

## Modéliser l'avion et son moyen de production : vers un modèle global pour de la conception simultanée

**François Bouissiere<sup>1</sup>, Claude Cuiller<sup>1</sup>, Pierre-Eric Dereux<sup>1</sup>, Stéphane Kersuzan<sup>1</sup>, Thomas Polacsek<sup>2</sup>**

[1] AIRBUS, 1 Rond Point Maurice Bellonte, 31707 Blagnac, France

[2] ONERA, 2 avenue Edouard Belin BP74025, 31055 TOULOUSE Cedex 4

---

*RÉSUMÉ. La construction d'objets complexes, tel qu'un avion, nécessite souvent la création d'un système industriel dédié. Par système industriel, nous entendons l'ensemble des moyens, matériels et immatériels, utilisés pour construire l'objet (main d'œuvre, machines, etc.). Classiquement, ce moyen de production est défini après la conception du produit. En d'autres termes, les spécifications du produit permettent de définir les exigences du système industriel. Le défaut de cette approche est que le système industriel peut hériter de contraintes bloquantes qui pourraient être aisément levées en changeant la conception du produit. Par conséquent, il est intéressant de définir un cadre global permettant de concevoir à la fois le produit et son système industriel. Cet article présente un cas d'étude industriel, dans le domaine aéronautique, qui peut servir de support à l'élaboration d'un tel cadre et propose un premier prototype de modèle pour une conception simultanée de l'avion et de sa production.*

*ABSTRACT. The construction of complex objects, such as an aircraft, requires the creation of a dedicated industrial system. By industrial system, we mean all the material and immaterial means used to build the object (labor, machines, factories, etc.). Classically, this means of production is defined after that the design of the product. In other words, the specifications of the product are the requirements of the industrial system. The drawback of this approach is that the industrial system can inherit blocking constraints that could be easily removed by changing the design of the product. Therefore, it is useful to define a global framework for designing both the product and its industrial system. This article presents an industrial case study, in the field of aeronautics, which can be used to support the development of such framework and proposes a first prototype model for a simultaneous design of the aircraft and its production.*

*MOTS-CLÉS : Ingénierie dirigée par les modèles, conception simultanée produit production*

*KEYWORDS: Model-driven engineering, simultaneous conception product production*

---

## 1. Introduction

Aujourd'hui, le marché aéronautique évolue extrêmement vite, créant ainsi une désynchronisation entre, d'un côté, les cycles de développement et de vie d'un avion et, de l'autre côté, les évolutions rapides du marché. En particulier, l'émergence régulière de compagnies aériennes porteuses de nouveaux modèles d'affaire contraignent les constructeurs aéronautiques à rechercher des solutions innovantes pour permettre de réduire drastiquement la durée des cycles de développement et les coûts de production. Ces nouveaux clients demandent des alignements très rapides entre les modèles d'avions et leurs attentes, que cela soit en coûts d'exploitation comme en capacité d'évolution de l'avion durant son exploitation. La réactivité exigée ici rentre directement en conflit avec le cycle de vie des avions qui s'inscrivent eux dans des temps longs.

Par conséquent, les constructeurs aéronautiques sont à la recherche de nouvelles solutions, permettant de réduire les cycles de conception et de production tout en limitant, le plus possible, une augmentation des coûts. De par la nature industrielle du problème, le retour sur investissement est un paramètre clef de toute adoption de nouvelles méthodes. En outre, dans un marché globalisé, l'arrivée de nouveaux constructeurs oblige les constructeurs historiques à introduire plus d'innovation dans leurs produits, et dans les méthodes de conception, pour conserver leur avantage compétitif.

C'est justement à la confluence de ces problèmes que se trouve l'*architecte avion*. Dans l'industrie aéronautique, l'architecte avion a pour rôle de gérer les interactions entre les différentes composantes de l'avion, qui s'inscrivent dans des disciplines très variées (aérodynamique, sécurité, thermique, etc.), afin de répondre aux mieux aux exigences aussi bien de l'avion que de fabrication.

Ainsi, la définition d'un avion et de son système de production<sup>1</sup> est le résultat d'activités itératives de conception, où des compromis sont sans cesse effectués pour converger sur un optimum global satisfaisant à la fois les intérêts du constructeur et ceux des compagnies aériennes. Pour réaliser ces arbitrages, il est nécessaire, pour l'architecte avion, de disposer d'une vue globale et cohérente des principaux composants de l'avion et, notamment, des interactions avec le moyen de production. Or, si la partie conception et la partie industrialisation sont aujourd'hui bien maîtrisées séparément, leurs interactions restent excessivement complexes à appréhender.

Nous pensons qu'une approche Ingénierie Systèmes pourrait permettre de passer un cap, en proposant une vision plus intégrée de ses deux versants du métier d'architecte. Plus précisément, disposer de modèles conceptuels permettrait de poser clairement, et de comprendre, pour chacun des acteurs impliqués, les problèmes sous-jacents à la création d'une vision globale du produit et de son système industriel dans le cadre aéronautique. De plus, même si nous n'adressons pas le problème dans cet ar-

---

1. Par système de production nous entendons l'ensemble des moyens, matériels et immatériels, utilisés pour construire un avion (main d'œuvre, machines, usines, méthodes, outils, etc.).

ticle, des travaux ont montré la possibilité d'utiliser des solveurs logiques pour l'aide à la conception (Delmas *et al.*, 2011 ; Delmas et Polacsek, 2013). Dans la lignée de ces travaux, nous avons pour objectif, dans les travaux futurs, de faire appel à des méthodes automatiques pour pouvoir optimiser de concert la conception et l'outil industriel. Pour cela, il sera nécessaire de disposer d'un double digital de l'usine et de l'avion, double qui permettra de réaliser les opérations d'analyses et d'optimisations conjointes du produit et de son moyen de production.

