

TELMA : plateformes pédagogiques innovantes en réseau de e-maintenance

Jennifer Mayo ^a, Romain Duponnois ^a, Camille Devos ^d, Guillaume Rivière ^e,
Muriel Lombard ^{a, b}, François Proriot ^h, Olivier Cardin ^{e, f, g}, Eric Levrat ^c, Patrice Caulier ^{h, i, *}

^a AIP-PRIMECA/S.mart Lorraine – 745 rue du Jardin Botanique – F-54600 Villers-lès Nancy

^b IUT Nancy-Brabois – Génie Mécanique et Productique – Rue du Doyen Urion – BP 90137 – F-54601 Villers-lès-Nancy

^c CRAN UMR 7039 – Faculté des Sciences et Technologies – BP 239 – F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy

^d S.mart Grenoble Alpes – 46 avenue Félix Viallet – F-38000 Grenoble

^e S.mart Pays de la Loire

^f IUT de Nantes – Génie Mécanique et Productique – 2 avenue du Professeur Jean Rouxel – BP 539 – F-44475 Carquefou

^g Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes

^h Université Polytechnique Hauts-de-France – INSA Hauts-de-France

ⁱ LAMIH CNRS UMR 8201 – Campus du Mont Houy – F-59313 Valenciennes Cedex 9

* patrice.caulier@uphf.fr

1. INTRODUCTION

La mise en place des programmes du BUT (Bachelor Universitaire de Technologie), la nécessité d'appréhender les technologies et pratiques de l'industrie du futur ainsi que l'expérience acquise lors de la période d'enseignement à distance imposée par la crise de la Covid 19 ont montré la nécessité d'enseigner différemment en proposant des apprentissages en mode hybride (distant et présentiel).

Dans ce contexte, le projet <ET-LIOS> (*Enseignements Technologiques de niveau Licence Ouverts pour une industrie du futur compétitive et Soutenable*), en réponse à l'appel à projet de l'ANR au titre du PIA a permis de proposer de nouvelles pratiques pédagogiques [1].

Dans cet article nous nous focalisons sur la découverte des systèmes cyberphysiques de e-maintenance basée sur les plateformes TELMA des pôles S.mart de Nancy, Nantes et Valenciennes.

Après avoir présenté les plateformes, nous précisons quelques particularités au niveau de l'architecture de pilotage et de la mise en réseau de ces plateformes à destination de la communauté éducative.

Enfin, nous présentons certaines innovations pédagogiques mises en œuvre parmi la série des 10 travaux pratiques mis à disposition.

Nous concluons sur les premiers résultats obtenus.

En résumé, la problématique posée est la suivante : « Comment mutualiser une ressource en proposant des apprentissages en mode hybride et en autorisant un accès à distance ? ».

2. PLATEFORMES TELMA ET PROJET ET-LIOS

Les plateformes TELMA sont issues de travaux de recherche menés au CRAN autour de la problématique de la télémaintenance [2], [3]. Elles ont été utilisées comme support à l'étude d'un système cyberphysique de e-maintenance dans le module du projet <ET-LIOS>.

2.1. Projet ET-LIOS

Le projet <ET-LIOS> a permis de mettre en commun les expériences acquises par les 14 établissements d'enseignement supérieur et de recherche du projet pendant la période Covid 19 en matière de pédagogie à distance et de continuité des formations afin de développer des modules pédagogiques hybrides [1] à disposition de la communauté éducative.

