

# Pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production de biens « intelligents »

Patrice Caulier

Université de Valenciennes  
LAMIH CNRS UMR 8201  
Campus du Mont Houy  
F-59313 Valenciennes CEDEX 9 – France  
patrice.caulier@univ-valenciennes.fr

Abdelghani Bekrar

Université de Valenciennes  
LAMIH CNRS UMR 8201  
Campus du Mont Houy  
F-59313 Valenciennes CEDEX 9 – France  
abdelghani.bekrar@univ-valenciennes.fr

*Résumé—Le concept d'industrie du futur, ou d'industrie 4.0, correspond à la mise en place de systèmes de production « intelligents » (ou « smart manufacturing ») capables, d'une part, d'une flexibilité et d'une adaptabilité de la production accrues et, d'autre part, d'une allocation optimale des ressources. Il se structure selon une hiérarchie de contrôle/commande, de supervision et de pilotage distribuée et, donc, en réseaux. Le concept s'inscrit également dans une volonté de répondre aux problématiques actuelles de maîtrise des énergies de production. La communication se positionne dans ce contexte. Elle présente les premiers résultats d'un projet de pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production flexible de biens « intelligents ». Ces résultats concernent quatre aspects : la commande fonctionnelle et distribuée de la cellule, la supervision des défaillances, la mesure des énergies de production et le produit « intelligent ». Pour l'essentiel, ils ont été obtenus, sous la forme d'un Apprentissage par Problème et par Projet (APP), par sept étudiants de seconde année de Master en Automatique. Le projet est développé dans le cadre de la cellule de production flexible du Pôle AIP-PRIMECA Nord Pas de Calais, site de Valenciennes.*

*Mots-clés—adaptabilité, APP, durabilité, pilotage, produit « intelligent ».*

## I. INTRODUCTION

L'objectif de cette communication est de présenter les premiers résultats obtenus dans le cadre d'un projet de pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production flexible de biens « intelligents ». Ce projet est mené selon deux aspects fondamentaux. Le premier aspect porte sur l'approche pédagogique suivie : l'Apprentissage par Problème et par Projet (APP) [1]. Selon cette approche, l'apprenant est acteur de son apprentissage. Le second aspect concerne le concept d'industrie du futur [2]. Ce concept vise, essentiellement, à (1) augmenter la flexibilité et l'adaptabilité de la production, (2) optimiser l'allocation des ressources et (3) maîtriser les énergies de production.

La communication est structurée en trois parties. Nous commençons par présenter les modalités de l'approche pédagogique selon laquelle est mené le projet. Dans la deuxième partie, après avoir défini le contexte et les objectifs du projet, nous présentons, successivement, chacun des quatre

premiers résultats obtenus. Enfin, nous concluons et énonçons la poursuite des travaux telle qu'elle se déroule actuellement.

## II. APP OU LA PEDAGOGIE PAR PROJET

Les premiers résultats du projet ont été obtenus par sept étudiants de seconde année de Master en Automatique dans le cadre d'un APP [3]. L'APP est une méthode de pédagogie active où l'étudiant devient le principal acteur de ses apprentissages. Dans un APP, afin de stimuler la motivation, la démarche suivie est structurée autour d'un projet en lien avec l'exercice d'une profession plutôt que de matières ou disciplines. Il s'agit de confronter le groupe d'étudiants à un projet proche d'une pratique professionnelle donnée dans le but d'asseoir solidement, à l'occasion de la réalisation du projet, les connaissances, les compétences, les attitudes et les comportements nécessaires à l'exercice de cette profession.

Chaque problème posé dans un processus d'APP vise une série d'objectifs d'apprentissage explicites [4]. Pour qu'il y ait réellement apprentissage, les étudiants ne peuvent en aucun cas se borner à exploiter leurs connaissances existantes. Il est impératif qu'ils soient amenés à :

- découvrir que certaines connaissances leur font défaut,
- identifier les connaissances à acquérir,
- acquérir ces savoirs,
- appliquer l'ensemble de leurs connaissances (anciennes et nouvelles) à la réalisation du projet proposé.