Dans cet article, nous allons présenter une activité initiée chez Airbus pour accompagner le développement incrémental du programme d'avions A320 visant la montée en cadence de la chaîne de production. Cette augmentation de la cadence a pour but de répondre aux besoins des compagnies aériennes, tout en s'accompagnant de réduction des coûts récurrents de fabrication et de l'amélioration de la capacité à fournir de nouveaux services. Les travaux présentés ici sont encore au stade préliminaire. Ils représentent un effort important, de plusieurs mois, de collecte d'informations de nature très variée (documents, entretiens, plans, etc.) et de données brutes dans le cadre d'un cas d'étude concret, qui ont permis de faire émerger un modèle préliminaire, support du futur double digital.

Notre but ici est donc de présenter un problème industriel et montrer comment il a alimenté nos premières pistes de réflexions en vue de faire un cadre pour la conception simultanée, c'est-à-dire ici la conception en parallèle d'un produit et de son moyen de production. Des cadres génériques pour la modélisation conjointe de la conception et de la production existent déjà (Sprock et McGinnis, 2015) (Demoly *et al.*, 2011) (Benkamoun *et al.*, 2014), cependant, ces cadres restent de très haut niveau et sont difficiles à instancier sur un cas industriel concret. Nous avons ici fait la démarche inverse consistant à partir des données industrielles sur un cas existant et en faire émerger un cadre dédié à la pratique aéronautique. Nous espérons que notre cas d'étude pourra nourrir une réflexion plus large dans le futur.

Notons que le principe de conception simultanée entre le bureau d'étude et la production est un concept relativement ancien (Decreuse et Feschotte, 2017 ; Shenan et Derakhshan, 1994). Employée dans l'automobile, notamment dans le cadre de la logistique des éléments fournis par les sous-traitants (Göpfert et Schulz, 2013), sa mise en œuvre dans le cadre de l'étude de modifications de l'A320 pose des problèmes particuliers du fait de certaines spécificités du monde aéronautique. En effet, un avion est un objet particulièrement complexe composé de nombreux éléments requérant des opérations de fabrication souvent manuelles et faisant appel à un savoir-faire très spécifique. La conception, elle, est réalisée de manière séquentielle en considérant d'abord les exigences liées aux performances du produit (nombre de passager, consommation, etc.), puis la définition des composants majeurs de l'avion pour seulement finir par la définition des moyens de productions. De plus la réglementation aéronautique impose, au travers de la certification, des contraintes très fortes sur la conception, la fabrication et l'opération d'avion. Ainsi, ces contraintes mettent un frein aux évolutions des méthodes de conception et de production du fait des efforts nécessaires pour fournir les éléments justifiant du maintien de la conformité aux ré-

gements. Enfin les volumes de production, limités à quelques centaines d'avions par an, n'ont pas incité à revoir les modes de production qui sont essentiellement appelés à des tâches manuelles.

Dans la Section 2 de cet article, nous présenterons notre problème et nous donnerons une description du contexte industriel. Dans la Section 3, nous donnerons les concepts clés de la chaîne de production et expliquerons la démarche que nous avons suivie pour capturer cette connaissance. Nous expliciterons et motiverons notre modèle dans la Section 4 et la Section 5 sera consacrée à la conclusion.

## 2. Présentation de notre problème

### 2.1. Contexte industriel

Le cadre industriel de notre étude concerne la partie de la chaîne de production qui réalise l'assemblage des *tronçons avants* pour les avions monocouloir de la famille A320. Le tronçon avant englobe la pointe de l'avion, le poste de pilotage, et s'étend dans la cabine jusqu'au tronçon central où se trouve la jonction avec la voilure. La chaîne de production du tronçon avant est située sur le site de Saint-Nazaire et s'organise au travers de deux sous chaînes, la première dédiée à l'ensemble des assemblages dit structuraux, le corps de l'avion, et la seconde, nommée COMETE, dédiée à l'installation de l'ensemble des systèmes. Ici, ce que nous appelons systèmes correspond en fait à des éléments non structuraux tels que : l'isolation thermo-phonique, les harnais et meubles électriques, les tuyauteries d'air conditionné, etc.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la chaîne COMETE (Figure 1). Cette chaîne est constituée de 14 stations sur lesquelles sont distribuées les activités manufacturières, c'est-à-dire d'installation d'équipements sur le tronçon avant. Elle est pilotée sur un principe dit de *ligne pulsée* qui consiste à faire avancer tous les  $X$  heures le tronçon d'avion à équiper et ses outillages de station en station. Le produit arrive donc sur la station 1 où débute l'installation des équipements et sort complètement équipé sur la station 14.

Cette famille d'avion étant ancienne, sa conception n'a pas été prévue pour de fortes cadences. A cette époque, la cadence d'un avion par mois était une performance remarquable. Aujourd'hui, les cadences atteignent un rythme de 50 avions par mois pour répondre à la demande du marché. Il faut réaliser que, de par le poids de l'histoire de ce programme, les activités manufacturières sont fortement manuelles et les technologies utilisées, d'une grande fiabilité et d'un coût assez faible, n'ont quasiment pas évolué depuis les origines. De plus, les zones de travail ont conservé leur exiguïté, rendant les tâches des opérateurs particulièrement pénibles aux cadences actuelles.

