



**HAL**  
open science

# MODELISATION DES PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT POUR LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES DU SECTEUR AERONAUTIQUE

S. Lemoussou, J.C. Chaudemar, R.A Vingerheds

► **To cite this version:**

S. Lemoussou, J.C. Chaudemar, R.A Vingerheds. MODELISATION DES PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT POUR LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES DU SECTEUR AERONAUTIQUE. Congrès Lambda Mu 21 “ Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces ”, Oct 2018, Reims, France. hal-02073921

**HAL Id: hal-02073921**

**<https://hal.science/hal-02073921>**

Submitted on 20 Mar 2019

**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.

# MODELISATION DES PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT POUR LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES DU SECTEUR AERONAUTIQUE

## PROCESS MODELING APPROACH FOR SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES DEVELOPMENT IN AERONAUTICS SECTOR

Lemoussu S.  
STAR ENGINEERING  
12 rue G. Péri 31000 Toulouse  
[sophie.lemoussu@star-engineering.fr](mailto:sophie.lemoussu@star-engineering.fr)  
[sophie.lemoussu@isae-superaero.fr](mailto:sophie.lemoussu@isae-superaero.fr)

Chaudemar J.C., Vingerhoeds R.A.  
ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse  
10 avenue E. Belin 31000 Toulouse  
[jean-charles.chaudemar@isae-superaero.fr](mailto:jean-charles.chaudemar@isae-superaero.fr)  
[rob.vingerhoeds@isae-superaero.fr](mailto:rob.vingerhoeds@isae-superaero.fr)

### Résumé

Récemment, des Petites et Moyennes Entreprises (PME) innovent en proposant de nouveaux moyens de transport aériens. Ces projets posent des questions importantes par rapport à la réglementation alors que celle-ci n'est pas complètement disponible pour ces types de développement. Le processus de certification, activité critique pour toute entreprise du marché aéronautique, demeure un enjeu pour ces entreprises non familières avec l'ensemble des contraintes imposées. Les PME concernées, démunies face à la complexité du marché, requièrent un support méthodologique. Nous proposons dans notre recherche de répondre à cette demande spécifique par une approche d'ingénierie système basée sur les modèles et une modélisation hiérarchisée des processus d'entreprise.

### Summary

Recently, several Small and Medium Enterprises (SME) innovate and propose new means of transportation. These projects have to deal with some important issues regarding the regulation whereas it is not fully available for this kind of development. The certification process, critical activity for any enterprise in this industry, constitutes a major challenge for this SME who are not completely aware of all requested constraints. These SME, disadvantaged on this complex market, may ask for a methodological support. We offer in our research to build a Model Based Systems Engineering (MBSE) framework and a structured process modeling to answer to this specific concern.

## 1 Introduction

Le secteur aéronautique vit une nouvelle révolution technologique avec l'émergence de nouveaux types d'aéronefs et de nouveaux systèmes. De nouveaux entrants, en majorité des PME (Petites et Moyennes Entreprises), voir des TPE (Très Petites Entreprises), avec des axes d'innovation souvent très forts, souhaitent proposer de nouveaux véhicules aériens. Les règles, les normes et les standards aéronautiques ont fait, cependant, du secteur un espace très difficile à pénétrer pour les entreprises extérieures au domaine. Et à raison, car la sécurité des personnes et des infrastructures est en jeu.

La maîtrise des risques est au cœur de toute activité aéronautique et y associer l'innovation comme moteur de la conception génère à priori plus de menaces que d'opportunités. Des projets comme les dirigeables, les drones-taxi, les drones de transport de marchandises plus ou moins lourdes, les voitures intégrant l'espace aérien deviennent des préoccupations sérieuses pour les instances de certification et les nouveaux systèmes du marché. L'émergence de ces projets aéronautiques amène aussi de nouvelles pistes de recherche. L'objectif principal est de transformer les menaces en réelles opportunités de croissance pour cette industrie, en apportant tout le support nécessaire à toutes les parties prenantes concernées par ces projets innovants.

Cette communication est le fruit d'une première année de recherche. Nous proposons d'aborder la problématique par une approche d'ingénierie système basée sur les modèles et plus particulièrement par la modélisation structurée des processus de développement, adaptée au contexte des TPE/PME, cible de notre recherche.

Cette communication s'organise selon cinq chapitres principaux. Après une présentation de l'objectif général de la recherche dans le chapitre 2, le contexte réglementaire en aéronautique est expliqué dans le chapitre 3. L'approche d'ingénierie système est présentée dans le chapitre 4, puis la méthode choisie est développée dans le chapitre 5 avant de discuter les premiers résultats de la modélisation dans le chapitre 6. La conclusion, en chapitre 7, abordera des axes potentiels pour de futures recherches.

## 2 Objectif

Les TPE/PME constituent une valeur ajoutée importante dans l'économie européenne et demeurent un atout majeur de la croissance dans toutes les industries (Muller et al., 2016). C'est aussi le cas dans l'industrie aéronautique. Historiquement, dans ce secteur, elles sont souvent des entreprises dites sous-traitantes qui travaillent pour le compte d'entreprises dites systémiers (principalement Airbus en France mais aussi Dassault Aviation, ATR). L'évolution du secteur cependant les amène de plus en plus à changer de logique de travail et à travailler de plus en plus en entreprise étendue, c'est-à-dire en co-développement ou en délégation, de toute façon en collaboration de plus en plus étroite avec leur client. De sous-traitants exécutants, ces entreprises sont devenues de véritables partenaires avec de plus en plus de responsabilités et de risques afférents (Braziotis et al., 2017).

