



HAL
open science

Système d'assemblage reconfigurable - Utilisation dans un cadre didactique

Jean-Jacques Santin, Thierry Berger, Sondès Chaabane, Antoine Dequidt,
Yves Sallez

► **To cite this version:**

Jean-Jacques Santin, Thierry Berger, Sondès Chaabane, Antoine Dequidt, Yves Sallez. Système d'assemblage reconfigurable - Utilisation dans un cadre didactique. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296141

HAL Id: hal-03296141

<https://hal.science/hal-03296141v1>

Submitted on 22 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Système d'assemblage reconfigurable

Utilisation dans un cadre didactique

Jean-Jacques Santin¹, Thierry Berger^{1,2}, Sondès Chaabane^{1,2}, Antoine Dequidt^{1,2}, Yves Sallez¹

¹ Univ. Polytechnique Hauts-de-France, LAMIH, CNRS, UMR 8201, F-59313 Valenciennes, France

² INSA Hauts-de-France, F-59313 Valenciennes, France

Jean-Jacques.Santin@uphf.fr

Les industries manufacturières, en particulier les PME, font face aujourd'hui à de nouveaux défis qui nécessitent une profonde réorganisation des moyens de production. Les ateliers de fabrication reconfigurables, et plus spécifiquement les Systèmes d'Assemblage Reconfigurables, constituent une des réponses possibles d'adaptation à ces changements. Ces systèmes font appel à un certain nombre de technologies de l'industrie 4.0 sur lesquelles les élèves ingénieurs doivent être préparés et formés.

Après avoir posé le contexte précité, cet article expose la manière dont la formation aux technologies de l'industrie 4.0 est abordée au sein de l'INSA Hauts-de-France, à travers la description des moyens utilisés, notamment ceux qui ont été développés spécifiquement, leur organisation, et leur mise en œuvre dans le cadre d'une activité de type projet.

Mots-clés— *Système de production reconfigurable, robotique, plateforme didactique, Industrie 4.0.*

I. INTRODUCTION - MOTIVATION

Introduit par Koren [1-2], le concept de système de production reconfigurable peut être défini comme suit : « Les systèmes de production reconfigurables sont conçus dès le départ pour permettre un changement rapide de la structure, ainsi que des composants matériels et logiciels, afin d'ajuster rapidement la capacité de production et les fonctionnalités, au sein d'une famille de produits, en réponse à des problèmes imprévus liés aux évolutions du marché ou des exigences réglementaires ». Appliqué au domaine de l'assemblage, le concept précédent donne naissance au Système d'Assemblage Reconfigurable (SAR) [3-5]. Un SAR est constitué d'un ensemble de composants matériels (ex. des robots, des unités de convoyage) et logiciels pouvant être ajoutés ou supprimés pour s'adapter aux besoins de la production [3-6]. Une synthèse sur les SAR et leur conception peut être consultée dans [5, 6].

Le système Ifactory développé à l'Université de Windsor [3] est certainement l'un des prototypes les plus avancés de SAR. Ce système est composé de modules pouvant être déplacés et configurés facilement. Les différents modules sont équipés de dispositifs optiques permettant de reconnaître la topologie du système. Les produits sont transportés au sein de chaque module à l'aide d'un convoyeur à deux niveaux. D'autres travaux [7] proposent des sous-systèmes d'assemblage mobiles et modulaires afin de construire un SAR destiné aux chaînes d'assemblage finales d'un constructeur

automobile. Ces modules d'assemblage mobiles permettent, si nécessaire, de supporter une collaboration Homme-Robot.

D'autres solutions, spécifiquement dédiées au domaine didactique, ont également été proposées par les sociétés Festo [8] et SMC [9]. Exploitant un ensemble de modules de base (ex. modules de convoyage, robotisés, de stockage...), ces solutions permettent, selon l'agencement des modules, d'aboutir à différentes configurations d'un SAR. Ces solutions sont appropriées si l'on souhaite bénéficier d'une plate-forme didactique rapidement opérationnelle. Cependant, chaque module est totalement dédié et s'avère peu évolutif, tant d'un point de vue physique qu'informationnel. Les calculateurs de contrôle, par exemple, sont prédéfinis, et toute évolution de son choix nécessite de revoir totalement l'architecture de contrôle globale. De plus, les modules robotisés proposés sont complètement cartésiens pour des raisons de sécurité. Cette solution, si elle s'avère efficace, nuit à l'accessibilité du poste par les opérateurs lors d'interventions, par exemple pour changer des outils ou réapprovisionner en composants. Souhaitant œuvrer au développement de postes robotisés plus facilement accessibles et donc plus « ouverts », ces solutions se sont révélées trop restrictives dans le cadre de nos travaux de recherche sur la sécurité des RAS.