Dans ce contexte, la mise en réseau de trois plateformes TELMA multisites (Nancy, Nantes, Valenciennes) mutualisées permet aujourd'hui la réalisation de 10 travaux pratiques portant sur 8 thématiques. Elles sont accessibles via une connexion par VPN. Un enseignant a alors la possibilité de faire travailler ses étudiants sur une ou plusieurs des plateformes avec les ressources proposées : TP1

Découvrir et Connaitre l'installation, TP1bis Analyser les dysfonctionnements, TP2 Collecter, visualiser et traiter des données des machines en temps réel et à distance, TP2bis Définir et implémenter les stratégies de maintenance adaptées, TP3 Créer et gérer un tableau de bord, TP4 Diagnostiquer et Pronostiquer des défaillances et la performance, proposer des actions de maintenance, TP5 Gérer le support logistique des interventions, TP6 Préparer et former à l'intervention (réalité virtuelle), TP7 Superviser la production, TP8 Aider à l'intervention (réalité augmentée). Ces ressources précisent les modalités de mise en situation avec les étudiants, les compétences recherchées, les prérequis nécessaires, le travail à réaliser, les ressources mises à disposition et comment l'enseignant peut les utiliser (installation, procédures, prise en main...) et des questions de réflexion. Elles proposent également des tutoriaux sur l'installation et l'utilisation de logiciels. Certains de ces TP sont détaillés dans ce qui suit.

2.2. Plateformes TELMA

Les 3 plateformes TELMA permettent de supporter les enseignements de la maintenance et d'illustrer l'apport des nouvelles technologies dans le processus de maintenance et les nouvelles architectures qui en découlent. Ces plateformes simulent un process de production semi-continu, répandu dans l'industrie. Elles illustrent un process de déroulage de bande et de découpe ou poinçonnage de pièces. Les dimensions et formes de découpe peuvent être choisies parmi plusieurs options. La capacité de la bobine est également paramétrable.

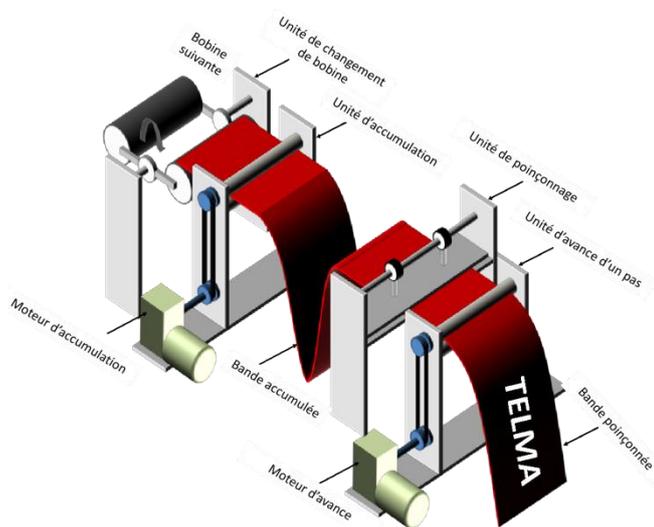


Figure 1 - Sous-systèmes fonctionnels de la plateforme TELMA

La Figure 1 présente les sous-systèmes de la plateforme TELMA de Nancy (Figure 8) :

- **Unité de changement de bobine** : permet de simuler une opération de raboutage de bobines permettant l'alimentation en entrée de la plateforme,
- **Unité d'accumulation** : permet de maîtriser la tension de la bande en créant un poumon

d'accumulation situé entre deux niveaux critiques (bande trop haute donc trop tendue / bande trop basse),

- **Unité de poinçonnage ou de découpe** : permet de simuler le process choisi. Un arbre à cames synchronisé avec le sous-système suivant simule le poinçonnage/découpe,
- **Unité d'avance** : permet d'entraîner la bande vers la sortie.

La plateforme située à Valenciennes ne comporte pas le changement de bobine. Il est remplacé par une temporisation qui dépend du produit fabriqué. Les moteurs utilisés sont des moteurs asynchrones triphasés.

Ces plateformes permettent de générer un ensemble de défaillances, définies au travers de scénarii paramétrables, qui viennent nuire au fonctionnement « normal » de l'installation. En exploitation normale ou dégradée, les données de production obtenues sont exploitées selon différents objectifs pédagogiques.

