



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

SLTC



Ecole Doctorale SLTC

Laboratoire 2LPN

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : PSYCHOLOGIE

par Raphaël PABLO

**Sous la direction de Valérie SAINT-DIZIER DE ALMEIDA &
Antonietta SPECOGNA**

**Développement ergonomique d'un support de formation
mobilisant les outils de l'industrie du futur**

09/11/2023

Membres du jury :

Directeur(s) de thèse :	Mme Valérie SAINT-DIZIER DE ALMEIDA	PU, Université de Lorraine, Nancy.
	Mme Antonietta SPECOGNA	MCF-HDR, Université de Lorraine, Thionville-Yutz.
Président de jury :	M. Jean-Michel PEREZ	PU, Université de Lorraine, Nancy.
Rapporteurs :	Mme Christine VIDAL GOMEL	PU, Université de Nantes, Nantes.
	M. Jean-Marie BURKHARDT	DR, Université Gustave Eiffel, Paris.
Examineurs :	M. André TRICOT	PU, Université Paul Valéry, Montpellier.
	M. Jean-Michel PEREZ	PU, Université de Lorraine, Nancy.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	10
Liste des acronymes	19
Table des figures et des tableaux	22
 Chapitre 1 : Contexte de la recherche	 28
1.1 L'industrie du futur.....	28
1.2 La plateforme 3D Expérience	31
1.3 Le projet TINA-M2P	33
Partie 1 : Ancrage théorique de la recherche action du projet TINA-M2P	36
Chapitre 2 : la notion d'objet intermédiaire au cœur d'une démarche d'ergonomie participative	37
2.1 La conduite de projet en ergonomie de l'activité	37
2.1.1 Une démarche permettant d'enrichir le projet à chaque étape.....	38
2.1.2 Une démarche développant l'activité de l'ensemble des acteurs du projet.....	40
2.2 La Didactique professionnelle	41
2.2.1 L'analyse du travail pour la formation	42
2.2.2 Les produits issus de l'analyse du travail en didactique professionnelle.....	42
2.2.3 La théorie des schèmes	44
2.2.3.1 Les règles d'action et variables de situation.....	45
2.2.3.2 Les buts.....	46
2.2.3.3 Les théorèmes en actes.....	47
2.2.3.4 Les concepts organisateurs.....	48
2.2.3.5 Des situations de références, cibles du développement de compétences.....	49
2.2.4 Des situations de simulation médiatrices entre l'apprenant et les situations de références	51
Résumé.....	53

2.3	Objet Intermédiaire comme articulant ergonomie de l'activité et didactique professionnelle	54
2.3.1	Le rôle des Objets Intermédiaires (OI) dans le processus de conception	56
2.3.2	L'OI médiateur de la dynamique collective	58
2.3.3	L'OI simplificateur de l'espace de dialogue.....	60
	Résumé.....	62

Chapitre 3 : La création d'un objet intermédiaire reflétant l'activité et son intégration dans un projet..... 64

3.1	Les modèles de tâches	64
3.2	Les groupes de discussion focalisée	73
3.2.1	Avantages.....	73
3.2.2	Limites.....	74
	Résumé.....	76

Chapitre 4 : Création et évaluation des formations sur la base des données constitutives de l'objet intermédiaire 78

4.1	Ingénierie pédagogique.....	78
4.1.1	Le modèle des 9 étapes de l'enseignement (Robert Gagné 1985)	80
4.1.2	Le Modèle ARCS de John Keller (1987).....	83
4.1.3	Le modèle 4C/ID (4 components / Instructional design) de van Merriënboer (2002) ..	86
4.2	Evaluation à des fins d'amélioration de la formation	88
4.2.1	Niveau des réactions : évaluation de la satisfaction et analyse des commentaires	89

Chapitre 5 : problématique et processus d'investigation..... 91

Partie 2 : Le développement de la conception.....97

Chapitre 6 : Déroulement du processus d'investigation/intervention..... 98

6.1	L'élaboration d'un dispositif de création de formation	98
6.2	L'observation du travail et la création de l'objet intermédiaire	101
6.2.1	La sélection d'une méthode de modélisation la plus adaptée à nos besoins	103
6.2.1.1	La méthode HTA.....	104
6.2.1.2	La méthode CUA.....	105
6.2.1.3	La méthodeGTA.....	107
6.2.1.4	La méthode CTT.....	110
6.2.1.5	La méthode MABTA.....	112
6.2.1.6	La méthode MAD.....	116
6.2.1.7	Tableau récapitulatif.....	119
6.2.2	Création de l'OI modélisation des tâches.....	120
6.3	Enrichissement de l'objet intermédiaire par les créateurs du drone.....	127
6.3.1	Animation de groupes de discussion focalisée afin d'enrichir l'objet intermédiaire ..	129
6.3.2	Résultats de l'enrichissement de l'objet intermédiaire	132
6.3.3	6.3.3. La posture de l'ergonome	141
6.4	Conception des formations par le biais de groupes de discussion focalisée médiatisés par l'objet intermédiaire	146
6.4.1	Des groupes de discussion focalisée pour concevoir des formations.....	147
6.4.1.1	La composition des GDFOI	147
6.4.1.2	Le déroulement des différents GDFOI.....	149
6.4.2	Résultats obtenus par le groupe de discussion focalisée.....	156
6.4.3	La posture de l'ergonome.....	161
6.4.3.1	Apport d'informations relatives au Projet TINA-M2P	162
6.4.3.2	Apports d'informations quant aux objectifs du groupe de discussion focalisée	163
6.4.3.3	Apport d'informations quant à ce qui a été réalisé par les stagiaires	164
6.4.3.4	Les demandes d'informations complémentaires.	165
6.4.3.5	Les demandes de clarification	166
6.4.3.6	L'énonciation de questions.....	167
6.4.3.7	La création d'un espace intersubjectif.....	168
6.4.4	L'élaboration des consignes à fournir aux groupes de discussion focalisée.....	171

6.5	Création des supports de formation sur la base des informations contenues dans l'objet intermédiaire.....	172
6.6	Evaluation et amélioration de la formation	176
6.6.1	Description de l'échantillon	177
6.6.2	Présentation du questionnaire de satisfaction.....	177
6.6.3	Validité de l'échelle.....	179
6.6.4	Analyse thématique	183
6.6.5	Amélioration des supports de formation sur la base de l'analyse des commentaires..	188
6.6.6	Evaluation des supports améliorés.....	191
6.6.7	Syllabus optimisation topologique	198
	Résumé.....	200

Partie 3 : Discussion et conclusion générale.....202

Chapitre 7 : Discussion.....203

7.1	L'assise scientifique du processus de conception.....	203
7.2	Le développement d'un cadre théorico-méthodologique	205
7.3	Un processus de conception intelligible et partageable	208
7.4	Les modules développés	209
7.5	Un processus de conception itératif base sur une méthode de gestion de projet	210
7.6	L'évaluation à des fins d'amélioration	213
7.7	La posture du psychologue ergonomiste	215
7.8	Une recherche action inscrite dans le courant de l'ergonomie participative	218
7.9	Les interactions entre l'OI et l'ergonome	219

Chapitre 8 : Conclusion221

Bibliographie226

ANNEXES.....	240
ANNEXES 1 : Fiches composant l’OI à la suite de l’observation de la primo-conception (Optimisation topologique).....	241
ANNEXES 2 : Retranscription GDF phase de primo-création (Optimisation topologique)	245
ANNEXES 3 : Fiches composant l’OI à la suite du premier enrichissement de l’OI (Optimisation topologique).....	263
ANNEXES 4 : Retranscription GDF phase de conception (Optimisation topologique)	281
ANNEXES 5 : Fiches composant l’OI à la suite du second enrichissement de l’OI (Optimisation topologique).....	363
ANNEXES 6 : Support pédagogique de l’optimisation topologique avant amélioration	369
ANNEXES 7 : Exercices Module d’optimisation topologique	385
ANNEXES 8 : Questionnaire de satisfaction.....	387
ANNEXES 9 : Support pédagogique de l’optimisation topologique après amélioration	400
ANNEXES 10 : Bible de codification du questionnaire	418
ANNEXES 11 : Résultats obtenus au questionnaire de satisfaction.....	419

Remerciements

A l'heure où je dois poser ma plume afin de lui offrir un repos bien mérité, je ne puis me résoudre à nous refuser un baroud d'honneur. Je vais donc la laisser virevolter une dernière fois sur l'immaculée surface virtuelle et faire d'elle la légataire de ma gratitude avant de clore ce chapitre de mon existence.

Mes remerciements vont en premier lieu à Madame Valérie Saint-Dizier de Almeida et à Madame Antonietta Specogna mes directrice et co-directrice de thèse. Elles m'ont accordé leur confiance et m'ont associé à cette formidable aventure. Elles m'ont également permis de voir plus loin et d'étayer ma pensée au-delà de tout ce que j'aurais pu espérer.

Je tiens également à remercier mon jury de thèse, Monsieur Jean-Michel Perez, Madame Christine Vidal Gomel, Monsieur Jean-Marie Burkhardt et Monsieur André Tricot qui m'honorent en prenant le temps de lire cette thèse et de l'enrichir de leurs commentaires.

Enfin je remercie mon comité de suivi de thèse composé de Monsieur André Tricot et de Monsieur Jérôme Dinet pour leur bienveillance et leurs remarques qui m'ont permis d'enrichir ce travail de thèse et, ce que nous avons produit dans le cadre du projet TINA-M2P¹.

Ce travail n'aurait jamais pu voir le jour sans la coopération du 2LPN, de l'INSPE académie Nancy-Metz, de la fondation de l'académie des technologies, de l'IRT-M2P et de Dassault système. A ce titre je tiens à remercier Monsieur Daniel Dudzinski, Madame Antonietta Specogna, Monsieur Patrick Ledermann, Monsieur Alain Hazotte, Monsieur François Mudry, Monsieur Patrick Le Hir et Monsieur Thierry Chevrot qui sont à l'origine du projet TINA-M2P et de la thèse que ce projet a portée.

¹ TINA-M2P : Tuteur Intelligent pour Nouvel Apprenant Méthode de Pédagogie par Projet

Je tiens également à remercier l'ensemble des acteurs du projet TINA-M2P qui ont été de formidables collaborateurs et des sujets d'études passionnants. A ce titre je tiens tout particulièrement à remercier Bart Zurowski et Christophe Czarnota qui ont été mes principaux collaborateurs et les piliers de la mise en œuvre du projet TINA-M2P. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour la patience dont ils ont fait preuve en m'expliquant les principes des mécaniques qui m'étaient étrangers. Je remercie également les équipes du projet avec qui j'ai collaboré 3 ans durant :

- pour le module Choix des matériaux je remercie Lionel Germain, Alain Hazotte et Benoît Beausir
- pour le module Electronique je remercie Pierre Pino, René Girardin et Régis Grass
- pour le module Conception mécanique je remercie Cyprien Wolff, Christophe Czarnota
- pour le module Ingénierie des exigences je remercie Sylvain NKanza Julien Zins et Alaa Hassan
- pour le module de Modélisation dynamique je remercie Nadine Bourgeois et Nicolas Bonzani
- pour le module de fabrication additive je remercie Gael Le Coz et Mohammed Boukhetaia
- pour le module d'Optimisation topologique je remercie Christophe Czarnota et Matthieu Norman

Je remercie également Nadir Djeniah et Naïm Hannane les créateurs de la première version du drone avec lesquels j'ai passé les 6 mois de mon stage de fin d'études et qui m'ont initié à la mécanique.

Je remercie l'ensemble des doctorants que j'ai pu croiser au sein du 2LPN et plus particulièrement Yasmina Kebir, Eloïse Zehnder, Capucine Bauchet, Alison Demangeon et Syrine Masrouki, ou durant mes formations Fabien Bessiere et Pierre Martin. Je les remercie tous pour leurs soutiens. Je remercie également mes camarades de psychologie que j'ai côtoyés durant des années Gilles Klein, Nicolas Molinéro, Maeva Dell'era, Julie Seychelles, Camille Dautreville, Marion Hilaire, Lucile Dartois, Pauline Stefanelli et Antoine Faure. Je n'aurai pu espérer meilleure compagnie durant mes études.

Enfin je remercie du plus profond de mon cœur mon père et ma mère Dominique Pablo et Sabine Pablo qui sont les deux géants qui m'ont porté sur leurs épaules aussi bien physiquement qu'intellectuellement et m'ont permis d'arriver là où j'en suis aujourd'hui. Je remercie mes amis les plus chers à mon cœur, que je n'ai pas pu voir aussi souvent que je l'aurais souhaité ces dernières années. Merci pour tout Josselin Ferragu-Schmitt, Richard Godot, Cyril Briquet, Manon Muhar, Rémi Mazelin, Pierre Emmanuel Mercuri, Mathieu Muller, Julien Luthman, Jean-François Fixe, Matthieu Fixe, Thomas Bazart, Reynald Lemaire et Cyril Blant.