Face à ce constat, l'approche proposée dans cet article vise à élaborer un SAR à partir d'Unités Élémentaires Configurables (UEC) adaptables, modulaires, et pouvant être agencées entre elles pour former des cellules d'assemblage.

Après avoir exposé nos motivations dans cette première partie, la deuxième est consacrée à une description des principes d'élaboration du SAR. La troisième partie est dédiée à la présentation de son utilisation dans un cadre didactique. Enfin, la dernière partie propose une conclusion et quelques perspectives.

II. PRESENTATION DU SAR DE L'INSA HAUTS-DE-FRANCE

A. Vue d'ensemble

Afin de former ses élèves aux concepts de l'Industrie 4.0, l'INSA Hauts-de-France a investi depuis 2017 dans le développement d'un SAR avec un triple objectif :

- déployer un ensemble de technologies clés de l'Industrie 4.0 (robotique collaborative, robotique mobile, réalité augmentée, IIoT (Industrial Internet of Things)...))

susceptibles de servir de support aux enseignements sur l'Industrie 4.0 ;

- pouvoir valider sur des équipements réels les concepts et méthodologies proposés par les collègues œuvrant dans le domaine des systèmes de production au LAMIH UMR CNRS 8201 ;
- servir de démonstrateur « Industrie 4.0 » à destination des PME de la région.

Le principe de constitution d'un SAR est illustré sur la figure 1. Trois types d'UEC (U_i) sont distinguées : robotisées, manuelles ou cobotiques. Les UEC sont déplacées par les opérateurs et physiquement reliées via des dispositifs mécaniques spécifiques pour former les différentes cellules d'assemblage du SAR. Ce positionnement des UEC correspond à une configuration « stationnaire » du SAR, c'est à dire valide jusqu'à ce qu'une nouvelle configuration advienne. Des moyens logistiques sont également utilisés pour assurer les flux matériels au sein des cellules (logistique intracellulaire) et entre les cellules (logistique intercellulaire) du SAR. La logistique intercellulaire est assurée par une flotte de robots mobiles industriels (RMI). Ce choix d'équipement est justifié par la nécessité de disposer d'un équipement pouvant s'adapter très rapidement et facilement aux différentes configurations du SAR.

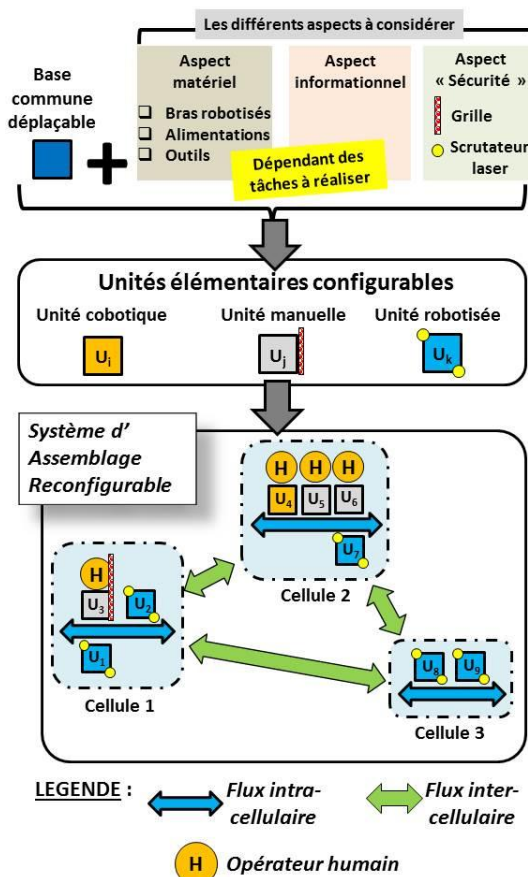


Figure 1. PRINCIPE DE CONSTITUTION DU SAR

Les UEC, toutes élaborées à partir d'une même structure de base, accueillent des équipements physiques et informationnels adaptés à certaines tâches (ex. robots, outils,

etc.). Lors de la constitution de ces UEC, plusieurs aspects doivent être pris en compte : matériels, informationnels, sécuritaires, mais aussi ergonomiques (dans le cas d'une unité avec opérateur humain). Les paragraphes suivants détaillent ces différents aspects.

