

Application de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le développement d'une avionique intégrée de microsatellite

Ing. A. BILOCQ
Ir T. DELAITE
PIERRARD – Virton

L'objectif de cet article est de démontrer l'utilité de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le secteur spatial. La méthodologie permet de développer simultanément un produit, une unité modulable pour microsatellite dans notre cas, et son procédé de fabrication tandis que les Smart Technologies permettent d'automatiser un travail réalisé de manière manuelle avant ce projet.

Mots-clefs : Lean 3P, Smart Technologies, Microsatellites

The purpose of this article is to demonstrate the utility of Lean 3P methodology and Smart Technologies in the space sector. The methodology makes it possible to simultaneously develop a product, a modular unit for microsatellite in our case, and its manufacturing process, while Smart Technologies could automated a job done manually before this project.

Keywords : Lean 3P, Smart Technologies, Microsatellites

1. Introduction

Le but de ce travail est de démontrer l'utilité de la méthodologie Lean 3P¹ et des Smart Technologies² dans le processus de développement d'une cellule d'assemblage, intégration et de tests dans le cas d'une avionique intégrée de microsatellite. Tout d'abord, la méthodologie va permettre de définir rapidement le produit et son procédé de fabrication tandis que les Smart Technologies vont permettre d'optimiser la cellule de production pour passer d'une fabrication entièrement manuelle à une fabrication automatisée. Ensuite, la combinaison des deux permet de définir le processus idéal pour l'entreprise au niveau du capital, des coûts d'opérations et de son efficacité.

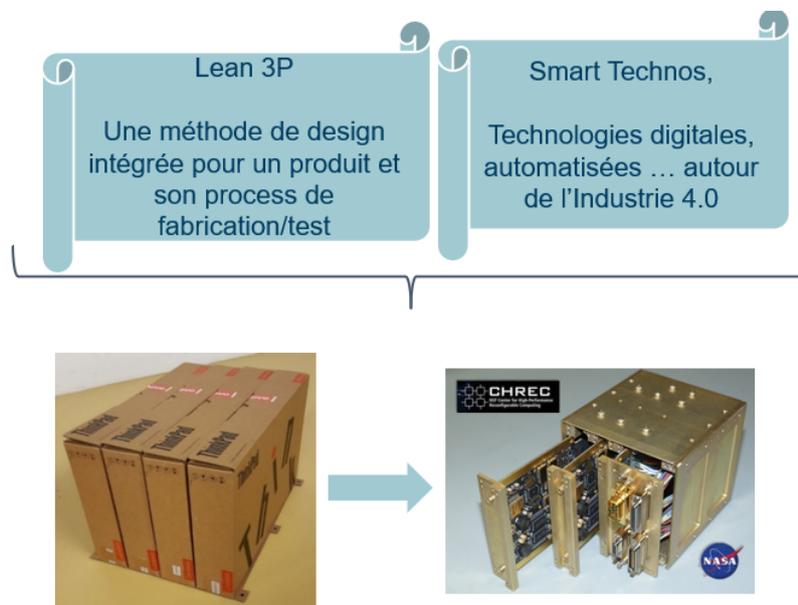


Figure 1 – Utilisation de la méthodologie Lean 3P et des Smarts Technologies pour le passage d'un prototype en carton à un produit final.

La figure 1 fait le lien entre les différentes étapes à mettre en oeuvre. Premièrement, un prototype du produit est réalisé grâce à la méthodologie. Deuxièmement, en combinant cette dernière avec les Smart Technologies, un procédé de fabrication optimal est établi pour réaliser le produit.

1. 3P : Production, Préparation, Processus

2. Dans le contexte imposé par l'entreprise, elles définissent les technologies digitales et automatisées induites par l'industrie 4.0.

1.1. Méthodologie Lean 3P

La méthodologie [1] propose le développement d'un produit et de son processus de fabrication de façon **simultanée** durant ce qui s'appelle le **Lean 3P Event**. Ce dernier se déroule sur une période d'une semaine par trois équipes pluridisciplinaires composées de 8 personnes. Dans le cadre de ce travail, l'événement est réalisé par une seule personne dans un délai de deux mois. Il se déroule en quatre phases :

- L'information : phase de recherche sur le produit à concevoir et son procédé de fabrication. Les informations recueillies viennent soit de l'expérience de l'entreprise soit de ce qui se fait sur le marché ;
- L'innovation : phase de développement d'alternatives par rapport aux attributs du produit ainsi que le processus. Sept alternatives sont ainsi considérées et notées en fonction de critères Lean comme l'espace requis, la valeur ajoutée à l'opérateur, etc. A la fin de cette étape, le produit et le diagramme des fonctions pour le réaliser sont fixés. Finalement, trois processus alternatifs sont définis et partagés entre les différentes équipes ;
- Le prototypage : les trois processus définis au point précédent sont développés et réalisés avec des matériaux peu coûteux comme du carton. En effet, cela permet de modifier et ajuster les erreurs rapidement à moindre frais ;
- L'optimisation : phase d'évaluation des prototypes, un processus hybride est déterminé en fonction des points forts des autres prototypes.