3. ARCHITECTURE DE PILOTAGE

3.1. Architecture de contrôle-commande

Le niveau contrôle-commande des plateformes TELMA est structuré en deux parties « process » et « défaut », Figure 2.



Figure 2 - Parties commande process et défaut TELMA Valenciennes

La partie commande « process » comporte un automate SE M262 de contrôle-commande de la plateforme, des modules d'E/S déportées, trois variateurs de vitesse SE ATV320 de contrôle-commande des moteurs d'accumulation, de poinçonnage et d'évacuation, et d'un maître IO-Link pour la mesure des consommations énergétiques. Pour sa part, la partie commande « défaut » comprend un automate SE M262 de génération de défaillances et de dégradations contrôlées et deux variateurs de vitesse SE ATV320 de contrôle-commande des actionneurs de défaut. L'ensemble de ces équipements est interconnecté par un réseau Ethernet TCP/IP.

Dans la suite de l'article, nous verrons que, à l'image de la pyramide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), le niveau contrôle-commande des plateformes TELMA est enrichi d'un niveau supervision et d'un niveau MES [4].

3.2. Conduite de la production

La production est conduite par un opérateur, à partir d'un pupitre de commande et d'un écran tactile Harmony HMIST6 (exemple Figure 3). Le pupitre comprend différents boutons et voyants pour lancer/arrêter/visualiser la production. Via l'écran tactile, l'opérateur choisit le type de produit, la capacité de la bobine et le nombre de pièces à fabriquer (la « recette » du produit), puis il lance la production. Il peut ensuite naviguer vers différentes vues de supervision, lui donnant de manière plus ou moins détaillée l'état d'avancement de la production ainsi que l'état instantané de la machine (présence éventuelle de dégradations et défaillances durant la production). Une verrine lumineuse vient compléter ces informations.



Figure 3 - Pupitre de la plateforme TELMA Valenciennes

3.3. Collecte, traitement et stockage des données de production

Les plateformes TELMA sont des systèmes automatisés qui simulent une production. Les nombreux capteurs installés sur celles-ci permettent de surveiller et de contrôler le processus de production.

En plus des capteurs nécessaires au fonctionnement des plateformes, des capteurs sans fils et sans piles ont été installés sur chacune d'elle (un capteur de mesure d'intensité [5] et 2 capteurs de température [6]). Ces solutions de captage de donnée, non intrusives et faciles d'installation, communiquent avec une passerelle en 2,4GHz.

Les données, qu'elles viennent de la passerelle sans fil ou des entrées sorties déportées sont renvoyées par l'Automate Programmable Industriel (API) de commande. Cet API possède un serveur OPC intégré sur lequel les données peuvent être lues et écrites. Un serveur OPC UA externe récupère également les données présentes dans les tables du serveur de l'API.

Les données ainsi générées sont transformées et mises en forme par une chaîne de traitement sur l'outil de développement *Node-RED* [7]. Cet outil basé sur les flux permet, par le biais d'un client OPC, de venir lire dans la table des variables du serveur OPC interne à l'API et de les transformer et mettre en forme pour être utilisées dans le calcul d'indicateur ou pour leur stockage dans une base de données.

Les données de production sélectionnées et mises en forme sont stockées en format .json dans une ou plusieurs des bases *MongoDB* [8] se trouvant sur un des sites (Nancy, Nantes ou Valenciennes). Elles peuvent être exportées dans des fichiers .csv.

3.4. Architecture réseau

Les plateformes TELMA peuvent être utilisées localement dans un contexte pédagogique classique de travaux pratiques et de projets sur site mais également en mode distant par Internet pour des opérations de télésurveillance de télédiagnostic, de télémaintenance d'une installation industrielle distante, ou pour l'accès à des données de production, de suivi de production, ainsi que pour l'enseignement à distance. Cela nécessite la mise en place d'une architecture réseau décrite Figure 4.