Notre problème industriel consiste donc à élaborer des solutions pour atteindre des cadences de 63 avions par mois (et plus), sans introduire de changement profond dans la chaîne. Ces changements doivent être à faible impact sur la chaîne de par la volonté



**Figure 1.** Chaîne d'installation des systèmes COMETE

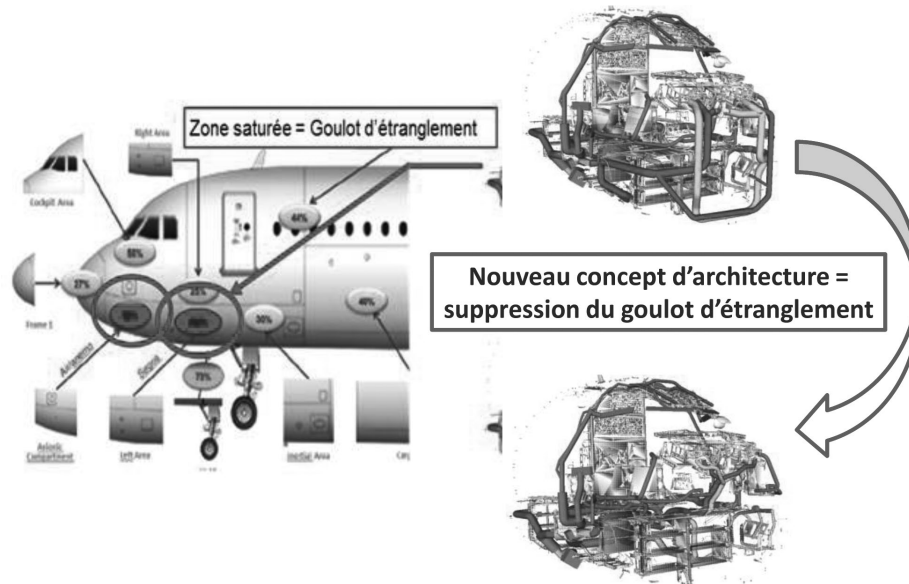
de minimiser les risques industriels. De plus, il faut éviter la solution qui consisterait à construire une nouvelle chaîne d'installation en renfort de l'existant.

Une option possible pour adapter les cadences à la demande croissante, sans impacter le moyen de production, ou presque, est de réaliser des changements dans la conception même de l'avion pour rendre les opérations manufacturières "*plus simples*". Le véritable défi est, qu'aujourd'hui, la conception n'est pas pensée en termes d'installation. Un élément à installer peut être lourd et grand, donc difficilement manœuvrable, mais peut devoir être installé dans une position non ergonomique pour un opérateur, par exemple les bras en l'air. Si nous choisissons de déplacer cet élément dans un endroit plus accessible, ou carrément de changer cet élément, nous pouvons espérer des gains dans le temps d'installation. Pour réaliser cela, il est nécessaire que l'architecte dispose d'une vue précise des conditions d'installation dès les phases de conception.

Afin de répondre à ces challenges, nous avons décidé de mettre en place une activité de conception simultanée entre le bureau d'études et la production. Le but de cette conception simultanée est de pouvoir itérer rapidement entre des propositions d'évolution de la définition de l'avion et l'évaluation des bénéfices attendus côté chaîne de production (réduction du cycle d'assemblage). Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier et de caractériser les interactions entre la conception de l'avion et son système de production.

## **2.2. Un problème d'abstraction**

La conception des avions de la famille A320 a suivi un développement très traditionnel, en cascade, partant d'exigences de très haut niveau raffinées en exigences de plus bas niveau et traduites en spécifications. Ces étapes de conception datant, peu d'outils informatiques ont été utilisés que cela soit pour l'ingénierie comme pour la production.



**Figure 2.** Concept d'architecture permettant de supprimer un goulot d'étranglement

Dans cette approche séquentielle, en cascade, les phases d'avant-projet se consacrent exclusivement à la spécification générale et au dimensionnement global de l'avion. Elles consistent en une concertation entre les architectes avion, les bureaux d'études et les entreprises nationales européennes qui constituent le *Groupement d'Intérêt Economique* (GIE) Airbus. Suite à cette étape, vient la phase d'études générales qui, à partir de l'architecture du nouvel avion, définit les principaux lots à développer par les différentes entreprises du GIE. A partir de là, débute la conception avec la définition détaillée des constituants majeurs (fuselage, poste de pilotage, ailes, empennages, systèmes, trains d'atterrissage, interface moteur). C'est sur la base de cette conception détaillée de l'avion que commencent les phases de définition des moyens de production industrielle. Par conséquent, la conception des moyens de fabrication est complètement désynchronisée par rapport aux activités d'ingénieries.

Avec cette approche, la conception et la définition de l'avion sont figées avant celles du système de production. En outre, l'organisation industrielle impose une répartition des activités prédéfinie, non modifiable (car contractuelle), laissant peu de place à l'optimisation du produit ou du système industriel.

Concernant la définition des moyens de production industrielle, pour définir les étapes d'assemblage, identifier les pièces à usiner et à assembler, les outillages, quantifier les besoins en personnel de fabrication et ordonnancer la production, il est actuellement nécessaire de disposer d'une définition très précise de l'avion. Or, la piste d'amélioration privilégiée dans cette étude consiste à pouvoir anticiper, dès les pre-

mières étapes de conception, l'impact d'une architecture avion, d'une conception d'avion, sur la chaîne de production.

Prenons l'exemple concret suivant. Après étude sur la chaîne d'assemblage, il apparaît qu'un goulot d'étranglement pour l'augmentation de la cadence est liée à l'installation d'une conduite de conditionnement d'air (voir Figure 2). Une partie de cette conduite passe dans une zone très exigüe, ce qui rend l'installation particulièrement difficile. Les architectes proposent de modifier la "route" de cette conduite, son cheminement dans l'avion, et de la faire passer par une zone plus facile d'accès pour les opérateurs. Pour connaître son impact sur la chaîne de production, il est nécessaire aujourd'hui de repasser par le cycle complet : avant-projet, études générales, conception détaillée et définition industrielle.