L'APP est donc un travail d'équipe dans lequel on apprend ensemble à résoudre un projet contextualisé. Toutefois, le but principal du processus d'APP n'est pas seulement de réaliser le projet. Il est aussi d'[4] :

- apprendre à travailler en groupe : écouter les autres et s'investir pour participer activement au travail de groupe ; se sentir responsable des apprentissages de chacun,
- être acteur de son apprentissage : développer son autonomie dans l'apprentissage ; apprendre à apprendre,
- acquérir de nouvelles compétences à travers la réalisation du projet.

L'approche APP est centrée sur ce que fait l'étudiant. Le rôle de l'enseignant s'en trouve modifié. L'enseignant a essentiellement un rôle ponctuel de guide et suit l'avancement du projet. Il permet aussi l'accès aux ressources et aux sources d'information concernées. Enfin, l'enseignant s'assure que les objectifs d'apprentissage sont atteints et apporte, le cas échéant, les compléments de connaissances.

Dans la partie suivante, nous exposons les premiers résultats issus de cette pratique pédagogique novatrice et prometteuse à plus d'un titre.

### III. LE PROJET ET SES PREMIERS RESULTATS

Le projet objet de cette communication concerne le pilotage intégré, en temps réel, adaptatif et durable d'une cellule de production flexible de biens « intelligents ». Il s'inscrit dans le concept de l'usine du futur. Après avoir présenté son contexte, nous définissons ses premiers objectifs. Les principaux résultats obtenus sont ensuite détaillés.

#### A. Contexte du projet

Le projet est développé dans le cadre de la cellule de production flexible du Pôle AIP-PRIMECA Nord Pas de Calais disponible sur le site de Valenciennes, figure 1.



Figure 1. CELLULE FLEXIBLE DU POLE AIP-PRIMECANPDC

Elle est constituée d'un réseau de convoyage flexible desservant diverses unités de traitement. Sur le réseau de convoyage peuvent circuler des *shuttles* motorisés capables d'accueillir les pièces composant le produit. La flexibilité du réseau est obtenue par la présence d'aiguilles rotatives commandées. Les unités de traitement sont au nombre de sept : deux robots manipulateurs KUKA 1 et KUKA 3 six axes anthropomorphes (RRRRRR) de montage, un robot manipulateur KUKA 2 quatre axes sphérique (RRPR) de montage, un bras manipulateur cartésien (PPP) de chargement/déchargement, un poste optique de contrôle qualité, un poste de traitement manuel et, enfin, un robot manipulateur *STÄUBLI Robotics* six axes anthropomorphe (RRRRRR) de comptage des pièces assemblées. Dans un premier temps, les travaux ont sollicité les seules quatre premières unités de traitement de cette énumération. Ces unités de traitement nous permettent de réaliser 2 gammes de produits. L'ensemble de la cellule est contrôlé et commandé, de façon distribuée, par quatre automates Premium, Schneider Electric, en réseau Ethernet industriel. Les variables d'E/S des automates sont sur réseaux AS-i raccordés à des coupleurs AS-i TSX SAY 100. Enfin, le routage dynamique des *shuttles* motorisés sur le réseau de convoyage est possible par la présence de tags RFID, fixes et embarqués, en lecture/écriture.

#### B. Objectifs du projet

Les objectifs généraux du projet sont de deux ordres. Le premier vise à mettre en place une architecture de pilotage intégré et en temps réel de la cellule de production flexible selon les niveaux de la figure 2. Cette mise en place se fera, notamment, par l'intégration des progiciels, d'une part, de supervision des défaillances PcVue® (éditeur ARC Informatique) [5] et, d'autre part, de « *Manufacturing Execution System* » (MES) COOX® (éditeur ORDINAL Software) [6]. Le second ordre vise à inscrire la cellule dans le concept d'industrie du futur en lui procurant des capacités de production plus flexibles et plus durables en terme de maîtrise des énergies de production.