L'écran tactile, les variateurs de vitesse ATV320, le maître IO-Link SMC, l'automate de commande M262 et le deuxième automate chargé de la génération de défaillances communiquent entre eux par Ethernet IP.

L'automate M262 et l'écran tactile HMI de Schneider Electric sont équipés de deux cartes Ethernet IP, la première est connectée dans le réseau interne de la machine, tandis que la deuxième est connectée dans le réseau Ethernet du pôle AIP. D'autre part, ils sont équipés de serveurs web. De cette manière, les données de l'automate et l'interface web de l'IHM sont accessibles depuis les salles de TP pour un pilotage et une surveillance à distance.

De plus, en utilisant un VPN, il est possible de piloter la machine depuis l'extérieur, récupérer les données du serveur OPC UA embarqué de l'automate de commande, et visualiser le fonctionnement de la machine grâce aux caméras web.

A ce jour, nous avons uniquement une interconnexion entre nos 3 machines via ce VPN, ce qui réduit les risques de cyber attaques. Nous travaillons actuellement sur la sécurisation de l'accès via d'autres sites universitaires.

La sécurité physique est assurée par une cartérisation de nos machines et la présence de capteurs qui, lorsque les portes de nos TELMA s'ouvrent, provoquent immédiatement son arrêt.

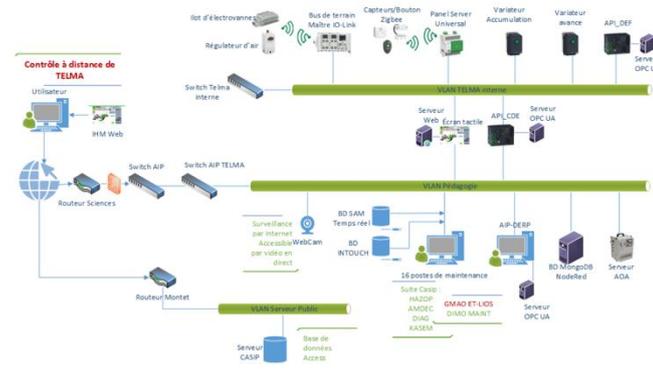


Figure 4 - Architecture réseau

4. INNOVATIONS PEDAGOGIQUES

Différentes innovations pédagogiques ont été développées afin de permettre aux apprenants de pouvoir s'initier en étant guidés ou en autonomie. Certaines d'entre elles permettent d'envisager le développement d'autres apprentissages. Certaines de ces innovations ont été conçues dans la perspective de pouvoir réaliser certains TP à distance, et donc de permettre à des collègues non présents sur un de nos 3 sites de les réaliser.

4.1. Showroom 3D

Le Showroom 3D a pour objectif la découverte fonctionnelle et technique des 3 plateformes TELMA.

En déplaçant un personnage à la première personne, il est possible de visiter un environnement virtuel (Figure 5) dans lequel les 3 plateformes sont présentées et découpées en 3 niveaux : vue générale ; sous-ensembles fonctionnels ; actionneurs et capteurs. Ces éléments sont animés et bougent comme si les plateformes étaient en cours de fonctionnement.

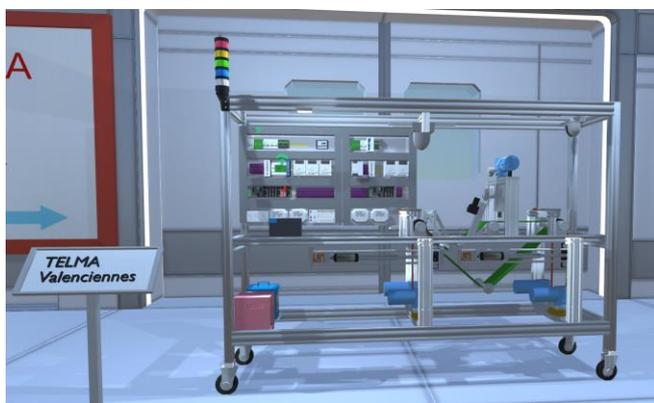


Figure 5 - Showroom 3D TELMA

Il est également possible d'interagir avec ces éléments afin de les voir de plus près, de visualiser des plaques signalétiques, d'avoir des informations sur leur rôle dans

le système ou encore d'avoir accès aux documentations techniques de ceux-ci.