En marge de cette réalité, de nombreuses entreprises proposent de nouveaux concepts. Certaines souhaitent par exemple faire revivre des machines du passé comme les dirigeables, plus éco-durables mais aussi plus sensibles aux intempéries que les avions. D'autres pensent élargir le marché des drones avec des applications diverses le plus souvent liées au transport de marchandises. Des projets de type taxi aérien se multiplient aussi. Ces entreprises, souvent novices sur le marché, doivent comme les grands groupes répondre aux problématiques réglementaires aériennes et fournir aux instances responsables toutes les preuves suffisantes de fiabilité et de sécurité de leur système. En effet, pour tout aéronef, si son constructeur souhaite le commercialiser, une étape cruciale est à franchir, celle de l'acquisition de son certificat de type et de tous les agréments imposés par la réglementation. Dans ce cadre, tout développement empirique ou artisanal n'a pas sa place.

Pourtant, puisque très créatrices, très innovantes, ces petites organisations pourraient être incitées à ne pas suivre ces règles car implicitement l'acte d'innover suppose justement de désobéir aux normes existantes (Babey et al., 2012). Elles ont des besoins particuliers ; elles doivent pouvoir modifier leurs processus de manière dynamique pour pouvoir se développer et assurer leur

transformation organisationnelle de manière souple et évolutive. Autrement dit nous pouvons nous demander si le principe de certification de ces nouvelles machines pourrait être compatible avec l'idée d'innovation ? Comment la certification peut s'associer à l'innovation ? Comment associer l'innovation et la gestion des risques ?

Notre travail de recherche s'inscrit dans ce questionnement et propose une démarche d'ingénierie système dirigée par les modèles pour répondre aux objectifs de la certification. Notre intention est de fournir un cadre méthodologique soutenant les TPE/PME dans leur développement en tenant compte des récentes innovations et des règles institutionnelles du secteur.

### 3 Contexte réglementaire

Le cadre réglementaire de l'aviation civile permet d'assurer une bonne navigabilité, c'est à dire de garantir l'aptitude des aéronefs en service à effectuer des transports de passagers et/ou de fret dans des conditions acceptables de sécurité.

La réglementation aérienne civile est définie au niveau international par les textes de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). Depuis 1947, elle édicte des normes et des recommandations, applicables aujourd'hui dans ses 188 pays membres. Au niveau européen, l'AESA (Agence Européenne pour la Sécurité Aérienne), mandatée par la Communauté Européenne, est en charge de la mise en œuvre des textes de l'OACI pour ses 32 pays membres. Le règlement de base (the Basic Regulation) No 216/2008 du 20/02/2008 régit les règles communes, générales et applicables dans le domaine de l'aviation civile tandis que les modalités d'exécution (the Implementing Rules) sont réparties dans une douzaine de textes additionnels. La navigabilité, sous-ensemble remarquable de la réglementation applicable, est composée de 3 textes (Cf. Figure 1) :

- CE N°748/2012
- CE N°1321/2014
- CE N°2015/640

La réglementation No 748/2012 du 03/08/2012 décrit en 12 articles et 3 annexes, les modalités d'exécution de la navigabilité initiale. Cela signifie que toute organisation qui souhaite mettre en service un nouvel aéronef, ou commercialiser des pièces et équipements d'un nouvel aéronef, doit impérativement se conformer avec ces exigences et en particulier avec celles de son annexe principale, plus connue sous le nom de Part-21. Celle-ci constitue précisément le cœur des règles auxquelles les

TPE/PME, à l'instar de tous les industriels du secteur, doivent se soumettre. Pour exemple, les articles 8 et 9 de la navigabilité initiale (EC N°748, 2012) imposent aux organisations responsables respectivement de la conception et de la production d'aéronefs (ou de pièces et équipements), de démontrer leur capacité en conformité avec les exigences issues des Subpart J et G de la Part 21, qui constituent les droits et devoirs, respectivement des organismes de conception et de production.

L'AESA, en complément, accompagne ces textes réglementaires d'un ensemble de commentaires qui constituent des guides ou « Guidance Material » (GM) pour la mise en œuvre de la conformité, et propose des moyens dits acceptables ou « Acceptable Means of Compliance » (AMC) pour répondre concrètement à la conformité. Depuis Février 2018, pour la première fois, l'AESA propose un document unique qui consolide tous ces textes (la navigabilité initiale, ses annexes, les GM et les AMC), en incluant tous les amendements publiés jusque-là (EASA, 2018).

Enfin l'AESA propose des cahiers des charges techniques pour accompagner la conception d'un certain nombre de produits et équipements. La CS25 concerne les grands avions, la CS31-TGB tous les ballons attachés, tandis que la CS31-HB et la CS31-GB concernent les ballons libres, respectivement à air chaud et à gaz autre que l'air. Ces cahiers, quand ils existent, constituent des contraintes fortes pour la conception. Plus d'une vingtaine de CS sont mis à disposition mais aucun n'est disponible pour la conception des dirigeables, des drones lourds supérieurs à 150kg ou même des taxis aériens avec ou sans pilote.

La Part-21 est composée de deux sections. La section A s'applique aux candidats à la certification et la section B au personnel de l'AESA qui doivent appliquer les procédures internes de l'Agence. La section A se décompose en 14 sous-parties (SubParts), chacune décrivant les droits et devoirs relatifs à tous les agréments nécessaires pour, in-fine, la mise en service d'un aéronef.

La sécurité, au sens de « Safety » et la sûreté de fonctionnement plus particulièrement, sont au cœur de la réglementation civile aérienne. De manière conventionnelle, les trois facteurs retenus pour avoir un impact sur la « Safety » sont :

- Les facteurs humains,
- Les facteurs opérationnels,
- Les facteurs techniques.