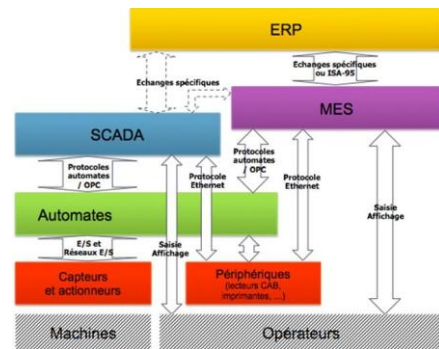


Figure 2. NIVEAUX DE PILOTAGE DE LA CELLULE

Dans ce cadre global et à plus court terme, quatre objectifs spécifiques ont été définis :

- la commande fonctionnelle et distribuée de la cellule,
- la supervision des défaillances,
- la mesure des énergies de production,
- le produit « intelligent ».

Ces premiers aspects spécifiques du projet ont constitué les quatre objectifs d'apprentissage de l'APP évoqués dans la première partie de cette communication. Leurs résultats sont, maintenant et successivement, décrits.

#### C. Commande fonctionnelle et distribuée

La programmation de la commande de la cellule de production flexible a été développée selon deux approches : fonctionnelle et distribuée.

La décomposition fonctionnelle est motivée par le fait, qu'à terme, la cellule sera pilotée par un progiciel de MES selon les approches des normes, d'une part, ISA-88 [7], pour l'automatisation orientée objet des procédés flexibles par lots et, d'autre part, ISA-95 [7], pour le pilotage ou la gestion de l'exploitation des systèmes industriels (MES). Ainsi, l'aspect fonctionnel de chaque aiguille rotative du réseau de convoyage et des unités de traitement utilisées a été analysé puis programmé de façon modulaire à l'aide du langage fonctionnel « *Function Block Diagram* » (FBD) de la norme IEC 61131-3 [8]. Le modèle de chacun de ces équipements recense : les propriétés, les visuels et la (ou les) phase(s) qu'il permet de réaliser. Chaque phase d'un équipement est donc définie par un bloc fonctionnel autonome dans le programme de tel ou tel automate. Elle ne connaît que ses paramètres d'E/S et l'équipement sur lequel elle est exécutée. Elle ne sait pas à quel

moment elle intervient dans la gamme. C'est l'application de MES qui est le « chef d'orchestre » de l'enchaînement des phases conformément à la gamme. Les phases créées permettent de définir les 2 gammes de montage (« b\_prod » et « E\_prod ») de pièces (de types « axe », « r », « I », « L » et « vis ») de la figure 3. Une gamme précise le graphe d'enchaînement des phases de tel ou tel équipement de la cellule de production flexible. Ces montages sont réalisés sur une platine embarquée sur chaque *shuttle* motorisé.

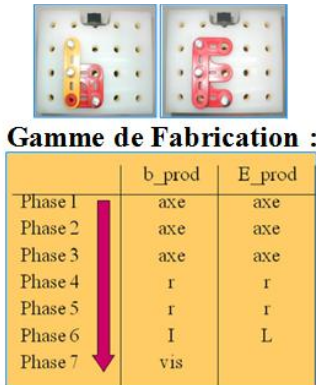


Figure 3. LES DEUX GAMMES DE MONTAGE DE PIÈCES

A terme, l'application de MES définira une (ou plusieurs) recette(s) associée(s) à telle gamme. Elle précisera, ensuite, un « Ordre de Travail » (OT) relatif à telle recette. Enfin, suite à un « Ordre de Fabrication » (OF), ordonné et reçu de l'application d'Enterprise Resource Planning (ERP) de niveau supérieur (figure 2), l'OT sera lancé en exécution depuis l'application de MES. Cette exécution correspond à un lot de production.

Cette approche de programmation fonctionnelle et modulaire permet de « standardiser » le dialogue entre l'application de MES et les automates de commande selon le protocole de communication « Phase Logic Interface » (PLI) défini par la norme ISA-88 [7]. Sous la forme d'un graphe d'états-transitions, la figure 4 précise le protocole de communication PLI entre l'application de MES, maître, et le programme automate, esclave.

