



**HAL**  
open science

## Conception et simulation collaborative d'une ligne d'assemblage final aéronautique - L'exemple d'un projet de fin d'études.

Vincent Cheutet, Thomas Paviot, Samir Lamouri

### ► To cite this version:

Vincent Cheutet, Thomas Paviot, Samir Lamouri. Conception et simulation collaborative d'une ligne d'assemblage final aéronautique - L'exemple d'un projet de fin d'études.. 11ème Colloque National AIP PRIMECA, Apr 2009, La Plagne, France. hal-00710696

**HAL Id: hal-00710696**

**<https://hal.science/hal-00710696>**

Submitted on 21 Jun 2012

**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.

# CONCEPTION ET SIMULATION COLLABORATIVE D'UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE FINAL AERONAUTIQUE L'EXEMPLE D'UN PROJET DE FIN D'ETUDES

**Vincent CHEUTET (1), Thomas PAVIOT (1), Samir LAMOURI (1)**

(1) LISMMA EA2336, SUPMECA, 3 rue Fernand Hainaut, 93407 SAINT OUEN Cedex, téléphone 01 49 45 29 38, Fax 01 49 45 29 04, e-mail : [vincent.cheutet@supmeca.fr](mailto:vincent.cheutet@supmeca.fr), [thomas.paviot@supmeca.fr](mailto:thomas.paviot@supmeca.fr), [samir.lamouri@supmeca.fr](mailto:samir.lamouri@supmeca.fr)

## Résumé :

*L'Usine Numérique est en plein essor pour concevoir et simuler, au plus tôt dans le cycle de vie des produits, les systèmes de productions associés. Les ingénieurs qui sortent aujourd'hui d'école d'ingénieurs auront à déployer les outils et les méthodes associés à l'Usine numérique lors de leurs prochains emplois.*

*Cet article réalise un retour d'expérience sur un projet pédagogique réalisé dans le cadre de la formation de troisième année de cycle d'ingénieur. Ce projet a été conduit en partenariat avec EADS Innovation Works, basé à Suresnes. Il a permis de réaliser un travail collaboratif s'appuyant sur les outils Usine Numérique et PLM mutualisés au sein de l'AIP-Priméca IdF*

**Mots clés: usine numérique, PLM, assemblage aéronautique, projet pédagogique.**

## 1 Introduction ; l'Usine Numérique

Dans un contexte global de réduction des coûts de fabrication, d'accélération du cycle de développement des produits ou encore d'amélioration de la qualité, l'**Usine Numérique** est un ensemble d'outils logiciels et de méthodologies permettant de concevoir, simuler, mettre en œuvre et optimiser les systèmes de production [1, 2, 3]. Une démarche d'Usine Numérique vise à l'intégration des méthodes et des outils existant à différents niveaux, pour planifier et tester le produit et son système de production associé ainsi que le contrôle de production (figure 1).

Une telle démarche s'appuie sur des environnements logiciels de plus en plus performants (Delmia de Dassault Systèmes [4] ou Tecnomatix de Siemens PLM Software [5]), qui intègrent dans un environnement 3D les simulations. L'objectif est de diminuer les temps de développement en faisant juste du premier coup, ceci en apportant plus rapidement les informations pertinentes aux services de production dès le démarrage d'un nouveau projet et en limitant le recours aux maquettes physiques. Les grands groupes industriels explorent actuellement ces environnements. Ainsi, on peut citer l'exemple du Boeing 787 Dreamliner, qui a été entièrement conçu sans recours à une maquette physique, tant du produit que de son système de production [6].

Pour gérer les informations produites par les différents acteurs du cycle de vie du produit et permettre une meilleure communication entre eux, le concept PLM (Product Lifecycle Management ou Gestion du cycle de vie produit) répond au besoin de partager les connaissances relatives à un produit durant chaque étape de son cycle de vie [7]. Associés à l'Usine Numérique, les outils PDM (Product Data Management) permettent de gérer les résultats de simulation et de garantir la cohérence entre les données produit, les simulations de son comportement et celles de son système de production.