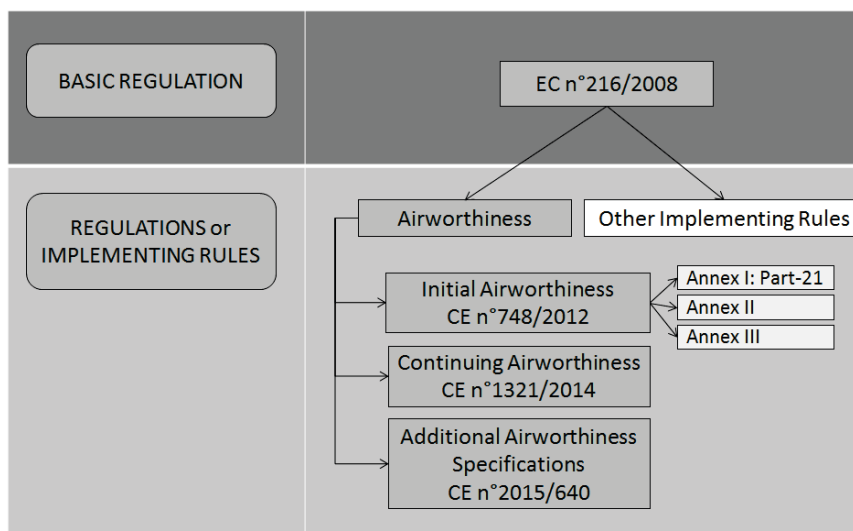


Figure 1. Structure générale de la réglementation européenne de l'aviation civile et de la navigabilité en particulier

La réglementation civile aérienne porte sur ces 3 aspects mais la navigabilité initiale aborde plus particulièrement le troisième facteur en se focalisant sur la conception des systèmes et leur production (De Florio, 2016).

Ainsi la réglementation aéronautique européenne fixe les exigences essentielles concernant le maintien d'un niveau élevé de sécurité de l'aviation civile et de protection de l'environnement et permet aux constructeurs d'aéronefs et à tous les industriels de la filière d'obtenir les agréments nécessaires.

La navigabilité initiale concerne tout autant les produits (les aéronefs, moteurs et hélices sont considérés comme des produits) que les pièces et équipements qui constituent ces produits. Elle permet aussi aux organisations elles-mêmes d'obtenir des agréments. De fait, la Part-21 décrit les exigences pour l'obtention de différents types d'homologation dont voici les principales :

- Le certificat de type (au niveau produit),
- L'ETSO ou European Technical Standard Order (au niveau pièce et équipement)
- L'agrément de conception (au niveau organisation),
- L'agrément de production (au niveau organisation).

Les aéronefs de l'aviation civile sont presque tous concernés par les exigences de la Part-21, à l'exception des aéronefs spécifiés dans l'annexe II de la réglementation de base (EC N°216, 2008). Les dirigeables, les drones de plus de 150kg et les taxis aériens sont éligibles pour être certifiés selon les exigences de la Part-21. Presque tous les composants d'un aéronef nécessitent aussi une approbation. Cette approbation est délivrée aussi grâce au processus de certification en conformité avec les exigences de la Part-21.

Seuls les composants standards (Standard parts) et les matériaux unitaires (matériaux de base et consommables) ne font pas partie du périmètre de la Part-21 et n'ont besoin d'aucune approbation (Cf. Figure 2).

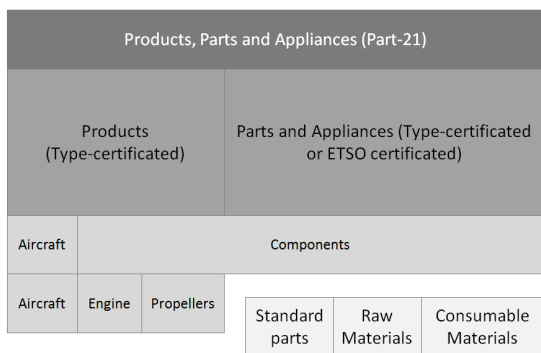


Figure 2. Couverture et limites de la Part-21

Les moteurs et hélices, sont des composants spécifiques, qui, à l'instar de l'aéronef, nécessitent un certificat de type. Pour les pièces et équipements, l'agrément peut être obtenu de différentes manières :

- Comme pièce d'un produit, grâce au certificat de type du produit dans lequel elle est installée,
- Comme pièce d'un produit, par approbation d'une modification (majeure ou mineure) du certificat de type du produit dans lequel elle est installée,
- Comme pièce d'un produit, par approbation d'une modification majeure du certificat de type demandée par une personne ou une organisation différente de celui qui détient le certificat de type. Dans ce cas la modification est approuvée par un STC (Supplemental Type Certificate),

- Comme pièce d'un produit, par approbation d'une modification mineure du certificat de type demandée par une personne ou une organisation différente que celui qui détient le certificat de type,
- Comme équipement, par une autorisation ETSO.

Selon les cas, l'AESA peut établir un niveau d'implication différent qui n'est pas systématiquement 100%. De même l'Autorité Nationale du pays où est inscrit l'industriel (la DGAC typiquement pour la France) sera impliquée à différentes étapes de la certification et avec un accompagnement plus ou moins fort en fonction de la complexité des projets.

Le certificat de navigabilité (Certificate of Airworthiness ou CoA), est l'ultime agrément pour la mise en circulation d'un aéronef et le certificat pour la navigabilité initiale. C'est le premier objectif des systémiers et le graal de la Part-21. La vie de l'aéronef sera ensuite jalonnée d'autres agréments issus de la navigabilité continue et des autres textes réglementaires (Cf. Figure 1). De même le certificat de navigabilité initiale, comme les autres agréments, peut être retiré à tout moment de la vie de l'aéronef si celui-ci présente des défauts qui rendent les conditions de sécurité inacceptables.