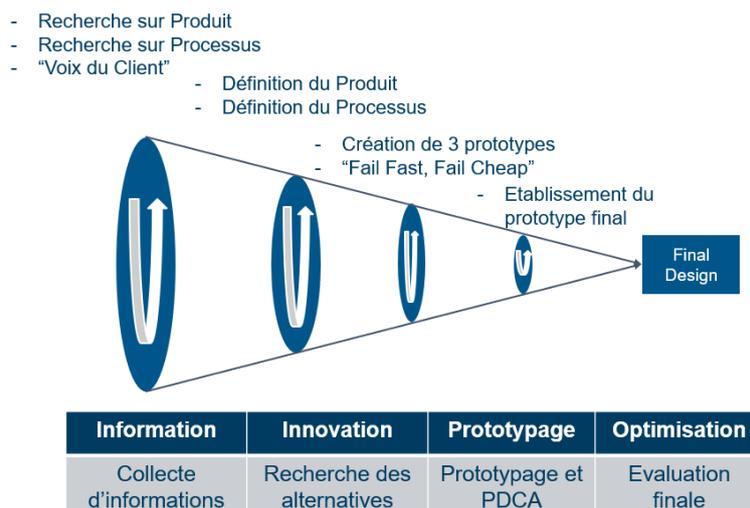


Figure 2 – Phases de la méthodologie Lean 3P [1]

1.2. Contexte

Dans la cadre du développement d'une nouvelle plateforme de microsattellites, l'entreprise Luxspace [2], membre du groupe OHB [3], ambitionne de produire des satellites abordables, adaptables et modulables en fonction de la mission, rapide à lancer sur le marché et permettant une production en série.

Pour le moment, l'entreprise conçoit ses satellites de façon "artisanale". Chaque produit est assemblé manuellement et est unique en son genre. En outre, chaque étape de fabrication est assurée par un ingénieur, du simple vissage, aux tests finaux. Pour permettre une mise sur le marché rapide et une production en série, l'objectif est donc double en matière de temps et d'argent.

Il faut, dans un premier temps, réduire les coûts non-récurrents en développant rapidement le produit ainsi que le procédé de fabrication. En effet, l'entreprise a montré qu'une de ses difficultés est le passage à la production. Les ingénieurs en charge de la conception du produit ne pensent pas forcément au moyen de le produire et cela entraîne des ralentissements, donc une hausse des coûts. Dans un deuxième temps, réduire les coûts récurrents en commençant à développer les moyens de production de l'entreprise. Plus le temps de production d'une unité est réduit, plus le bénéfice est intéressant pour l'entreprise.

Pour résumer, le tableau 1 reprend l'état des lieux initial au début du projet et ce qui est ambitionné par le travail.

	Initial	Final
Produit	Idée relativement floue	Produit établi
Fabrication	Inexistante pour le produit	Définition de chaque étape
Production	Entièrement manuelle Ingénieur à chaque étape Aucune production en série	Automatisée Opérateur et chargé de la qualité Production en série

Tableau 1 – Etats des lieux initial et final reprenant le produit, son procédé de fabrication et la ligne de production de l'entreprise.

2. Information

2.1. Unité modulaire

Une unité modulaire est composée de plusieurs modules dont le nombre est variable en fonction de la mission du microsatellite. L'unité en question gère la communication et la navigation. Il est possible de décomposer l'unité en trois niveaux [4] :

- L'unité : elle comporte tous les modules et les connexions nécessaires à la communication des équipements électroniques. Comme il est possible de le voir sur la figure 3, l'unité peut être soit un châssis fixe avec un nombre de modules défini, soit un châssis modulaire défini par les modules eux-mêmes ;

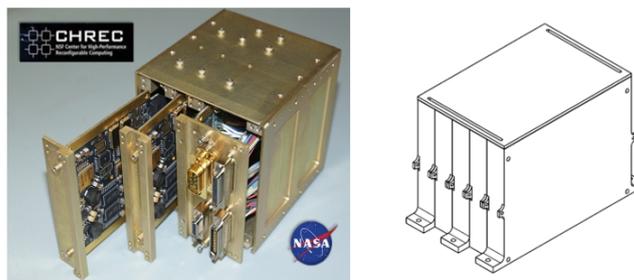


Figure 3 – A gauche, une unité à châssis fixe ; à droite, une unité à châssis modulaire [4]

- Le module : contient l'équipement électronique. Les dimensions des modules sont égales excepté pour la hauteur. Cette dernière peut varier en fonction du contenu du module ;



Figure 4 – A gauche, un module "avec oreilles", à droite, un module sans "oreilles" [5]

- Le contenu : Le type d'équipement électronique, soit une PCB, soit un composant électronique soit mixte.



Figure 5 – Différents types d'équipement possibles pour l'unité avionique [5]

Le tableau 2 reprend la totalité des attributs de l'unité avionique intégrée définis lors du processus de recherche sur le produit et les informations récoltées par le client ³. Tous ces attributs devront être pris en compte lors de l'établissement du diagramme des fonctions dans la phase d'innovation.

Fonction	Attributs	Données
Unité modulable	Nombre de modules	Dépend de la mission
Adaptable	Type de module	Possible redondance
Châssis	Fixe, modulable	/
Empilement	Horizontal, vertical, hybride	/
Base commune	Commune, divisée	Dépend de l'empilement
Connexion interne	Câbles, carte mère	Carte mère
Forme	Avec/sans oreilles	Sans oreilles
Connecteurs	Nombre, position	2 , sur côtés opposés
Contenus	Equipement, PCB	PCB
Châssis du module	Ouvert, fermé	Dépend du module
Hauteur du module	Hauteur	/
Côtés utilisés de la PCB	Un ou deux	Deux
Fonction	Une, plusieurs	Plusieurs
Carte fille	Oui, non	Dépend de la PCB
Câbles	Rigide, flexible	/

Tableau 2 – Différentes caractéristiques de l'unité avionique et les attributs fixés par l'entreprise [4] [5]

3. En l'occurrence, dans ce cas-ci, l'entreprise elle-même.

2.2. Cellule de production

Une des contraintes de ce projet est la production en série du satellite comme mentionné dans la section 1.2.. Au niveau spatial, aucune maintenance n'est possible lorsque le satellite est placé en orbite. Pour être certain de son bon fonctionnement, les différents composants et ensuite le satellite passent par plusieurs modèles de développement [6] avant la conception finale :

- *Structural Model* : permet de qualifier la structure mécanique ;
- *Engineering Model* : permet de qualifier l'électronique ;
- *Flight Model* : modèle de vol final.