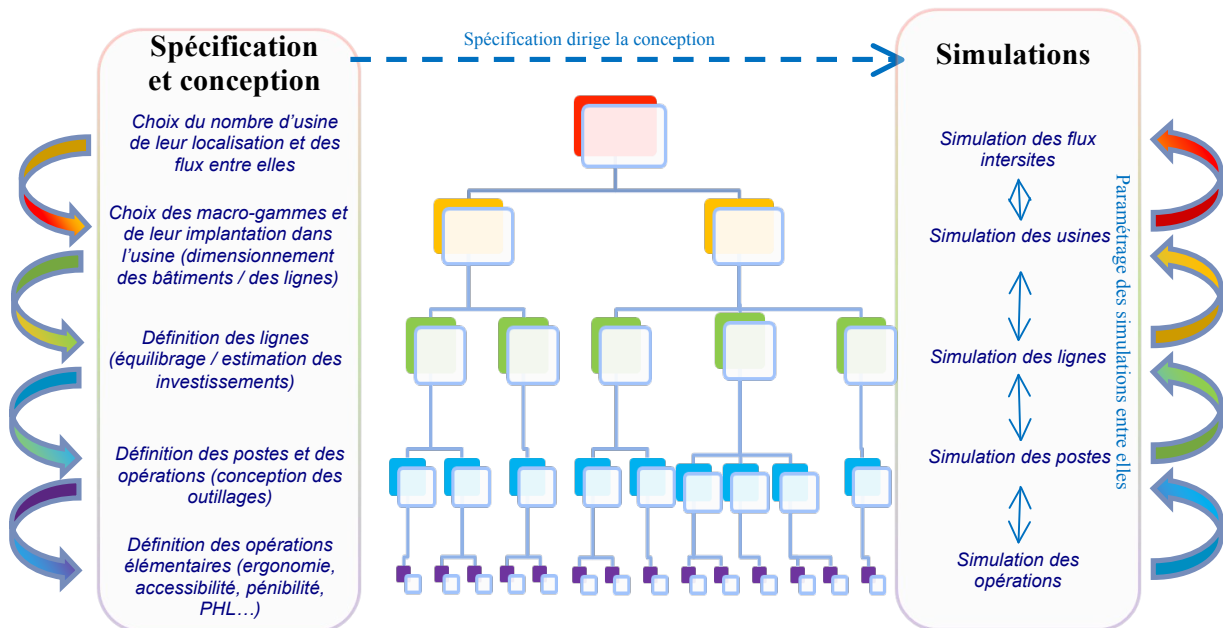


Figure 1. Les différents niveaux de l'Usine Numérique (courtoisie EADS IW)

Dans ce contexte, les futurs ingénieurs auront de plus en plus à faire face à l'intégration de la simulation numérique des systèmes de production avec les autres phases du cycle de vie du produit et à la mise en place de démarches PLM dans l'ensemble des activités de l'entreprise.

L'objectif de cet article est de partager une expérience pédagogique visant à développer les compétences des étudiants en fin de cycle ingénieur sur les méthodes et outils de l'Usine Numérique et du PLM. Cette expérience a été réalisée avec le concours d'EADS Innovation Works<sup>1</sup> et a porté sur la conception et la simulation d'une ligne d'assemblage final d'avion en phase d'avant projet (figure 2).

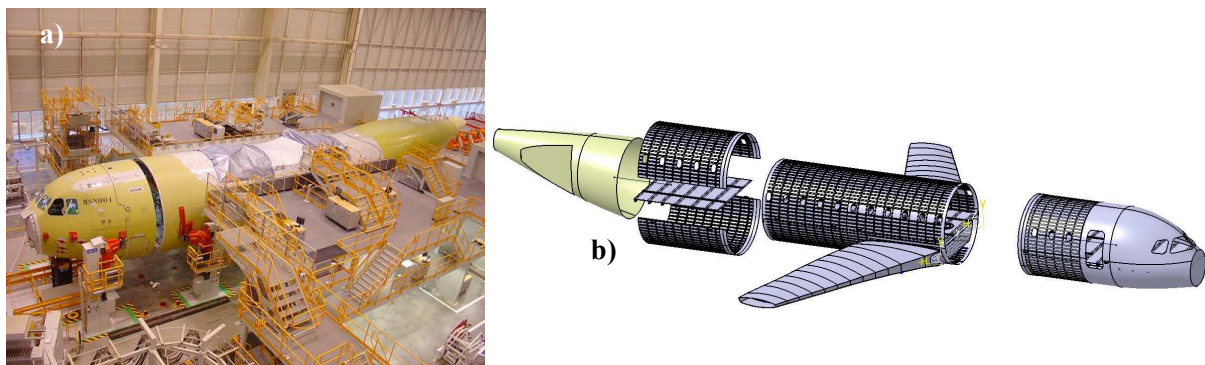


Figure 2. a) Site d'assemblage d'Airbus-Toulouse b) Maquette numérique simplifiée d'un avion de type Airbus (courtoisie EADS IW).