Le certificat de navigabilité est rendu accessible sous plusieurs conditions mais il nécessite avant tout, pour le systémier, l'obtention de trois autres agréments au préalable, tous définis dans la Part-21 et dont l'obtention se fait généralement en parallèle (Cf. Figure 3) :

- Le certificat de type : Type Certificate (TC) ou Restricted Type Certificate (RTC),
- L'agrément d'organisme de conception : Design Organisation Approval (DOA) ou Alternative Procedures to DOA (APDOA),
- L'agrément d'organisme de production : Production Organisation Approval (POA) ou Production without POA.

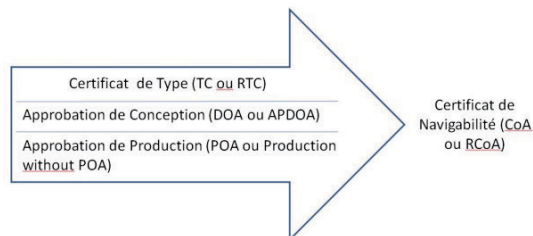


Figure 3. Principaux agréments préalables pour obtenir le certificat de navigabilité initiale d'un aéronef.

Il est possible d'obtenir un certificat de type restreint (Restricted Type certificate ou RTC), selon des conditions opérationnelles particulières. Dans ce cas le certificat de navigabilité sera lui aussi restreint (Restricted Certificate of Airworthiness ou RCoA). Par ailleurs le temps estimé par l'AESA pour obtenir l'ensemble de ces agréments est de 5 ans pour les grands avions et les grands hélicoptères et peut être réduit jusqu'à 3 ans pour les produits, pièces et équipement moins complexes.

Notre travail de recherche se concentre sur toutes les exigences de la Part-21. Nous nous intéressons à des projets innovants qui découvrent l'expérience de la certification. L'AESA n'a donc pas les spécifications techniques, les CS correspondants. Une relation de collaboration et de confiance est indispensable pour mener à bien le processus de certification dans les temps. La qualité de cette relation peut être améliorée à l'aide d'une approche d'ingénierie système adaptée.

#### 4 Ingénierie des systèmes complexes

L'ingénierie système est une approche interdisciplinaire, qui permet le développement sécurisé de systèmes

complexes. Elle est largement répandue dans les grands groupes de toutes les branches concevant des systèmes critiques. C'est une pratique intégrée dans les processus des grandes entreprises où les employés en font l'expérience sans forcément s'en rendre compte. Les TPE/PME d'un autre côté ne sont pas toujours sensibilisées à l'approche système et n'y trouvent pas forcément leur intérêt alors que leurs principales considérations se trouvent plus au niveau d'une démarche qualité centrée sur la conformité d'un produit ou d'un service et les seuls processus de sa réalisation. Même si la valeur de l'ingénierie système reste difficile à évaluer concrètement (Honour, 2004), il est cependant reconnu qu'elle permet de produire des systèmes plus fiables pour un coût et dans un temps mieux maîtrisés. Pour les TPE/PME, la tentation serait alors forte de se tourner vers les normes, les standards et les outils disponibles sur le marché pour répondre à leurs besoins. Mais quelles normes et quels standards sont vraiment prêts en l'état à être employés par ces organisations? Certains travaux (Lemoussu et al., 2018; Xue et al., 2014) tendent à prouver que les moyens à disposition ne sont pas en phase avec les attentes de ces entreprises. Des recherches peuvent être menées pour proposer une méthodologie originale et adaptée aux besoins des TPE/PME.

L'ingénierie système s'intéresse au produit final, le système, dans sa globalité, tout en prenant soin de le décomposer en sous-systèmes pour mieux maîtriser tous les objectifs fonctionnels. Les doubles approches « Top-down » et « Bottom-up » permettent de valider toutes les décisions prises lors de chacune des phases du processus de développement. Ainsi les exigences initiales sont bien transformées en exigences techniques. Puis les architectures fonctionnelles et physiques sont déterminées en conformité avec les exigences techniques. La production de toutes les pièces et de tous les équipements est ensuite vérifiée en conformité avec les exigences techniques et en concordance avec les choix d'architecture jusqu'à l'intégration du produit final qui doit être homologué par l'AESA.

La modélisation du système, qui est la discipline de l'ingénierie système basée sur les modèles, ou Model Based Systems Engineering (MBSE) en anglais, apporte un support non négligeable aux analyses fonctionnelles, aux analyses de performance du système et aux activités de vérification et de validation. L'analyse des exigences grâce aux modèles constitue l'ingénierie des exigences basée sur les modèles (MBRE en anglais). Cette discipline permet aussi l'allocation des exigences aux composants du système et en assure la couverture. Cette approche complète la gestion traditionnelle des exigences écrites sous forme textuelle. Elle ne la substitue pas car souvent la modélisation n'est pas capable de capturer tous les types d'exigence et notamment les exigences non-fonctionnelles qui tracent la performance, la sécurité ou la gestion du temps (Blanchard and Blyler, 2016).

Au sens de l'ingénierie système, l'organisation d'une entreprise peut être vue comme un type de système particulier qui peut se décomposer selon différentes ressources (humaines, physiques et matérielles, immatérielles, financières,...). L'organisation, le système d'intérêt, répond aussi à un ensemble d'objectifs rendus atteignables au travers des processus mis en œuvre au sein de l'entreprise. Chaque processus répond à un sous-ensemble d'objectifs (Lemoussu et al., 2018). Les processus sont donc des preuves tangibles qui témoignent de la complexité de l'organisation par leur nombre et leurs imbrications. Les processus demeurent cependant des concepts abstraits, qui n'ont pas de réalité propre physique, et qui restent donc immatériels. Formaliser les processus puis les analyser permet de mieux les comprendre et enfin de les améliorer.

