager) sans connaissance a priori des modalités de désassemblage.

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 captation, de communication et intégrant notamment la démarche d'analyse de risques associées aux standards normatifs de sécurité.

4.2 Cas d'étude du LAMIH

La méthode proposée sera également appliquée au LAMIH (UPHF) dans le cadre d'une coopération Humain-robot au sein d'une cellule robotisée reconfigurable pour désassembler de petits moteurs électriques [Sallez et Berger, 2018]. La cellule est utilisée à des fins didactiques au sein de l'INSA Hauts-de-France et sert de support à diverses activités de Recherche dans le cadre du LAMIH. Elle comporte deux robots UR5, un robot collaboratif ABB Yumi® IRB 14000 et trois robots mobiles MIR, ces derniers sont chargés de la transitique des produits entre les différents postes robotisés. Le lecteur peut se référer à [Berger et al., 2021] pour une plus ample présentation de cette cellule.

Le robot Yumi dispose de deux bras de dimensions anthropomorphiques, à 7 degrés de liberté chacun. Il est parfaitement ambidextre avec des possibilités de mouvements coordonnés. C'est une quasi-machine au sens de la directive « machines » 2006/42/CE. Son utilisation nécessite une analyse de risque. Ses capacités sont complémentaires à celle d'un opérateur : plus performants sur certains points comme la précision, l'endurance, l'indépendance de ses 2 bras ; mais moins performant sur d'autres comme la perception de l'environnement, la communication avec l'opérateur humain,

l'adaptabilité, l'universalité de ses préhenseurs (peu performant d'origine ou spécialisés) et la capacité d'emport (500g par bras, sans préhenseur).

Dans le cadre des travaux sur le désassemblage, l'accent sera mis sur un poste de travail collaboratif constitué d'un opérateur humain et du robot collaboratif Yumi (voir figure 4). Ce dernier pourra assister l'opérateur au travers de différentes activités « supports » :

- Assurer en automatique le démontage d'une partie du produit (par exemple, dévissage des différentes vis associées au châssis des moteurs) ;
- Aider l'opérateur dans la manipulation du moteur en servant de 3^{ème} (voire de 4^{ème}) main ;
- Assister l'opérateur en lui présentant le ou les outils les plus appropriés pour la tâche de désassemblage à réaliser.



Figure 4. Le robot YUMI utilisé (LAMIH/INSA Hauts-de-France)

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'économie circulaire et le recyclage font aujourd'hui partie des priorités de développement au sein de nos régions et pays. Le désassemblage est l'une des étapes nécessaires à la mise en œuvre des processus de recyclage. Tester et si possible désassembler des produits sont cependant des tâches qui sont plus complexes que celles habituellement déployées dans nos industries, tel que l'assemblage. Les incertitudes liées à l'état du produit ou de ses composants remettent constamment en question les fonctions devant être appliquées, mais aussi la répartition de ces fonctions entre les opérateurs humains et les robots. Cette communication a pour objectif de démontrer la complexité de la tâche, mais aussi de proposer des solutions en termes de méthodologie et de technologie pouvant répondre au besoin de partage entre l'opérateur humain et le robot.

La méthodologie proposée s'appuie sur les principes de coopération humain-machine. Elle va être prochainement appliquée pour définir les fonctions que le concepteur roboticien devra programmer sur le robot, mais également pour définir quel sera le rôle du futur opérateur humain qui devra à

la fois définir et mettre en œuvre les tâches de désassemblage pour les planifier, les attribuer, les adapter et les capitaliser en fonction des situations rencontrées.

Plusieurs aides à la décision et à l'action vont être identifiées, sur les niveaux tactique et opérationnel, pour soutenir la coopération entre l'opérateur humain et le robot, pour le contrôle du processus de désassemblage et l'implication chacun dans ce processus soient transparents et adaptables. 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. Ainsi, concernant les perspectives, l'outil pourrait également :

- aider l'opérateur humain à prendre des décisions au quotidien dans l'exécution des tâches notamment les opérations à faire par lui-même ou le robot,
- aider le décideur au choix de démonter tel ou tel produit. En effet, certains produits ne seront peut-être pas 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.
- capitaliser les décisions prises (futurs apprentissages, prédictions à évoquer)