Le chapitre 2 présente les objectifs pédagogiques de la formation et l'importance du projet dans ce contexte. Le chapitre 3 décrit le projet et les différentes études à mener. Le chapitre 4 synthétise le déroulement du projet, avec la présentation des méthodes employées et les résultats des élèves ingénieurs. Le chapitre 5 conclut cet article et présente les perspectives, à la fois du point de vue de la recherche et de la pédagogie.

<sup>1</sup> EADS Innovation Works, situé à Suresnes (92), est le centre commun de recherche d'EADS.

## 2 Les objectifs pédagogiques

Les élèves ingénieurs qui suivent le cycle ingénieur à SUPMECA choisissent en troisième année un département de spécialisation correspondant à leur projet professionnel. Un des départements s'intitule Systèmes de Production et propose deux parcours : un parcours en Production & Logistique, centré sur la gestion de chaîne logistique, et le second en Usine Numérique, basé sur la simulation des systèmes de production et sur la gestion des informations produit/process.

Dans le cadre de la formation Usine Numérique, nous avons fixé les objectifs suivants :

- appréhender les méthodes et méthodologies de conception d'un système de production, dans une démarche collaborative et concurrente,
- rédiger un cahier des charges en adéquation avec des contraintes industrielles fortes,
- comprendre les outils de simulation de l'Usine numérique qui peuvent être à la disposition d'ingénieurs,
- intégrer les outils de conception et de simulation du produit et du process dans une démarche PLM.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons opté pour l'utilisation d'une méthode active d'apprentissage en amenant nos élèves ingénieurs à mener un projet collaboratif de conception et de simulation d'une ligne complète avec l'aide des outils de l'Usine Numérique et du PLM. En effet ces méthodes sont connues pour faciliter l'apprentissage [8] : il met en jeu une mémoire motrice et affective en plus qu'intellectuelle, ce qui permet une meilleure intégration du sujet ; il aide à l'acquisition d'un savoir. Elles transforment la situation d'apprentissage. Par ailleurs, « Les élèves ingénieurs font un plus grand effort pour apprendre et retenir ce qu'ils apprennent lorsqu'ils perçoivent des relations entre la matière et leur propre existence. Ils demandent constamment à savoir pourquoi il leur faut étudier un sujet ou à quoi servira l'information qu'ils apprennent » [9].

Dans le cadre d'un projet de fin d'études qui se déroule avant le stage de fin d'études, les étudiants doivent mettre en œuvre de manière concrète sur une courte durée tout ou partie de l'enseignement dispensé dans leur année de spécialisation (figure 3).

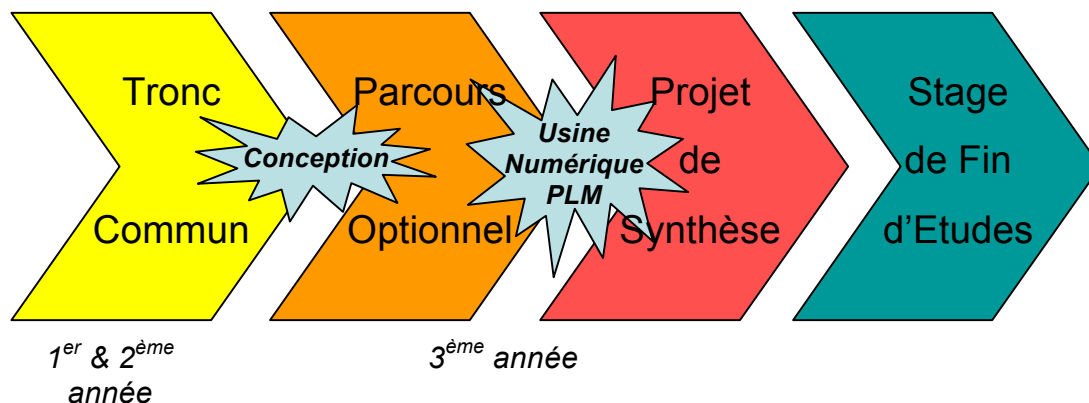


Figure 3. Organisation pédagogique de la formation.