En d'autres termes, une amélioration de l'architecture de l'avion visant à augmenter les cadences doit passer par :

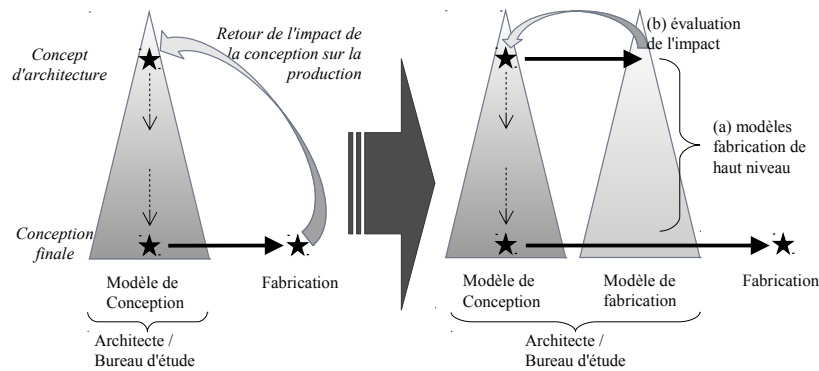
- 1) l'identification des goulots d'étranglements en production et de leurs causes ;
- 2) l'identification et l'analyse des instructions d'assemblage pour construire les liens entre opérations d'assemblage, durée, pièces, zones avion, nombre d'opérateurs ;
- 3) l'élaboration d'un nouveau concept d'architecture visant à supprimer le goulot d'étranglement (saturation de la zone de travail, tâches trop complexes, etc.) ;
- 4) l'analyse détaillée par l'équipe production des impacts sur les instructions, la création d'un nouveau séquençage et le calcul de la nouvelle cadence de ligne (fait principalement à la main), pour valider ou non les améliorations ciblées sur le cycle de production.

Ce processus est trop long par rapport à la réactivité exigée aujourd'hui. Alors que le travail de conception de l'avion commence avec des concepts généraux correspondant à des niveaux d'abstraction supérieurs il est nécessaire, pour connaître l'impact sur le moyen de production, de disposer de la définition du produit final. En effet, l'architecte considère des éléments comme une aile ou un train d'atterrissage alors que la fabrication manipule vis, écrou, câbles, etc. Ce processus, en plus d'être consommateur de temps, peut demander un travail qui s'avère parfois inutile quand la modification n'a pas les effets positifs escomptés sur la chaîne. Dans ce cas-là, le travail effectué est pure perte.

Pour pouvoir atteindre notre objectif de faire de la conception simultanée, nous devons pouvoir faire cette évaluation d'impact beaucoup plus rapidement, en restant au bon niveau de granularité. Il faut donc créer des niveaux d'abstraction du moyen de production afin de pouvoir calculer l'impact sur la production au même niveau d'abstraction que celui utilisé dans la conception.

### **2.3. Notre objectif**

Comme nous l'avons vu, de par les raffinements successifs nécessaires, il est excessivement coûteux d'évaluer l'impact de nouvelles propositions d'architecture sur la



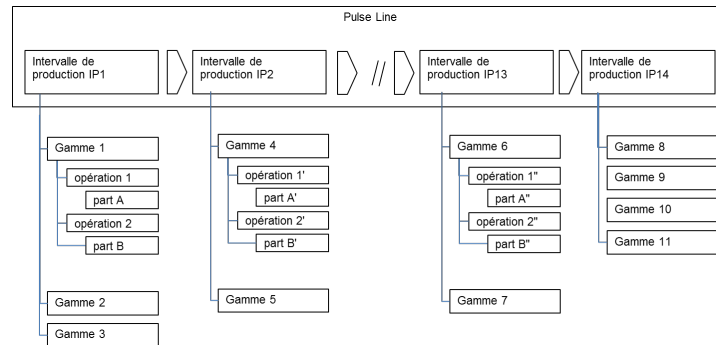
**Figure 3.** Vers un modèle enrichi pour l'architecte avion

production. Pour réduire les temps, et les coûts, de ce calcul d'impact il est nécessaire de recourir à des modèles d'abstraction de l'avion et de son système de production (voir Figure 3). De plus, l'ensemble des données manipulées aujourd'hui sont d'une granularité extrêmement fine, rendant impossible une analyse à un au niveau d'abstraction, comme c'est le cas pour un proposition de concept d'architecture. Il est donc nécessaire d'agréger ces données en des ensembles plus abstrait. Par conséquent, nous visons à terme les objectifs suivants :

(a) pouvoir raisonner au même niveau d'abstraction entre conception et fabrication. Pour ce faire, nous devons disposer d'un moyen permettant de traduire une proposition de conception en objets d'un modèle, de haut niveau d'abstraction, faisant la jonction entre conception et fabrication. Nous devons donc disposer d'abstractions de haut niveau du modèle de production au même titre que les modèles produit utilisés en phase de conception ;

(b) pouvoir faire de l'estimation de performance du moyen de production, en d'autres termes, pouvoir calculer une estimation de la cadence. Sur le modèle de (Delmas *et al.*, 2011), nous voulons pouvoir calculer l'enchaînement optimal des actions, toujours à haut niveau d'abstraction, nécessaire à la production pour en déduire une cadence de production. Les modèles définis en (a) doivent donc pouvoir servir de support à de la simulation et, plus précisément, à un outil de recherche opérationnelle qui permettra de faire l'ordonnancement (Graham, 1966).

Notre objectif à long terme est de disposer d'une chaîne complète de méthodes et d'outils permettant d'évaluer les propositions d'architecture en terme d'impact sur la production. Notons que cette approche ne se bornerait pas à calculer les séquences de montage de l'avion, mais pourrait, in fine, déduire le dimensionnement idéal de l'outil de production. Pour le moment, nous ne nous focalisons que sur la partie (a), c'est à dire sur l'élaboration de modèles de fabrication de haut niveau et leurs correspondances avec les modèles de conception.