Figure 6 – Différentes étapes de qualification

Comme on peut voir, les modèles subissent différents tests avant d'aboutir au modèle final. Ces tests sont de deux types :

- Qualification : ces tests simulent un environnement plus hostile que la réalité pour éprouver le produit ;
- Acceptance : une fois le système qualifié, il s'agit de s'assurer que le produit est conforme aux spécifications.

Dans le cadre de la production en série et en fonction de ce qui a été défini au-dessus, les hypothèses suivantes sont fixées pour la cellule de production :

- L'unité avionique à produire est un *Flight Model* ;
- Les tests réalisés ne sont que des tests d'acceptance ;
- Les produits réceptionnés ont déjà été qualifiés.

Finalement, pour entièrement définir cette cellule de production nommée AIT (Assemblage, Intégration, Tests), voici les définitions [6] des étapes à réaliser :

- Assembler : combinaison physique de composants, pièces pour former une entité plus large ;
- Intégrer : combinaison fonctionnelle d'entités de plus bas niveau pour former une entité de niveau plus élevé ;
- Tester : méthode de vérification des fonctionnalités et performances d'un produit dans un environnement simulé.

3. Innovation

Maintenant que l'unité modulable et la cellule de production sont définies globalement, il est important de définir précisément tous les attributs du produit. En effet, comme le projet n'en est qu'à son commencement, certains points ne sont pas encore établis et peuvent changer dans l'avancement du projet. Pour établir la cellule de production qui convient le mieux au produit, tous ces points doivent être pris en compte directement. Cette partie de la méthodologie suit la courbe en V.

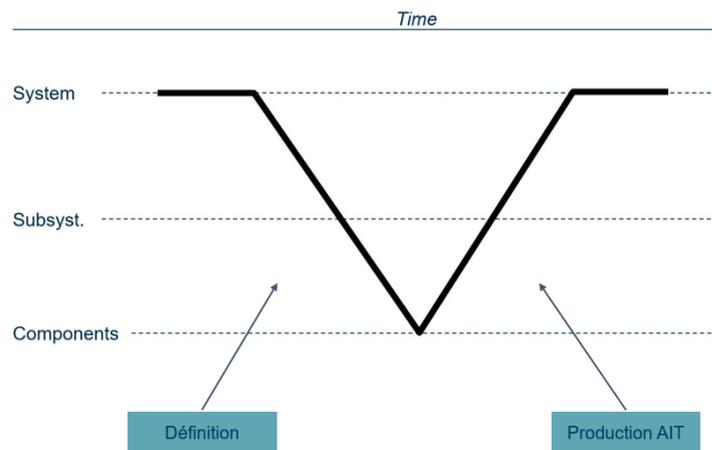


Figure 7 – Courbe en V. A gauche, la définition la plus plausible possible de l'unité modulable, à droite, la production nécessaire pour concevoir le produit [5]

En premier lieu, l'unité avionique est décrite dans sa globalité et en suivant la courbe, l'unité est décomposée en fonction de ses modules et ensuite, des différents composants qui la constituent. Le principe est d'obtenir la définition la plus précise de l'unité, des différents sous-systèmes jusqu'aux plus petits composants.

En second lieu, la production des sous-systèmes est établie en remontant la courbe. A chaque étape, des vérifications sont effectuées pour s'assurer que le produit correspond aux spécifications définies dans le premier point. Cette partie est illustrée dans le diagramme des fonctions. (Fig.11)

3.1. L'unité avionique intégrée

Différents points sont à prendre en compte pour définir totalement l'unité avionique en plus de ceux donnés à la section 2.1. En effet, ces points peuvent varier d'une unité à une autre et d'une mission à une autre.

Voici quelques exemples de variables à considérer :

- L'empilement des modules : ces derniers peuvent être positionnés de trois positions différentes en fonction de certaines contraintes comme la dissipation thermique, l'interconnectivité entre modules, etc ;



Figure 8 – Empilement des modules. De gauche à droite, empilement horizontal, vertical et mixte [4] [5]

- La fixation au satellite : grâce à des pieds de fixation ou à une base commune pour les modules ;



Figure 9 – Fixation des modules. A gauche, des pieds de fixation ; à droite, une base commune [5]

- L'intérieur du module : dépend de la composition du contenu. Ce dernier est défini par la mission à réaliser.