Les étudiants disposent donc des pré-requis nécessaires à la réalisation de ce projet : analyse fonctionnelle et analyse de la valeur (rédaction d'un cahier des charges fonctionnel), systèmes d'information et PLM, outils de l'Usine Numérique (simulation de flux et de processus), etc.

Les outils choisis pour réaliser ce projet sont les outils fournis par l'AIP-Priméca Ile de France, i.e. la solution Delmia V5R17 (de Dassault Systèmes) pour les outils Usine Numérique et la plateforme mutualisée Windchill (de PTC) de l'Ecole Centrale de Paris.

### 3 Description du projet

Ce projet répondait à une demande industrielle émanant d'EADS IW, qui a collaborer avec nous pour exprimer le besoin, assurer le suivi du travail ainsi que son évaluation finale. Pour EADS IW, les enjeux de la conception et de la simulation numérique de l'usine d'assemblage final sont nombreux, ils doivent permettre de :

- conduire l'étude du processus d'assemblage et la conception de l'usine en parallèle du développement de l'avion, pour réduire le time-to-market,
- comparer différentes configurations d'usine/gamme d'assemblage pour choisir celle qui permet l'assemblage le plus rapide au coût minimum,
- identifier le plus tôt possible les problèmes potentiels pour les résoudre avant que la mise en service de la ligne de production soit effective,
- prendre en compte les nombreuses modifications de spécifications du cahier des charges de l'avion qui interviennent au cours du projet,

Parmi les besoins industriels spécifiques à cette problématique, on pourrait citer les 3 exemples suivants :

- la gamme d'assemblage ainsi que les outillages et programmations doivent s'adapter à une modification de la géométrie de la maquette numérique de chaque élément ;
- la gamme d'assemblage doit s'adapter à une modification de la cadence ;
- l'usine d'assemblage final doit s'adapter à un changement de budget alloué au cours du développement du produit (moins de ressources, taille de l'usine plus petite etc.).

Dans le cadre de ce projet, EADS IW cherche à valider l'outil Catia/Delmia pour la conception et la simulation des gammes d'Airbus. Cette volonté se retrouve aussi dans les projets de recherche auxquels EADS IW est impliqué aujourd'hui, comme par exemple les projets Usine Numérique [10] et Usine Numérique 2 [11] du pôle de compétitivité SYSTEM@TIC.

Dans le cadre de ce projet, il n'est pas question de spécialiser l'étude sur un avion particulier : il a été préféré de s'atteler à la résolution des problèmes liés à la simulation de la gamme sous Delmia et de ce fait, la géométrie complexe d'un avion a été simplifiée. L'étude se base donc sur la simulation d'un modèle d'avion dont l'architecture générale se retrouve sur chaque modèle de la gamme Airbus.

Au sein du projet, 5 études particulières ont été menées en parallèle et sont décrites dans les paragraphes suivants.

#### 3.1 Les 2 équipes FAL : FAL1 et FAL2

Les équipes FAL (Final Assembly Line) ont eu pour objectif de simuler 2 gammes d'assemblage concurrentes avec Delmia.

Les contraintes des études FAL sont les suivantes :

- la gamme proposée devra assurer une cadence, pouvant varier de 20 à 30 avions/mois,

- l'assemblage sera fait dans un hall, initialement vide, de dimensions 260m\*60m\*30m,
- la géométrie de l'avion est une donnée d'entrée, la gamme doit donc s'appuyer sur cette géométrie,
- il n'y a aucune contrainte concernant les ressources à utiliser pour réaliser cette gamme, ainsi que sur le nombre de postes de travail dans le hall et la position des éléments au cours de l'assemblage (un tronçon peut se trouver par exemple en position verticale au cours d'une opération),
- l'assemblage de deux composants suit la macro-gamme décrite dans la figure 4.



Figure 4. Gamme d'assemblage final simplifiée.

Les élèves ingénieurs ont donc une liberté importante quant à la gamme d'assemblage globale de l'avion, ainsi que sur l'instanciation des gammes à partir des macro-gammes.

### 3.2 L'équipe PREFAL

L'équipe PREFAL (Pré Final Assembly Line) a eu pour objectif de simuler sous Delmia la gamme d'assemblage de la queue de l'avion, composée de la barque, du plancher, du pavillon et du cône. Cette étape est actuellement réalisée sur le site d'AIRBUS Méaultes.