**Figure 4.** Structure de la chaîne d’installation COMETE

### 3. La production : un monde d’opérations

La modélisation du moyen de production nécessite une compréhension détaillée des règles qui le régissent. La chaîne de production fait intervenir de nombreuses compétences et de nombreux métiers, parfois très éloignés du monde de la conception. Compte tenu de l’ancienneté du programme A320, nous nous retrouvons avec une documentation peu digitalisée, un savoir humain considérable qui n’est parfois partagé qu’oralement, voire qui n’est qu’implicite. Par conséquent, il nous a fallu aller régulièrement sur le site de Saint-Nazaire pour interviewer les différents acteurs, comprendre et questionner les pratiques et interpréter les informations de production.

Concernant la compréhension de la chaîne de production et nos besoins, nous avons pu isoler six grands concepts (voir Figure 4) :

**Pièces** : éléments physiques manipulés par l’opérateur et montés sur l’avion.

**Opération SOI<sup>2</sup>** : liste les pièces à manipuler et à installer sur avion. C’est une liste des tâches à exécuter par l’opérateur, dans une séquence imposée, pour installer des pièces avion.

**Gamme** : regroupement d’opérations relatives à un ensemble de pièces interconnectées. La gamme décompose le travail à faire (par exemple “*installer un harnais électrique dans le poste pilotage*”) en opérations (telles que : positionner le harnais derrière la console, fixer un support, connecter le harnais au ordinateur, etc.).

**Intervalle de Production (IP)** : espace temporel, correspondant au temps qui cadence la chaîne, pendant lequel un certain nombre de gammes de montage sont à exécuter. Par abus de langage, l’IP est aussi utilisé pour désigner la station, l’espace physique sur lequel est posé le tronçon de l’avion et sur lequel sont organisés tous les éléments nécessaires, outils et pièces. Ces éléments sont listés dans les gammes associées à l’IP.

**Ligne pulsée** (pulse line) : composée de stations (emplacements physiques correspondant à chaque IP), elle livre les tronçons à une cadence donnée. Toutes les *X* heures, le tronçon de l’avion passe à la station suivante.

2. SOI pour *Standard Operating Instruction*

**Zone** : cette notion est relative à la définition du produit final. Les zones sont des espaces prédéfinis dans l'avion.

A cela vient s'ajouter un ensemble de contraintes temporelles. Pour le séquençage des gammes, chaque gamme est renseignée par des informations de précédences, correspondant à des contraintes techniques de nature multiples. Pour une gamme  $g_1$ , la précedence correspond à la liste des gammes qui doivent absolument être terminées avant de commencer  $g_1$ .

A ce jour le séquençage de l'ensemble des gammes, induit par la précedence, est décrit dans un diagramme de PERT<sup>3</sup> construit par un Agent d'Evaluation du Temps. Ce travail est réalisé manuellement, sans automatisation.

Dans notre cas d'étude, l'ordre de grandeur de la volumétrie traitée est de 500 gammes qui correspondent à 3500 opérations de montage de 10000 pièces (hors quincaillerie).

Pour commencer notre étude, nous avons compilé les différentes sources d'informations (base de données d'ingénierie, de production, agents de production et architectes industriels, documentation) à notre disposition et avons retenu :

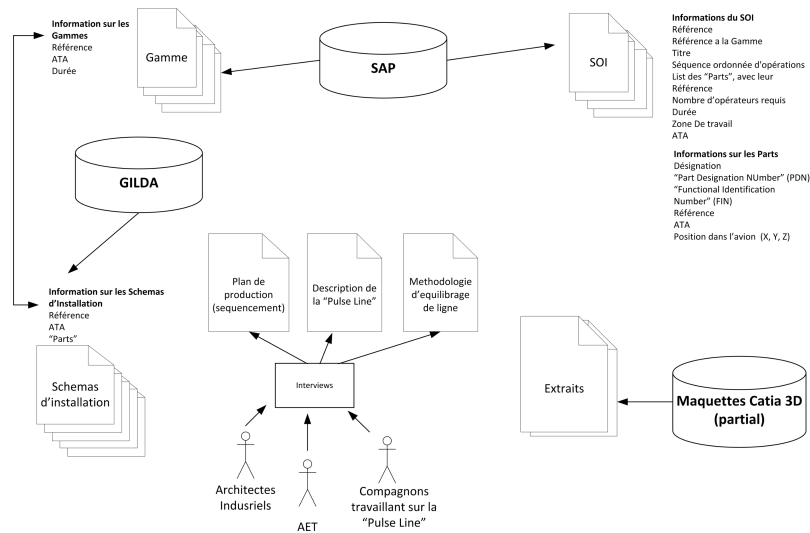
- un plan de production sous forme de fichier MS Project, contenant le diagramme de PERT des gammes ;
- les gammes sous forme de document pdf, contenant non seulement les opérations mais aussi les zones d'interventions sur la section en cours d'assemblage, la liste des pièces à installer et le nombre d'opérateurs requis pour l'assemblage d'une section d'avion ;
- la liste, sous forme de fichiers de tableurs, des pièces à installer sur les différentes IP de la ligne pulsée (obtenue à partir de requêtes du système d'information de production).

L'étape suivante a consisté à analyser ces sources d'informations et, identifier les données pertinentes pour notre étude. Ensuite, nous avons élaboré un premier modèle de données établissant les liens entre ces données et réalisé une base de données pour les stocker. Pour finir nous avons analysé en détails et extrait de chaque gamme les données que nous avons saisies (manuellement) dans notre base de données (voir Figure 5).