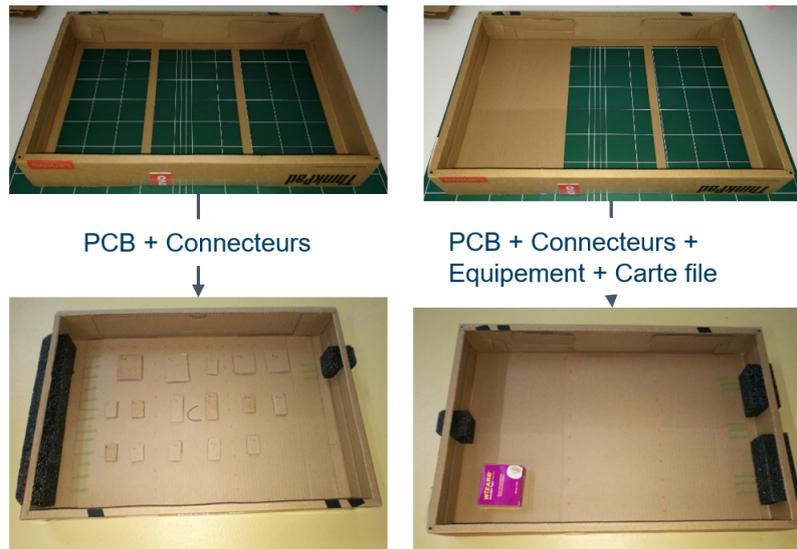


Figure 10 – Intérieur du module. A gauche, un module au fond ouvert pour PCB, à droite, un module au fond partiellement ouvert pour des équipements électroniques [4] [5]

Ensuite, l'intérêt de cette partie est de pouvoir déterminer les composants nécessaires à chaque étape de décomposition de l'unité avionique (unité, module, PCB). Le tableau 3 montre ces différents composants et à quel niveau ils sont intégrés.

Configuration	Unité	Module	PCB
Modules	X		
Structures		X	X
PCB Assemblée		X	
PCB Semi-Assemblée		X	X
PCB vide			X
Mezzanine		X	X
Connexion externe	X	X	X
OEM (Câble Coax, DC/DC, ...)		X	X
Parties mécaniques	X	X	X
EEE (Connecteurs, câbles, autres)			X

Tableau 3 – Réception des différents éléments par rapport au niveau d'intégration [5]

3.2. Diagramme des fonctions

Une fois toutes les parties du produit prises en compte, il est temps de le produire. Il est donc nécessaire de remonter la partie droite de la courbe en V. Le diagramme de la figure 11 représente toutes les étapes à réaliser pour obtenir l'unité finale à partir des composants indiqués dans le tableau 3. Il se décompose en quatre blocs :

- La partie logistique qui permet la réception, l'identification, le stockage et la planification de la fabrication (fonctions 1 à 5) ;
- La production de la PCB (fonctions 6 à 7) ;
- La production du module (fonctions 8 à 14) ;
- La production de l'unité (fonctions 15 à 20) ;

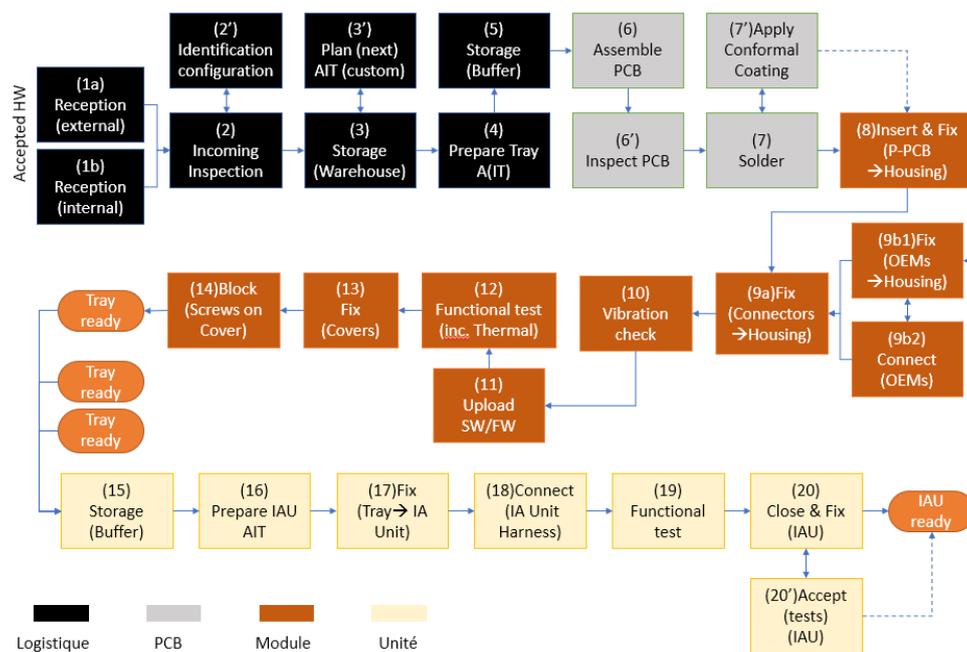


Figure 11 – Diagramme des fonctions, toutes les étapes nécessaires à la production de l'unité avionique sont représentées [5]

Les trois différents blocs de production représentent l'assemblage, l'intégration et les tests des sous-systèmes. Ils ont été conçus pour être indépendants les uns des autres. C'est-à-dire qu'une partie peut être supprimée sans modifier le comportement des autres. Par exemple, l'entreprise pourrait recevoir des PCB déjà assemblées si les fabriquer n'est pas rentable et dans ce cas, toute cette partie du diagramme pourrait être supprimée sans modifier la production du module et de l'unité.

Les parties suivantes de la méthodologie vont permettre de découvrir ce qui est intéressant à concevoir et ce qui est intéressant à acheter.