B. Présentation de l'aspect matériel des unités

La mécanique des UEC, développée en interne à l'INSA Hauts-de-France avec l'aide d'un fournisseur de biens d'équipement industriel, est constituée d'une partie commune et d'une partie spécifique. Les éléments décrits ci-dessous sont repérés par leur numéro sur l'illustration de la figure 2.

La partie commune est une ossature centrale pyramidale à base carrée rigide et stable (1). La forme carrée offre quatre orientations privilégiées. Elle dispose de quatre roulettes pivotantes (2) facilitant son déplacement manuel et de quatre pieds escamotables (3) qui assurent son immobilisation au sol et permettent d'en ajuster la hauteur et l'horizontalité. Cette pyramide est habillée et forme une armoire (4) destinée à recevoir des équipements électriques (armoire de commande, bloc d'alimentation, équipement réseau, etc.). Trois faces sont identiques, pourvues de repères d'accostage (5) pour les RMI, la quatrième laisse un espace suffisant pour les jambes d'un opérateur (6), en cas d'utilisation en unité manuelle ou cobotique. Aux quatre coins de la base, en partie basse, des emplacements (7) sont disponibles pour accueillir des scrutateurs laser. Deux scrutateurs laser de sécurité sont systématiquement installés sur des emplacements diamétralement opposés dans le cas d'une UEC robotisée.

La partie spécifique de l'UEC est sa table (8) qui sert d'interface mécanique avec l'équipement qui y est installé.

Une cellule est constituée d'une à plusieurs UEC mécaniquement solidarisées par l'intermédiaire de tablettes carrées d'une dimension identique à celle de la table d'une UEC. Les dispositions classiques en ligne, en L ou en U peuvent ainsi être obtenues. D'autres tablettes peuvent être ajoutées pour former, selon le besoin, un plan de travail (zone à valeur ajoutée), un plan de stockage (pour pièces, outils, etc.) ou une zone de circulation logistique intracellulaire.

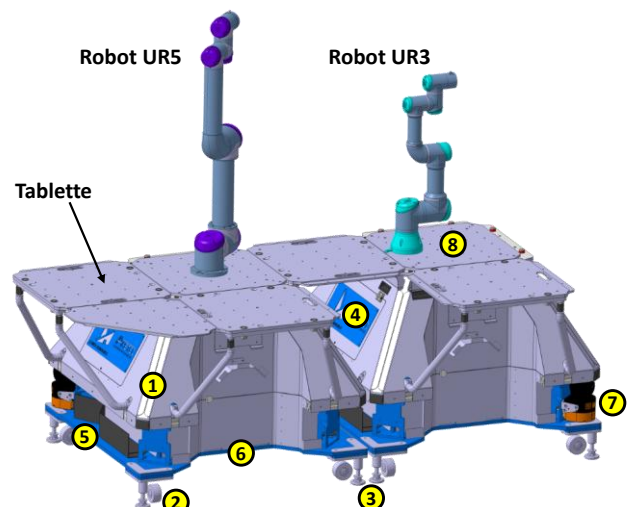


Figure 2. ASPECT MATERIEL D'UNE CELLULE AVEC DEUX UEC

C. Présentation des aspects logistiques

La variabilité des agencements des cellules et des unités dans les cellules, ainsi que la fréquence des reconfigurations, ont un impact important sur l'organisation et le choix des solutions logistiques. En effet, pour obtenir un fonctionnement probant du SAR, celles-ci doivent s'avérer tout aussi flexibles que la partie matérielle décrite précédemment, ce qui reste un défi à relever.

En ce qui concerne l'organisation de la logistique, les principales alternatives sont : l'approvisionnement de type « bord de ligne » des unités en pièces (disposées en vrac ou rangées), l'acheminement de kits contenant tout ou partie des pièces à assembler pour obtenir un produit final spécifique, ou le transfert d'un kit évolutif constitué non seulement des pièces à assembler, mais aussi du produit en cours d'assemblage, voire du produit final. Le choix d'une de ces solutions fait partie intégrante des variables d'optimisation du processus d'assemblage ; une combinaison de celles-ci n'étant pas à exclure. Le kitting évolutif a l'avantage de simplifier les flux logistiques, de tracer le produit pendant tout le processus d'assemblage, et permet, dans une certaine mesure, d'assembler des produits successifs différents. L'organisation étant posée, deux types de logistiques doivent être mises en œuvre : les logistiques intercellulaire et intracellulaire. Elles répondent à des besoins différents.