Après analyses de toutes ces informations, nous pouvons conclure que nous avons deux mondes très différents avec, d'un côté, la conception, qui est un monde que nous pouvons qualifier de statique, très descriptif, avec des éléments, des positions et des tailles. De l'autre côté, la fabrication, qui est un monde de nature plus dynamique, constituée d'actions, d'opérations, comme visser un élément, et de durée.

---

3. PERT pour Program Evaluation and Review Technique, c'est un diagramme qui permet de déterminer le chemin critique qui conditionne la durée minimale d'une séquence d'actions.



**Figure 5. Sources d'information**

#### 4. Vers un modèle pour l'architecte avion

##### 4.1. Faire un lien entre un monde d'opération et un monde de description

Afin de disposer d'un modèle permettant à l'architecte de réaliser une conception simultanée de l'avion et de sa production, il nous faut créer une correspondance entre des éléments dynamiques, les opérations de fabrication, et des éléments statiques. Prenons l'exemple simpliste d'une tuyauterie, dans le monde de la conception, elle correspond à une définition statique précise (géométrie, matériaux, etc.) et, dans le monde de la fabrication, aux opérations nécessaires à son installation. Le concept même de l'objet tuyauterie est finalement la passerelle entre ces deux mondes. Ainsi, les éléments physiques, constitutifs de l'avion, sont pour nous la zone de contact entre ces deux univers.

Nous pourrions réaliser cette jonction au moyen d'un couplage, comme des règles de transformation, entre deux modèles distincts (Herrmann *et al.*, 2007). Nous n'avons pas choisi cette solution et ce pour trois raisons. Premièrement, il existe un risque non négligeable d'une dérive entre les deux modèles. En effet, il est envisageable, qu'aux travers des évolutions futures dans la vie de l'entreprise, les modèles changent sans que leur couplage ne soit mis à jour, voire qu'ils deviennent complètement incompatibles entre eux. La deuxième raison est plus idéologique. Que cela soit en conception, comme en fabrication, il n'y a qu'un seul et unique avion : on ne fabrique pas un autre avion que celui conçu. Dès lors, il est préférable de montrer, au sein de l'entreprise, un modèle unique de l'avion qui peut être partagé par tous, plutôt que des modèles hétérogènes qui donnerait à penser que l'objet réel n'est pas exactement le même. Pour finir,

la troisième raison est liée à notre but. Toute notre démarche vise à permettre à l'architecte d'appréhender les interactions entre l'architecture et la production dans une vue cohérente et unique. Il ne s'agit donc pas d'avoir deux modèles distincts, conception et production, mais bien un modèle de l'avion qui dispose d'une partie conception et d'une partie moyen de production.

Cependant, nous ne voulons pas non plus fusionner de façon inextricable le modèle de production et celui de conception. Nous devons pouvoir envisager que, dans le futur, les modèles à chaque univers puissent évoluer, sans que chaque évolution de l'un impacte nécessairement l'autre. Notre idée est donc de définir un modèle, muni de deux parties, avec un nombre limité d'objets partagés entre les parties. Dans ce modèle, les objets partagés définissent la "zone de contact", la liaison, entre la partie production et la partie conception. Ainsi, chaque métier peut faire évoluer son modèle sans impacter l'autre du moment qu'il ne touche pas aux objets de liaisons.

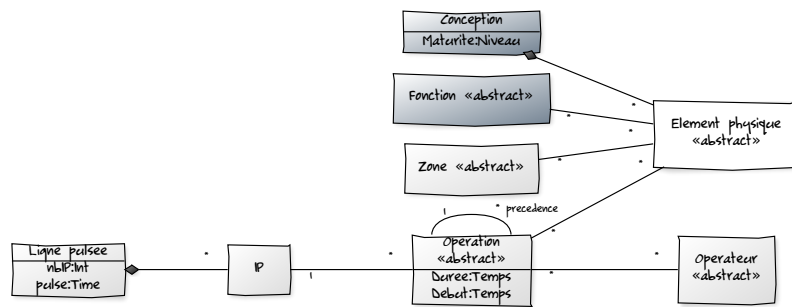
Parallèlement, pour pouvoir travailler dans les premières phases du cycle de développement, quand les pièces ne sont pas encore connues ou définies en détails, il est nécessaire de travailler à un haut niveau d'abstraction. Aujourd'hui, cette vision existe déjà dans la conception. Avant de se décliner en pièces, l'avion est vu au travers de grands ensembles de composants. Ces justement ces différents niveaux d'abstraction, qui n'existent pas du côté fabrication, que nous cherchons à caractériser.

Dans la lignée de (Wisnosky et Vogel, 2004) avec les cadres d'architectures, nous avons choisi une approche en vues, où chaque vue correspond à une couche d'abstraction. Par contre, contrairement aux approches macromodèles (Salay *et al.*, 2009) qui sont composées de couches d'abstraction avec un système explicitant le passage d'un niveau à un autre, nous avons pour le moment privilégié la simplicité, en considérant un modèle abstrait de haut niveau qui vient se spécialiser dans des classes concrètes pour chaque niveau d'abstraction.

#### **4.2. Notre modèle**

Une première ébauche de notre modèle conceptuel abstrait est présentée Figure 6. Ce modèle abstrait doit se spécialiser dans chaque vue, dans chaque niveau d'abstraction de la conception. Pour des raisons de lisibilité, nous avons choisi de faire figurer que les attributs et les classes les plus importantes. De plus, dans cet article, nous ne rentrerons pas dans les détails techniques de la conception et des liens avec les modèles 3D, ni dans les détails du moyen de production (source d'énergie, qualification et disponibilité de la main d'œuvre, etc.).