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet TINA-M2P (2018-2021). C'est un projet qui implique différentes structures : l'Université de Lorraine (2LPN, LEM3, DITEX, INSPE), l'Académie des Technologies, Dassault Systèmes et l'IRT M2P. L'objectif du projet est la conception et le développement de formations innovantes au plus proche de l'activité réelle s'articulant autour de thématiques de l'industrie du futur comme la conception, les matériaux, la mécatronique, l'ingénierie des systèmes et la fabrication additive. La formation repose sur l'utilisation/exploitation de la plateforme 3DEXpérience par les apprenants. Elle intègre un espace collaboratif proposant des outils de modélisation 3D, de management de projets et de communication en temps réel. Cette suite de logiciels de Dassault Systèmes permet de réaliser l'intégralité des phases du cycle de vie d'un produit, de l'analyse du cahier des charges jusqu'à la fabrication. Il a été décidé que le prétexte à l'utilisation de ces différents outils serait la création d'un drone via impression 3D. Le choix du drone est lié au fait que c'est un objet complexe justifiant l'utilisation d'un grand nombre d'outils mais également d'un nombre important de notions du domaine de la mécanique et de gestion de projet tout en étant économiquement abordable pour être utilisé dans les classes de lycée. La formation s'adresse aux étudiants des filières BAC+2 à BAC+5 : ex-Diplôme Universitaire de Technologie, Licences, Master ainsi que des écoles d'ingénieurs.

Dans le cadre de cette thèse et afin de répondre aux ambitions du projet TINA-M2P, nous avons élaboré une méthodologie de conception de formation basée sur une approche d'ergonomie de l'activité. Celle-ci propose dans un premier temps d'analyser le travail afin d'obtenir les données qui nous permettront d'obtenir des solutions de conception négociée entre les différents acteurs du projet. Nous avons également eu recours à la notion d'objet intermédiaire afin de favoriser les interactions entre les acteurs du projet et la coordination entre les différentes équipes pluridisciplinaires que la réalisation du projet a requis. Ainsi, dans le cadre du projet TINA-M2P, nous avons pu développer des parcours de formation en nous axant sur une approche d'ergonomie participative. Le but de notre recherche action était de développer un cadre théorico-méthodologique de gestion de projet de conception de formation articulant ergonomie, didactique professionnelle et ingénierie pédagogique. Le tout, inscrit dans le courant de l'ergonomie participative. Nous avons également proposé une méthode d'évaluation des formations afin de pouvoir améliorer ces dernières et ce, de manière itérative. Enfin il s'agissait également d'instruire la posture du psychologue ergonomiste dans ce type de projet.

Résumé vulgarisé

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet TINA-M2P. Ce projet avait pour vocation de créer un ensemble de modules de formation permettant à ceux qui y participent d'apprendre en créant un drone en impression 3D grâce à la plateforme 3DExpérience.

Notre rôle dans le cadre de ce projet a été de proposer une méthode de conception de formation permettant à tous les participants du projet de pouvoir donner leur avis quant aux contenus et leur mise en œuvre. Nous avons également pour rôle d'évaluer la qualité des modules de formations que nous proposons afin de pouvoir les améliorer.

Le but de cette thèse est de proposer une assise théorique à l'ensemble des moyens mis en œuvre dans ce projet et aussi, de définir le rôle du psychologue ergonomiste dans ce type de projet.

Résumé en Anglais

This thesis is part of the TINA-M2P project (2018-2021). This project involves different structures: the University of Lorraine (2LPN, LEM3, DITEX, INSPE), the Academy of Technologies, Dassault Systèmes and the IRT M2P. The project objective is to design and develop innovative training courses that are as close as possible to real-life activities, based on the themes of the industry of the future such as design, materials, mechatronics, systems engineering and additive manufacturing. The training is based on the use and exploitation of the 3DExpérience platform by the learners. It integrates a collaborative space offering 3D modelling, project management and real-time communication tools. This software suite from Dassault Systèmes allows users to carry out the entire life cycle of a product, from the specification analysis to the manufacturing process. It was decided that the reason for using these different tools would be to design and manufacture a drone via 3D printing. Choosing a drone is supported by the fact that it is a complex object justifying the use of a large number of tools but also of a significant number of notions in the field of mechanics and project management.

The training is aimed at students of the BAC+2 to BAC+5 courses: DUT, Licences, Master as well as engineering schools.

Within the framework of this thesis and in order to meet the ambitions of the TINA-M2P project, we have developed a training design methodology based on an ergonomic approach of the activity. This methodology proposes to analyse the work in order to obtain data that will allow us to obtain design solutions that have been negotiated between the different actors of the project. We also used the notion of intermediate object in order to favour interactions between the actors of the project, and coordination between the different multidisciplinary teams required by the project realisation. Thus, within the framework of the TINA-M2P project, we were able to develop training courses based on a participatory ergonomics approach. The aim of our research action was to develop a theoretical-methodological framework for the training management for design projects that articulates ergonomics, professional didactics and pedagogical engineering; With all of this in line with the current participatory ergonomics.

We also proposed a method for evaluating training courses in order to improve them iteratively. Finally, our role was also to instruct about the posture of the ergonomic psychologist in this type of project.

Résumé vulgarisé en Anglais

This thesis was carried out in the framework of the TINA-M2P project. This project was aimed at creating a

training package that would allow participants to learn by creating a 3D printed drone using the 3DExpérience platform.

Our role in this project was the proposal of a method for the creation of a training that would allow all participants in the project to give feedback on the content of the training and its implementation. We also had the role of evaluating the quality of the training we proposed, in order to improve them.

This thesis aims at providing a theoretical base for all the means we used in this project and to also define the role of the ergonomic psychologist in this type of project.

Liste des acronymes

2LPN : Laboratoire Lorrain de Psychologie et Neurosciences

3D : 3 Dimensions

4C/ID : Four-Component Instructional Design

ADDIE : Analysis Design Development Implementation Evaluation

ANEFA : Association Nationale paritaire pour L'Emploi et la Formation en Agriculture

ANOVA : ANalyse Of VAriance

ARCS : Attention, Relevance, Confidence, Satisfaction

CAO : Création Assistée par Ordinateur

CTT : Concur Task Tree

CUA Collaboration Usability Analysis

DMU : Digital Mock-Up

EEE Evaluation de l'enseignement par l'étudiant

ENSGSI : Ecole Nationale Supérieure en Génie des Systèmes et de l'Innovation

ERIC : Educational Resources Information Center

ERP : Etablissement Recevant du Public

ERPI : Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs

ESPE : Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education

ESSOC : Etat au Service d'une Société de Confiance

FDM : Fused Deposition Modeling

GDF : Groupe de Discussion Focalisée

GL : Génie Logiciel

GT : Groupe de travail

GTA : Groupware Task Analysis

HTA : Hierarchical Task Analysis

HTN : Hierarchical Task Network

ID : Instructional Design

IHM : Interface Homme Machine

INSPE : Institut National Supérieur du Professorat et de l'Education

IRT : Institut de Recherche en Technologie

IRT-M2P : Institut de Recherche en Technologie, Matériaux, Métallurgie et Procédés

ITI : Instance de Tâche Individuelle

IUT GMP : Institut Universitaire de Technologie Génie Mécanique et Productique

JIT : Just In Time

LCOMS : Laboratoire de Conception, Optimisation et Modélisation des Systèmes

LEM3 : Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux

LISI : Laboratoire d'Ingénierie de la Sécurité Incendie

MABTA : Multiple Aspect Task Analysis

MAD : Méthode Analytique de Description des tâches

MADDEC : Modèle d'Analyse Dynamique pour la Description et l'Evaluation des Compétences

MM : MultiModalité

NTIC : Nouvelle Technologies de l'Information et de la Communication

OI : Objet Intermédiaire

PDF : Portable Document Format

PLM : Product Lifecycle Management

RFLP : Requirement, Fonctional Logic Physic

RH : Ressource Humaine

SCI journal : Science Journal Impact Factor

SNCF : Société Nationale des Chemins de fer Français

SSCI : Social Sciences Citation Index

TCAO : Travail Coopératif Assisté par Ordinateur

TINA-M2P : Tuteur Intelligent pour Nouvel Apprenant Méthode de Pédagogie par Projet

TMS : Trouble Musculo-Squelettique

UFR MIM : Unité de Formation et de Recherche Mathématique Informatique et Mécanique

UPS : Unité de Prestation de Service

VAE : Validation des Acquis de l'Experience

ZPD : Zone proximale de développement

Table des figures et des tableaux

Liste des figures

Figure 1 : Démarche de conduite de projet proposée par l'ergonomie de l'activité (Van Belleghem & Barcellini, 2011).....	37
Figure 2 : Schéma de la médiation sujet/situation de référence via la situation de simulation extrait de Rogalski (1998).....	51
Figure 3 : Relations entre les notations étudiées, en fonction de leur champ disciplinaire. GL : Génie Logiciel. IHM : Interaction Homme-Machine. TCAO : Travail collaboratif Assisté par Ordinateur. MM : Multimodalité. Extrait de Jourde, Laurillau et Nigay (2014).....	65
Figure 4 : Neuf événements d'instruction de Robert Gagné créé par Kaylee Ranocchia (2014).....	80
Figure 5 : Schématisation de la méthodologie de création d'un module de formation dans le cadre du projet TINA-M2P.....	98
Figure 6 : Modélisation de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » en suivant la méthodologie HTA.....	104
Figure 7 : Diagramme du flot de travail pour la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » d'après la méthode de modélisation CUA.....	105
Figure 8 : Définition du scénario « Paramétrer l'optimisation » selon CUA.....	106
Figure 8 : Modèle de Tâche CUA pour le scénario « préparer la simulation ».....	107
Figure 9 : Arborescence hiérarchique de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » selon la méthode de modélisation GTA.....	108
Figure 10 : Diagramme d'activité de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » selon la méthode GTA.....	108
Figure 11 : Diagramme de classe de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » selon la méthode GTA.....	109
Figure 12 : Exemple de représentation de l'environnement physique pour l'action « choisir le maillage » sur 3DExpérience selon la méthode GTA.....	109
Figure 12 : Représentation graphique des différents types de connecteurs temporels proposés par la méthode de modélisation CTT d'après l'outil CTTE	110

Figure 13 : Représentation graphique des différents types de tâches proposées par le modèle CTT d'après l'outil CTTE.....	111
Figure 14 : Modélisation de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » en utilisant la méthode de modélisation CTT.....	112
Figure 15 : Modèle de rôles et des utilisateurs selon la méthode de modélisation MABTA.....	115
Figure 16 : Modèle de tâche de groupe selon la méthode de modélisation MABTA.....	114
Figure 17 : Décomposition hiérarchique des tâches selon la méthode de modélisation MABTA.....	114
Figure 18 : Exemple de modèle de l'interface graphique détaillée.....	115
Figure 19 : Représentation graphique des opérateurs temporels selon la méthode de modélisation MAD.....	116
Figure 20 : Modélisation des tâches selon la méthode de modélisation MAD.....	116
Figure 21 : Exemple de fiche descriptive de la tâche reprenant les attributs de la tâche proposée dans la méthode de modélisation MAD.....	117
Figure 22 : Figure 22 : exemple de notes manuscrites prises durant l'observation participante.....	121
Figure 23 : Adaptation du formalisme de la méthode MAD à l'outil utilisé.....	123
Figure 24 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie R de l'OI.....	124
Figure 25 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie F de l'OI.....	125
Figure 26 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie L de l'OI.....	125
Figure 27 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie P de l'OI.....	126
Figure 28 : Illustration de la tâche « Optimiser la modélisation du prototype de bras » et des sous-tâches qui la compose utilisées pour notre OI.....	127
Figure 29 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie L de l'OI.....	130

Figure 30 : Illustration des tâches qui concernent l'optimisation topologique avant l'enrichissement de l'OI par les stagiaires.....	133
Figure 31 : Illustration des tâches qui concernent l'optimisation topologique après l'enrichissement de l'OI par les stagiaires.....	133
Figure 32 : Représentation de l'ensemble des tâches de l'OI sélectionnées par le GDF afin de faire l'objet d'un module de formation portant sur l'optimisation topologique.....	156
Figure 33 : Résultat du consensus auquel les participants du GDF ont aboutis pour ce qui est des tâches que les apprenants devront réaliser durant le module d'optimisation topologique.....	157
Figure 34 : Tâches d'apprentissage du module d'optimisation topologique	174
Figure 35 : Exemple de support pédagogiques avant amélioration.....	189
Figure 36 : Exemple de supports pédagogiques avec ajout d'éléments d'interface de la plateforme.....	189
Figure 37 : Exemple de supports pédagogiques avant amélioration.....	190
Figure 38 : Supports pédagogiques dont le nombre d'éléments a été réduit avec ajout d'éléments de l'interface utilisateur de la plateforme.....	190
Figure 39 : Fiche descriptive du module d'optimisation topologique.....	199
Figure 40 : Schématisation du modèle ADDIE (Molenda, 2003).....	211
Figure 41 : Illustration du modèle MADDEC (Coulet 2011).....	223

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des différentes méthodes de modélisation et leur intérêt dans le cadre de notre projet.....	120
Tableau 2 : Comparaison du contenu des fiches descriptives des tâches avant et après le premier enrichissement de l’OI.....	139
Tableau 3 : Analyse des actions communicationnelle de l’ergonome durant le groupe de discussion foracalisée réalisé avec les stagiaires dans le cadre du module d’optimisation topologique.....	141
Tableau 4 : Analyse des actions communicationnelle de l’ergonome durant le groupe de discussion foracalisée réalisé avec personnes en charge de la conception du module d’optimisation topologique.....	161
Tableau 5 : Présentation de l’échantillon des apprenants.....	177
Tableau 6 : Sous échelle « contenu de la formation » du questionnaire de satisfaction.....	177
Tableau 7 : Sous échelle « conditions de formation » du questionnaire de satisfaction.....	178
Tableau 8 : Sous échelle « actions pédagogiques » du questionnaire de satisfaction.....	178
Tableau 9 : Questions composant l’échelle de satisfaction du questionnaire TINA-M2P.....	179
Tableau 10 : Coefficients de cohérence interne du questionnaire TINA-M2P.....	180
Tableau 11 : Résultats de l’analyse en composante principale à 1 facteur du questionnaire TINA-M2P.....	181
Tableau 12 : Résultats de l’analyse en composante principale à 1 facteur du questionnaire TINA-M2P après modification.....	181
Tableau 13 : Résultats de l’analyse en facteur commun à 3 facteurs du questionnaire TINA-M2P.....	182
Tableau 14 : Commentaires appartenant au thème « Plateforme 3DExpérience ».....	184
Tableau 15 : Commentaires appartenant au thème « Supports pédagogiques ».....	185
Tableau 16 : Commentaires appartenant au thème « Déroulement du cours ».....	187