Cet assemblage devait s'effectuer dans un hall dédié, de dimensions 70m\*30m pour une hauteur de 30m. Dans cette phase, la mise en position relative des éléments est assurée par un outillage spécifique, à concevoir par l'équipe PREFAL. L'équipe devait chercher en priorité à robotiser au maximum cet assemblage, qui est une opération pour l'instant majoritairement manuelle.

### 3.3 L'équipe « Gestion et conception des ressources »

Les objectifs pour cette équipe étaient les suivants :

- la mise en place d'un système à l'intérieur de l'outil PLM, permettant d'identifier les ressources de manière à ce qu'elles soient accessibles rapidement à tous les membres du projet,
- la proposition de nouvelles ressources spécifiques, en réponse à un besoin exprimé par l'une des équipes Gamme (FAL ou PREFAL),
- l'élaboration d'une méthodologie de standardisation des éléments d'outillage proposés dans chacune des simulations : pour cela, l'équipe pouvait se référer à des travaux déjà menés au sein d'EADS IW [12].

### 3.4 L'équipe R&D

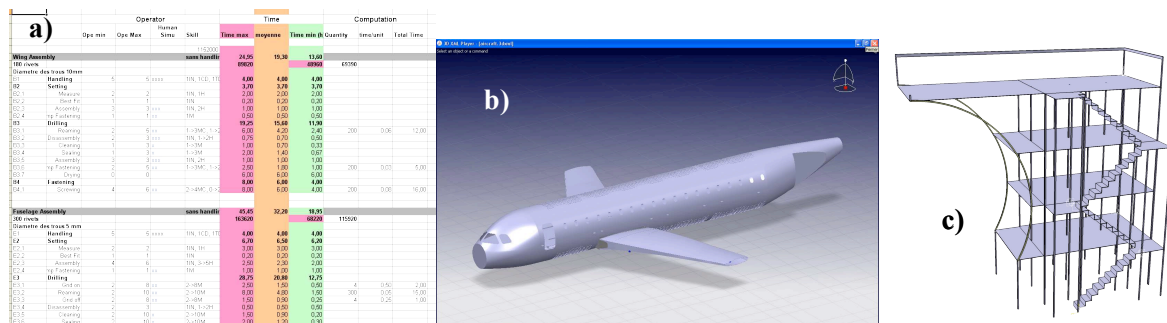
Elle anticipe les besoins et difficultés auxquelles seront confrontées les équipes FAL/PREFAL en fin de projet. 2 voies ont été identifiées en amont du projet :

- le paramétrage des gammes d'assemblage DELMIA, avec application aux gammes PREFAL, FAL1 et FAL2 après modification d'un élément (modification de la cadence, d'un temps, de la position relative de plusieurs postes de travail),
- la liaison entre deux simulations différentes : application au lien PREFAL-FAL.

L'équipe R&D assurera un transfert de compétence vers les équipes « Gamme ».

### 3.5 Ressources mises à disposition et livrables attendus

EADS IW a laissé à disposition des étudiants les ressources suivantes : la description de la gamme d'assemblage, avec les temps moyens observés pour chaque étape, les maquettes numériques simplifiées de l'avion et des outillages (figure 5).



L'objectif pour EADS est d'étudier la faisabilité de la conception et simulation collaborative d'une ligne d'assemblage avec les outils Delmia. Par conséquent, les différentes équipes devaient privilégier le développement de solutions à partir de ressources standards, données par EADS IW ou présentes dans les bibliothèques de Delmia, et non la conception précise d'outillages spécifiques.

Les livrables attendus à la fin du projet étaient de plusieurs types. Les équipes FAL1, FAL2 et PREFAL étaient en charge de livrer une simulation adéquate de leur processus, avec validation des architectures des ressources, ainsi qu'un rapport justifiant leur choix de conception et capitalisant sur les problèmes rencontrés au cours de la simulation. L'équipe Outillage devait livrer un ensemble d'outillage, ainsi qu'une proposition de méthodologie de conception paramétrique d'outillage. Enfin l'équipe R&D devait livrer un rapport capitalisant sur la problématique du paramétrage temporel et spatial d'une simulation et sur une méthodologie de travail collaboratif autour de l'outil Delmia.