## 5 Méthode

La recherche actuelle vise à modéliser les processus attendus par la certification aéronautique. Le principe est de formaliser le texte central qui est au cœur de la réglementation actuelle en Europe pour tous les aéronefs commerciaux, plus connus sous le nom de Part-21. Il s'agit d'un ensemble d'exigences qui ne suit pas les règles attendues de l'ingénierie des exigences : clarté, unicité, non-ambiguïté, testabilité. Au contraire, le contenu force à l'interprétation et de fait à de possibles malentendus, pouvant conduire à des surcoûts voire à un échec du processus de certification (Lemoussu et al., 2018). Pour les TPE/PME qui ont pour objectif de développer un nouveau moyen de transport aérien, le processus de certification est d'autant plus critique qu'il nécessite une bonne compréhension des attendus de la réglementation, que leur projet est innovant et donc sans spécification officielle de l'AESA, c'est-à-dire sans cahier des charges pré-établi pour leur type de machine, sans CS validé. L'implication des autorités nationales (DGAC en France) et supranationales (AESA en Europe) est alors à son niveau maximal et tout écart minime ou important, surtout si récurrent et/ou mal implémenté, mal corrigé dans l'organisation, peut entacher le lien de confiance qui doit s'établir entre le candidat à la certification et les autorités de certification.

Nous travaillons à une proposition plus formelle du contenu de cette réglementation en l'adaptant afin que les TPE/PME gagnent en compréhension et en réactivité. La réglementation de l'espace aérien, les standards du secteur aéronautique et les normes internationales en matière d'ingénierie des systèmes sont prises en compte pour être formalisées dans un ensemble de modèles de processus d'entreprise. Une méthodologie solide, reproductible et vérifiable, capable d'appliquer des règles de détection d'incohérences et d'identifier des potentiels goulots d'étranglement est proposée.

La modélisation des processus requiert le choix d'un langage de modélisation et le choix d'un outil. La première partie de la recherche s'est focalisée sur l'analyse des différents langages à disposition pour la modélisation des processus. Le langage BPMN, langage majeur utilisé dans de nombreuses industries (Chinosi and Trombetta, 2012) s'est d'abord imposé pour sa grande simplicité de modélisation couplée à une grande richesse de représentation. Finalement il apparaît que son plus grand atout est aussi sa plus grande faiblesse. En effet avec plus de 150 symboles différents, cet outil ne permet pas de valider aisément et de manière automatisée ses diagrammes.

De nombreux autres langages existent pour la modélisation des processus et notamment des langages plus formels. Par exemple, les réseaux de Pétri sont à nouveau étudiés, particulièrement dans le cadre des travaux de Process Mining (Van der Aalst, 2016, 2011). Le Process Mining permet d'interroger les données issues de l'exécution des processus afin de mieux comprendre ses dysfonctionnements et de trouver des leviers pour les optimiser.

Le SysML est le langage le plus couramment utilisé en MBSE. Tout comme le BPMN, c'est un langage semi-formel. Par contre il permet de modéliser un système selon plusieurs points de vue différents et de conserver en même temps une vue globale et centralisée.

Quand on entreprend de faire de la modélisation, la validation des modèles est une étape cruciale. La métamodélisation permet de mieux maîtriser la sémantique et mieux structurer les sous-ensembles. De fait, elle aide à vérifier et valider le formalisme de la production des modèles. Plusieurs métamodèles de processus existent avec différentes approches (Lemoussu et al., 2018, 2018), mais à ce jour aucun ne semble adapté



à la modélisation des processus dans un contexte de développement de système aéronautique, où la certification est le moteur de toutes les activités. Par ailleurs notre volonté de répondre à une simplification de la Part-21 par la modélisation nous amène à nous poser la question sur l'intérêt de la complexité des métamodèles mis à disposition. Nous proposons donc de créer un nouveau métamodèle spécifique à la problématique et adapté à notre cible d'organisation, les TPE/PME (Lemoussu et al., 2018). Ce métamodèle permet de répondre aux considérations de consistance, complétude et de vérification des modèles produits.

Nous proposons ainsi une structuration de modèles, basée sur une architecture à trois couches, tel que le préconise les travaux de l'OMG, prenant en compte:

- un métamodèle,
- une série de modèles en conformité avec le métamodèle,
- des instanciations issues de cas concrets.

Les modèles, générés grâce à une démarche « Top-down », constitueront le livrable final adressé aux TPE/PME qui devront se l'approprier pour mettre en place leur organisation interne en conformité avec les attendus de la réglementation et à leur propre stratégie.

La confrontation des modèles avec les attentes et les contraintes de terrain des TPE/PME permettra dans un second temps de compléter les modèles et éventuellement de corriger le métamodèle lors d'une phase « Bottom-up ».

## 6 Résultats

Le travail pour rendre plus formelle la Part-21 passe par différents axes :

- l'analyse de la Part-21 et de sa structure,
- le classement des exigences par sous-partie ou SubPart,
- l'analyse des objectifs par SubPart et de manière transverse au sein de la Part-21,
- la modélisation des exigences, et la modélisation de l'organisation c'est-à-dire du système considéré ainsi que la modélisation de son comportement dans son environnement,
- l'analyse, la vérification et la validation des modèles produits.