La logistique intercellulaire consiste à faire transiter le kit évolutif d'une cellule à une autre, mais aussi à alimenter certaines cellules en pièces détachées (approvisionnement « bord de ligne »). Les distances à parcourir peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres, ce qui nécessite des vitesses de déplacement de l'ordre de 5 km/h ; les parcours sont d'autant plus variés que le nombre de cellules est important. La masse à transporter correspond à plusieurs kits. Les temps d'arrêt à chaque cellule doivent être minimisés. Aujourd'hui, les RMI constituent une solution adaptée au besoin de la logistique intercellulaire ; ils sont arrivés à maturité industrielle.

La logistique intracellulaire consiste à faire transiter le kit évolutif, d'une unité à une autre unité, au sein d'une même cellule. Les déplacements se font de station à station, sur des distances de quelques mètres, à une vitesse de l'ordre de 0,5 m/s, sur un parcours généralement invariable. Le kit est par ailleurs amené à stationner plusieurs dizaines de secondes sur chaque poste. Les solutions classiques de type convoyeur à bande ou à rouleaux sont généralement retenues, mais d'autres solutions plus flexibles émergent et font appel à de mini-AGV ou RMI (par exemple [10-11]).

Faire cohabiter les systèmes inter et intracellulaire afin d'assurer la continuité du flux logistique est une difficulté. La solution généralement retenue pour assurer la compatibilité des deux systèmes logistiques consiste à embarquer un convoyeur à bande ou à rouleaux sur un RMI (par exemple [12]). Il assure le transfert du bac de kitting entre RMI et cellule. Une synchronisation des dispositifs, et donc une communication entre eux, apparaît comme un prérequis incontournable. La figure 3 donne un exemple d'agencement de 2 UEC robotisées et d'utilisation conjointe des logistiques intra et intercellulaires.

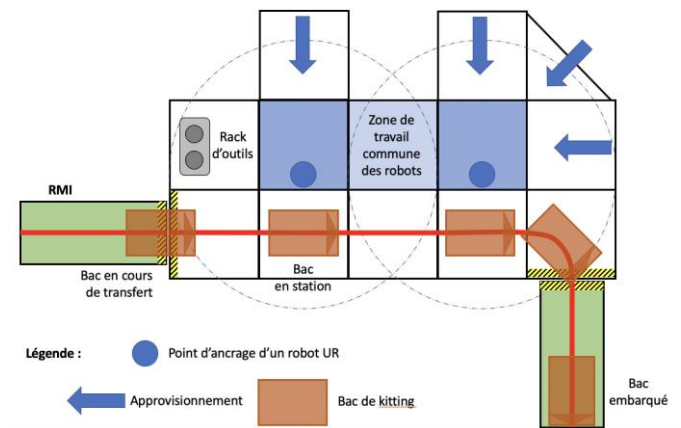


Figure 3. EXEMPLE D'AGENCEMENT D'UNE CELLULE AVEC SES MOYENS LOGISTIQUES INTRA ET INTER CELLULAIRES

D. Présentation de l'aspect informationnel des unités

Cet aspect informationnel est la clé de voute du SAR : la collaboration entre unités nécessite une communication efficace ; sans cette dernière, le SAR est inopérant. La structure informationnelle doit être adaptée aux impératifs du SAR qui comprend des équipements déplaçables (UEC) et des équipements mobiles (RMI). Les communications entre les diverses unités sont assurées par une solution basée sur un réseau IP sécurisé reposant sur de l'Ethernet filaire et du Wi-Fi 2.4 et 5 GHz. Chaque unité comprend un ordinateur spécifique (un Wago PFC200) prenant en charge les échanges entre unités. Ces échanges sont relatifs aux synchronisations (ex. RMI demandant à une UEC robotisée de réaliser une tâche d'assemblage). Outre les synchronisations, le réseau supporte, le cas échéant, les échanges de données relatifs à la sécurité entre UEC. Ces dernières sont issues des scrutateurs laser et des ordinateurs de sécurité associés. Les échanges liés à la sécurité sont supportés en adoptant la méthode du « black channel » [13].