3.3. Processus Alternatifs

Une fois que les étapes sont définies, sept alternatives sont proposées pour les réaliser⁴. Le but étant d'établir trois processus alternatifs pour produire l'unité avionique avec les contraintes suivantes :

- Une alternative manuelle pour représenter la façon de procéder actuelle de l'entreprise ;
- Une alternative fortement automatisée ;
- Une alternative intermédiaire.

Sept processus pour: Identification							
Materiel		Alphanumerique	Optique	Optique	Radio	GPS	RTL5
Méthode		étiquette et écrire dessus	Barcode 2D	Barcode 3D	RFID	GPS et antenne	capteurs pour localiser
Outils		Humain ou robot collaboratif	scanner	lecteur QR	RFID tag, récepteur		IR, UV, wifi ou bluetooth
Critère Evaluation	Poids						
Minimal Space Required	1	0	+	+	+	-	-
Takt Time	0,25	-	+	+	+	0	0
Pull System	1	-	0	+	+	0	0
Load Load Operations	0,75	-	0	0	+	0	0
Poka Yoke	0,5	-	+	+	+	0	0
Low Motion Waste	1	-	0	0	+	0	0
Maximum op. value-add	1	-	0	0	+	0	0
Changeover Time	1	0	+	+	+	-	+
Tool Room Maintenance	1	+	0	0	0	-	-
Safety, ergonomics, health	1	+	+	+	+	0	0
Known Process	0,75	+	0	0	-	-	-
Future Challenge	1	-	0	+	+	0	+
Scalability	1	-	+	+	+	0	+
Minimal Capex	1	+	0	0	0	-	-
Total +		3,75	4,75	6,75	9,5	0	3
Total -		6,5	0	0	0,75	4,75	3,75
Classement		5	3	2	1	6	4

Tableau 4 – Processus alternatifs pour la fonction "Identification"

Pour définir les technologies les plus intéressantes, les sept alternatives sont évaluées suivant divers critères Lean comme le takt time, la valeur humaine ajoutée, l'espace requis minimum, etc. Le tableau 4 illustre la méthode appliquée pour la fonction "Identification" du diagramme des fonctions. Dans ce cas, seulement six alternatives

4. Ce qui représente plus de 150 alternatives sur l'ensemble du diagramme.

ont été traitées ⁵. Les poids sont attribués en fonction des besoins de l'entreprise. L'espace requis par une technologie est un des points les plus importants car l'entreprise dispose de peu d'espace au sol. De plus, comme le prix au sol dans le pays ⁶ de l'entreprise est élevé, il est d'autant plus important d'optimiser ce critère. A l'inverse, moins d'importance est accordée au takt time car la cadence de production de satellites est faible. ⁷ Une fois les alternatives évaluées, elles sont classées de la meilleure à la moins intéressante. Les trois premières sont utilisées dans la suite. Cette méthode est répétée à chaque étape du diagramme des fonctions.

Le tableau 5 représente les trois solutions retenues.

Value Added Function	First Selected Alternative	Second Selected Alternative	Third Selected Alternative
1a Reception (external)	Feet, trolley, lift	Mobile robot	Conveyor belt
1b Reception (internal)	Feet, trolley, lift	Mobile robot	Conveyor belt
2 Incoming Inspection	Eye, also with caliper	2D Camera	"Metrological" Cobot
2' Identify	Printed IdentTag	Bar code 3D (e.g. QR)	RFID
3 Storage(Warehouse)	Shelves	Vertical Carousel	Automatic Shelving
3' Plan	Manual	WMS	MES
4 Prepare Tray A(IT)	Bags and/or boxes	(Boxes in) Vertical Carousel	Pick & Drop by Robot
5 Storage (Buffer)	Shelves	Vertical Carousel	Automatic Shelving
6 Assemble PCB	Paper doc	Augmented Reality	Pick & Place Machine
6' Inspect PCB	Eye, also with microscope	2D Camera	"Inspection" Cobot
7 Solder	Paper doc	Augmented Reality	(void)
7' Apply Coating	Manual	Coating machine	(void)
8 Insert&Fix	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
9a Fix (Connectors)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
9b1 Fix (OEMs)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
9b2 Connect (OEMs)	Manual	(void)	(void)
10 Vibration Check	Manual "Shake&Listen"	Cobot "Shake&Listen"	Vibrating Plate / Centrifuge
11 Upload SW/FW	Manual with EGSE	With EGSE "Test Clamp"	(void)
12 Functional test	Manual with EGSE	With EGSE "Test Clamp"	(void)
13 Fix (Covers)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
14 Block (Screws Cover)	Manual (glue)	Automated Glue Dispenser	Cobot
15 Storage (Buffer)	Manual (shelves)	Vertical Carousel	Automatic Shelving
16 Prepare IAU AIT	Manual (bags and/or boxes)	(Boxes in) Vertical Carousel	Pick & Drop by Robot
17 Fix (Tray)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
18 Connect (Harness)	Manual	Cobot (Pick & Place)	(void)
19 Functional test	Manual with EGSE	With EGSE "Test Clamp"	(void)
20 Close&Fix (IAU)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
20' Accept (tests)	With EGSE Test Facilities	(void)	(void)

Tableau 5 – Trois processus alternatifs pour chacune des fonctions [5]

5. Sept est une moyenne donnée par la méthodologie Lean 3P [1]

6. Grand Duché du Luxembourg

7. Moins de 15 microsattellites par an dans le meilleur des cas.

4. Prototypage

Prototyper les lignes de production définies dans le point précédent a nécessité de développer toutes les fonctions du diagramme de la figure 11 en différentes tâches à accomplir. Leur élaboration a été possible grâce à la reconstitution d'unités en carton comme sur les figures 8 et 9. Ceci a été réalisé pour les trois processus alternatifs.