A ce stade de la recherche, le choix du langage s'est porté plus particulièrement sur le SysML qui permet de présenter une modélisation de l'organisation sous différents points de vue. Par l'usage de différents types de diagrammes, l'organisation est construite d'un point de vue structurel et comportemental, tout comme peut l'être tout système complexe.

### 6.1 Diagrammes SysML

Plusieurs types de diagrammes SysML sont investis par notre recherche :

- Les diagrammes d'exigences
- Les diagrammes de blocs
- Les diagrammes d'activités
- Les diagrammes de séquence
- Les diagrammes d'état

Les diagrammes d'exigences sont utilisés pour représenter la structure de la Part-21 : un diagramme par Subpart est proposé.

Les diagrammes de blocs sont utilisés pour construire l'organisation des processus nécessaires pour être en conformité avec ces exigences. Ils font référence à la

description structurelle de l'organisation. Chaque bloc correspond à un processus particulier. Il est associé à une exigence de la Part-21 grâce au lien « Satisfy » et permet d'assurer la traçabilité de couverture de chaque exigence dans l'organisation. Chaque processus est composé d'activités et de tâches conformément au métamodèle proposé (Lemoussu et al., 2018).

Les diagrammes d'activités, de séquence et d'état seront à terme utilisés pour détailler les enchaînements dynamiques entre les processus, les activités et les tâches.

Les Figures 4 et 5 proposent des exemples de diagrammes d'exigences, respectivement de la SubPart J (Design Organisation Approval), et de la SubPart G (Production Organisation Approval for Products, Parts and Appliances). Ces deux SubPart sont majeures dans le processus de certification. La SubPart J expose les exigences minimales pour obtenir l'agrément de conception, celui qui assure que l'entreprise est en capacité de concevoir de manière sécurisée. La SubPart G expose les exigences minimales pour obtenir l'agrément de production, celui qui assure que l'entreprise est en capacité de produire de manière sécurisée.

Les Figures 4 et 5 montrent comment ce type de diagramme SysML permet d'avoir une vue d'ensemble de la réglementation et d'en simplifier la compréhension. Il apparaît ainsi plus clairement un squelette d'exigences communes avec des titres et des contenus d'exigences que nous retrouvons dans les deux SubParts :

- x31 : Scope
- x33 : Eligibility
- x34 : Application
- x49 : Transferability
- x51 : Terms of Approval
- x53 : Changes to the terms of Approval
- x57 : Investigations
- x58 : Findings
- x59 : Duration and continued validity
- x63 : Privileges
- x65 : Obligations of the holder

Aussi il apparaît des exigences similaires (Cf Table1).

Id	SubPart J	SubPart G
x35	Issue of DOA	Issue of POA
x39	Design Assurance System (DAS)	Quality System
	Changes in DAS	Changes to approved production organisation
x47		
x43	Data	Exposition

**Table 1.** Exigences comparables des SubPart J et G

Enfin la SubPart G décrit 2 exigences particulières qui sont propres au périmètre de l'agrément de production :

- 21.A.145 Approval requirements
- 21.A.148 Changes of location

Cette approche permet d'identifier une structure de modélisation comparable alors que le contenu seul des SubParts ne pouvait pas nous amener cette information.

La modélisation des exigences permet d'extraire plus d'information des exigences et force à structurer les objectifs de chacune en créant un lien qui peut paraître subjectif au premier abord mais qui apporte définitivement du sens à la compréhension des objectifs.

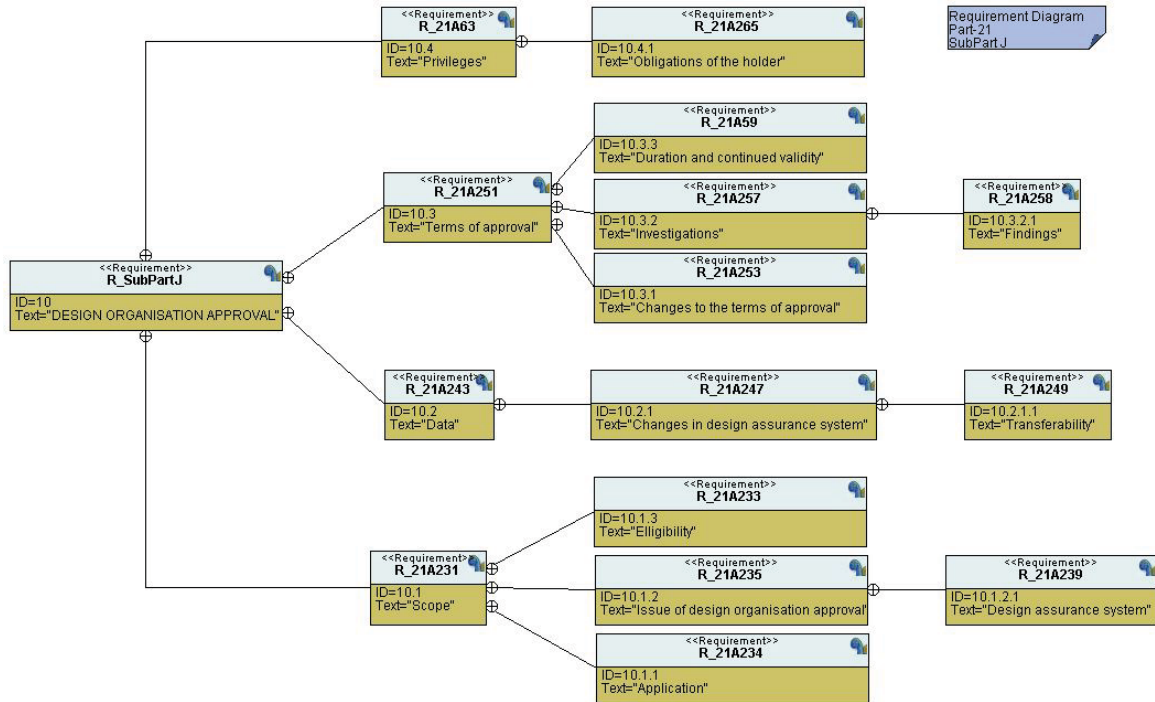


Figure 4. Diagramme des exigences de la SubPart J (Design Organisation Approval)