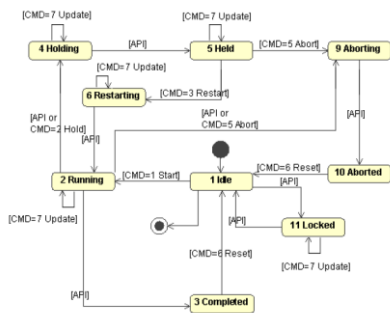


Figure 4. GRAPHE D'ÉTATS-TRANSITIONS DU PROTOCOLE PLI

La phase est ainsi commandée sur tel équipement par le programme automate correspondant. Les paramètres d'entrée en sont les consignes. Les réponses de l'automate en sont les paramètres de sortie. Un mot de commande à l'automate (démarrer, arrêter, suspendre, reprendre, abandonner, etc.)

permet de piloter la phase. Enfin, l'automate informe de son état par un mot de réponse. Cette approche de programmation fonctionnelle et modulaire permet aussi la réutilisation des phases d'un équipement à l'autre, d'une gamme à l'autre et d'un projet à l'autre. On obtient ainsi des programmes automates conformes à la norme IEC 61499 [8]. Le respect de cette norme autorise la distribution de blocs fonctionnels lesquels constituent une bibliothèque.

De son côté, l'approche de programmation distribuée se justifie par le fait que le contrôle et la commande de l'ensemble de la cellule sont répartis sur quatre automates en réseau Ethernet industriel. Les programmes de commande sont donc conçus et réalisés pour chaque automate. Cette distribution nécessite le partage de certaines variables (mode de marche, départ de cycle, arrêt, pause, état de telle variable, etc.) entre les automates. Celle-ci est gérée par le service de communication « Global data ». Ce service de communication est offert par le protocole Ethernet industriel. Les données à partager le sont selon une méthode de publication/souscription entre les automates. Cette méthode de distribution est fondée sur le protocole de publication/souscription UDP/IP. Elle nécessite que les automates concernés appartiennent à un groupe virtuel de multidiffusion qu'il convient de configurer, figure 5.

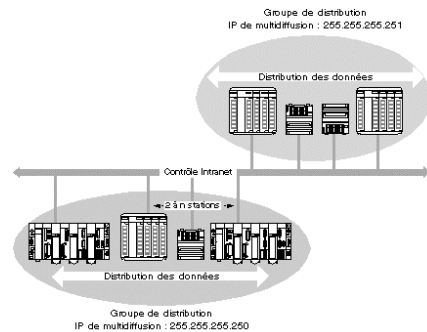


Figure 5. MULTIDIFFUSION DE DONNÉES SUR ETHERNET INDUSTRIEL

#### D. Supervision des défaillances

Un autre objectif d'apprentissage de l'APP est le développement de l'application de supervision, ou « Supervisory Control And Data Acquisition » (SCADA) de la cellule de production flexible, figure 2. La supervision est multi-fonctionnelle et traite de données, d'origine et de nature, hétérogènes. En ligne, elle regroupe, essentiellement, des fonctions de surveillance, de diagnostic (aspect réactif ou curatif) et pronostic (aspect préventif) [9, 10]. La supervision se justifie en présence de défaillances ou de perturbations d'origine humaine, technique (procédé ou produit) ou environnementale.

Plusieurs vues animées ont été développées à l'aide du progiciel de supervision PcVue® : vues synoptiques, vues de réglages, bandeau d'alarmes, journal des alarmes, pupitre de commande et vue de production. Les vues synoptiques, figure 6, permettent de suivre, en temps réel, la position des *shuttles* circulant sur le réseau de convoyage, l'état des capteurs et actionneurs du réseau et le mode de marche des unités de traitement. Les vues de réglages offrent à l'opérateur de supervision de commander en manuel les différents éléments

de la cellule. Sur chacune de ces vues, un bandeau d'alarmes affiche l'occurrence des alarmes. Les alarmes sont de différents types : alarmes de défaut, alarme de panne, alarmes de sécurité, alarmes de performances et alarmes de configuration. Les alarmes survenues sont capitalisées dans un journal des alarmes où l'opérateur de supervision peut retrouver leurs caractéristiques (référence, date, heure, évènement, libellé, état, etc.).