Une fois les étapes développées, tous les temps pour les effectuer ont été établis. Ces temps sont répartis en quatre catégories :

- Le travail réalisé par un opérateur ;
- Le travail réalisé par un QA⁸ qui vérifie les résultats des tests effectués. En reprenant la courbe en V, il est le lien entre la partie production et les spécifications définies dans la partie définition ;
- Le travail réalisé par la technologie comme un robot collaboratif par exemple ;
- Les temps d'attente.

De là, le temps de travail humain total est déduit. Le dernier point est consacré au coût d'investissement nécessaire pour chacune des technologies.

Fonctions	Tasks	Process Duration	Tech		QA		Techno		Wait		Work Time	CAPEX (€)
			% Task	Effort	% Task	Effort	% Task	Use	%Task	Duration		
1	Delivery(via Mobile Robot)	00:03:10	0%	00:00	63%	00:02	37%	00:01:10	0%	00:00:00	00:02:00	20000
Stairs	Place the load on the robot	00:01:00	0%	00:00	100%	00:01	0%	00:00:00	0%	00:00:00		
	Exterior to InclInsp (100m)	00:01:10	0%	00:00	0%	00:00	100%	00:01:10	0%	00:00:00		
	Remove the load	00:01:00	0%	00:00	100%	00:01	0%	00:00:00	0%	00:00:00		
2	Incoming Inspection	00:05:00	0%	00:00	80%	00:04	20%	00:01:00	0%	00:00:00	00:04:00	3200
	Unpack	00:02:30	0%	00:00	100%	00:02	0%	00:00:00	0%	00:00:00		
	Visual inspection	00:00:30	0%	00:00	0%	00:00	100%	00:00:30	0%	00:00:00		
	Measure geometries	00:00:30	0%	00:00	0%	00:00	100%	00:00:30	0%	00:00:00		
	Report	00:01:30	0%	00:00	100%	00:01	0%	00:00:00	0%	00:00:00		

Tableau 6 – Une partie du prototypage du processus alternatif automatisé[5]

Après avoir déterminé ces paramètres, il est possible de représenter graphiquement le temps de travail nécessaire à un humain (opérateur ou QA) pour finir une fonction. Une première observation sur la figure 12 permet de voir que les durées de travail de la plupart des fonctions peuvent être fortement réduites. Cependant, les fonctions de 6 à 7' sont difficilement améliorables, il s'agit du bloc de production de la PCB.

8. Quality assurance.

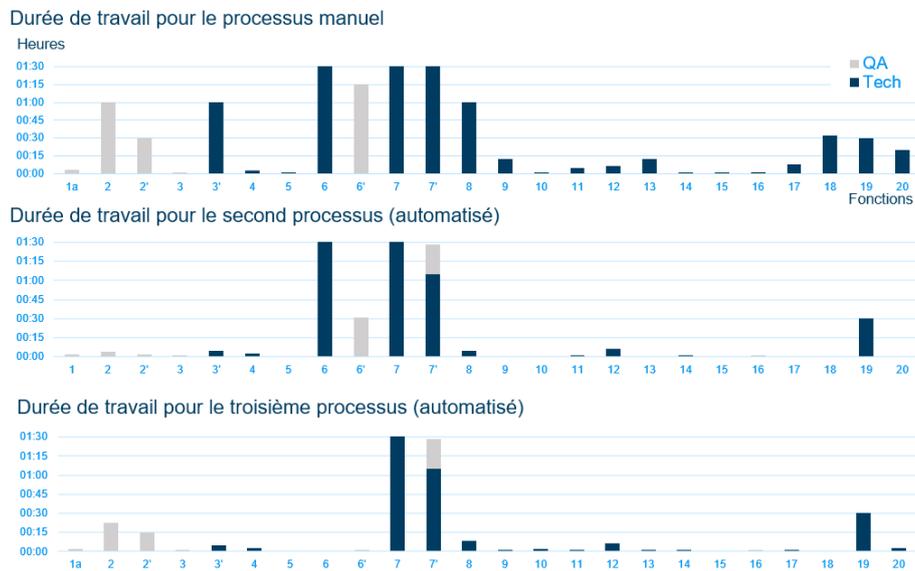


Figure 12 – Durée de travail humain (en heures) pour les différents processus [5]

5. Optimisation

L'évaluation du procédé de production optimale s'effectue en ayant conscience des contraintes de production imposées par le produit et le contexte :

- Une faible cadence de production (moins de 15 satellites par an) ;
- Une ligne de production flexible pouvant s'adapter aux besoins de la mission ;
- La présence d'un opérateur et d'un QA minimum ;
- Une minimisation des coûts d'investissement dans un premier temps.

Pour cette partie, l'objectif n'est pas de choisir un processus alternatif en entier mais de combiner le meilleur des trois procédés. Dans ce but, les prototypes sont évalués en fonction de trois niveaux : la stratégie du système, les personnes et les fonctions [1]. Les mêmes critères Lean que dans la sous-section 3.3. sont utilisés pour l'évaluation du dernier point à la différence qu'ils sont tous pondérés au même niveau.