6 REFERENCES

- Chang, M. M. L., Ong S. K. & Nee A. Y. C. (2017) Approaches and Challenges in Product Disassembly Planning for Sustainability, *Procedia CIRP* 60, 506 – 511
- Parsa S. & Saadat M. (2019). Intelligent selective disassembly planning based on disassemblability characteristics of product components, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104:1769–1783
- Liu, H., Hai, J., Li, L., Yin, F. (2022). An efficient disassembly process generation method for large quantities of waste smartphones, *Procedia CIRP* 105, 140-145.
- Foo, G., Kara S., Pagnucco, M. (2022). Challenges of robotic disassembly in practice. *Procedia CIRP* 105, 513-518
- Poschmann, H., Bruggemann, H., Goldmann, D. (2020). Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation, *Chemie Ingenieur Technik*, 92, N°4, 341–359
- Gil, P., Pomares, J., Diaz, S.v.P.C., Candelas, F. & Torres, F. (2007). Flexible multi-sensorial system for automatic disassembly using cooperative robots. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(8), 757-772.
- Berger, T., Santin, J.J., Chaabane, S., Dequidt, A., Sallez, Y. (2021). SmartLab: a concept of Reconfigurable Assembly System designed at INSA Hauts-de-France. 11th workshop SOHOMA'21 (Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future), Cluny, France, November 18-19, 2021.
- Lee M. L., Behdad S., Liang X. & Zheng M. (2021) Task allocation and planning for product disassembly with human-robot collaboration," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 76, no. June 2021, p. 102306, 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2021.102306.
- Huang, J., Pham, D. T., Li, R., Qu, M., Wang, Y., Kerin, M., Su, S., Ji, C., Mahomed, O., Khalil, R., Stockton, D., Xu, W., Liu, Q., Zhou, Z., (2022) An experimental human-robot collaborative disassembly cell, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 155, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107189.
- Li, K., Liu, Q., Xu, W., Liu, J., Zhou, Z. & Feng, H. (2019)

- Sequence planning considering human fatigue for human-robot collaboration in disassembly, *Procedia CIRP*, vol. 83, pp. 95–104, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.127.
- Parsa, S. & Saadat, M. (2021) Human-robot collaboration disassembly planning for end-of-life product disassembly process, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 71, no. February, p. 102170, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2021.102170.
- 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.
- I. Belhadj, M. Aicha, and N. Aifaoui, "Product disassembly planning and task allocation based on human and robot collaboration," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 16, no. 2, pp. 803–819, 2022.
- Hjorth, S. & Chrysostomou, D. (2022) 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.
- 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.
- Pacaux-Lemoine M.-P. (2020) Human-Machine Cooperation: Adaptability of shared functions between Humans and Machines - Design and evaluation aspects, Valenciennes: Habilitation à Diriger des Recherches, Université Polytechnique Hauts-de-France, France, 2020.
- Flemisch, F., Heesen, M., Hesse, T., Kelsch, J., Schieben, A., & Beller, J. (2012) Towards a dynamic balance between humans and automation: Authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations. *Cognition, Technology and Work*, 14(1), 3–18.
- Rasmussen, J. (1983) Skills, Rules, and Knowledge; signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3), 257–266.
- Schmidt, K. (1991) Cooperative Work: A Conceptual Framework. In J. Rasmussen, B. Brehmer, & J. Leplat (Eds.), *Distributed Decision Making: Cognitive Models for Cooperative Work* (pp. 75–109). Chichester: John Wiley & Sons.
- 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
- 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.
- Bounouar, M., 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.
- Safeea, M. Neto, P. Béarée R. (2019) On-line collision avoidance for collaborative robot manipulators by adjusting off-line generated paths : An industrial use case, *Robotics and Autonomous Systems*, 119, 278–288, 2019.
- Safeea, M. Neto, P. Béarée, R. (2019) A Quest Towards Safe Human Robot Collaboration. In *proceedings of the 20th Towards Autonomous Robotic Systems Conference - TAROS19*, London, UK, July 2019. Norme collaboration Homme – robot.
- Sallez, Y. and Berger T. (2018) 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.