Tableau 17 : Effectif des sujets en fonction de la version du support de cours et de la formation initiale suivie.....	191
Tableau 18 : Bible de codification des nouvelles variables créées afin de réaliser les comparaisons avant/après.....	191
Tableau 19 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants lors des formations réalisées avec la version originale du support de formation.....	192
Tableau 20 : Résultats des ANOVA visant à déterminer si l'appartenance à un groupe fait varier significativement le score obtenu au questionnaire si l'on a suivi la formation avec la version initiale du support de formation.....	192
Tableau 21 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants lors des formations réalisées avec la version modifiée du support de formation.....	193
Tableau 22 : Résultats des ANOVA visant déterminer si l'appartenance à un groupe fait varier significativement le score obtenu au questionnaire si l'on a suivi la formation avec la version modifiée du support de formation.....	193
Tableau 23 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants lors de l'ensemble des formations.....	194
Tableau 24 : Résultats des ANOVA visant déterminer si l'appartenance à un groupe fait varier significativement le score obtenu au questionnaire.....	194
Tableau 25 : Résultats des ANOVA visant déterminer si le fait d'avoir assisté à la formation avec l'une ou l'autre version des supports de formation fait varier significativement le score obtenu au questionnaire.....	195
Tableau 26 : Moyenne des résultats obtenus en fonction de la version des supports de formation.....	195
Tableau 27 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants à l'ensemble des items de la sous-échelle « contenus de la formation ».....	196
Tableau 28 : Résultats des ANOVA visant à déterminer si le fait d'avoir assisté à la formation avec l'une ou l'autre version des supports de formation fait varier significativement le score aux items de la sous échelle « contenus de la formation »..	196
Tableau 29 : Moyenne des résultats obtenus aux items de la sous-échelle « contenus de la formation » en fonction de la version des supports de formation.....	196
Tableau 27 : Bible de codification de la sous-échelle « Contenus de la formation »....	198

Chapitre 1 : Contexte de la recherche

1.1 L'industrie du futur

Depuis quelques années, un renouveau industriel à l'origine de l'émergence de nouveaux outils, se produit à l'échelle mondiale.

L'industrie a subi plusieurs révolutions. Chacune étant caractérisée par l'apparition d'une nouvelle technologie.

- La première révolution industrielle est liée à l'invention de la machine à vapeur par James Watt en 1769.
- La seconde révolution est amenée par l'introduction de l'électricité qui a permis la production de masse.
- Enfin une troisième révolution a lieu au milieu du XXème siècle grâce à l'électronique, les télécommunications ou encore l'informatique.

Lors de la foire de Hanovre, salon de la technologie industrielle de 2011 il a été mis en évidence que nous assistions aux prémices d'une quatrième révolution industrielle fondée sur l'usine intelligente. Cette dernière serait liée au couplage qui a lieu en ce moment entre la production industrielle et les NTIC (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication).

Cette révolution se produit au niveau mondial. En Europe, les principaux acteurs de cette révolution sont la France et l'Allemagne et bien que les noms des projets portant cette révolution ne soient pas les mêmes, l'idée qui les soutient est identique. En effet, l'Industrie 4.0 est l'un des projets clé de la stratégie concernant les hautes technologies du gouvernement allemand, qui encourage la révolution numérique des industries. En France, connu sous le nom « d'industrie du futur » les sociétés comme Fives, Schneider Electric, Dassault Systèmes, Airbus Group, Bosch Rexroth, SNCF sont très impliquées dans cette révolution industrielle. C'est d'ailleurs pour répondre aux besoins de l'industrie du futur que Dassault Système a créé la plateforme 3D EXPERIENCE. Voici à la suite les principales caractéristiques de ces usines du futur.

- **La numérisation de l'usine** : l'utilisation d'internet, de réseaux cyber physiques et de capteurs aux seins de l'usine du futur permet une communication instantanée entre les outils et les postes de travail intégrés dans les chaines de production et d'approvisionnement.
- **La personnalisation de la production** : un site de production composé d'éléments intelligents communicants entre eux et avec l'extérieur permet aux différents partenaires mais également aux clients d'intervenir dans le processus de production. La grande flexibilité qu'offre un tel système permet donc une très grande adaptation à la demande. Il est dès lors possible d'obtenir un produit personnalisé et conçu à grande échelle.
- **L'économie de l'énergie et des matières premières** : cette économie est permise par le fait que l'usine du futur est organisée selon un réseau de communication et d'échanges instantanés et permanents. Les besoins du système sont connus en permanence ce qui permet une gestion des ressources plus efficace et donc une augmentation de l'efficience globale.
- **De nouveaux outils logistiques** : l'usine du futur par le biais des NTIC génère un flux d'information bien supérieur à celui des usines traditionnelles. Ces informations devant circuler rapidement entre les différents acteurs, il est indispensable de se munir d'un outil logistique capable d'assumer ce rôle.
- **Des outils de simulation** : les performances des simulations ont fortement évolué ces cinq dernières années. Ainsi, aujourd'hui, certaines simulations de procédés, ou de flux de production, atteignent un niveau de robustesse qui en font de nouveaux outils d'aide à la décision. La modélisation des lignes de production, des espaces de stockage, de la transitique, ainsi que de toutes les règles d'organisation industrielle et logistique, permet de représenter virtuellement un site de production ou logistique. Et ceci avant tout investissement matériel. Le recueil des données produites par les différents éléments de la chaîne de production permet également de produire une réplique virtuelle de tout ou partie de cette chaîne afin de générer des simulations de procédés ou de tests, mais aussi de permettre aux futurs ouvriers et techniciens de se familiariser avec des outils de travail et des procédures complexes ou encore de faciliter les réparations et la maintenance pour des non-spécialistes.

Etant donné le contexte d'évolution industrielle mondiale, il est primordial que les ingénieurs nouvellement diplômés soient opérationnels le plus vite. Ainsi il semble primordial de proposer des formations permettant d'utiliser les outils de l'industrie du futur. Le projet dans lequel s'inscrit cette thèse se propose de créer des modules de formation utilisant deux des outils de l'industrie du futur, l'impression 3D et la 3DEXpérience, une plateforme développée par Dassault système. L'impression 3D est un procédé de type fabrication additive qui permet la création de pièces par ajout de matière contrairement à la fabrication dite soustractive qui elle part d'un bloc de matière et soustrait de la matière à ce bloc afin d'obtenir la forme escomptée. La fabrication additive est un procédé de fabrication plus lent mais qui réduit les pertes de matière et permet la création de pièces à géométrie complexe. Initialement réservée à l'industrie du fait de son coût et de sa difficulté de mise en place, l'impression 3D a connu une révolution dans les années 2000 du fait de l'expiration du brevet sur la technologie FDM (Fused Deposition Modelling). La 3DEXpérience quant à elle prend la forme d'une plateforme proposant des outils de modélisation 3D pour la conception et la fabrication d'objets dans de nombreux domaines de l'industrie. Afin de décrire l'histoire et les enjeux qui ont mené à la création de cette plateforme, nous nous appuierons sur l'entreprise Dassault Système qui en est à l'origine.

1.2 La plateforme 3D Expérience

Dassault Système est une entreprise née du besoin d'informatisation de la conception d'avions de l'entreprise Dassault Aviation. L'entreprise commence son activité en mettant sur le marché le logiciel de modélisation 3D CATIA en 1981. A cette époque le design 3D se réduisait à dessiner la pièce à usiner sans tenir compte de l'environnement. Chaque ingénieur suivait son cahier des charges afin de créer une pièce et chaque pièce était ensuite assemblée à d'autres une fois produite.

Une première évolution a eu lieu dans les années 90 avec la 3D DMU (Digital Mock-Up). Avec la 3D DMU les ingénieurs devaient prendre en compte les autres pièces du système dans lequel devait s'intégrer la pièce qui leur était attribuée ainsi que les interactions entre les différents organes de ce système. La maquette 3D ainsi obtenue permettait de simuler le comportement du système complet. Ce paradigme nécessitait une coopération entre les différents ingénieurs travaillant sur les pièces d'un même système afin de permettre le fonctionnement optimal de ce dernier.

Une deuxième évolution est venue se greffer à la 3D DMU dans les années 2000, la conception 3D PLM (Product Life Management). Elle met le focus sur le produit tout au long de son cycle de vie (de sa conception à son recyclage). Ainsi des considérations telles que la maintenance du produit sont prises en compte et ce dès la conception. La 3D PLM a nécessité la mise en place d'une ingénierie concourante et donc la transmission de l'ensemble des caractéristiques du produit à des entreprises dont l'activité est satellite (maintenance du produit, réparation, sécurité, recyclage du produit etc.) à celle de l'entreprise qui conçoit.

Les nouveaux outils développés par Dassault Systèmes dans le cadre de la révolution industrielle mentionnée plus haut ont permis une nouvelle évolution de la conception 3D. Les fonctionnalités de la plateforme 3Dexperience en plus de favoriser la collaboration entre les différents acteurs, permet de placer le client au centre du processus de conception grâce aux informations partagées en temps réel.

Cependant Dassault Système a pu observer que les ingénieurs sortant des écoles ne prennent pas systématiquement en compte le système dans lequel s'intègre les pièces qu'ils conçoivent. Dassault Systèmes étant très impliqué dans l'industrie du futur, l'entreprise a pour volonté de proposer des solutions aux organismes de formation afin que les nouveaux ingénieurs s'inscrivent dans les paradigmes de la 3D PLM et soient aptes à utiliser les outils de l'usine du futur (3Dexperience, fabrication additive). C'est cette volonté qui a amené Dassault Système à soutenir le projet TINA-M2P en proposant ses solutions logicielles comme outils de formation.

1.3 Le projet TINA-M2P

Face au couplage entre la production industrielle et les nouvelles technologies de l'information et de la communication qui a lieu en ce moment dans le monde entier, l'industrie doit se montrer plus réactive que jamais. Ce besoin de réactivité se traduit dans le domaine industriel par l'arrivée d'usines du futur qui peuvent ajuster leur production très rapidement afin de répondre à la demande. Au niveau de la formation, ce besoin de réactivité se traduit par un besoin de formation au plus proche de l'activité réelle afin que les ingénieurs fraîchement diplômés soient aptes à répondre aux exigences de l'industrie du futur et prêts à utiliser ses outils le plus rapidement possible. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet TINA-M2P.

Le projet TINA-M2P a pour ambition, en utilisant une plateforme numérique (la 3Dexperience), de développer des modules de formation et des parcours pédagogiques au plus proche de l'activité réelle. Le tout permettant la conception partielle ou totale d'un objet complexe, en l'occurrence un drone. Nous avons fait le choix du drone car c'est un objet de petite taille et léger qui pourra être facilement créé via l'impression 3D avec des matériaux facilement accessibles ce qui permettra à un grand nombre d'établissements scolaires, universitaires et professionnels de pouvoir former les apprenants au développement des compétences attendues, par la fabrication de drones.

Un drone est également un objet complexe qui allie électronique et informatique étant donné qu'il vole et est commandé à distance. Ainsi il pourra faire l'objet de modules de formations provenant de différentes disciplines. Enfin un drone est un objet volant, il est de fait soumis à une contrainte de légèreté ce qui amène à intégrer au processus de conception l'utilisation de procédés comme l'optimisation topologique.

La plateforme est destinée aux étudiants et aux enseignants en ingénierie mécanique, électronique et mécatronique. Les modules auront pour but de permettre aux étudiants de maîtriser les outils de l'industrie du futur. Le projet se déroule en 4 étapes : fabrication du drone avec les outils de l'industrie du futur par des étudiants stagiaires en fin de cursus formés à l'utilisation de ces outils, conception des modules de formation et de parcours, test en conditions réelles de ces parcours exploitant les modules de formation et le déploiement de ces formations. C'est dans le cadre de ce projet que s'inscrit ce travail de thèse.

L'objectif du projet TINA-M2P est de créer des formations basées sur un objet qui n'avait pas encore été créé en utilisant exclusivement la 3DExpérience et l'impression 3D. Etant acteur à part entière du projet TINA-M2P nous avons, dans une optique de recherche action, développé une méthodologie de création de modules de formation basée sur les principes de l'ergonomie, de la didactique professionnelle et de l'ingénierie pédagogique. En effet, durant l'observation, les principes de la didactique professionnelle nous ont permis de déterminer et d'extraire les éléments les plus pertinents de l'activité de création du drone à des fins d'apprentissage. L'ergonomie nous a fourni les outils méthodologiques nécessaires pour transformer ces éléments en un tout cohérent et compréhensible par tous les membres du projet via la conception d'un objet intermédiaire - objet intermédiaire qui a ensuite été injecté dans les échanges au sein de l'équipe pluridisciplinaire en charge du projet.

Cette équipe composée d'enseignants, de professeurs des universités, de psychologues, de professionnels de l'ingénierie spécialistes en mécanique électronique, informatique et ingénierie système nous a permis, dans le cadre d'une démarche participative inspirée de l'ergonomie de l'activité, d'enrichir cet objet intermédiaire afin qu'il nous permette de répondre aux exigences de l'ingénierie pédagogique en matière de création de formation. C'est en alliant les principes de l'ergonomie, de la didactique professionnelle et de l'ingénierie pédagogique dans une démarche participative que nous avons pu créer un ensemble de modules de formation permettant à l'apprenant de créer un drone depuis la création du cahier des charges jusqu'à l'assemblage du drone.