4.2. Pilotage de la production

La définition, l'exécution et le suivi de la production est assuré par une application de MES (Manufacturing Execution System) [4]. Sa mise en œuvre nécessite l'enchaînement de trois étapes :

1. Modélisation des équipements physiques de la plateforme.
2. Définition des procédures de production.
3. Programmation des tâches d'exécution élémentaires côté automate « process ».

Les modèles des moteurs d'accumulation, de poinçonnage et d'évacuation ont été conçus et réalisés. Le développement poursuit avec la définition de la gamme de production. Le modèle procédural de la norme ANSI/ISA-S88.01 [9] structure une gamme de production d'une cellule de production, selon quatre éléments d'exploitation :

1. La procédure.
2. La procédure d'unité.
3. L'opération.
4. La phase.

À l'aide du langage PFC (Procedure Function Chart), trois opérations exécutant les phases élémentaires d'accumulation, de poinçonnage et d'évacuation ont été définies. Elles sont, ensuite, ordonnées par une procédure d'unité. Enfin, une procédure permet de piloter la production de n produits, Figure 6.

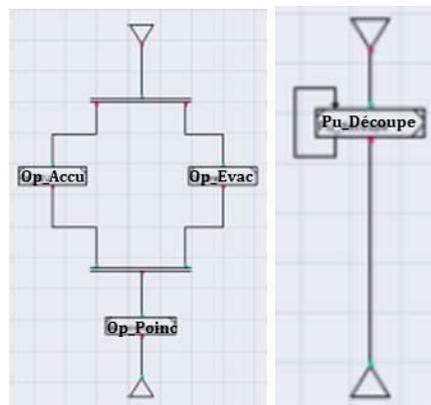


Figure 6 - Procédure d'unité et Procédure Découpe

Avant de pouvoir exécuter et contrôler une procédure à l'aide de l'application de MES, la dernière étape consiste à programmer les phases au niveau de l'automate « process ». La communication entre une phase de prescription, exécutée côté application de MES, et une phase d'exécution, exécutée côté automate « process », s'effectue selon le diagramme états-transitions de l'interface PLI (Phase Logic Interface) [10].

Les développements nécessaires à la réalisation de ces étapes ont été menés, côté MES, à l'aide du progiciel

COOX[®] (éditeur ORDINAL Software) [11] et, côté automate, à l'aide de l'environnement de développement *ExostruxureTM Machine Expert[®]* (EME, éditeur Schneider Electric). Pour sa part, la mise en œuvre des échanges a nécessité la configuration et l'utilisation d'un serveur OPC Top Server 6 entre l'application de MES et l'automate « process ».

4.3. Application de supervision

L'objectif de ce TP est de familiariser les étudiants avec la création d'une application simple de supervision, étendant les simples données issues des capteurs présents sur TELMA. Les étudiants ont à disposition un accès à l'interface web permettant de visualiser l'état de la machine, ainsi que de lancer des ordres de fabrication à distance. Les sujets proposés font travailler au choix avec InTouch[®] ou PcVue[®].

En parallèle, un *template* de programmation leur est fourni sur le logiciel AVEVA[®], contenant une bibliothèque préconfigurée d'éléments graphiques prêts à être animés. Dans le sujet, les éléments nécessaires à la connexion de leur application avec le serveur OPC de TELMA leur sont également fournis.