## 4 Déroulement du projet et principaux résultats

Le projet a duré 4 semaines, avec une semaine de vacances au milieu. Il a regroupé 14 étudiants, répartis de la manière suivante : 3 étudiants pour chaque équipe de gamme (FAL1, FAL2 et PREFAL), 3 étudiants pour l'équipe Outillage et enfin 2 étudiants pour l'équipe R&D. Une salle équipée de 16 postes informatiques, avec l'ensemble des outils informatiques appropriés, a été dédiée à ce projet, ce qui a permis de constituer un plateau projet sur l'ensemble du temps consacré.

Les élèves ingénieurs ont travaillé de manière autonome, avec une planification du projet, construite au tout début du projet en collaboration entre les élèves ingénieurs et l'équipe pédagogique. La planification fait apparaître :

- des points techniques, à l'intérieur de chaque équipe, deux fois par jour,
- une revue de projet globale chaque soir, durant lequel chaque équipe faisait un point de son avancement aux autres équipes,
- et une réunion avec l'équipe pédagogique deux fois par semaine.

En amont du projet, une visite du site d'AIRBUS Méaultes a été réalisée avec l'ensemble de l'équipe projet, afin de réaliser une veille technologique de l'assemblage en aéronautique. Il est en effet indispensable de comprendre les spécificités du métier d'assembleur aéronautique par rapport aux industries manufacturières, que ce soient en termes de taille de produit et d'outillage qu'en termes de cadence.



Au niveau global, les objectifs affichés pour le projet ont été atteints. Les différentes simulations réalisées ont permis de montrer à la fois la faisabilité d'une telle simulation au plus tôt dans le cycle de vie du produit et en mode collaboratif, ainsi que les difficultés rencontrées.

Après un travail de veille technologique sur les différents types d'outillage existants dans le milieu aéronautique et les ressources rendues disponibles par EADS IW, l'équipe Outillage s'est séparée pour avoir un membre dans chaque gamme développée. Ainsi, les équipes FAL1, FAL2 et PREFAL se sont agrandies pour avoir 4 membres, dont un à plein temps sur la définition de l'outillage nécessaire. Du fait des stratégies très différentes entre chaque gamme, l'étude relative à la standardisation des outillages n'a été qu'esquissée.

L'équipe R&D a fortement travaillé sur deux points identifiés comme étant essentiels par EADS IW : le paramétrage temporel d'un processus de fabrication et le développement d'une méthodologie d'intégration de processus dans un processus préexistant, qui aidera la conception collaborative d'une simulation. Cette ébauche a par la suite permis à un stagiaire d'EADS IW de développer une macro dans l'outil Delmia, automatisant ce processus d'intégration de processus dans un processus préexistant [13].

Les 2 équipes FAL ont d'abord travaillé en commun pour proposer plusieurs alternatives d'implantations et en sélectionner 2. Afin d'évaluer ces propositions et leur adéquation vis-à-vis du cahier des charges du projet, une étude de flux a été réalisée sous QUEST pour valider à la fois la cadence initiale, les montées en cadence avec ajout de ressource et/ou ajout de postes (figure 6).

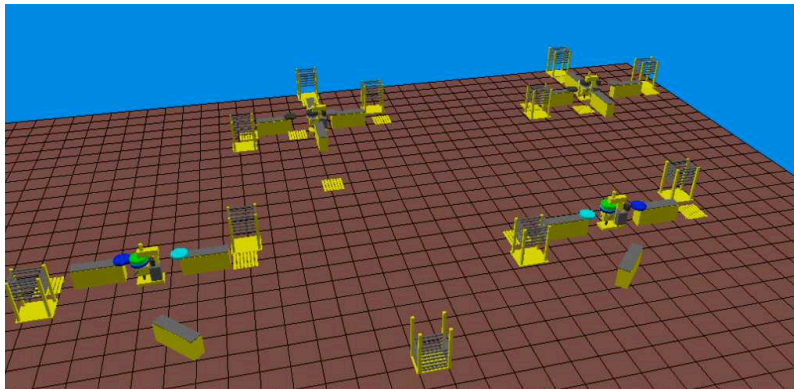


Figure 6. Simulation des flux avec QUEST.