Partie 1

**Ancrage théorique de la recherche action du projet
TINA-M2P**

Chapitre 2 : la notion d'objet intermédiaire au cœur d'une démarche d'ergonomie participative

La notion d'objet intermédiaire et les perspectives qu'elle offre nous ont amenés à la solliciter dans le cadre d'une démarche d'ergonomie participative.

2.1 La conduite de projet en ergonomie de l'activité

L'ergonomie de l'activité a développé une démarche d'accompagnement des projets de conception articulant analyse ergonomique du travail, démarche participative, simulation du travail et accompagnement (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013). Nous expliquerons ci-après en quoi cette démarche a un intérêt pour nos travaux.

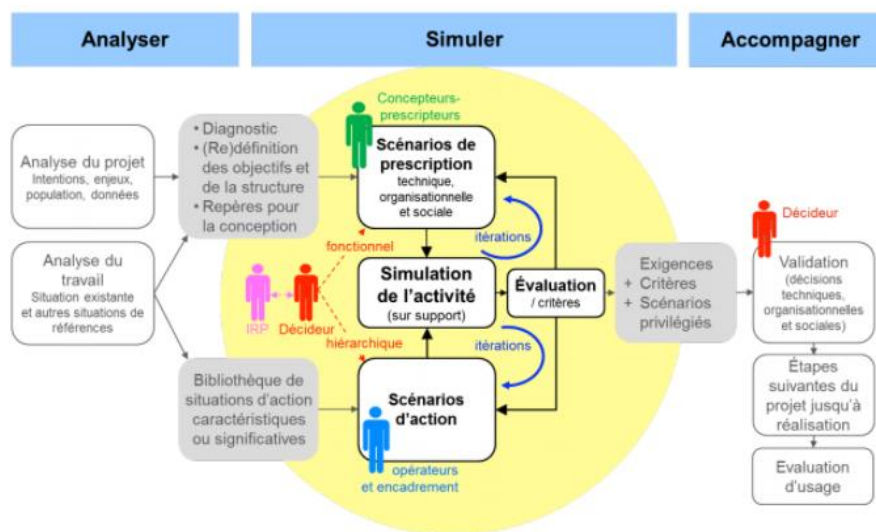


Figure 1 : Démarche de conduite de projet proposée par l'ergonomie de l'activité (Van Belleghem & Barcellini, 2011)

La figure 1 ci-dessus permet de montrer l'importance de l'enrichissement du projet par la prise en compte du travail. Au-delà des trois temps forts que sont l'analyse, la simulation et l'accompagnement, nous pouvons constater l'importance de l'implication des acteurs que sont les décideurs, les opérateurs, les concepteurs et les instances représentatives des personnels dans la co-élaboration d'un projet. Nous montrerons en quoi cette démarche permet un enrichissement et en quoi elle génère un développement de l'activité des acteurs.

2.1.1 Une démarche permettant d'enrichir le projet à chaque étape

La démarche de conduite de projet en ergonomie a été appliquée à de nombreuses reprises depuis sa formalisation (Petit & al., 2011) et des formes de développement de l'activité ont pu être observées. Ces développements se créent dans la rencontre des « mondes » proposée par cette démarche et permettent des apprentissages mutuels entre les acteurs (Béguin, 2007).

L'analyse de projet nécessite l'identification des enjeux et l'identification de la population concernée par les futures situations de travail. Elle permet de poser un diagnostic de projet orienté vers les décideurs et d'en redéfinir les objectifs quand c'est nécessaire (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013).

L'analyse ergonomique du travail permet, quant à elle, de produire des connaissances liées à la tâche. Ces connaissances sont utiles à tous les acteurs du projet et ont de ce fait un impact sur plusieurs aspects. Elles permettent aux décideurs de faire évoluer les objectifs en fonction des constats réalisés. Sur la base de ces connaissances, les concepteurs peuvent formaliser des repères qui éclaireront l'élaboration de premières solutions de conception (Daniellou, 2004). Enfin elles permettront à l'ergonome de construire des bibliothèques de situations d'actions caractéristiques (Daniellou, 1987 ; Garrigou et al., 1995) qui rendront possible l'élaboration des scénarios pour les simulations.

Vient ensuite la simulation qui peut se dérouler de deux manières (Daniellou, 2007) : soit sur un support de simulation réduit, soit grandeur nature. Les opérateurs peuvent alors éprouver de manière concrète les améliorations apportées par la nouvelle solution ce qui leur permet de comprendre que des améliorations sont possibles (Nahon & Arnaud, 2000). La simulation enrichit le dialogue entre opérateurs et prescripteurs. Elle favorise l'émergence de solutions de conception négociées (Détienne, 2006 ; Béguin, 2007) et de compromis pouvant être source d'innovation.

Enfin vient l'accompagnement. Afin que les scénarios de prescription soient effectivement déployés, les résultats des simulations doivent être traduits sous formes d'exigences ayant un sens pour les concepteurs. Ces exigences formalisées permettent aux concepteurs de progresser dans la conception du futur système et sa réalisation concrète (Van Belleghem & Barcellini ,2011).

2.1.2 Une démarche développant l'activité de l'ensemble des acteurs du projet

Lors de la phase de simulation, les concepteurs sont invités à participer à la simulation mais également à proposer de nouveaux scénarios de prescriptions sur la base du diagnostic réalisé en amont. Le but étant une meilleure intégration de l'activité réelle dans ces nouveaux scénarios et donc des développements dans l'activité des concepteurs. En effet, les concepteurs dans leur activité se centrent généralement sur les seuls composantes procédurales ou matérielles du système qu'ils conçoivent. Cependant par le biais de la simulation, les concepteurs sont confrontés à l'activité des opérateurs et bien que l'intégration de cette dernière puisse sembler contraignante, elle se révèle être finalement une des conditions du fonctionnement du système (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013). Dans un cadre participatif, l'augmentation des exigences qu'entraîne la prise en compte de l'activité réelle engendre un débat autour du travail entre opérateurs et concepteurs. Ce débat qui renforce les aspects délibératifs du projet (Van Belleghem 2018), est source d'innovation dans le sens où opérateurs et concepteurs, par une appropriation de points de vue de chacun, élargissent le champ des possibles (Béguin, 2013).

La démarche ergonomique de gestion de projets aide également à développer l'activité des décideurs. En effet, elle permet à ces derniers de se rendre compte de l'impact de la fonction de maîtrise d'ouvrage qui détermine les objectifs sur l'activité de la maîtrise d'œuvre² chargée de trouver des solutions afin d'atteindre ces objectifs (Barcellini 2015).

² La maîtrise d'œuvre ou maître d'œuvre est la personne physique ou morale choisie par le maître d'ouvrage pour la conduite opérationnelle des travaux en matière de coûts, de délais et de choix techniques, le tout conformément à un contrat et un cahier des charges.

Cet écart entre les objectifs et ce qui sera effectivement réalisé nécessite des ajustements entre objectifs et ressources et ce pendant toute la durée du projet. Assurer cette homéostasie nécessite la présence d'un collectif de décideurs où sont représentées toutes les logiques vitales pour la vie du projet (RH, Financement, Marketing ...) et d'un chef de projet qui assure une représentation permanente des décideurs au sein du projet et la fonction d'interface avec la maîtrise d'œuvre. La démarche ergonomique, au travers de la simulation du travail, permet la mise à l'épreuve des organisations techniques et organisationnelles. Ceci contribue au développement de l'activité des décideurs en rendant visibles les différentes logiques à prendre en compte mais également en offrant l'opportunité de mettre en place de nouvelles formes d'organisation ou de gestion qui seraient apparues comme inapplicables sans la simulation (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013).

2.2 La Didactique professionnelle

La didactique professionnelle trouve ses origines à la croisée de quatre champs disciplinaires : l'ingénierie de formation, la psychologie ergonomique, la psychologie du développement et la didactique des disciplines (Pastré, 2006). La didactique professionnelle propose une entrée « activité » afin de développer des formations étant de fait en rupture avec des méthodes de formation plus traditionnelles organisées autour de savoirs disciplinaires dont il faut orchestrer la transmission (Pastré, 2011). Ainsi la didactique professionnelle propose de former pour et par l'analyse de l'activité effective des opérateurs (Pastré, Mayen et Vergnaud, 2006).

2.2.1 L'analyse du travail pour la formation

La didactique professionnelle, considère l'activité productive et l'activité constructive. L'activité productive est une activité qui permet à l'être humain de transformer le réel ; en parallèle, l'activité constructive a pour effet de modifier le travailleur lui-même. En somme, le travailleur apprend de son travail, c'est pourquoi l'un des fondamentaux de la didactique professionnelle est de poser que l'apprentissage est indissociable de l'activité (Pastré, 2006). Ainsi la didactique professionnelle s'intéresse aux apprentissages professionnels afin d'améliorer les parcours et les dispositifs de formation proposés aux adultes tant en formation initiale qu'en formation continue, quel que soit le secteur d'activité concerné.

Pour ce faire, la didactique professionnelle utilise les méthodes d'analyse de l'activité développées en psychologie ergonomique et utilise comme ancrage théorique la théorie des champs conceptuels développée par Vergnaud (1990) sur la base de la théorie des schèmes élaborée par Piaget (Piaget 1947). Pour Vergnaud, le couple conceptuel situation/schème est considéré comme central dans l'apprentissage. En effet selon lui, le sujet construit des connaissances en réponse à des questions qu'il se pose en situation. Nous pouvons également souligner que selon l'auteur, les situations sont à la fois les sources et les conditions de l'apprentissage ainsi les connaissances doivent être systématiquement opératoires. La visée et l'objet de la didactique professionnelle est donc « l'analyse du travail pour la formation » (Pastré, 1999).

2.2.2 Les produits issus de l'analyse du travail en didactique professionnelle

L'analyse du travail permet entre autres de construire des référentiels de formation. Dans cette optique, Mayen, Métral & Tourmen (2010) ont proposé les trois catégories suivantes permettant de synthétiser les objets de l'analyse du travail en didactique professionnelle :

- l'analyse des situations de travail soit générique soit critique afin de déterminer leurs principales variables (Mayen 2001),
- l'analyse des activités des personnes au travers des prises d'informations et des contrôles que ces derniers effectuent afin de prendre des décisions (Pastré 2006),

- l'analyse des ressources qui permettent aux personnes d'agir dans les situations de travail. Ces ressources sont identifiées comme des éléments constitutifs du schème que sont les invariants opératoires Pastré (1999).

Les analyses menées dans le cadre de la didactique professionnelle ont permis d'acquérir une meilleure connaissance des métiers étudiés et d'enrichir la théorie à l'origine de la didactique professionnelle (Rogalski, 2014). Ces recherches ont également permis de créer divers outils de formations. Des simulateurs (Pastré, 2009) utilisés dans le cadre de la culture du colza (Jeaunereau, 2009) ou encore de la taille de la vigne (Caens-Martin & Specogna, 2004) ou du pilotage d'hélicoptères (Boccaro et al. 2018). Des dispositifs de formation utilisés pour former des agents de nettoyage (Genest, 2009), des contremaîtres de service technique en milieu hospitalier (Mayen, 1999), des enseignants en sciences industrielles de l'ingénieur (Koslowski, Morge, Specogna 2020), des conseillères téléphoniques (Oudart, 2008) ou des conseillers en gestion (Mayen, Specogna 2005). Ou encore des outils de valorisation et d'évaluation des compétences, comme le carnet de compétences des doctorants de Tourmen (2010), le guide à l'usage des jurys de VAE de Mayen & Tourmen (2009), le modèle opérationnel de la compétence de Coulet (2016).

Les outils fournis par l'analyse du travail permettent de guider la conception des activités de formation de différentes manières. Par exemple, les situations critiques du travail peuvent devenir des moyens de formation car ces dernières contiennent de manière intrinsèque les compétences nécessaires à leur maîtrise (Métral, 2012). Leur caractérisation permet la création de simulateurs, d'études de cas pédagogiques, de films, de parcours pédagogiques... mais également la conception d'outils d'évaluation des compétences en situation professionnelle (Tardif & Dubois, 2010).

Les activités étudiées deviennent ce que les personnes formées doivent reproduire dans différentes situations réelles mais également lors des formations comme le préconisent les approches pédagogiques actives (Eitington, 2001) plaçant l'apprenant en activité. Enfin, les résultats d'analyse de l'activité constituent des ressources exploitées en formation pour la formation des jeunes professionnels. Ces ressources permettent également de définir des formes d'évaluation basées sur des modes de raisonnement et des connaissances qui organisent les comportements observables de l'apprenant. Ces analyses reposent sur quatre portes d'entrée théoriques et pratiques issue de la théorie des schèmes de Pastré (Tourmen, 2014).

2.2.3 La théorie des schèmes

La théorie de la conceptualisation dans l'action, ou théorie des schèmes, telle que développée par Vergnaud (1996), dans la lignée du concept de schème de Piaget (1947), propose une théorisation du développement de l'activité compétente et de l'organisation de cette dernière dans des situations de travail. Sur la base de la théorie des schèmes, Mayen et al. (2006) proposent un cadre pratique pour l'étude du travail des personnes. Ce cadre pratique est composé de quatre entrées qui sont également dérivées des composants des schèmes dans leur dimension cognitive : les possibilités d'inférences, les buts, les théorèmes-en-actes et les concepts-en-actes.