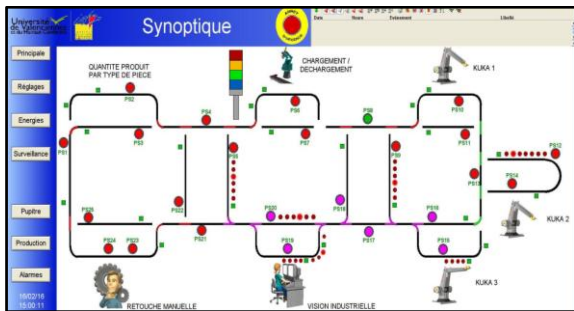


Figure 6. VUE SYNOPTIQUE ANIMÉE

A l'aide du pupitre de commande (réalisé sous la forme d'une « pop-up »), l'opérateur peut choisir le mode de marche de la cellule et agir sur différents boutons de marche, de pause, d'arrêt normal et d'arrêt d'urgence. Enfin, une vue production, figure 7, visualise l'évolution des OT pour chaque shuttle en service. Sont affichés : l'identifiant du shuttle, la gamme suivie, le numéro de la phase courante et la phase à suivre dans la gamme. Ces différentes valeurs sont obtenues et mises à jour à partir des tags RFID embarqués sur les shuttles.

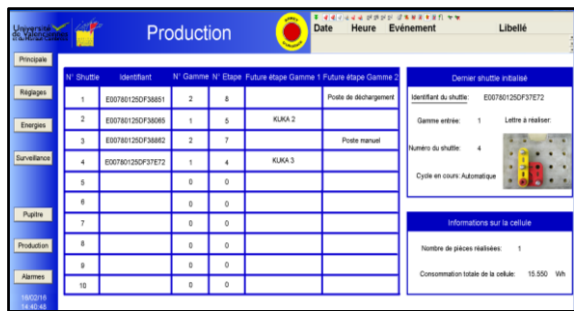


Figure 7. VUE PRODUCTION POUR 4SHUTTLES

A terme, dans le cadre de l'aspect curatif, le développement de fonctions de suivi et de reconnaissance de chroniques, vues comme autant de précurseurs ou de signatures d'évolutions alarmantes (exploitation des signaux faibles), est envisagé. Il permettra d'adapter le pilotage, non seulement aux défaillances et aux perturbations, mais également aux évolutions potentiellement alarmantes du système.

La communication entre l'application de supervision et les automates de contrôle et de commande de la cellule de production flexible utilise le serveur OPC® (« OLE for Process Control ») OFS® (« OPC Factory Server ») de Schneider Electric.

### E. Mesure et maîtrise des énergies de production

L'un des objectifs du concept d'industrie du futur est la maîtrise des énergies de production. En effet, au-delà de la durabilité du produit, l'empreinte carbone laissée par la façon

dont le produit est fabriqué est devenue aussi un enjeu, à la fois, d'image de marque et économique. Afin de contribuer à cet objectif, l'APP a permis de concevoir et de mettre en place un poste autonome de mesure, en et hors ligne, des énergies de production.

Dans un premier temps, le poste autonome de mesure comporte les équipements suivants, figure 8 :

- Une arrivée secteur et une carte d'alimentation 24V pour l'automate.
- Un automate Wago® 750-841 en réseau Ethernet TCP/IP avec les autres automates de la cellule.
- Une carte de mesure d'énergie Wago® 750-494/000-001.
- Trois capteurs de mesure d'énergie à effet Hall monophasés WAGO® 855-301/050-103.
- Trois prises monophasées, ou une prise triphasée, permettant de relier les unités de traitement de la cellule dont on souhaite mesurer les consommations électriques.

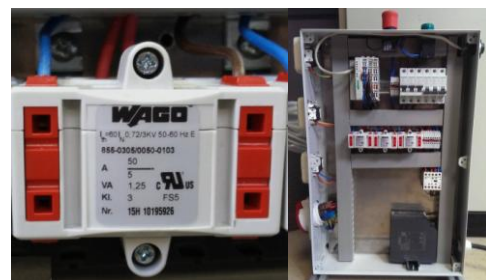


Figure 8. CAPTEUR ET POSTE DE MESURE ENERGETIQUE

Une fois ces équipements implantés et configurés, l'automate est programmé afin de récupérer les mesures de tensions, d'intensités, de fréquences et de facteurs de puissance délivrées par la carte de mesure d'énergie. Le programme automate permet aussi de calculer les puissances et les énergies consommées, instantanément, quotidiennement et mensuellement, par telle unité de traitement ou par l'ensemble de la cellule de production flexible.