E. Présentation de l'aspect « sécuritaire » des unités

Dans le cadre d'un SAR, le caractère déplaçable et reconfigurable des UEC robotisées induit de nouvelles contraintes de sécurité vis-à-vis des opérateurs amenés à intervenir. La solution classique qui consiste à isoler les opérateurs des équipements robotisés à l'aide de barrières matérielles [8] s'avère peu flexible. Pour intégrer des unités robotisées « ouvertes » et faire coexister en toute sécurité unités robotisées, unités manuelles ou cobotiques, et robots mobiles, de nouvelles approches sont nécessaires [14-15]. Dans ce contexte, nous avons introduit le concept de bulle de sécurité « coopérative » [16-17]. L'objectif de cette nouvelle approche est de gérer de manière dynamique le problème de sécurité, sans se limiter à un nombre fini de configurations « certifiées ». Dans cette approche, chaque unité robotisée est apte à détecter l'intrusion d'un opérateur dans son espace de travail grâce à ses deux scrutateurs laser et au besoin d'en avvertir les autres unités. Une méthodologie de déploiement de dispositifs de sécurité supplémentaires (scrutateurs laser ou barrières) est également présentée dans [16-17]. Le déploiement de scrutateurs laser supplémentaires est grandement facilité par les emplacements disponibles aux quatre coins de la partie basse des UEC, cf. figure 2, repère (7).

La partie suivante relate une utilisation didactique du SAR ainsi élaboré.

III. UTILISATION DIDACTIQUE

A l'heure actuelle, le SmartLab – nom donné au SAR de l'École – dispose de 3 UEC (2 UEC robotisées avec un UR5 et un UR3 et une UEC cobotique avec un ABB Yumi), d'une caméra Pickit 3D pour le dévraquage, de 3 RMI MiR100.

Dans le cadre de la spécialité Génie Industriel de l'INSA Hauts-de-France, un ensemble d'enseignements est dispensé pour préparer les élèves à l'Industrie 4.0. Un projet intitulé « Système de production reconfigurable » a été proposé pour la première fois en septembre 2020 à un groupe de 10 élèves. Les attendus du projet sont de se familiariser avec le concept de reconfiguration des moyens de production et de prendre en main les différents équipements du SAR.

A. Description du produit et du SAR implémenté

Le produit assemblé est un système électronique modulaire disposé dans un boîtier, représentatif d'une production à la demande. La figure 4 présente ce produit constitué :

- d'un boîtier contenant une carte électronique,
- d'une structure support construite en briques Lego,
- de trois modules électroniques Grove sur leur support,
- de trois câbles.

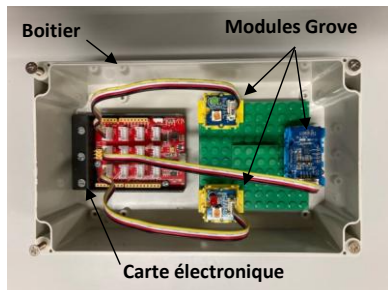


Figure 4. ELEMENTS CONSTITUTIFS DU PRODUIT

Comme illustré à la figure 5, trois cellules sont mises en œuvre. La cellule n°1 est en charge de la préparation d'un bac contenant le boîtier et les câbles d'une part, et du déchargement du produit fini d'autre part. La cellule n°2 est constituée des deux UEC robotisées ; elle assure le montage de la structure support. La cellule n°3 est constituée de l'unique UEC cobotique ; les modules électroniques et les câbles y sont montés. Une flotte de trois RMI réalise le transfert des bacs entre les différentes cellules. Cette année, le flux intracellulaire n'a pas été mis en œuvre. Le tableau 1 résume les étapes successives de montage du produit.