Nous avons fait figurer en haut de la figure les concepts relatifs à la conception et en bas ceux relatifs à la production. Le pont entre les deux mondes étant l'avion physique, représenté ici par la classe abstraite *Element physique*. Cette classe se spécialise aux travers des classes concrètes *Pièce* (voir Figure 7), pour un modèle de bas niveau, et en *Sous-élément* pour un modèle associée à la conception de haut niveau. La notion de Sous-élément est un concept que nous avons défini dans cette étude. Un



**Figure 6.** Prototype de diagramme UML de classe générique pour un modèle de conception simultanée aéronautique

Sous-élément est un ensemble de pièces qui a une pertinence propre à un stade du processus de production (résultat intermédiaire d'opérations d'assemblage). Un ensemble de sous-éléments définit un composant de l'avion qui correspond à une partie de l'avion (voilure, tronçon avant) fabriquée par différents sites de production et livré pour assemblage aux usines qui réalisent l'assemblage final.

Du côté conception, une proposition d'architecture correspond à un objet de type *Conception* auquel est associé un niveau de maturité et qui est composé d'éléments physiques. Chaque objet Élément Physique est associé à une *Fonction* avion. Ces fonctions correspondent à la vie opérationnelle de l'avion : générer de l'électricité, stocker le carburant, fournir les moyens de communication etc. Là encore, ces fonction vont se spécialiser :

- à haut niveau d'abstraction, par des fonctions qui correspondent aux services rendues aux utilisateurs de l'avion (pilotes, passagers, personnel cabine, etc.), sans présumer de la façon dont ces fonctions sont réalisées,
- au niveau le plus détaillé, par des *Fonctions élémentaires* qui sont toutes les fonctions techniques nécessaires pour réaliser les fonctions avion et reflétant une solution technique.

Du côté production, nous avons deux classes concrètes qui représentent la chaîne de production : la *Ligne pulsée* et l'*IP*. La ligne pulsée a un temps de pulse, dit *TAKT*, qui correspond à la cadence, et un nombre d'*IP*. Sur chaque *IP* sont réalisées des Opérations. Une opération correspond à des actions que réalise un opérateur sur l'*IP*. Une opération a une durée et une date de début. A haut niveau d'abstraction, ces opérations vont se spécialiser sous la forme d'action à très gros grain qui consiste à équiper l'avion avec un Sous-élément sans rentrer dans les détails. Au niveau le plus fin, ces opérations correspondent à celle décrites en section 3 dites *Operation SOI*.

Pour finir, nous avons sur notre modèle générique une classe abstraite *Opérateur*, qui correspond à l'acteur qui réalise l'Opération, et *Zone* qui correspond à l'emplacement de l'Element physique.

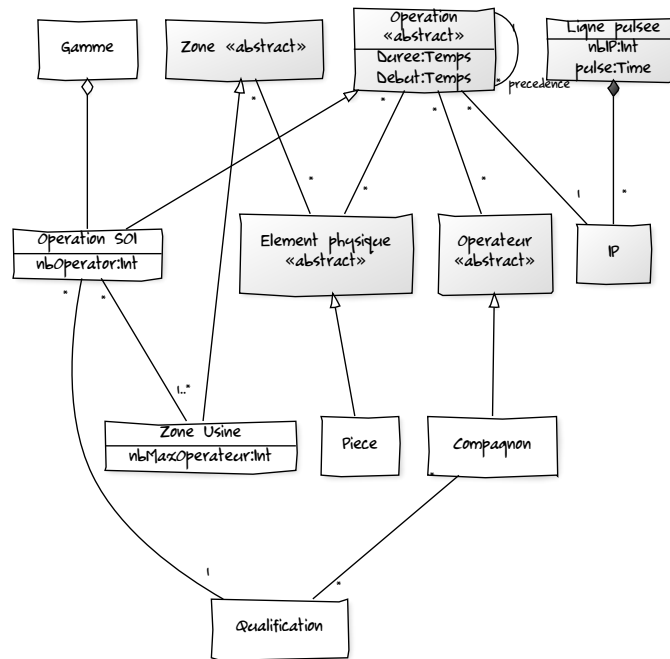


Figure 7. Diagramme UML de classe spécialisé, partie fabrication

Nous donnons Figure 7, un exemple de spécialisation de la partie production de notre modèle abstrait. Ici, le modèle actuel de conception est composé de descriptions fonctionnelles et physiques de l'avion. Chaque Pièce est décrite sous une forme 3D et est liée à des Opérations SOI et les informations concernant ces opérations sont décrites en détail dans les Gammes, documents destinés aux opérateurs devant réaliser les opérations de montage d'un ensemble de pièces au sein d'une zone sur une station. Les opérateurs qui réalisent les tâches sont des Compagnon, il n'y a pas de robot dans cet exemple, et chaque compagnon à des Qualification. La Zone est ici spécialisée en Zone Usine qui identifie l'endroit où les compagnons devront intervenir.

Si nous reprenons notre exemple du concept d'architecture de la conduite de conditionnement permettant de supprimer un goulot d'étranglement Section 2.2, nous avons les éléments suivants :

- la conduite de conditionnement d'air est de type Sous-élément et appartient à une vue de haut niveau ;
- les sections de tuyaux la constituant sont des objets de type Pièce. C'est au travers de ces objets que se fait le lien entre la conception (définition du tuyaux, forme, matériaux, etc.) et la production. Ils sont associés aux objets de type Opérations SOI, qui décrivent les opérations nécessaires pour l'installation de la pièce ;

- la pointe avant est une zone de haut niveau qui va se décomposer en objets de type Zone ;
- la modification de la route de la conduite de cheminement d'air va entraîner le déplacement des opérations nécessaires à son installation dans une autre zone de l'avion. Ces opérations peuvent être décrites de manière macroscopique lors des études d'architecture et de manière détaillée (classe Opération SOI) pour être fournies aux opérateurs de production.