5.1. Niveau des systèmes et des personnes

Tout d'abord, les résultats des graphiques à la figure 12 montrent un élément important : la fabrication de la PCB est la partie de production la plus longue. Une première caractéristique du processus optimal en découle, le bloc de PCB n'est pas intéressant à réaliser dans l'entreprise pour la cadence donnée. Il est plus intéressant de recevoir

cette carte électronique des fournisseurs.

Ensuite, comme les contraintes de base imposent au minimum deux personnes présentes dans la cellule de production et que l'automatisation "lourde" ne permet pas un gain de temps conséquent⁹ [5], un intérêt primordial est accordé à l'optimisation du temps de travail des personnes.

5.2. Niveau des fonctions

Cette évaluation est réalisée de façon similaire à ce qui a été introduit à la sous-section 3.3. Les fonctions identiques des différents processus sont comparées et classées selon leur intérêt. A la fin de cette étape, les technologies retenues sont les suivantes :

- Le convoyeur pour acheminer les pièces ;
- La caméra 2D pour l'inspection d'entrée ;
- Le barcode pour l'identification des pièces lors du stockage ;
- Le carousel vertical pour une optimisation de la capacité de stockage ;
- Un logiciel WMS¹⁰ pour la planification et la gestion des stocks ;
- Le tournevis automatique pour la fixation des nombreuses vis présentes dans l'unité [5].

Cette optimisation donne naissance à un processus tourné vers l'humain, commençant la production au niveau du module (comme référencé dans le diagramme des fonctions de la figure 11). Le tableau 7 expose les coûts préliminaires à l'acquisition de ces technologies. Ensuite, le tableau 8 présente le procédé de fabrication optimal de l'unité avionique intégrée. Finalement, la figure 13 illustre le temps de travail nécessaire pour réaliser une étape grâce aux technologies identifiées.

Technologie	Coût €
Convoyeur	2000
Caméra 2D	3200
Barcode	3250
Carousel Vertical	25000
WMS-ERP	20000
Tournevis Automatique	5000

Tableau 7 – Coût des technologies pour le processus optimal

9. Voir différence de temps entre processus 2 et 3 sur la figure 12

10. Warehouse Management System

Value Added Function	Optimal Process
1a Reception (external)	Conveyor belt
1b Reception (internal)	Conveyor belt
2 Incoming Inspection	2D Camera with Pattern Recognition
2' Identify	Bar code 3D (e.g. QR)
3 Storage(Warehouse)	Vertical Carousel
3' Plan	WMS : Warehouse Management System
4 Prepare Tray A(IT)	(Boxes in) Vertical Carousel
5 Storage (Buffer)	Vertical Carousel
6 Assemble PCB	Manual
6' Inspect PCB	Visual (eye, also with microscope)
7 Solder	Manual with paper doc
7' Apply Coating	Manual
8 Insert&Fix	Automated Screwing (tool)
9a Fix (Connectors)	Automated Screwing (tool)
9b1 Fix (OEMs)	Automated Screwing (tool)
9b2 Connect (OEMs)	Manual
10 Vibration Check	Manual "Shake&Listen" or "Shake&Look"
11 Upload SW/FW	Manual (all connections by hand) with EGSE
12 Functional test	Manual (all connections by hand) with EGSE
13 Fix (Covers)	Automated Screwing (tool)
14 Block (Screws Cover)	Manual (glue)
15 Storage (Buffer)	Vertical Carousel
16 Prepare IAU AIT	(Boxes in) Vertical Carousel
17 Fix (Tray)	Automated Screwing (tool)
18 Connect (Harness)	Automated Screwing (tool)
19 Functional test	Manual (all connections by hand) with EGSE
20 Close&Fix (IAU)	Automated Screwing (tool)
20' Accept (tests)	Manual (with EGSE and Test Facilities)

Tableau 8 – Processus optimal[5]

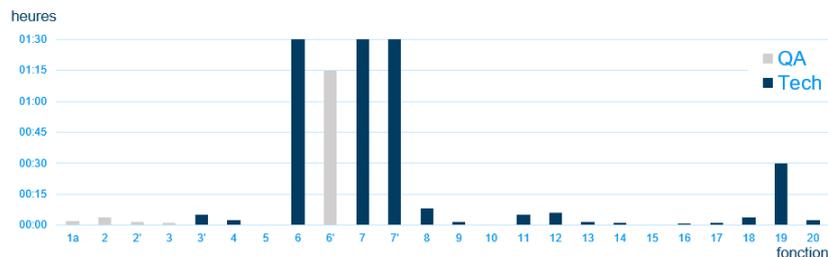


Figure 13 – Durée de travail humain pour le processus optimal [5]

6. Comparaison entre processus manuel et optimal

Une fois le processus idéal déterminé, il est possible de le comparer au procédé entièrement manuel.¹¹ Le but de cette partie est de mettre en avant les technologies permettant le meilleur gain de temps et ayant la meilleure rentabilité. Comme les paramètres de temps, de coûts d'opération et de coûts d'investissement sont connus, il est possible de modéliser les processus pour voir leur fonctionnement en fonction de différentes configurations de production [5]. Dans le cas présenté, la configuration d'entrée est la réception de pièces pour la production d'une unité de cinq modules.