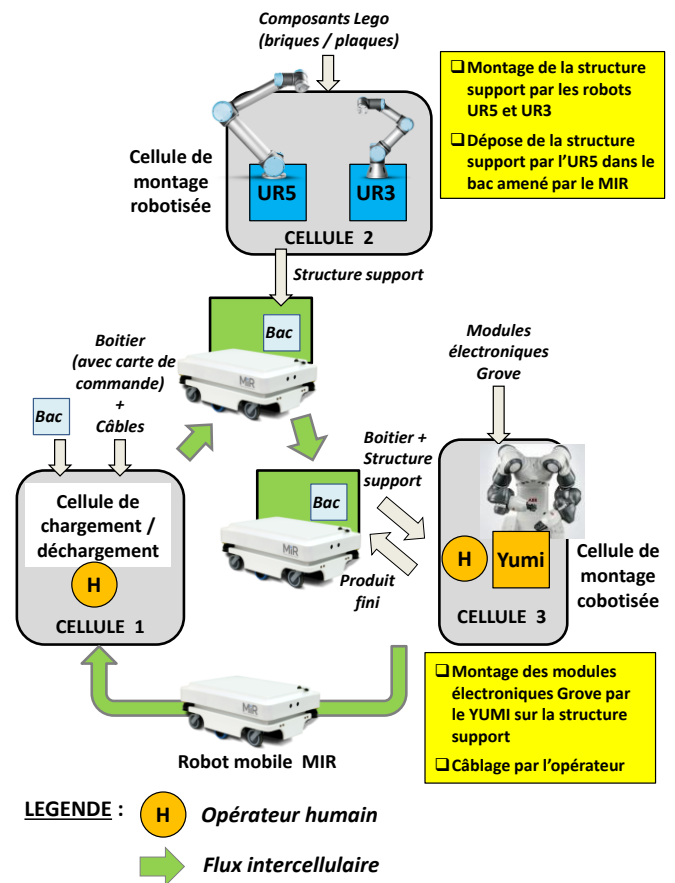


Figure 5. DESCRIPTION DU PROCESSUS DE MONTAGE

Étapes	Lieu / acteurs	Descriptif
1	Cellule 1	Préparation d'un bac contenant 1 boîtier et 3 câbles
2	Robots mobiles	L'opérateur appelle un robot mobile "libre"
3	Cellule 1	L'opérateur dépose le bac sur le robot mobile
4	Robots mobiles	Le robot mobile se dirige vers la cellule 2
5	Cellule 2	UR3 et UR5 montent la structure support en Lego
6	Cellule 2 (UR5)	L'UR5 dépose la structure support dans le boîtier
7	Robots mobiles	Le robot mobile se dirige vers la cellule 3
8	Cellule 3 (Opérateur)	L'opérateur décharge le boîtier
9	Cellule 3 (Yumi)	Le robot Yumi monte les composants Grove
10	Cellule 3 (Opérateur)	L'opérateur réalise le câblage
11	Cellule 3 (Opérateur)	L'opérateur dépose le produit fini dans le bac
12	Robots mobiles	Le robot mobile se dirige vers la cellule 1
13	Cellule 1	L'opérateur décharge le produit fini

Tableau 1. ETAPES DU PROCESSUS DE MONTAGE

B. Déroulé du projet

Cet enseignement de 42 heures se déroule sur 12 séances. Après une première séance de présentation du projet, trois séances sont consacrées à une simulation du SAR via l'outil de simulation de flux Siman-Arena. Les élèves peuvent ainsi comprendre la problématique de gestion des flux correspondants au système étudié, modéliser les différents processus associés aux différentes configurations, et ainsi

appréhender la complexité du processus de reconfiguration. La simulation a pour objectif de comparer plusieurs configurations (cf. exemple à la figure 6) du SAR, en partant d'une configuration initiale imposée, afin de mettre en évidence les gains possibles. Les élèves ont d'abord modélisé le processus en partant de sa description : les ressources, les parcours des RMI, la gamme de fabrication du produit, etc. Ensuite, ils ont identifié différentes configurations, depuis la simple augmentation de la capacité des ressources (cf. figure 7) jusqu'à la définition de nouveaux flux et l'intégration de nouveaux produits. Au total, quatre configurations ont été simulées et comparées à l'aide de quatre indicateurs de performances : le nombre de pièces produites, le temps de séjour des produits dans le système, le taux d'occupation des robots, et le taux d'occupation des opérateurs. Les séances restantes sont consacrées à un travail en équipe visant à mettre en œuvre une production. La dernière séance fait l'objet d'une démonstration du fonctionnement du SAR et de présentations orales. L'équipe enseignante, encadrant les élèves, est constituée des cinq auteurs du présent article et compte des spécialistes de la simulation de flux, de la robotique collaborative, de l'IIoT et de la robotique mobile.

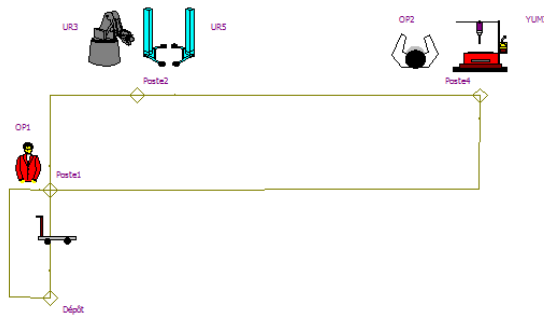


Figure 6. EXEMPLE DE CONFIGURATION (ANIMATION)