Les objectifs opérationnels des étudiants se déclinent en quatre temps :

1. Animer des objets sur le changement de valeur d'une variable booléenne (ex : vérin sorti/rentré)
2. Animer des objets sur des variables entières (ex : hauteur de bande en stock)
3. Tracer des graphiques de suivi d'une valeur de variable en temps réel (ex : vitesse du moteur triphasé)
4. Historiser des déclenchements d'alarme sur une valeur de stock critique, avant sa détection par les capteurs d'arrêt d'urgence

4.4. Exploitation d'indicateurs en maintenance

Avec les données générées par les plateformes différents indicateurs peuvent être définis par les étudiants. Ces indicateurs peuvent permettre de surveiller la production de la plateforme, comme présenté dans la Figure 7.

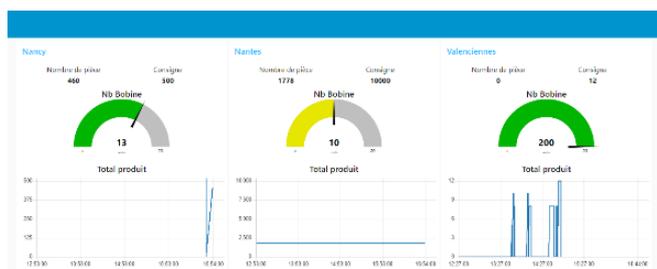


Figure 7 - Interface Web du tableau de bord de surveillance des plateformes TELMA

Ces indicateurs peuvent également être définis pour surveiller l'état de santé des équipements. Pour ces derniers, les étudiants se basent sur les analyses dysfonctionnelles qu'ils ont réalisées sur les plateformes ainsi que sur les documentations fournies par les constructeurs.

Les étudiants peuvent, à partir des indicateurs qu'ils ont défini, créer des tableaux de bord directement sur l'outil de développement *Node-RED*.

La mise en place de ces indicateurs permet aux étudiants de mettre en place concrètement les stratégies de maintenance préventive conditionnelle, voire prévisionnelle, définies en TD. Les étudiants peuvent également s'essayer au développement de solutions d'analyse et de diagnostic automatiques des défaillances d'une plateforme.

4.5. Réalité virtuelle

Une fois le(s) problème(s) identifié(s) sur la plateforme, les étudiants n'ont pas la possibilité d'aller jusqu'à l'intervention physique pour procéder aux opérations de maintenance nécessaires pour sa remise en état. Aussi, une application de réalité virtuelle a été développée sous *SimLab Composer* leur permettant d'aller jusqu'au bout de l'« intervention virtuelle ». Dans notre cas, c'est le remplacement du roulement à billes de l'arbre de l'unité d'accumulation qui a été développé.

Cette application peut également servir pour la formation des personnels hors site en prévision d'une intervention sur site industriel ou pour la préparation des pièces de rechanges, équipements et outils nécessaires pour réaliser les différentes opérations.

Elle permet également de travailler les problématiques de mise en position, d'isostatisme, de réglage, de contrôle ... à respecter avant et après un démontage/remontage. Elle peut être utilisée couplée à de la captation de mouvement afin de travailler sur l'accessibilité, l'ergonomie et la posturologie lors d'une intervention et ainsi définir les équipements adéquats.

4.6. Réalité augmentée

Une fois les étudiants formés aux interventions, ils peuvent intervenir physiquement sur la plateforme. Pour cela, ils sont guidés grâce à des applications de réalité augmentée développée avec *EcostruxureTM Augmented Operator Advisor (AOA)* de Schneider Electric. A titre d'exemple, une procédure de consignation a été développée. Elle a pour but de guider l'utilisateur lors de la mise hors tension de la machine, en listant les étapes à suivre, depuis la sélection des EPI (Equipements de protection individuel) jusqu'à la VAT (vérification d'absence de tension).