Ces éléments constitutifs du schème sont à considérer comme « des totalités dynamiques et fonctionnelles » (Vergnaud, 2001). Ces entrées ne sont donc pas exclusives et le recours à l'une impliquera inévitablement de recourir à une ou plusieurs autres afin que l'analyse soit aussi fine que possible (Mayen 2006). Ces quatre entrées sont accessibles par l'observation, la verbalisation et l'analyse du travail dans le but d'en faire émerger les éléments constitutifs (Vergnaud, 2001).

La didactique professionnelle utilise également la méthodologie des entretiens d'explicitation de Vermersch (1994) pour qui un discours spontané sur le travail risque d'être trop général, empli de jugements et de généralités qui masqueraient la richesse de l'activité en situation. Afin de limiter ce risque, des « entretiens d'explicitation historique » (une adaptation des entretiens d'explicitation Mayen et Pin (2010)) ont été utilisés dans le cadre de l'étude de Tourmen (2014) portant sur les apprentissages d'étudiants partis en stage à l'étranger.

2.2.3.1 Les règles d'action et variables de situation

L'analyse de l'activité en utilisant le cadre de la didactique professionnelle peut consister à identifier les informations que le professionnel prélève sur la situation de travail et son évolution afin d'adapter son comportement ou d'anticiper cette évolution. Ces éléments permettent ensuite d'identifier quels raisonnements d'inférence (si A alors B), le professionnel applique afin d'utiliser la règle d'action la plus adéquate pour la situation (Pastré, 2006). Ce sont ces raisonnements qui sont appelés règles d'action et qui ont pour fonction l'anticipation, le diagnostic et l'adaptation (Vergnaud, 1996). Ces règles d'action peuvent émerger à la suite de questions du type : « Qu'est-ce que vous cherchez ? Que devez-vous savoir ici et maintenant ? À quoi faites-vous attention ? Qu'est-ce que vous surveillez ? Comment le surveillez-vous ? Qu'est-ce que vous contrôlez ? » (Mayen et al., 2006, p. 69). Le recours à ces questions permet de mettre à jour des prises d'informations que le professionnel incorpore à son travail sans nécessairement en avoir conscience. Une fois que le professionnel annonce quelle information était pertinente à tel moment et dans telle situation, il pourra dès lors expliquer l'influence que cette prise d'information aura sur son comportement pour la suite des événements. Il pourra expliquer pourquoi il a été attentif à cet élément précisément et quelles règles d'action il met en œuvre et ce, dans quel but (Mayen et al., 2006).

2.2.3.2 Les buts

Une seconde possibilité est de s'intéresser aux buts de l'activité. Ils sont multiples et contradictoires car provenant de sources de prescriptions dont les objectifs diffèrent (Leplat, 1997). Afin de pouvoir se donner une direction à suivre, les travailleurs hiérarchisent en fonction de la situation. L'entrée par les buts visés/anticipés se fait par l'intermédiaire de questions comme « Quel but privilégiez-vous dans ce cas-là ? Qu'est-ce qui risque de se passer si vous ne faites pas de cette façon ici et maintenant ? Quels sont les conséquences, l'impact de votre choix ? etc. » (Mayen et al., 2006, p. 72) qui peuvent révéler le système de buts qui guide l'activité. Tourmen (2014) mentionne une étude portant sur une analyse du travail réalisée auprès de « maçons-bancheurs » dont le but n'est pas toujours la durabilité de leur construction mais des préoccupations à court terme comme le prix du matériau ou encore l'économie du geste.

Il est également fait mention que les travailleurs n'ont pas toujours conscience des conséquences à long terme de ces choix sur la structure et qu'ils ne peuvent pas observer. Afin de pallier ces difficultés, des exercices pédagogiques ont été proposés à des apprentis maçons-bancheurs. Lors de ces exercices, des images de murs en béton présentant des défauts qui apparaissent à long terme étaient soumises aux apprenants et ceux-ci devaient établir un diagnostic de la gravité de ces défauts et déterminer l'origine de ces défauts. Le but de cette formation était de faire prendre conscience aux apprentis que l'un des buts de leur travail, tel la durabilité, entraînait des conséquences difficilement observables sur leur travail et qu'il leur fallait anticiper ces conséquences en régulant leur activité au moment de la construction des structures en béton. On peut voir, au travers de cet exemple, les liens qui existent entre les différents composants du schème, notamment la prise en compte des buts nécessite des changements au niveau des prises d'information et des raisonnements d'anticipation.

2.2.3.3 Les théorèmes en actes

. En didactique professionnelle, les théorèmes-en-actes aussi appelés propositions tenues pour vraies sur le réel (Vergnaud, 2001) sont des éléments centraux dans l'exercice d'un métier ; on observe que quelques théorèmes en actes suffisent à organiser le comportement d'un individu. Les théorèmes en actes s'expriment généralement sous forme de propositions assertives portant sur le travail. Elles orientent la lecture des situations et les règles d'action qui seront mises en œuvre. Les théorèmes en actes sont généralement révélés par des questions poussant l'individu à généraliser ce qu'il a réalisé ou ce qui s'est passé : « faites-vous toujours de cette façon ? » (Mayen et al., 2006) ou « est-ce que les choses se passent souvent ainsi ? ».

La verbalisation des théorèmes-en-actes se fait généralement lorsque le professionnel décrit son activité de travail, c'est au formateur ou au chercheur de poser la question au moment où le théorème-en-actes est accessible. A titre d'exemple Coulet (2011) a pu observer que des opérateurs expérimentés avaient plus souvent recours aux théorèmes en actes afin de décrire leur activité tandis que des opérateurs novices avaient tendance à utiliser des règles d'actions afin de décrire leur activité. Ces observations ont également permis à l'auteur de développer un modèle permettant d'opérationnaliser les compétences (MADDEC) issu de la didactique professionnelle.

2.2.3.4 Les concepts organisateurs

Viennent enfin les concepts organisateurs qui sont la porte d'entrée de prédilection de la didactique professionnelle, étant donné que la conceptualisation est au cœur de cette discipline (El Mostafa et al, 2012). Les concepts organisateurs sont centraux dans la pratique des professionnels observés et par conséquent dans l'analyse du travail car ils renforcent les règles d'action mais également les théorèmes en actes. Les concepts organisateurs organisent les prises d'information et les diagnostics réalisés sur des situations mais ce sont également eux qui déterminent la hiérarchie des buts visés par la personne (Vidal Gomel & Rogalski, 2007). Cependant, les concepts organisateurs n'apparaissent qu'après une analyse de l'ensemble du travail au travers des règles d'actions et de théorèmes en actes. Ils doivent donc être extraits puis formalisés par les observateurs ou les formateurs avant de pouvoir faire l'objet de discussion avec les professionnels.

Une fois identifiés, ces concepts organisateurs peuvent, par exemple, être modélisés dans des structures conceptuelles (Caens-Martin, 1999). Le schéma ainsi créé lie indicateurs de situation, variables de situation et concepts organisateurs afin de montrer la fonction diagnostique de ces derniers mais également leur rôle central dans l'organisation de l'activité. Ce modèle a servi de base pour la construction d'un simulateur de taille de la vigne (Caens-Martin et al., 2004) mais également de grille d'interprétation des interactions qui ont eu lieu lors de séances de retour de stage en centre de formation (Caens-Martin, 2005). Durant ces séances, la grille a permis d'apprécier comment les concepts étaient utilisés par les apprenants et étoffés ou verbalisés de multiples manières par le formateur.

Ainsi il ne suffit pas qu'un concept soit énoncé par le formateur pour que le concept soit intégré par l'apprenant et utilisé de manière pertinente et opératoire plus tard. Tourmen (2007) a montré que l'énonciation des concepts organisateurs ainsi que des autres composants du schème ne constitue que les prémices de la conception pédagogique. Les éléments du schème doivent donc être utilisés dans des cas concrets par les formateurs, leur octroyant ainsi un rôle de concepteur, faisant appel à leur créativité. Ces éléments doivent également être construits, utilisés et finalement appropriés par les apprenants pour devenir à leur tour organisateur de leur propre activité. Une des voies possibles est de construire des situations pédagogiques dont le traitement impliquera le recours à l'un ou l'autre de ces concepts, ceci afin de les faire manipuler par les personnes en formation.

2.2.3.5 Des situations de références, cibles du développement de compétences

Comme nous l'avons dit plus haut, la didactique professionnelle propose des méthodologies permettant de créer des simulations à des fins de formation (Caens-Martin et al., 2004). Ces formations sont élaborées dans le cadre de la théorie de la conceptualisation dans l'action qui se base sur le concept de schème (Piaget 1947) et qui considère que l'acteur en situation de travail est en mesure de diriger ses actions selon deux registres. Un registre pragmatique pour transformer le réel (l'acteur effectue son travail). Un registre épistémique pour découvrir les propriétés du réel puis mettre à jour ses savoirs (l'acteur apprend de son travail) (Pastré, 1999).

Ainsi une classe de situation de travail permettant de développer des compétences et si ces dernières sont visées par le processus de formation on parle alors de situations de référence. Les situations de travail sont définies comme un ensemble de tâches (un but à atteindre avec un système de ressources et de contraintes) et d'acteurs dans un dispositif organisé (Coulet, 2011). Une situation de travail peut être actuelle (la situation existe dans le travail réel) ou potentielle (la situation ne sera que rarement voire jamais rencontrée par le travailleur). Dans le cadre d'une approche en didactique professionnelle, on transpose une situation de référence en situation de simulation. L'enjeu est double, il s'agit d'une part de rendre les situations accessibles aux apprenants et d'autre part, de permettre à l'apprenant d'acquérir les compétences que permet de développer la situation de référence. Une transposition didactique a pour but de contrôler les objets qui permettent l'acquisition de connaissance. Dans de telles transpositions, il peut être nécessaire d'intégrer des simulateurs (comme dans le cadre de formations pour pilotes d'hélicoptères (Rogalski, 2018) ce qui n'est pas le cas dans le cadre du projet TINA-M2P étant donné que l'outil à maîtriser, la 3DExpérience, est à disposition de l'apprenant.

2.2.4 Des situations de simulation médiatrices entre l'apprenant et les situations de références

Les situations de simulation sont sources d'apprentissages (Pastré, 2005 ; Rogalski, 2014). Ce phénomène s'explique par la médiation qui est opérée entre l'apprenant et la situation de référence. La figure 2 ci-dessous représente la médiation entre sujet et situation de référence par la situation de simulation.

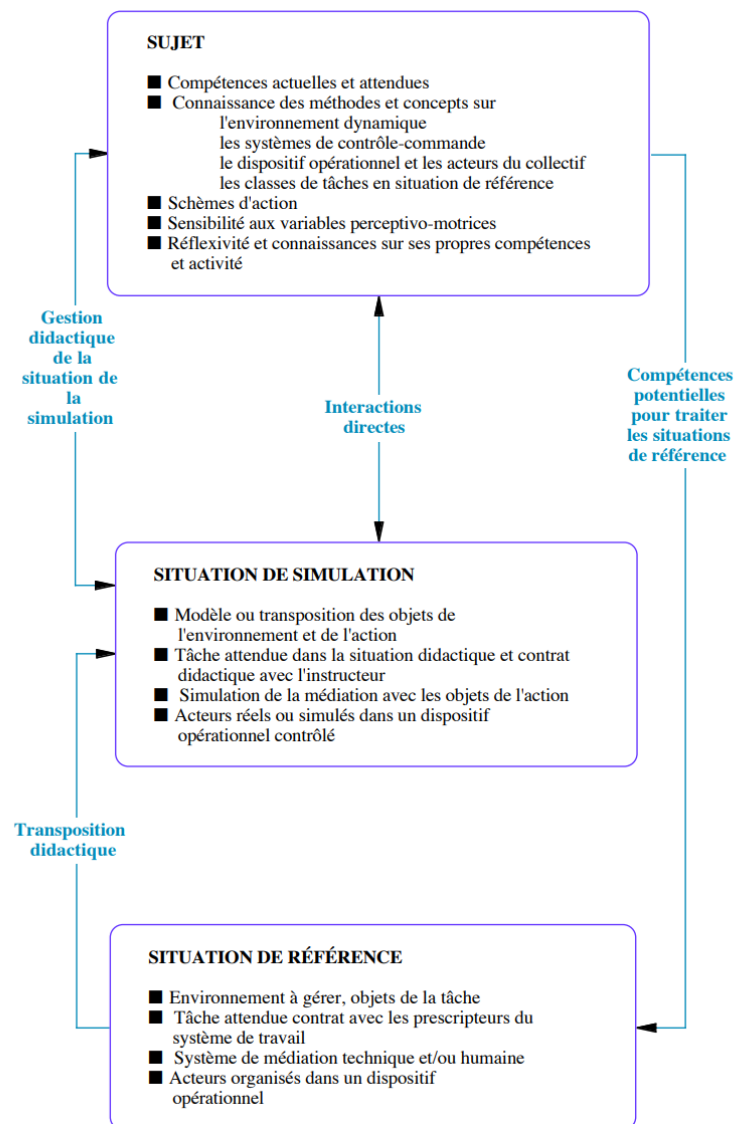


Figure 2 : Schéma de la médiation sujet/situation de référence via la situation de simulation extrait de Sarmaçay et Rogalski (1998).

La transformation des compétences de l'apprenant va avoir lieu d'une part, par l'activité engagée directement dans la situation de simulation, et d'autre part, par la médiation de l'instructeur. Celui-ci va agir en effet sur la gestion des variables de la situation de simulation, à travers les attentes et les évaluations exprimées sur l'activité des sujets. On verra ultérieurement que les interventions de l'instructeur peuvent s'effectuer en temps réel ou différé.