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un cas d'étude industriel, qui montre, pour la conception d'objets<sup>4</sup> complexes tel qu'un avion, l'importance de disposer d'un cadre de réflexion et de conception englobant aussi bien la dimension du produit comme celle de son système industriel. L'approche modèle permet de poser clairement les différents concepts, d'analyser le problème et d'avoir un socle commun pour faciliter la communication entre les équipes conception et fabrication. De plus, notre modèle est une première étape vers un double digital permettant, in fine, de réaliser des études d'impact d'architecture sur la production. Après une étude précise de la réalité de terrain de notre cas d'étude, qui a mobilisé l'essentiel de nos efforts jusqu'à présent, nous avons donné une première ébauche de ce qui sera notre modèle pour une conception simultanée de l'avion et de sa production.

Dans les travaux futurs, nous allons devoir affiner la partie production de notre modèle afin de pouvoir réaliser un simulateur de la chaîne production pouvant permettre à l'architecte d'estimer des cadences en fonction de choix de conception. Pour ce faire, nous pensons utiliser des outils issus de la recherche opérationnelle tels que (Pralet et Verfaillie, 2013). Par ailleurs, il pourrait être intéressant de faire un lien entre notre modèle statique, qui décrit le produit et le système de production, avec le processus de fabrication qui relève d'une vue dynamique. Pour cela, nous pourrions voir du côté de travaux qui cherchent à unifier ces deux vues aux travers de diagrammes SysML (Batarseh et McGinnis, 2012). Dans un tout autre registre, dans la lignée des travaux de (Bruno *et al.*, 2015), nous pourrions chercher à utiliser une ontologie orientée fabrication afin de permettre aux architectes d'avoir des raisonnements de haut niveau d'abstraction sur des données très détaillées, en établissant le lien entre la vision éléments physiques et les fonctions réalisées.

## 6. Bibliographie

Batarseh O., McGinnis L. F., « SysML to Discrete-event Simulation to Analyze Electronic Assembly Systems », *Proceedings of the 2012 Symposium on Theory of Modeling and Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium*, TMS/DEVS '12, San Diego, CA, USA, 2012, Society for Computer Simulation International, p. 48 :1–48 :8.

---

4. Nous employons ici le terme d'objet plutôt que système, car nous voulons mettre en avant le caractère usinable, de système qui donne lieu à une fabrication industrielle.

- Benkamoun N., ElMaraghy W., Huyet A.-L., Kouiss K., « Architecture Framework for Manufacturing System Design », *Procedia CIRP*, vol. 17, 2014, p. 88 - 93.
- Bruno G., Antonelli D., Villa A., « A Reference Ontology to Support Product Lifecycle Management », *Procedia CIRP*, vol. 33, 2015, p. 41–46.
- Decreuse C., Feschotte D., « Ingénierie simultanée », *Techniques de l'ingénieur Stratégies de conception pour l'innovation*, vol. base documentaire : TIB127DUO., 2017, Editions T.I.
- Delmas R., Doose D., Pires A. F., Polacsek T., « Supporting Model Based Design », Bellatreche L., Pinto F. M., Eds., *Model and Data Engineering - First International Conference, MEDI 2011, Óbidos, Portugal, September 28-30, 2011. Proceedings*, vol. 6918 de *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2011, p. 237–248.
- Delmas R., Polacsek T., « Formal Methods for Exchange Policy Specification », Salinesi C., Norrie M. C., Pastor O., Eds., *Advanced Information Systems Engineering - 25th International Conference, CAiSE 2013, Valencia, Spain, June 17-21, 2013. Proceedings*, vol. 7908 de *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2013, p. 288–303.
- Demoly F., Yan X., Eynard B., Rivest L., Gomes S., « An assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning », *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 27, n° 1, 2011, p. 33–46.
- Göpfert I., Schulz M., « *Logistics Integrated Product Development in the German Automotive Industry : Current State, Trends and Challenges* », p. 509–519, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- Graham R. L., « Bounds for certain multiprocessing anomalies », *The Bell System Technical Journal*, vol. 45, n° 9, 1966, p. 1563-1581.
- Herrmann C., Krahn H., Rumpe B., Schindler M., Völkel S., « An Algebraic View on the Semantics of Model Composition », Akehurst D. H., Vogel R., Paige R. F., Eds., *Model Driven Architecture- Foundations and Applications, Third European Conference, ECMDA-FA 2007, Haifa, Israel, June 11-15, 2007, Proceedings*, vol. 4530 de *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2007, p. 99–113.
- Pralet C., Verfaillie G., « Dynamic Online Planning and Scheduling Using a Static Invariant-Based Evaluation Model », Borrajo D., Kambhampati S., Oddi A., Fratini S., Eds., *Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Automated Planning and Scheduling, ICAPS 2013, Rome, Italy, June 10-14, 2013*, AAAI, 2013.
- Salay R., Mylopoulos J., Easterbrook S. M., « Using Macromodels to Manage Collections of Related Models », van Eck P., Gordijn J., Wieringa R., Eds., *Advanced Information Systems Engineering, 21st International Conference, CAiSE 2009, Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2009. Proceedings*, vol. 5565 de *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2009, p. 141–155.
- Shenas D. G., Derakhshan S., « Organizational approaches to the implementation of simultaneous engineering », *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 14, n° 10, 1994, p. 30–43, MCB UP Ltd.
- Sprock T., McGinnis L. F., « Analysis of Functional Architectures for Discrete Event Logistics Systems (DELS) », *Procedia Computer Science*, vol. 44, 2015, p. 517 - 526.
- Wisnosky D. E., Vogel J., « DoDAF Wisdom : A Practical Guide to Planning », *Managing and Executing Projects to Build Enterprise Architectures Using the Department of Defense Architecture Framework (DoDAF)*, , 2004.