Les mesures d'énergies hors ligne peuvent être utilisées par les algorithmes de routage des shuttles sur le réseau de convoyage flexible. Par exemple, à partir d'une position donnée, un shuttle pourra être routé vers telle ou telle unité de traitement concurrente en fonction, notamment, de l'énergie consommée. La mesure des énergies de production en ligne permet, elle, par exemple, de connaître le coût énergétique d'un lot de production.

Les mesures des énergies de production ont été intégrées à l'application de supervision présentée au paragraphe précédent. A l'aide du service de communication « IO Scanning », fourni par le réseau Ethernet TCP/IP, les variables de mesure des énergies définies par l'automate Wago® du poste autonome de mesure sont transmises aux automates interfacés avec l'application de supervision. Cette communication permet, d'une part, d'afficher, instantanément, les énergies électriques et, le cas échéant, pneumatiques consommées par le réseau de convoyage flexible et chaque unité de traitement, figure 9.

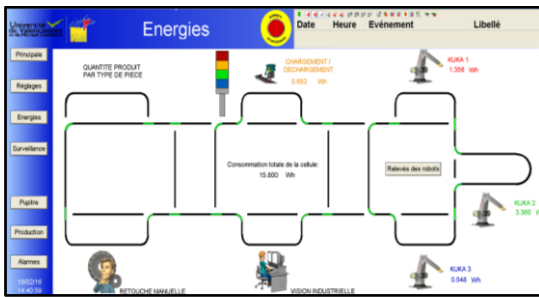


Figure 9. CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DE LA CELLULE

D'autre part, la communication offre la possibilité de tracer, et donc d'historiser, l'évolution des différentes consommations d'énergies de la cellule de production flexible afin de pouvoir les comparer en temps réel, figure 10.

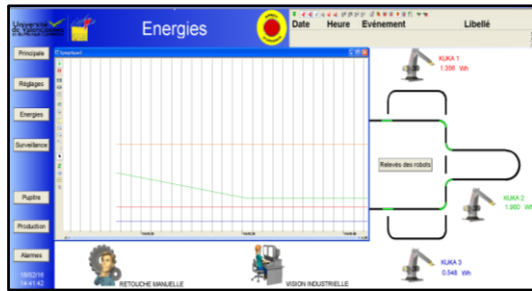


Figure 10. TRACES DES CONSOMMATIONS DES ROBOTS KUKA

Enfin, de façon plus large, connaître les consommations d'énergies de production permet de :

- maîtriser ces consommations et, donc, leurs coûts,
- revoir les stratégies de commande, de reconfiguration ou d'accommodation,
- mettre en place des mesures d'économie d'énergies,
- contribuer à une estimation plus fiable du coût de revient des produits,
- négocier au plus fin les modalités et les coûts des contrats de fourniture d'énergies.

#### F. Produit « intelligent »

Le dernier objectif d'apprentissage de l'APP concerne le concept de produit « intelligent ». Un produit « intelligent » est un artefact, réel ou virtuel, qui, au-delà de son usage premier, possède des capacités d'information, de traitement, de communication, de décision, etc. facilitant sa conception, sa production, sa traçabilité, son usage, sa maintenance, etc. [11]. Dans le contexte du projet, la notion de produit « intelligent » consiste à doter le *shuttle*, support du produit en cours de montage, de capacités informationnelles, personnalisées et en temps réel, sur l'enchaînement des phases de la gamme sélectionnée.

Pour ce faire, nous utilisons un microcontrôleur PIC32MX460F512L®, de la marque Microchip [12], implanté sur une carte de développement de chez MikroElektronika [13]. Cette carte possède, principalement, les équipements suivants, figure 11 :

- un écran tactile TFT de résolution 320x240 permettant l'affichage des informations contextuelles de production,

- un lecteur de carte microSD pour le stockage du programme,
- un port miniUSB pour le chargement du programme,
- une carte RFID click destinée à communiquer avec les tags RFID de la cellule de production flexible selon le protocole ISO/IEC 15693 [8].