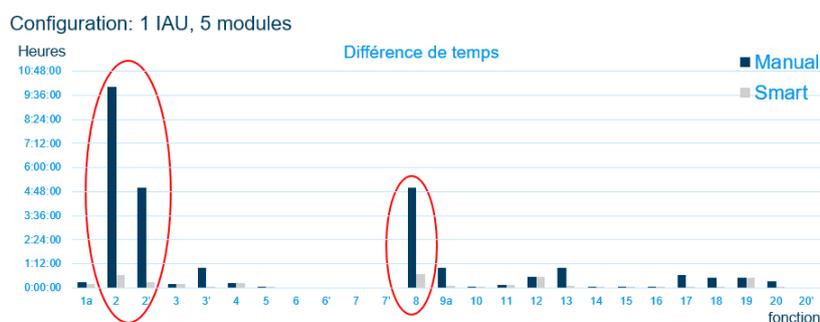


Figure 14 – Différence de temps (en heures) entre la production manuelle et la production optimisée [5]

Il ressort de la figure 14 que trois technologies permettent une plus forte amélioration de la durée de réalisation de leur fonction que les autres. Ces technologies sont respectivement la caméra 2D avec reconnaissance de formes pour l'inspection d'entrée des pièces, le système barcode pour leur identification et le tournevis automatique pour la fixation des vis de la PCB dans l'assemblage du module.

Maintenant que des technologies ont été pointées pour leur gain de temps, il est nécessaire de vérifier que la rentabilité de celles-ci est intéressante. En effet, si le coût d'investissement est trop important par rapport au gain effectué sur le coût d'opération, ces technologies ne seront pas développées.

La figure 15 prouve de nouveau que ces technologies sont les plus intéressantes à développer pour l'entreprise dans un premier temps car elles sont rentables à partir de quelques unités produites.

¹¹. Ce procédé est basé sur les technologies actuelles de l'entreprise



Figure 15 – Nombre d'unités à produire pour rentabiliser la technologie en fonction de la tâche [5]

7. Pistes d'améliorations

Maintenant que le processus optimal a été défini et simulé une première fois, une simulation 3D de ce dernier permettrait de mieux le comprendre. En effet, ce type de simulation est utilisé pour observer le comportement dynamique d'une ligne de production. Des données, comme le temps de processus, les coûts d'opérations et le pourcentage de fonctionnement, peuvent être recueillies.

Une fois la simulation réalisée et maîtrisée pour l'unité avionique intégrée, il serait possible d'appliquer la méthodologie Lean 3P à l'entièreté du satellite puis de développer la simulation 3D totale de la production. Cette dernière permettrait de réaliser des tests de configurations en fonction des spécifications des satellites à produire.

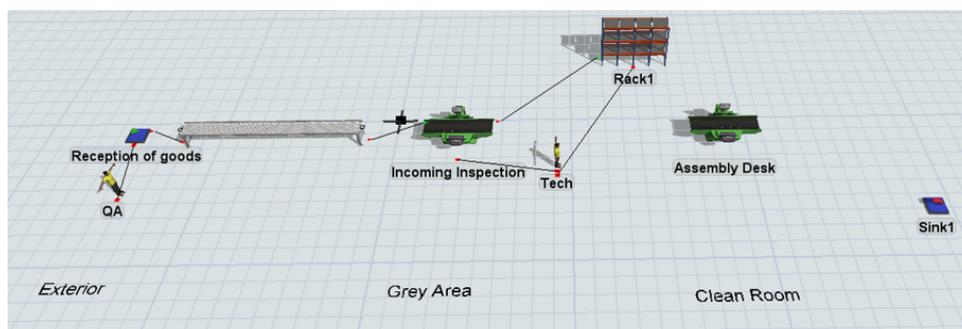


Figure 16 – Essai de simulation [7]

8. Conclusion

Le travail a permis de mettre en avant différents points clés pour la fabrication de l'unité avionique. Tout d'abord, une faible automatisation du système est plus intéressante dans un premier temps pour permettre de maîtriser le processus et de lisser¹² la production. Grâce à cela, il sera possible d'investir dans une automatisation plus lourde, optimisée par les besoins de la production lissée.

Finalement, le travail a démontré l'utilité de la méthodologie lors du lancement d'un projet. Elle a permis de définir un produit en fonction de ses caractéristiques et son procédé de fabrication de manière optimale. Grâce à cette démonstration, l'entreprise pourra réutiliser cette méthodologie pour développer de façon complète sa nouvelle plateforme de microsattellites.

9. Sources

- [1] COLLETA, A., *The Lean 3P Advantages : A Practitioner's Guide to the Production Preparation Process*
Paris, Dunod, 2012, 336 p.
- [2] *Triton-X- our next generation multi-mission microsatellite designed to enable affordable regional and global LEO constellations* (consulté en février 2018).
Adresse URL : <https://luxspace.lu/triton-x>
- [3] *First listed Space- and Technology Group in Germany* (consulté en février 2018).
Adresse URL : <https://www.ohb.de/en/corporate/>
- [4] MOSER, H., *Systems Engineering for Modular Space Electronics Packaging*,
Mémoire de master, Stuttgart, Allemagne : University of Stuttgart, 2008.
- [5] BILOCQ, A., *Application de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le développement d'une avionique intégrée pour microsatellite*, Trav. de fin d'ét., Virton, Belgique : Henallux, juin 2018.
- [6] BUURSINK, J., *Sat-A AIT Plan*, rapp. tech., Betzdorf, Luxembourg, 2015.
- [7] *Simulation de flux FlexSim* (consulté en mai 2018).
Adresse URL : <https://www.flexsim.com/fr/>

¹². Rendre la cadence de production constante dans le temps. Ceci permet de ne pas surutiliser les machines pendant une période puis de ne pas les utiliser pendant une autre période.