Scenario	Name	Program File	Reps	NB_UR3	NB_UR5	NB_YUMI	OP1	OP2	Catégorie	CP1 Utilisés	CP2 Utilisés	UR3 Utilisés	UR5 Utilisés	YUMI Utilisés
Scenario 1	A Config1		1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	30.0000	0.540	0.965	0.250	0.350	0.240
Scenario 1	B Config1		1	1.0000	2.0000	2.0000	1.0000	1.0000	40.0000	0.410	0.714	0.300	0.150	0.300
Scenario 1	C Config1		1	1.0000	4.0000	4.0000	1.0000	1.0000	24.0000	0.244	0.414	0.211	0.219	0.221
Scenario 1	A Config1		1	1.0000	1.0000	2.0000	2.0000	30.0000	0.274	0.477	0.250	0.350	0.240	
Scenario 1	B Config1		1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	40.0000	0.410	0.715	0.198	0.281	0.198	

Figure 7. PLAN D'EXPERIENCES POUR SIMULER ET EVALUER DIFFERENTES CAPACITES DES RESSOURCES

Lors du travail en équipe sur le SAR, cinq binômes sont constitués. Les compétences attendues sont différentes selon les postes traités mais contribuent globalement à appréhender les différentes facettes de fonctionnement d'un SAR :

- Le premier binôme réalise l'étude de la cellule n°2 de montage (disposition des UEC robotisées, approvisionnement, agencement de la zone de montage, programmation des robots, étude sécuritaire de la cellule). Les compétences développées visent la maîtrise de la coopération entre robots industriels, des interactions entre

robot industriel et robot mobile et des aspects sécuritaires inhérents à ces postes robotisés.

- Le second binôme mène l'étude de la cellule n°3 cobotisée (tâches et interactions Homme-cobot, approvisionnement, agencement de la zone de montage, étude ergonomique du poste de travail, programmation du cobot). Les compétences attendues portent principalement sur la maîtrise des différentes facettes (sécurité, ergonomie) d'une application en robotique collaborative.
- Le troisième s'intéresse au transfert des produits entre les cellules du RAS (gestion des interactions entre les RMI, les UEC et les opérateurs, programmation des RMI). Les compétences développées dans ce cadre portent principalement sur la maîtrise d'une application en robotique mobile avec application des concepts de pilotage par le produit.
- Le quatrième est en charge de la logistique interne à la cellule n°2. Les tâches réalisées visent plus particulièrement l'étude des possibles solutions de logistique interne (ex. convoyeurs à palettes, palettes autonomes).
- Enfin, le dernier binôme a pour mission de proposer une implantation de la cellule n°1 (chargement / déchargement) ainsi qu'un agencement du bac dans lequel le produit et certains constituants sont transportés. Il assure aussi la traçabilité des produits, le suivi de production et la remontée d'informations à des fins de maintenance. Les compétences attendues concernent principalement la maîtrise des flux informationnels associés aux produits et aux ressources au sein d'un RAS en utilisant les concepts et outils de l'IIoT.

Ces cinq binômes œuvrent conjointement sous la direction d'un chef de projet, chargé d'animer les échanges d'idées, de vérifier la cohérence des choix techniques et de coordonner l'avancement des différentes tâches. Il doit aussi veiller à la qualité des livrables produits à l'issue du projet (rapports, supports visuels) et assurer la coordination avec l'équipe enseignante. D'un point de vue opérationnel, il participe également à l'étude du flux intercellulaire qui nécessite d'appréhender le fonctionnement global du SAR.

A l'issue du projet, l'évaluation se fait au vu de plusieurs éléments :

- une démonstration globale de fonctionnement du SAR permettant d'évaluer la cohérence globale des choix effectués par les équipes et les efforts de coordination réalisés ;
- des évaluations (démonstrations ciblées, présentations PowerPoint, rapports), binôme par binôme, permettant d'évaluer les compétences acquises.

C. Premiers retours d'expérience

Outre les compétences techniques indispensables à la réalisation de chacune des tâches, les élèves ont dû se coordonner et interagir de façon à mener à bien le projet sous la direction du chef de projet, améliorant ainsi leurs compétences relationnelles et organisationnelles.

Bien accueilli, le projet a eu un effet très positif sur le développement des compétences des élèves. Les principales difficultés qu'ils ont rencontrées proviennent de l'expertise

nécessaire dans de nombreux domaines comme la robotique, la cobotique, l'informatique industrielle, la conception mécanique, la gestion industrielle, la gestion de projet, ce qui limite, en outre, ce type d'activité pédagogique à des apprenants en fin de cursus. Ces difficultés sont assez clivantes parmi les étudiants : certains sont découragés par les manques de compétences opérationnelles qu'ils doivent surmonter, alors que d'autres y voient la possibilité de mettre en pratique leurs savoir-faire dans un contexte concret et cohérent.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article a présenté le SAR déployé à l'INSA Haut-de-France. Ce SAR sert pour l'enseignement, la recherche et de démonstrateur auprès d'industriels de la région. Une première expérience d'enseignement mêlant aspects technologiques et managériaux auprès d'un public d'élèves ingénieurs par apprentissage en dernière année de formation a été relatée.