Figure 11. LE MICROCONTROLEUR ET SES EQUIPEMENTS

Le microcontrôleur est programmé à l'aide des logiciels Visual TFT®, pour la réalisation des vues affichées par l'écran tactile TFT, et MikroC Pro®, pour l'édition et la compilation du programme proprement dit. Le programme est développé afin d'afficher en temps réel les différentes phases réalisées par les unités de traitement de la cellule de production flexible. La figure 12 présente un échantillon de 4 vues gérées par le microcontrôleur et correspondant à la réalisation de telle ou telle phase impliquée dans la gamme choisie. Au début de chaque cycle et à l'aide de l'écran tactile TFT, l'utilisateur choisit entre deux gammes : la gamme 1 (« b\_prod »), correspondant au montage d'un « b », et la gamme 2 (« E\_prod ») relative à l'assemblage d'un « E ». Ensuite et en temps réel, l'écran tactile TFT du microcontrôleur va afficher chaque phase de montage du produit.

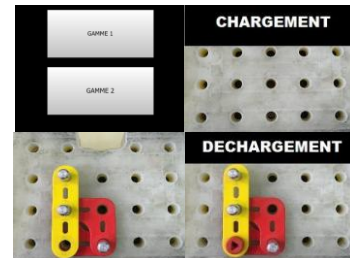


Figure 12. EXTRAIT DE 4 VUES AFFICHEES PAR LE MICROCONTROLEUR

La communication avec l'environnement extérieur est réalisée à partir de la carte RFID click, elle-même interfacée avec l'étiquette RFID embarquée par les *shuttles*. La communication entre le microcontrôleur et la carte RFID click est réalisée selon une liaison série de type « *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* » (liaison UART). Pour permettre l'affichage des informations contextualisées et en temps réel sur l'avancement des phases de la gamme, l'ensemble des équipements de la carte microcontrôleur est embarqué sur le *shuttle* comme le montre la figure 13.

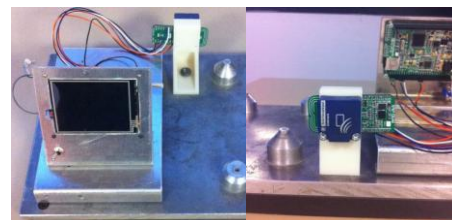


Figure 13. SUPPORT DU MICROCONTROLEUR EMBARQUE

#### IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La communication présente les premiers résultats obtenus dans le cadre d'un projet de pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production flexible de biens « intelligents ». Les travaux ont été menés par sept étudiants de seconde année de Master en Automatique dans le cadre d'un APP. Sur le plan de l'approche pédagogique, les principaux enseignements tirés de cette expérience sont relativement inédits et prometteurs :

- engagement des étudiants dans de l'authentique, dans des tâches du « monde réel » ; l'apprentissage s'en trouve amélioré,
- travail réalisé en groupes coopératifs sources d'émulation,
- absentéisme en baisse ; motivation et réussite accrues,
- amélioration des compétences méthodologique : travail en groupe, gestion des échéances, communication, recherche de l'information (aux sources multiples), autonomie, initiative, etc.,
- familiarisation avec l'approche interdisciplinaire,
- exigences de compréhension en profondeur de la part des étudiants accrues.

Avec l'APP, étudiants et enseignants sont désormais amenés à passer d'une culture de transmission du savoir centrée sur l'enseignant à une culture d'appropriation centrée sur l'étudiant. Quant aux résultats, le projet a déjà permis de (1) concevoir et réaliser une commande modulaire, fonctionnelle et distribuée cohérente avec le protocole PLI, (2) développer l'application de supervision, (3) mesurer (en et hors ligne) et intégrer les énergies de production consommées et (4) doter le produit de capacités informationnelles, personnalisées et en temps réel. Ces résultats constituent les premiers fondements de notre volonté d'inscrire la cellule de production flexible du Pôle AIP-PRIMECA Nord Pas de Calais, site de Valenciennes, dans le concept d'industrie du futur. Actuellement, le projet se poursuit selon trois voies.