En pratique, les étudiants peuvent créer une application pour une intervention particulière. Ils apprendront entre autres à organiser la documentation en choisissant les informations pertinentes à mettre à disposition en temps réel, quand l'opérateur en a besoin pour son travail, par la superposition de données ou

d'objets virtuels sur la plateforme réelle. Son travail sera organisé selon un mode opératoire modélisé sous forme d'un logigramme. Le passage d'une étape à une autre se fera par acquittement de l'opérateur, il peut se guider soit par comparaison d'image soit en fonction de l'état d'une variable lue dans l'automate. Le serveur hébergeant l'application de RA est installé dans le réseau Ethernet du pôle AIP, il communique avec l'automate de commande de TELMA afin de récupérer les données en temps réel et les afficher avec l'application AOA.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce rétrofit de nos plateformes a permis en 2 ans de faire un bond technologique dans nos Travaux Pratiques. 10 sujets de TP ont ainsi été écrits pour le niveau licence, mais peuvent s'adapter à des niveaux supérieurs. Ils sont consultables sur le site du projet ET-LIOS [12].

Les premiers retours des collègues et des étudiants sont très encourageants. Après chaque série de Travaux Pratiques, nous avons ainsi soumis un questionnaire à nos étudiants. Ce questionnaire a montré un haut niveau de satisfaction ainsi qu'une sensibilité particulière aux nouvelles technologies mises en œuvre. Les résultats obtenus lors des travaux pratiques nous montrent que nous atteignons bien les objectifs pédagogiques fixés. Nous voyons maintenant des collègues s'intéresser de très près à ces plateformes TELMA et nous attendons prochainement des TP à distance sur une ou plusieurs plateformes simultanément.

En plus d'être un traditionnel support pour les enseignements de maintenance, TELMA devient un support pour analyser des données de production, développer une supervision, appréhender des problématiques réseau, ...

Enfin, l'utilisation de la réalité augmentée ou la réalité virtuelle est un plus pour appréhender d'autres thématiques connexes comme l'ergonomie en situation d'intervention sur machine.

REMERCIEMENTS

Le projet <ET-LIOS> a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissements d'Avenir *Hybridation des formations d'enseignement supérieur de niveau licence*, portant la référence ANR-20-NCUN-0009.

REFERENCES

- [1] Projet <ET-LIOS> (*Enseignements Technologiques de niveau Licence Ouverts pour une industrie du futur compétitive et Soutenable*) 01/11/2022 au 30/10/2022. <https://et-lios.s-mart.fr>
- [2] Levrat E., Salzemann B, Clanché F. TELMA Plate-forme d'intégration de télémaintenance pour l'enseignement et la recherche. CETSIS'2005 Nancy, 25-27 octobre 2005
- [3] Muller A. Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic - Thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1,

spécialité Automatique, traitement du signal et Génie informatique. 7 juin 2005.

- [4] Caulier P. et Békrar A. Pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production de biens « intelligents », Actes du 15^{ème} Colloque National AIP-PRIMECA, La Plagne, France, 12-14 avril 2017.
- [5] <https://www.se.com/fr/fr/product/A9MEM1571/powertag-capteur-de-mesure-radiofr%C3%A9quence-dt40-3p+n-63a-amont/?node=44005611021-energy-sensors&range=64482-acti9-powertag-link&selected-node-id=44005611021>
- [6] <https://www.se.com/fr/fr/product/A9XST114/powertag-lot-de-4-sondes-de-temp%C3%A9rature/>
- [7] <https://nodered.org/>
- [8] <https://www.mongodb.com/fr-fr>
- [9] <https://www.isa.org/>
- [10] Caulier P. Gestion de l'exécution de phases de production par interface PLI, Actes du 13^{ème} Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR 2021), Paris, France, 8-9 novembre 2021.
- [11] <https://www.ordinal.fr/>
- [12] [E-maintenance des systèmes cyber-physiques de production - <ET-LIOS> \(s-mart.fr\)](https://www.ordinal.fr/)

ANNEXE



Figure 8 – Plateforme TELMA de Nancy