Dans la mesure où les situations de simulation sont toujours une transposition des situations de référence, ce schéma permet de positionner ou de questionner la nature de la transposition (réductions, amplifications ou modifications qui ont été opérées par rapport à la situation de référence), qu'elle soit due à des choix délibérés, aux contraintes techniques de conception ou encore aux contraintes liées au dispositif de formation.

Résumé

Dans cette partie nous avons pu voir que l'ergonomie de l'activité propose une démarche de gestion de projet en 3 étapes. Une étape d'analyse du projet et du travail qui permet de revoir les objectifs du projet si nécessaire et de construire des bibliothèques de situations caractéristiques qui seront utilisées lors de l'étape de simulation. Cette étape permet un enrichissement du dialogue entre opérateur et prescripteur par les retours que les opérateurs peuvent produire. Les informations recueillies durant l'étape de simulation sont ensuite utilisées afin de faciliter la réalisation du projet. Cette méthode a été appliquée à de nombreuses reprises. En vue d'en faire usage dans le cadre d'un projet dont l'objectif est de créer des formations au plus proche de l'activité réelle, il est possible d'utiliser une méthode prenant appui sur les cadres de la didactique professionnelle puisqu'elle offre un cadre théorique pour l'analyse du travail dans l'objectif de créer des formations. Les situations caractéristiques deviennent les situations de références qui peuvent ensuite être converties en situations de simulations testées auprès d'apprenants dans le cadre de la phase de simulation puis déployées après avoir été modifiées pour répondre aux exigences des concepteurs.

2.3 Objet Intermédiaire comme articulant ergonomie de l'activité et didactique professionnelle

Le projet TINA-M2P regroupe un nombre important d'acteurs aux profils différents. En effet, s'y retrouvent des professeurs, en mécanique, en électronique, en fabrication additive, en modélisation dynamique, en optimisation topologique, en ingénierie système, en choix des matériaux, des ergonomes, des didacticiens professionnels, des psychologues, des experts en 3DExpérience et des stagiaires en ingénierie. Ceci génère un défi non négligeable pour permettre à ces différents acteurs de collaborer dans un projet au long-cours. La multiplicité des acteurs nous a conduit à avoir recours à des objets intermédiaires, comme cela est préconisé dans la littérature (Vinck, 2009, Mer et al., 1995 ; Vinck et al., 1996 ; Vinck et Laureillard, 1996 ; Grégori et al., 1998 ; Vinck, 1999). Dans cet objectif de conception de formation en vue de participer au développement de l'industrie du futur, il a été décidé de concevoir un projet de formation transversale en favorisant la collaboration entre des participants sur des problématiques multi-physiques et réelles en écho aux situations professionnelles que rencontrent les ingénieurs dans l'industrie. Pour cela, la création d'un drone par le biais de la fabrication additive et de la 3DExpérience a été privilégié.

La notion d'Objet Intermédiaire s'inscrit dans une tradition de recherche dans le champ de la sociologie des sciences, de l'interactionnisme symbolique et de la théorie de l'acteur-réseau. Vinck (1999) définit l'Objet Intermédiaire comme « toute entité, physique, graphique ou textuelle, se trouvant entre plusieurs acteurs d'un réseau » (p. 392), ou comme production entre plusieurs étapes dans un cours d'action. Ces objets sont des marqueurs de l'activité, à la fois produits et instruments qui permettent d'entrer dans l'activité (Grégori et al., 1998). La présence des objets réduit la complexité sociale en limitant la prolifération des interactions simultanées de tous avec tous, rendant possible des interactions locales cadrées (Latour, 1994).

Nous traiterons également dans cette partie d'une notion proche de celle d'objet intermédiaire, à savoir l'objet frontière. Cette notion a été pour la première fois proposée par Star & Griesemer en 1989 et est considérée par Trompette & Vinck (2009) comme un sous-ensemble des objets intermédiaires. Star & Griesemer cherchaient à caractériser les processus par lesquels des acteurs appartenant à des mondes différents et avec des points de vue différents arrivaient à se coordonner et à coopérer. Les auteurs s'attachaient plus particulièrement à savoir comment les acteurs créent des terrains d'entente dans des domaines où les connaissances ne sont pas encore stabilisées. Les objets frontières peuvent être abstraits ou concrets, généraux ou spécifiques, matériels ou conceptuels mais leur structure doit être suffisamment commune aux différents mondes afin d'en être l'intersection tout en étant assez souple pour s'adapter à des contraintes spécifiques. Ces objets frontières sont dès lors capables de faciliter la communication « inter » monde et ainsi créer des compromis entre leurs points de vue respectifs (Trompette & Vinck, 2009).

2.3.1 Le rôle des Objets Intermédiaires (OI) dans le processus de conception

Vinck & Laureillard (1996) montrent que les OI portent et condensent provisoirement et partiellement une multiplicité de processus décrits à la suite.

- **La représentation rétrospective** : les OI portent les représentations de ceux qui les ont produits et modifiés. Ainsi, au fur et à mesure de leur circulation et de leur co-construction, les OI finissent par porter en eux la somme de ces représentations.
- **La représentation prospective** : l'OI représente ce qu'a été, ce qu'est et ce que pourra être l'objet autour duquel les concepteurs doivent trouver des compromis afin de le coconstruire
- **La commission** : les OI véhiculent les intentions de leurs auteurs. En effet les OI ne sont pas des objets neutres car ils transmettent les objectifs de leurs concepteurs.
- **La médiation** : les OI trahissent et transforment les intentions de ces mêmes auteurs.
- **La prescription** : les OI tendent à imposer des choix et des décisions à leurs utilisateurs.
- **La facilitation des interactions, des confrontations et des interprétations** : les OI permettent que les compromis se construisent, mais aussi que des ajustements locaux s'opèrent là où la prescription n'est pas contraignante.

Nous retiendrons que les OI dans le cadre d'un projet de conception cristallisent les intentions de l'ensemble des acteurs qui les mobilisent et sont des représentations de l'objet en cours de construction. Jeantet (1998) ajoute que les OI ponctuent et accompagnent l'activité des concepteurs lors des différentes phases de la conception d'un produit. Il précise que les OI contribueraient à l'organisation du travail de conception de trois manières. Les OI joueraient un rôle de médiation, de traduction et de représentation des actions. En effet, les OI traduisent, au travers des changements qu'ils subissent, les apports de chacun des acteurs de la conception ainsi que leurs points de vue (c'est le rôle de traduction). L'OI apparaît pour les acteurs de la conception comme un instrument de coordination et de coopération (Mer, Jeantet, & Tichkiewitch, 1995) ce qui constitue son rôle de médiation. Enfin, les OI de la conception (textes, modèles, simulations) sont des représentations d'un produit qui n'existe pas encore. Ils portent en eux les actions déjà accomplies lors du processus de conception et peuvent également représenter des éléments désirés pour le futur produit (rôle de représentation des actions). Ici encore, l'auteur souligne que les OI sont porteurs des représentations des acteurs de la conception et en même temps du futur produit en tant que perspectives.

2.3.2 L'OI médiateur de la dynamique collective

Vinck (2003) part du postulat qu'il ne suffit pas de juxtaposer des points de vue disciplinaires mais qu'il faut construire leur articulation et leur confrontation. Il mentionne que la qualité des échanges dépend en partie de celle des OI produits et mobilisés dans l'interaction. L'auteur prend pour exemple des chercheurs de disciplines différentes qui mettent en place une coopération en identifiant des concepts partageables par tous. Les textes lus et débattus par des chercheurs provenant d'horizons différents peuvent constituer des objets intermédiaires co-acteurs de la dynamique collective. Selon l'auteur, un texte choisi par les chercheurs d'une discipline à l'attention de chercheurs d'une discipline partenaire jouerait un rôle de représentation double. Le texte représente ce sur quoi les chercheurs doivent travailler, un objet scientifique qu'il s'agira de construire ensemble, le texte contribue donc à faire exister un objet interdisciplinaire qui n'existe pas encore. Et il représente également le point de vue de ceux qui l'ont proposé (approche, méthodologie...). Ainsi considéré, le texte scientifique apporte une connaissance de l'objet à construire ainsi qu'un angle d'approche de ce dernier. Vinck (2003) conclut que les objets intermédiaires médiatisent la dynamique collective.

Dans le cas d'une recherche interdisciplinaire, ces objets intermédiaires doivent permettre la confrontation des points de vue tout en étant assez ouverts pour permettre la construction de concepts communs aux différentes disciplines. Il semble dès lors possible de construire des entités de coopération interdisciplinaires.

Broberg, Andersen, Seim (2011) introduisent la notion d'objet-frontière (au sens de Star & Griesemer, 1989) afin de mieux comprendre le rôle des objets dans l'ergonomie participative et plus particulièrement en ce qui concerne le processus de conception. Selon les auteurs, les objets frontières favoriseraient le processus de conception participative dans le sens où il facilite la participation et l'implication des différents acteurs. Ils favorisent également l'émergence d'un langage commun à tous les participants qui permet aux idées et aux connaissances de ces derniers d'être représentées. Aux travers de deux études de cas les auteurs ont extrait certaines caractéristiques et certains effets de ces objets.

En effet les objets frontières sont créés puis modifiés à travers l'action des participants et pour cela ils doivent être flexibles et malléables et doivent disposer d'une potentialité acceptable qui doit être perçue par les participants afin que ces derniers jugent pertinent de l'investir. L'utilisation des objets frontières nécessite par ailleurs des instructions ainsi que des règles afin qu'ils soient utilisés de manière optimale. Afin de rendre ces règles et ces instructions audibles par les participants, il est nécessaire qu'un facilitateur accompagne les utilisations de l'objet frontière, ce même facilitateur devra également animer les ateliers au cours desquels l'objet frontière sera utilisé. Pour ce qui est de l'environnement dans lesquels les objets frontières sont utilisés, il doit être neutre et pas plus habituel pour l'un ou l'autre des participants. Cette neutralité et l'utilisation de l'objet frontière permet de gommer les rôles habituels et donc les statuts des participants ainsi que la structure organisationnelle ce qui favorise un processus d'apprentissage entre les différentes pratiques (Judon, 2017). Enfin, les objets frontières du fait de leur circulation au sein de l'organisation et de leur utilisation en tant que support physique des interactions entre acteurs permet une inscription dans la démarche participative.

Le concept d'OI a également été sollicité dans le cadre d'études sur la création de modules de vie (Conceição et al., 2012). Dans le cas de ce projet, l'objet intermédiaire devait supporter les analyses, les discussions, les suggestions et la validation de ces dernières par les différents acteurs du projet. Les auteurs ont dans un premier temps référencé les situations d'actions caractéristiques de ces modules grâce à l'analyse de situations de références ce qui a permis par la suite d'identifier les éléments que chaque module devait comporter afin de pouvoir être fonctionnel. Ce projet a également mis l'accent sur la formalisation des données provenant des analyses réalisées par les ergonomes à destination des concepteurs. Les OI, qui sont conçus de manière participative, cristallisent les prévisions et, les attentes des acteurs qui les ont créés et développées. Les auteurs soulignent que les OI ne remplacent pas une catégorie d'acteurs mais facilitent les échanges entre les différents acteurs d'un projet. Dans le cas de ce projet, le formalisme des OI a facilité le transfert d'expérience entre ergonomes et concepteurs.

Les objets intermédiaires peuvent également être mobilisés pour intégrer des connaissances ergonomiques dans le processus de conception. En effet, dans leur étude de 2014, Hall-Andersen & Broberg ont analysé une situation technique de conception en utilisant les théories des objets frontières et objets intermédiaires. L'objet intermédiaire en question était un guide ergonomique qui circulait au sein du processus de conception entre ergonomes et designers. Ce dernier a eu un impact quant aux choix du collectif sur les directions à suivre (il a permis de choisir certaines orientations plutôt que d'autres). Hall-Andersen & Broberg (2014) considèrent que les objets frontières au sens de Star & Griesemer facilitent la collaboration entre différents domaines de connaissances. Les auteurs mettent également en avant que les objets intermédiaires (Vinck et al., 1996 ; Broberg et al., 2011) permettent aux connaissances de circuler entre acteurs sans que ceux-ci aient à se rencontrer.

2.3.3 L'OI simplificateur de l'espace de dialogue

Dans une étude portant sur l'exposition au styrène des ouvriers de l'industrie du nautisme de 2006, Garrigou et ses collaborateurs montrent qu'une représentation appropriée de l'activité (proposée à un collectif de travail composé de médecins, d'ergonomes et d'opérateur) favorise une vision pluridisciplinaire de la santé au travail. Par le biais de l'outil CAPTIV©, il a été possible de créer une présentation de l'activité alliant images et mesures. Cette dernière a fourni des repères à chaque intervenant et a ainsi cristallisé les représentations des différentes parties et alimenter les échanges entre les acteurs de la situation de travail (Garrigou et al., 2006). Les présentations créées grâce à cet outil peuvent être considérées comme des OI car permettant de structurer les interactions entre acteurs (Judon, 2017).

Buchmann & Landry (2010) dans une étude menée au cours de plusieurs interventions de prévention des TMS utilisent un modèle de TMS comme OI afin de faciliter le dialogue entre les différents acteurs de l'entreprise. Le modèle choisi est celui de Bellemare et al. (2002) et les auteurs mettent l'accent sur la pertinence d'un modèle comme objet intermédiaire (Vinck, 2009) dans la mesure où celui-ci comporte les caractéristiques suivantes. L'OI doit être opérant, dans le sens où il contient les informations dont les acteurs ont besoin pour résoudre le problème qui leur est posé ou pour réaliser la tâche qui leur est confiée. L'OI doit également être communicant et faciliter les échanges mais également lier des acteurs provenant d'horizons différents. Enfin l'OI doit pouvoir être modifié.