Puis chaque équipe a développé une des deux solutions retenues (figure 7.a et 7.b). Ces simulations ont permis à chaque fois de positionner les ébauches d'outillages nécessaires à chaque poste, de déterminer et simuler les temps de passage ainsi que le taux d'utilisation des ressources à chaque poste. En particulier, dans le second scénario, la simulation d'humains virtuels sur le poste d'assemblage de deux tronçons a pu déterminer les besoins en ressources humaines et leur niveau de qualification, au vu de la difficulté des opérations envisagées. Cette simulation a aussi permis d'adapter l'architecture des outillages afin d'améliorer l'ergonomie des postes.

L'équipe PREFAL a réalisé une simulation du processus d'assemblage du tronçon arrière qui est entièrement basée sur l'utilisation de robots (figure 8). La solution proposée implique 4 robots articulés qui travaillent de manière collaborative autour du tronçon arrière. Comme convenu au début du projet (cf. chapitre 3.5), les ressources utilisées et donc les robots ne devaient pas être conçus explicitement pour le projet, et les membres de l'équipe ont donc utilisé des robots présents dans la bibliothèque de ressources de Delmia.



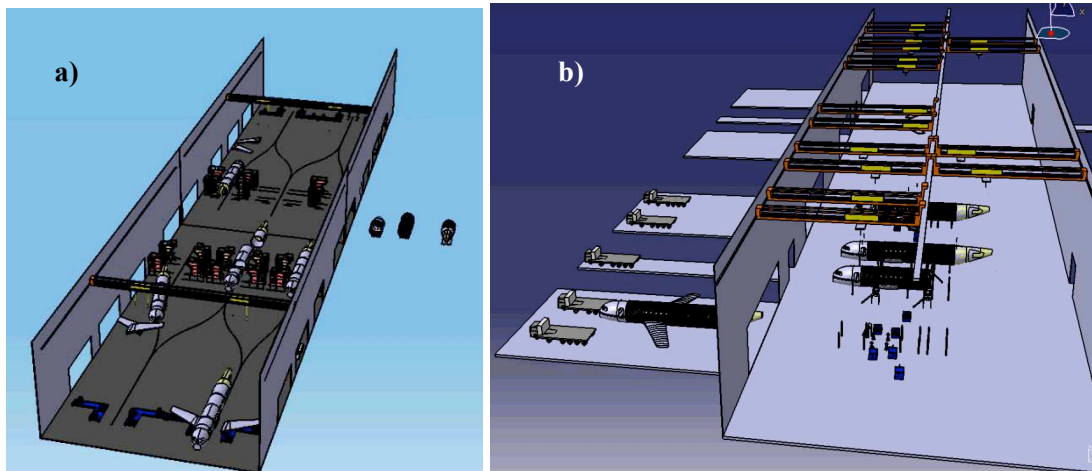


Figure 7. Simulations des deux scénarii FAL

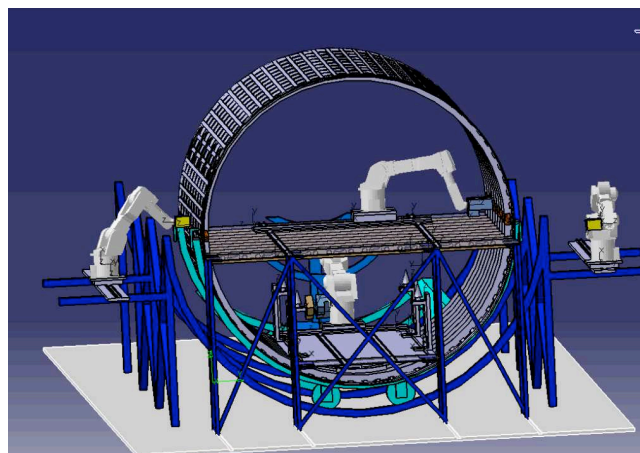


Figure 8. Simulation d'un poste robotisé d'assemblage du tronçon arrière.

## 5 Conclusion

Les principes de la formation-action ont trouvé leur intérêt dans le cadre de ce projet pédagogique. En effet, l'apprentissage et la compréhension des messages délivrés lors des différents cours du parcours, introductifs au projet, ont pris leur sens dans la réalisation de ce projet. Plusieurs niveaux ont pu être ainsi abordés :

- au niveau technique, les élèves ingénieurs ont acquis une connaissance accrue des outils de l'Usine Numérique et du PLM, née d'une utilisation prolongée dans le cadre du projet,
- au niveau équipe, les élèves ingénieurs ont vu la difficulté d'établir des démarches de travail collaboratif, tout en appréciant les avantages de la distribution des tâches au sein de l'équipe,
- au niveau projet, les élèves ingénieurs ont directement vécu la vie d'un projet, avec la problématique de planification, d'organisation et de gestion de projet.