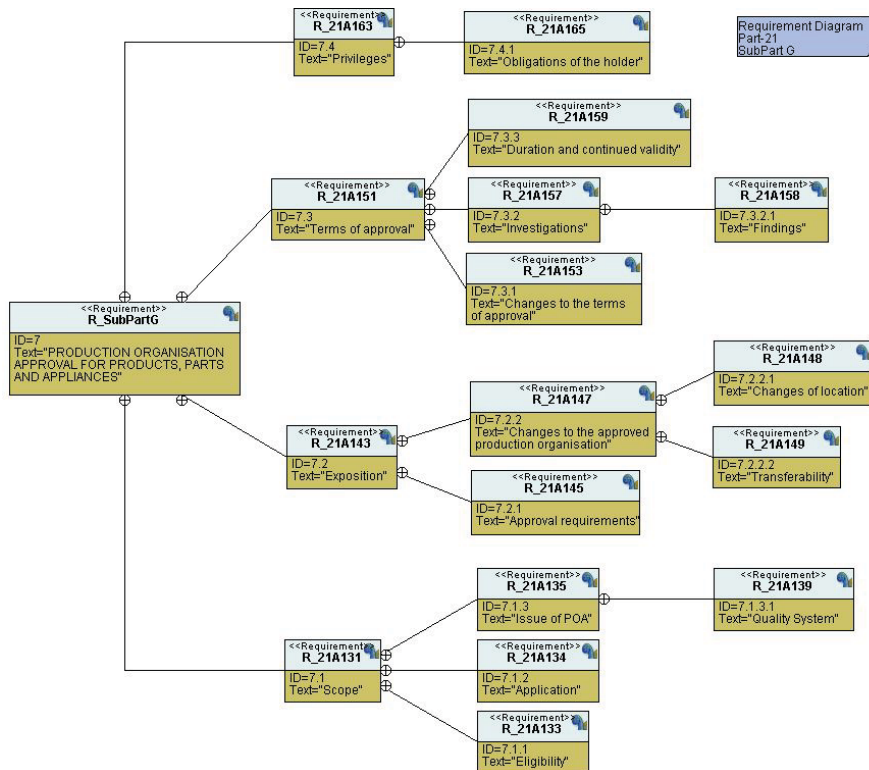


Figure 5. Diagramme des exigences de la SubPart G (Production Organisation Approval)

## 6.2 Paramétrisation de la modélisation

En plus de la modélisation SysML, la proposition de paramétrisation des modèles est un avantage supplémentaire par rapport à la liste d'exigences que propose la Part-21 actuellement. Un ensemble de paramètres est ainsi défini en entrée de la modélisation pour identifier plusieurs chemins possibles dans le modèle, car nous l'avons vu, la Part-21 permet plusieurs entrées de lecture.

**Définition 1 (Modèle).** Un modèle  $m$  est une fonction vectorielle  $m(X)=A$ , tel que:

- $A$  représente le vecteur des agréments demandés,
- $X$  représente le vecteur des variables d'entrée.

La Part-21 s'adresse à la fois aux organismes de conception, aux organismes de production, aux systémiers, aux motoristes, aux équipementiers, etc. Théoriquement, elle s'adresse à la fois aux grands groupes et aux TPE/PME. Le vecteur des variables d'entrée comportera donc plusieurs types de variables différentes, qui seront, à minima :

- la taille d'entreprise (nombre de salariés),
- l'activité de l'entreprise (conception, production, les deux, aucun des deux).
- le produit à certifier (aéronef, moteur, pièce, équipement).

**Définition 2 (Variable).** Une variable du modèle est un indicateur quantitatif ou qualitatif.

Différents agréments peuvent être obtenus en conformité avec la Part-21 et ceci en fonction des variables d'entrée, de la stratégie de certification de l'entreprise, de sa stratégie générale pour concevoir, produire et commercialiser son produit. La liste des exigences ne sera pas la même et les sorties, les livrables ou le vecteur des agréments ne sera pas le même (Cf. Figures 6 et 7).

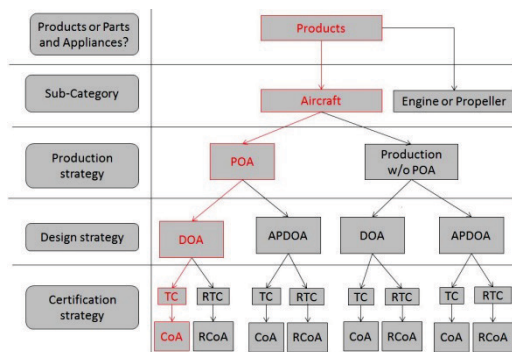


Figure 6. Sous-arbre de stratégie de la Part 21 : Produits

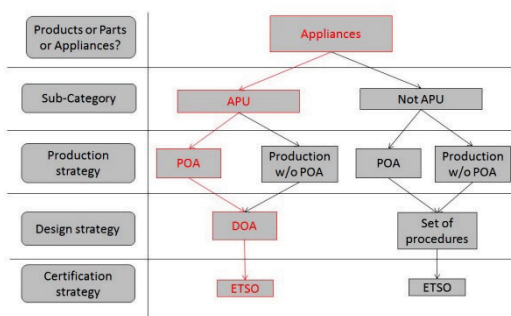


Figure 7. Sous-arbre de stratégie de la Part 21 : Pièces et Equipements

Les chemins identifiés en rouge dans les Figure 6 et 7 pourraient être une proposition pour les TPE/PME. Mais notre travail doit aussi consister à identifier les critères d'optimisation pour choisir le chemin optimal pour ces types d'entreprises.