Caroly & Barcellini (2013) soulignent que les objets intermédiaires sont l'une des conditions du développement de l'activité collective. Dans le cadre d'un travail collectif, les OI favorisent, chez les participants, la construction d'une représentation commune de la situation dans laquelle ils sont engagés. Ainsi les objets intermédiaires supportent et médiatisent les discussions et les débats sur les objectifs communs des opérateurs et sur la qualité future de leurs productions (Judon, 2017).

Résumé

Dans cette partie nous avons pu voir que lorsque les acteurs d'un projet sont amenés à collaborer afin de réaliser des tâches complexes ils tendent à solliciter des objets intermédiaires tout au long du projet. Différentes études ont permis d'en déterminer leurs caractéristiques. Au vu de ces éléments théoriques, nous posons que dans le cadre d'un projet de création de formations sollicitant plusieurs équipes pluridisciplinaires, la création d'un objet intermédiaire est pertinente. En effet le rôle de médiation de l'OI permet de faciliter la coordination et la coopération entre les acteurs. Les OI devant être communicant (Vinck, 2009), ils sont des facilitateurs des échanges entre acteurs provenant d'horizons différents et permettent de lier ces derniers dans le cadre de groupe de travail interdisciplinaire entre psychologue, ingénieur et universitaires. Le fait qu'ils portent le processus de représentation rétrospective leur permet d'être une sommation des points de vue des différents acteurs qui les ont modifiés. Ils cristallisent les points de vue de ceux qui ont participé au projet mais qui n'y participent plus. Cependant un facilitateur doit accompagner l'objet intermédiaire afin d'animer les ateliers dans lesquels l'OI sera sollicité. Ce rôle peut être assuré par un psychologue ou un ergonome.

Chapitre 3 : la création d'un objet intermédiaire reflétant l'activité et son intégration dans un projet

Afin de créer un objet intermédiaire qui puisse être le support des interactions au sein d'un groupe de travail pluridisciplinaire tout en permettant au groupe d'accéder à une représentation fidèle de l'activité, il semble intéressant de se tourner vers les méthodes de modélisation des tâches que l'ergonomie propose.

3.1 Les modèles de tâches

Un modèle est une représentation simplifiée d'un objet (Sperandio, 2003), il a généralement trois fonctions : il décrit la forme de l'objet, il explique son fonctionnement et permet, lors de simulations de prédire ses états futurs. Utilisé en ergonomie, le modèle permet de décrire les opérateurs, leurs comportements, les tâches qu'ils accomplissent mais également les interactions opérateur-opérateur ou entre opérateur-système technique (Sperandio, 2003). Appliqués à la didactique professionnelle, les modèles utilisés sont des modèles de tâches qui se réfèrent à la tâche réalisée. Ils ont pour objectif de décrire ce que font les opérateurs et ce qu'ils mettent en œuvre afin d'atteindre leurs buts en situation. Les tâches modélisées permettent de déterminer des scénarios didactiques de l'activité de professionnels pour accompagner la conception de formations.

Les modèles sont généralement créés en fonction des besoins de leur créateur qui dépendent de la mission et de ses spécificités. Dans le cadre du projet TINA M2P, les sujets sont amenés à interagir avec la plateforme c'est pourquoi, afin de coller le mieux possible avec leur activité réelle, il nous a semblé pertinent de nous orienter plus spécifiquement vers les méthodes de modélisation utilisées dans le domaine des interfaces IHM, ci-dessous décrits.

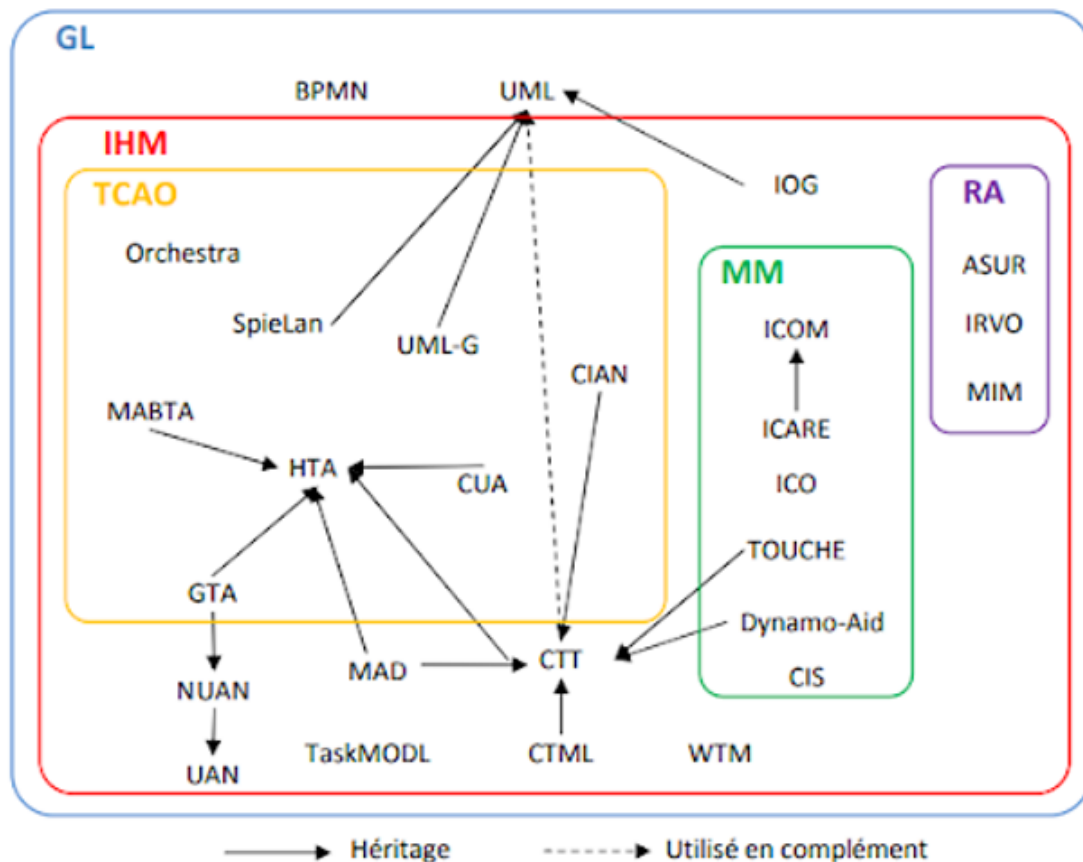


Figure 3 : Relations entre les notations étudiées, en fonction de leur champ disciplinaire. GL : Génie Logiciel. IHM : Interaction Homme-Machine. TCAO : Travail collaboratif Assisté par Ordinateur. MM : Multimodalité. Extrait de Jourde, Laurillau et Nigay (2014)

La figure 3 ci-avant est une cartographie des différentes techniques de modélisations utilisées dans les différents champs du génie logiciel. Afin de permettre une représentation graphique qui puisse servir de supports aux interactions entre les différents acteurs d'un projet nous avons fait le choix de nous pencher uniquement sur les techniques de modélisation héritées directement de HTA (Hierarchical Task Analysis) qui a été l'une des premières techniques de modélisation utilisée dans la formation et qui présente une représentation graphique en arborescence hiérarchique des tâches. Nous allons voir en détail, à la suite, les techniques de modélisation HTA, MABTA, GTA, CTT, CUA et MAD.

HTA (Hierarchical Task Analysis)

HTA est le plus ancien des modèles de tâche. Il a été décrit pour la première fois dans Annett & Duncan (1967). Il utilise les concepts de tâches et sous-tâches, de buts et sous-buts et de plans afin de modéliser l'activité d'opérateurs expérimentés afin de concevoir des formations pour les élèves. HTA (Hierarchical Task Analysis) est une méthode orientée tâches dont l'application décompose une tâche en sous-tâches (il existe un lien de hiérarchie entre tâche et sous-tâche. La formalisation de ce genre de décomposition aboutit généralement à des arborescences hiérarchiques de tâches et de sous-tâches. Les tâches décomposables sont dites abstraites, les tâches de plus bas niveau sont quant à elles qualifiées de tâches élémentaires (Couix, 2007).

GTA (Groupware Task Analysis)

GTA (Van Der Veer, Lenting, & Bergevoet, 1996) a été développé pour modéliser les tâches dans un environnement coopératif et de rendre compte de sa complexité. A la base, GTA a été développé afin de concevoir des systèmes coopératifs. Le modèle mobilise les notions suivantes.

- **Un rôle :** renvoie à un ensemble de tâches effectuées par un ou plusieurs agents. Un rôle est dit significatif quand son objectif est clair ou qu'il permet de distinguer les groupes d'agents entre eux. Les tâches sont donc associées à un rôle et les rôles peuvent être hiérarchisés.
- **Les agents :** entités actives qui réalisent des tâches. Généralement, les agents sont des humains/groupes d'humains mais peuvent également être les composants d'un programme. Un agent ne désigne pas un individu spécifique mais une classe d'individus ayant des caractéristiques précises.
- **Les objets :** entités matérielles ou non, utilisées par les opérateurs pour exécuter leurs travaux.

- **Une tâche** : activité réalisée par des agents pour atteindre un but. Une tâche peut être décomposée en plusieurs sous-tâches. Les tâches sont exécutées dans un certain ordre et peuvent déclencher l'exécution d'une ou de plusieurs autres tâches. Il faut différencier les tâches unitaires et les tâches de base, les tâches unitaires ne pouvant, dans l'idéal, être exécutées qu'après l'exécution de plusieurs tâches basiques. Enfin, les tâches basiques peuvent être décomposées en actions (utilisateur) ou opérations (système).
- **Un événement** : un changement d'état du monde durant l'exécution d'une tâche. La modification peut refléter les changements des valeurs d'attributs de concepts internes (Objet, Tâche, Agent ou Rôle) ou externes (Conditions météorologiques, coupure de courant, etc.) modifiant la séquence d'exécution des tâches en déclenchant d'autres.

Dans le cadre de la technique de modélisation GTA, ces différentes notions ont amené les auteurs à proposer quatre représentations différentes de l'activité afin de mieux rendre compte de la complexité de la réalisation de tâches en environnement collectif. La modélisation GTA propose de représenter l'activité au travers d'un arbre de tâches, d'un diagramme d'activité afin de représenter la dynamique de l'activité, d'un diagramme de classe afin de représenter les objets présents dans l'environnement et enfin d'une représentation de l'environnement physique et culturel (principalement du point de vue des usages).

CTT (Concur Task Tree)

CTT (Concur Task Tree) (Paternò et al., 1997 ; Paternò, 2000) est une notation basée sur des diagrammes pour la description des modèles de tâche. La notation Concur Task Tree (CTT) a été définie pour décrire les tâches des utilisateurs dans des systèmes interactifs, elle propose de représenter graphiquement les tâches suivant le principe de la planification hiérarchique (HTN). La planification HTN est une méthodologie permettant de construire un plan par décomposition hiérarchique de tâches. C'est un processus dans lequel le système de planification décompose les tâches globales en tâches plus petites jusqu'à obtention de tâches primitives. Ainsi CTT est un formalisme de décomposition hiérarchique des tâches, basé sur les concepts de tâches, objets, actions, constructeurs et rôles.

Dans ce modèle, il existe quatre catégories de tâches :

- **Les tâches de l'utilisateur** : ce sont des tâches exécutées entièrement par les utilisateurs. Elles requièrent donc des activités cognitives ou physiques sans interagir avec le système,
- **les tâches de l'application** : ce sont des tâches où seul le système intervient. On peut citer comme exemples la compilation d'un programme ou la réception de message via le réseau,
- **les tâches d'interaction** : ce sont des tâches exécutées par les utilisateurs en interagissant avec le système. Les interactions sont déclenchées par les utilisateurs eux-mêmes. Lancer une requête sur une base de données en est un exemple,
- **les tâches abstraites** : ce sont des tâches de plus haut niveau qui ne font pas partie des trois catégories précédentes. Elles se décomposent en sous-tâches pouvant appartenir à l'une des 4 catégories.

CTT propose également une série d'opérateurs afin de lier les tâches entre elles.

En voici la liste :

- **Concurrence** : Les actions peuvent être exécutés dans n'importe quel ordre
- **Choix** : une des deux tâches est prioritaire par rapport à l'autre. Cette dernière ne peut être exécutée qu'un fois l'autre tâche accomplie

- **Concurrence avec synchronisation** : tâches qui peuvent être réalisées en collaboration ou en coopération
- **Indépendance d'ordre** : les tâches peuvent être exécutées dans n'importe quel ordre mais simultanément
- **Désactivation** : la première tâche est terminée une fois que la seconde tâche l'est également
- **Activation** : la deuxième tâche est exécutée dès que la première tâche est terminée
- **Activation en passage d'information** : les informations provenant de la première tâche permettent l'activation de cette tâche (la tâche T2)
- **Suspension reprise** : la tâche T1 peut être interrompue par la tâche T2. Si la tâche T2 est terminée alors la tâche T1 peut reprendre.

Ainsi un modèle de tâche décrit avec cette notation se construit en trois phases : tout d'abord une décomposition hiérarchique des tâches représentées sous la forme d'un arbre, puis une identification des liens temporels qui unissent ces tâches et enfin une identification des objets et action associés.