Le projet s'est finalisé par une présentation commune de l'ensemble des participants devant les partenaires du projet (EADS IW) ainsi que d'autres industriels partenaires de l'école (Dassault Systèmes, etc.). Cette présentation a valorisé le travail des élèves ingénieurs auprès de nos partenaires.

Concernant les pistes d'amélioration, certains points ont été envisagés. Si ce projet partait d'une feuille blanche, la prochaine édition validera et optimisera les solutions proposées. D'autres contextes

d'application sont aussi envisagés pour réaliser ce type de projet, comme le domaine de l'énergétique ou de l'automobile.

Au point de vue recherche, le travail réalisé au sein du projet a montré les principales limitations des outils de l'Usine Numérique quant à l'intégration de plusieurs sous-processus de fabrication au sein d'une simulation plus complète. Ce sujet sera exploré dans le cadre d'une thèse incorporée dans le projet OLDP (On-Line Digital Production), labellisé par le pôle de compétitivité SYSTEM@TIC, avec EADS IW et Dassault Systèmes comme principaux partenaires.

### Remerciement

Nous voudrions remercier MM. Hugo Falgarone et Benoit Fricero, d'EADS Innovation Works pour leur contribution à la vie du projet. Nous remercions également l'équipe d'Airbus Méaultes, pour la visite de l'atelier d'assemblage des pointes avant Airbus, qui a permis aux étudiants de réaliser un état de l'art concret du métier d'assembleur aéronautique. Nous remercions aussi M. Laurent Kieffer, de l'IFMA pour l'aide apportée au cours du projet, tant au point de vue technique que méthodologique sur l'outil Delmia.

Enfin, nous souhaitons remercier et féliciter les élèves ingénieurs ayant participé à ce projet, pour leur travail et leur dynamisme : merci à K. Aleixo, D. Aydin, M. Bouton, Y. Castagne, T. Delrot, A. Garrigou, J. Hay, J. Hélie, Y. Le Diset, F. Roger, F. Scrofani, T. Tétard, N. Toureau et T. Tremblin.

### Références

- [1] U. BRACHT, T. MASURAT. "The Digital Factory between vision and reality", Computers in Industry, Elsevier, Vol. N°56, 2005, pp. 325-333.
- [2] W. KÜHN. "Digital Factory – Simulation enhancing the product and production engineering process ", Actes de : 2006 Winter Simulation Conference, pp 1899-1906. Monterey, USA, 2006.
- [3] "Usine numérique : Retour à la case production ", CAD-magazine, CIMAX, Vol.146, 2008, pp. 18-21.
- [4] Delmia, page web : <http://www.3ds.com/products/delmia>
- [5] Tecnomatix, page web : [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/tecnomatix/](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/)
- [6] S. NUNES. "Boeing inaugure la sortie d'usine virtuelle du premier 787 Dreamliner", Newsletter de CAD magazine, 2006, N°31.
- [7] CIMdata. Product Lifecycle Management (PLM) Definition, disponible à l'adresse <http://www.cimdata.com/plm/definition.html>, Novembre 2008.
- [8] R.MUCCHIELLI, "Les méthodes actives dans la pédagogie des adultes", Paris, ESF, 1975.
- [9] R. DELISLE. "How to use problem-based learning in the classroom", Alexandria VA, Italie, Association for supervision and curriculum development, 1997.
- [10] B. BOIME. "Le projet Usine numérique : Un projet du pôle de compétitivité SYSTEM@TIC Paris Région", Revue internationale d'ingénierie numérique, Lavoisier, Vol. N°1-4, 2005, pp. 393-402.
- [11] Usine Numérique 2, <http://www.systematic-paris-region.org/fr/ocds/UserFiles/File/USINE%20NUMERIQUE%202.pdf>
- [12] A. MUNCK. "Définition d'une méthode de conception de gammes d'assemblage", Projet de Fin d'Etudes réalisé chez EADS IW, 2007.
- [13] T. TETARD. "Usine numérique et concurrent engineering avec Delmia et 3D Live", Projet de Fin d'Etudes réalisé chez EADS IW, 2008.