Le système considéré est dans un premier temps statique et déterministe. Aussi l'échelle de temps n'est pas considérée dans une première étape de modélisation.

**Hypothèse 1.** En première abstraction, on fait l'hypothèse qu'une variable ne varie pas dans le temps.

Nous considérons que les données d'entrée déterminent de manière univoque le modèle d'intérêt et les variables de sortie. Ces dernières sont principalement les types d'agrément. Ainsi la propagation des incertitudes, inévitables en entrée du modèle, ne sera pas prise en compte dans un premier temps. Il pourra être envisagé par le futur de construire une modélisation dynamique où les variables d'entrées pourront varier dans le temps et ne seront plus suffisantes pour déterminer le modèle complet et les agréments de sortie.

**Hypothèse 2.** En première abstraction, on fait l'hypothèse que le modèle  $m$  est déterministe.

Il reste encore à définir complètement le vecteur des variables d'entrée du modèle, les catégoriser et finaliser la construction des diagrammes SysML.

Enfin nous prévoyons que les modèles produits seront à la fois validés par les cas concrets du secteur, par les expériences de certification en cours et à venir et par le personnel de l'AESA au travers des processus de certification des TPE/PME concernées. Deux cas d'études sont actuellement identifiés, chacun proposant un nouveau type d'aéronef (Flying Whales et Fly Win). D'autres entreprises sont à l'étude pour participer à notre échantillon de validation, notamment des équipementiers et des sous-traitants.

## 7 Conclusion

Notre travail de recherche s'applique à créer un cadre méthodologique solide et structuré pour répondre aux besoins des TPE/PME systémiers qui émergent sur le marché aéronautique. Celles-ci doivent pouvoir conserver la souplesse interne qui les caractérise et acquérir la confiance des organismes de certification, sans perdre trop de temps ni d'argent. Nous proposons une modélisation multi-vue, centralisée en utilisant les outils fournis par le langage SysML.

Notre approche de manière plus large pourra constituer un support méthodologique à toute entreprise qui souhaite obtenir l'un des agréments de la Part-21, grâce à une modélisation paramétrable selon des variables d'entrée et de sortie définies. Ainsi l'approche n'est pas exclusivement réservée aux systémiers mais peut aussi être utilisée par les équipementiers et autres sous-traitants du secteur.

A terme, d'autres standards et normes du secteur devront être intégrés aux modèles tels les normes d'ingénierie système (ISO15288, EIA632, IEEE1220), les ARP (4754, 4761, ...), les DO (178, 254, ...). Aussi l'idée est d'appliquer des méthodes d'optimisation et d'aide à la décision pour identifier un chemin critique acceptable pour toutes les parties prenantes du secteur aéronautique et d'élaborer des règles d'efficacité pour des cas d'utilisation précis.

Les activités de Process Mining pourraient être aussi adaptées pour améliorer l'ensemble de la proposition.

Enfin, notre approche pourrait s'adapter à d'autres industries où la réglementation est une contrainte importante.



## 8 Références

- Babey, N., Courvoisier, F., and Petitpierre, F. (2012). L'innovation, entre philosophie et management - La théorie des trois cubes.
- Blanchard, B.S., and Blyler, J.E. (2016). System Engineering Management.
- Braziotis, C., Tannock, J.D.T., and Boulakis, M. (2017). Strategic and operational considerations for the Extended Enterprise: insights from the aerospace industry. *Prod. Plan. Control* 28, 267–280.
- Chinosi, M., and Trombetta, A. (2012). BPMN: An introduction to the standard. *Comput. Stand. Interfaces* 34, 124–134.
- De Florio, F. (2016). *Airworthiness: an introduction to aircraft certification and operations* (Oxford: Butterworth-Heinemann).
- EASA (2018). *Easy Access Rules: Airworthiness and Environmental Certification* (Regulation (EU) No 748/2012).
- EC N°216 (2008). Regulation (EC) No 216/2008.
- EC N°748 (2012). Regulation (EC) No 748/2012.
- Honour, E.C. (2004). Understanding the Value of Systems Engineering. *INCOSE Int. Symp.* 14, 1207–1222.
- Lemoussu, S., Chaudemar, J.C., and Vingerhoeds, R.A. (2018). Proposition pour une Démarche de Modélisation des Processus. In *MOSIM'18: 12<sup>ème</sup> Conférence Internationale de MOdélisation, Optimisation et SIMulation*, (Toulouse, France), p. in press.
- Lemoussu, S., Chaudemar, J.C., and Vingerhoeds, R.A. (2018). Systems Engineering and Project Management Process Modeling in the Aeronautics Context: Case Study of SMEs. In *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, (Amsterdam, Netherlands), pp. 79–87.
- Muller, P., Devnani, D., Julius, J., Gagliardi, D., and Marzocchi, C. (2016). *Annual Report on European SMEs*.
- Van der Aalst, W. (2016). *Process mining: data science in action* (New York, NY: Springer Berlin Heidelberg).
- Van der Aalst, W.M.P. (2011). *Process mining. Discovery, conformance and enhancement of business processes* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).
- Xue, R., Baron, C., Esteban, P., and Demmou, H. (2014). Managing systems engineering processes: A multi-standard approach. In *2014 IEEE International Systems Conference Proceedings*, pp. 103–107.