De nombreux axes d'amélioration et de développement sont envisagés au niveau du SAR. Ils portent à la fois sur de nouveaux concepts et matériels comme des solutions flexibles d'approvisionnement en composants, la standardisation des protocoles de communication entre équipements hétérogènes, mais aussi la standardisation et la simplification de leur prise en main pour en faciliter leur utilisation, tant industrielle que pédagogique.

V. REFERENCES

- [1] Y. KOREN, U. HEISEL, F. JOVANE, T. MORIWAKI, G. PRITSCHOW, G. ULSOY, H. VAN BRUSSEL. "Reconfigurable manufacturing systems", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, 1999, pp. 527-540.
- [2] 1 Y. KOREN, M. SHPITALNI. "Design of reconfigurable manufacturing systems", Journal of manufacturing systems, Vol. 29, 2010, pp. 130-141.
- [3] 2 H. ELMARAGHY, W. ELMARAGHY. "Smart Adaptable Assembly Systems", Procedia CIRP, Vol. 44, 2016, pp. 4-13.
- [4] H-P. WIENDAHL, HA. ELMARAGHY, P. NYHUIS, MF. ZÄH, H-H-H. WIENDAHL, N. DUFFIE, M. BRIEKE. "Changeable manufacturing-classification, design and operation", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 56, 2007, pp. 783-809.
- [5] Z. BI, L. WANG, SY. LANG. "Current status of reconfigurable assembly systems", International Journal of Manufacturing Research, Vol. 2, 2007, pp. 303-328.
- [6] G. HUETTEMANN, C. GAFFRY, RH. SCHMITT. "Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly-Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook", Procedia CIRP, Vol. 52, 2016, pp. 112-117.
- [7] J. WEBER, M. STÄBLER, J. BAUMGARTL, K. PAETZOLD. "Mobile Assembly Units as Enabler for Changeable Assembly Lines", Procedia CIRP, Vol. 44, 2016, pp. 383-388.
- [8] S^{te} FESTO. "CP Factory – L'Usine Cyber-Physique mécatronique et l'automatisation", consulté le 02/02/2021 sur : <https://www.festo-didactic.com/fr-fr/materiel-education/choix-par-technologie/usine-ecole.systemes-cim-fms/cp-factory/cp-factory-l-usine-cyber-physique-mecatronique-et-l-automatisation.htm>
- [9] S^{te} SMC® International Training. "SIF400 Smart Innovative Factory - The training system for Industry 4.0" Catalogue IT-SIF400-V2-1 (67 pages), consulté le 02/02/2021 sur : <https://www.smctraining.com/fr/webpage/indexpage/1230>
- [10] S^{te} PROLYNK. "Miniaturized AGV for smart product transfer between process", consulté le 02/02/2021 sur : <https://www.prolynk.eu/products>
- [11] S^{te} BECKHOFF. "Flying Motion: XPlanar ", catalogue DK3462-1118, consulté le 02/02/2021 sur : https://download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff_XPlanar_e.pdf
- [12] S^{te} ROEQ. "Solutions de rouleau supérieur", consulté le 02/02/2021 sur : <https://roeq.dk/fr/solutions/solutions-de-rouleau-superieur/>
- [13] IEC 61784-3. "Industrial communication networks – Profiles – Part 3: Functional safety fieldbuses – General rules and profile definitions", Edition 3.0, ISBN 978-2-8322-3238-5, 2016.
- [14] C. H. KOO, M. VORDERER, S. JUNKER, S. SCHRÖCK, A. VERL. "Challenges and requirements for the safety compliant operation of reconfigurable manufacturing systems", Procedia CIRP, Vol. 72, 2018, pp. 1100–1105.
- [15] T. KOCH. "Approach for an automated safety configuration for robot applications", Procedia CIRP, Vol. 84, 2019, pp. 896–901.
- [16] Y. SALLEZ, T. BERGER, T. BONTE. "The concept of safety bubble for reconfigurable assembly systems", Manufacturing Letters, Vol. 24, 2020, pp. 77-81.
- [17] T. BERGER, T. BONTE, W. DERIGENT, Y. SALLEZ. "Concept de bulle de sécurité «coopérative» dans le cadre d'un système d'assemblage reconfigurable", Actes du 16ème Colloque AIP-Primeca S.Mart, Les Karellis, France, avril 2019.