La première voie concerne le développement de l'application de MES. Pour cela, le progiciel de MES COOX *Chameleon 7.01* ® a été installé sur une machine de l'architecture matérielle de pilotage de la cellule de production flexible. L'analyse fonctionnelle, d'une part, des équipements de la cellule (propriétés, phases et synoptiques) et, d'autre part, des opérations, des procédures d'unité et des gammes est entamée. Elle sera ensuite modélisée dans le progiciel de MES *Chameleon 7.01* ®. L'application de MES sera complétée par la définition de recettes associées aux gammes. Suite à l'exécution d'un OT selon telle recette, l'application de MES fournira des indicateurs de production concernant, notamment, le suivi des pièces, la traçabilité et la généalogie.

La deuxième voie traite de l'évaluation de méthodes de commande, de reconfiguration et d'accommodation adaptatives [14]. L'objectif est d'adapter le pilotage de la cellule aux contraintes (1) de production, (2) de disponibilité des unités de production (perturbations, évolutions alarmantes et défaillances) et (3) de maîtrise des énergies de production.

Enfin, la dernière voie, plus prospective, concerne la prédiction des situations de crise et l'agrégation des risques encourus [15, 16]. Par nature, une situation de crise est une

situation d'urgence, inédite, exceptionnelle ou irrégulière à la dynamique instable et aux conséquences graves et de grande ampleur. Elle est provoquée par un risque majeur, non maîtrisé, improbable, imprévisible ou imprévu. La principale difficulté liée à la prédiction des situations de crise réside dans la faible observabilité des grandeurs symptomatiques des dégradations.

#### V. REFERENCES

- [1] B. RAUCENT, M.N. DE THEUX, C. JACQMOT, E. MILGROM, C. VANDER BORGHT, P. VOUTERS. "Devenir ingénieur par apprentissage actif", *Didaskalia*, 24, pp. 81-101, 2004.
- [2] A. RADZIOW, A. BILBERG, M. BOGERS, E. SKOV MADSEN. "The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions", *Procedia engineering*, Volume 69, pp. 1184-1190, 2014.
- [3] B. RAUCENT, C. VANDER BORGHT. "Etre enseignant : magister ou metteur en scène ?", DE BOECK, *Collection Pédagogies en développement*, Bruxelles, 2006.
- [4] B. RAUCENT, E. MILGROM, B. BOURRET, C. ROMANO, A. HERNANDEZ. "Guide pratique des APP", INSA Editions, Toulouse, 2011.
- [5] <http://www.pcvuesolutions.com/>
- [6] <http://www.ordinal.fr/>
- [7] <http://www.standards-isa.fr/>
- [8] <http://www.iec.ch/index.htm>
- [9] P. CAULIER. "SACRE : un Système d'Aide à la Capitalisation et à la Réutilisation d'Expériences de supervision", in: *Raisonnement à Partir de Cas 2 : Surveillance, Diagnostic et Maintenance, Traité IC2, Série Informatique et Systèmes d'Information*, 2, Hermès Science Eds, 2007.
- [10] P. CAULIER, V. VANDERHAEGEN. "Improving proactive human behavior in supervision of manufacturing systems using chronicles", 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEASymposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, August 11-15, Las Vegas, USA, 2013.
- [11] G. MEYER, K. FRÄMLING, J. HOLMSTRÖM. "Intelligent products: a survey", *Computers in Industry*, Volume 60 (3), pp. 137-148, 2009.
- [12] <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC32MX795F512L>
- [13] <http://www.mikroe.com/>
- [14] A. CAGGIANO, F. CAIAZZO, R. TETI. "Digital factory approach for flexible and efficient manufacturing systems in the aerospace industry", *Procedia CIRP*, Volume 37, pp. 122-127, 2015.
- [15] P. LUOKKALA, K. VIRRANTAUS. "Developing information systems to support situational awareness and interaction in time-pressuring crisis situations", *Safety Science*, Volume 63, pp. 191-203, 2014.
- [16] B. VAN DE WALLE, B. BRUGGHEMANS, T. COMES. "Improving situation awareness in crisis response teams: An experimental analysis of enriched information and centralized coordination", *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 95, pp. 66-79, 2016.