MABTA (Multiple Aspect Based Task Analysis)

La notation MABTA (Multiple Aspect Based Task Analysis) a été développée afin d'analyser les tâches et les besoins liés aux activités de groupe (Lim, 2004). Cette notation repose sur quatre modélisations réalisées de manière séquentielle afin de décrire les différents aspects de l'activité collaborative.

- **Modèle de rôles** : représente la répartition des rôles des différents opérateurs en une structure hiérarchique.
- **Modèle de tâches de groupe** : permet d'attribuer à des rôles, des types de tâches de groupe (tâche de coordination, de décision ou mono-utilisateur)
- **Modèle de tâches** : ce modèle est plus précis que le modèle de tâches de groupe, il décompose chaque tâche en sous-tâches jusqu'à atteindre le niveau des tâches élémentaires.

- Modèle d'interface abstraite : ce modèle vise à expliquer l'agencement de l'interface ; ensuite la modélisation MABTA propose de décrire la collaboration entre les utilisateurs par le biais d'un modèle de tâches de groupe.

CUA (Collaboration Usability Analysis)

CUA (Pinelle et al., 2003) est une méthode d'analyse centrée sur les problèmes d'utilisabilité dans le domaine du travail collaboratif. Cette méthode sert à analyser et à évaluer l'interaction collaborative mais elle est également utilisable en tant que méthode de conception des systèmes interactifs multi-utilisateurs. L'approche proposée est itérative et offre un moyen pour passer du scénario d'activité à l'expression de l'interface utilisateur concrète. Les principales phases sont :

- la description d'un diagramme de flot de travail qui s'appuie sur un ensemble de scénarios faisant intervenir l'ensemble des acteurs identifiés
- la description précise de chaque scénario selon un canevas fourni par CUA comportant la description de l'activité du scénario, la description des utilisateurs, le résultat attendu, et le contexte du scénario
- la description d'un modèle de tâches multi-utilisateurs.

MAD

MAD (Bastien & Scapin, 2001) est un modèle de tâche basé sur un formalisme de décomposition hiérarchique de tâches. Il est basé sur les notions de tâche, constructeurs (ou opérateurs), utilisateur et objet. Selon le formalisme MAD, une tâche permet de représenter un traitement quelconque quel que soit son niveau de complexité. Une tâche est caractérisée par trois groupes d'éléments : les éléments d'identification, les éléments de structure et les éléments d'attributs.

Les éléments d'identification sont :

- **le numéro de la tâche**
- **le nom de la tâche**

Les éléments de structure sont :

- **le but** : ce qui est recherché dans l'exécution de la tâche,
- **l'état initial** : liste d'objets permettant de représenter, au temps t_0 , une partie du monde dans laquelle la tâche va s'effectuer,
- **les préconditions** : ensemble de prédicats exprimant des contraintes sur les objets de l'état initial,
- **le corps de la tâche** : expression de la façon dont la tâche est exécutée. Il peut être soit une action élémentaire, soit une structure de sous-tâches. Cette dernière est définie par un constructeur et un ensemble de sous-tâches. Elle peut être séquentielle, alternative, parallèle ou simultanée.
- **les postconditions** : contraintes portant sur les objets de l'état final,
- **l'état final** : liste des objets permettant de représenter la partie du monde qui a été modifiée par la tâche (le cas échéant).

Les éléments d'attributs: sont définis par des représentations génériques caractérisées par un constructeur, dont les arguments sont constitués d'une liste d'objet-tâche. Les constructeurs sont des précurseurs à l'agencement des tâches impliquées. Ces constructeurs sont prédéfinis :

- **les tâches séquentielles** : les sous-tâches sont exécutées en séquence, c'est-à-dire, l'une après l'autre dans un ordre prédéterminé. Une tâche ne peut être commencée que lorsque l'exécution de la précédente est terminée
- **les tâches parallèles** : une relation parallèle signifie que les tâches liées par ce type de connecteur peuvent être effectuées dans n'importe quel ordre. Une seule sous-tâche peut être effectuée à la fois. Ainsi il faut attendre que la sous-tâche soit effectuée avant de passer à une autre sous-tâche.
- **les tâches alternatives** : l'alternative est une structure permettant d'indiquer une tâche pouvant s'exécuter de plusieurs manières différentes. Il est important de noter qu'une seule des sous-tâches est effectuée. Autrement dit, c'est l'une ou l'autre des tâches qui est effectuée.
- **les tâches itératives** : la relation itérative dans laquelle les tâches et sous tâches se répètent avant de pouvoir passer à une autre tâche (exemple la tâche « éplucher les pommes de terre » se répète jusqu'à ce qu'il n'y en ai plus à éplucher).

3.2 Les groupes de discussion focalisée

La méthode des groupes de discussion focalisée consiste à mettre un groupe de personnes dans une situation de conversation centrée sur un sujet défini qui les rejoint. Elle permet la collecte de données qualitatives (Leclerc et al., 2011). Ce sont les interactions au sein du groupe qui influencent la qualité des données recueillies (Agan et al., 2008). Patton (2002) mentionne que la caractéristique du groupe de discussion focalisée est que les participants poursuivent la construction de leurs opinions à partir des points de vue exprimés par les autres. Les commentaires ainsi obtenus vont au-delà des points de vue des participants (Julien-Gauthier et al., 2013).

3.2.1 Avantages

La méthode des groupes de discussion focalisée fournit un contexte de groupe pouvant être perçu comme moins intimidant pour certains participants. Ainsi la dynamique de groupe peut amener des personnes à participer alors qu'elles pensent n'avoir que peu de contenu à offrir sur le sujet (Kitzinger & Barbour, 1999). C'est une méthode qui facilite la prise de parole car la simple présence des autres participants incite l'individu à s'exprimer (Boutin, 2007). Certains auteurs affirment même que cette méthode est supérieure à l'observation participante ou l'entrevue individuelle de par la dynamique sociale qu'elle engendre et qui fait émerger des pratiques et des positions idéologiques d'un groupe particulier de personnes (Kamberelis & Dimitriadis, 2008). Cette méthode permet également d'accéder au langage spécifique utilisé par les participants échangeant à propos du sujet qui les relie (Agan et al., 2008).

Cette méthode permet au chercheur, d'accéder à des informations, des points de vue, des réflexions difficiles à obtenir en entretien individuel (Julien-Gauthier et al., 2013). Elle permet également aux participants de partager leurs expériences et elle favorise l'émergence d'idées nouvelles (Boutin, 2007). Cette méthode, de par les interactions qu'elle engendre, permet aux participants de produire des informations riches à propos de leur pensée (Diambra et al., 2009). De plus, les groupes de discussion focalisée permettent de multiplier les points de vue d'une même situation et donnent aux sujets la possibilité de produire des réponses plus diversifiées et plus innovantes que si on les avait pris en entretien séparément (Davila & Dominguez, 2010). Enfin, cette méthode permet au chercheur de préciser les questionnements, les attentes individuelles et collectives afin que les participants puissent mieux appréhender le potentiel du sujet qui leur est proposé (Demers, 2010).

3.2.2 Limites

Les groupes de discussion focalisée peuvent représenter un défi pour l'animateur. En effet, certains participants sont inhibés en situation de groupe, d'autres monopolisent le discours, d'autres encore parlent pour ne rien dire (Krueger & Casey, 2000). Il se peut également que l'animateur perde le contrôle et que les débats ne se focalisent que sur une facette de l'objet. Aussi, les mécanismes d'influences peuvent empêcher certains participants d'exprimer une opinion divergente.

Bien que l'indépendance soit valorisée au niveau individuel, ce sont les liens sociaux qui priment en groupe (Hampden-Turner & Trompenaars, 2006). De ce fait l'animateur doit être plus assuré et plus habile qu'en entretien individuel afin de contrer ces mécanismes (Fontana & Frey, 2003). Une autre limite du groupe de discussion focalisée est que le point de vue d'un individu ne sera jamais autant approfondi qu'en entretien individuel (Adams & Cox, 2008). Kitzinger (2004) établit une liste des reproches fréquemment exprimés à l'encontre de la méthode des groupes de discussion focalisée : les attitudes et les opinions sont indissociables du contexte du groupe ; les avis des individus sont dilués dans celles du collectif et ne peuvent être déterminés avec certitude ; les points de vue de chacun sont influencés par ceux des autres ; une personne peut être interrompue et son point de vue peut être complété de manière imparfaite par le reste du groupe ; le changement de contexte fait que la comparaison entre plusieurs groupes de discussion focalisée se prêtant au même exercice est impossible.

Résumé

De par les interactions qu'ils permettent, les groupes de discussion focalisée sont un puissant outil pour ce qui est de produire des idées novatrices. En effet, le groupe de discussion focalisée permet aux différents acteurs d'exprimer en mots leurs idées et ainsi de la confronter à celles des autres. Cet enrichissement est certes bénéfique pour tous ceux qui y participent mais également pour l'objet intermédiaire qui en plus de servir de support aux interactions se nourrit de ces échanges afin de se développer, de s'améliorer et d'au final d'être le reflet des consensus auxquels ont abouti les différents acteurs. Cet outil n'est pas dénué de défauts étant donné le fait qu'il sollicite un groupe de personnes (et tous les biais que les groupes engendrent). Cependant, cette méthode couplée à l'emploi d'un objet intermédiaire médiateur des interactions et réducteur de la complexité de l'environnement social permet d'atténuer les défauts de cette méthode et de faciliter le rôle de l'animateur.

Chapitre 4 : Création et évaluation des formations sur la base des données constitutives de l'objet intermédiaire

Afin de maximiser les effets sur l'apprenant il est nécessaire que les formations conçues sur la base de l'activité puissent être élaborées et évaluées en suivant des méthodologies éprouvées. C'est pourquoi nous avons fait le choix de nous tourner vers les modèles de l'ingénierie pédagogique et les méthodes d'évaluation des formations utilisées en psychologie du travail.

4.1 Ingénierie pédagogique

Basque (2017) a proposé une synthèse sur le sujet et a estimé que la naissance de l'instructional design, correspond à l'ingénierie pédagogique en français, située dans les années 1960. Cependant comme l'a montré Reiser (2001), il faut remonter aux années 40 afin de retrouver les prémisses de l'instructional design. Cette discipline serait née en marge de la seconde guerre mondiale afin de répondre à des besoins rapides de formation à des fins militaires.

Mis en œuvre initialement par des psychologues et des spécialistes de l'éducation, le succès de l'instructional design lui a permis d'être reconnu en tant que discipline. Leur but était d'intégrer des évaluations de l'intelligence, des tests psychomoteurs et de perception pour orienter les apprenants vers telle ou telle formation (Reiser, 2001).

Ils souhaitaient également créer des formations plus ambitieuses afin de permettre à l'apprenant d'utiliser de nouveaux types d'armement. En parallèle, l'ingénierie pédagogique fut également utilisée afin de résoudre des problèmes dans l'industrie. En effet, le programme Training Within Industry a été utilisé entre 1940 et 1945 par le département de la guerre aux Etats-Unis développait et organisait des formations pratiques afin de résoudre des problèmes spécifiques à la production industrielle (Reiser, 2001).

L'ingénierie pédagogique sera considérée comme une discipline à partir du moment où elle adoptera une approche rationnelle en développant des modèles centrés sur ce que doit apporter une formation (Warin 2016). L'ingénierie pédagogique qui pourrait se définir comme « un système de procédures pour développer des programmes d'enseignement et de formation d'une façon cohérente et fiable » (Gustafson & Branch, 2002) a été traversée par de nombreux courants de la psychologie.

- **Le courant Behavioriste.** Le behaviorisme a été initié par Watson (Watson, 1913). La pédagogie qui en découle peut être décrite en quelques principes : 1) l'enseignant détermine les savoirs qui constituent la réalité objective, 2) ce savoir est découpé en savoirs élémentaires, 3) l'apprentissage des savoirs élémentaires suffit à garantir l'atteinte des objectifs pédagogiques, 4) le contrôle se fait par rapport au modèle de l'enseignant, 5) l'apprentissage se fait par un exposé des connaissances du formateur, 6) l'apprenant procède par écoute lecture, essai et erreur puis renforcement.
- **Le courant cognitiviste.** Contrairement au courant behavioriste, le cognitivisme se propose de modéliser et d'expliquer les activités mentales qui génèrent le comportement. Ainsi d'un point de vue pratique cela se traduit par le fait de faire le lien entre les nouvelles et les anciennes connaissances, de favoriser chez l'apprenant l'organisation de ses connaissances, de présenter les contenus sous différentes formes et différents cheminements (Kruse, 2009).
- **Le courant constructiviste.** Il a été introduit sur le plan théorique notamment par Piaget (1968). Le courant constructiviste enrichit l'approche cognitiviste en considérant que l'apprentissage résulte de l'interaction entre l'apprenant et son environnement et n'est pas uniquement déterminé par l'environnement. L'apprenant est un système actif qui apprend de son environnement au travers de ses propres représentations. Le formateur joue alors un rôle de facilitateur.
- **Le courant socio-constructiviste.** Le socio-cognitivisme de Vygotsky propose d'utiliser l'interaction sociale afin de favoriser la construction des connaissances, de médiatiser les processus d'apprentissage par le biais d'outils (wiki, blogs, forums etc.) et d'utiliser l'aide d'un formateur afin de franchir la zone proximale de développement (ZPD) (Cole, 2009).

La littérature en ingénierie pédagogique est foisonnante. En 2003 déjà on pouvait trouver 8348 documents sur la base Educational Resources Information Center (ERIC) relatant d'ingénierie pédagogique (Tricot & Plégat-Soutjis, 2003). De nos jours, ce nombre s'élève à plus de 78 000 et il en va de même pour le nombre de modèles que propose l'ingénierie pédagogique. La méta-analyse de Göksu et al. (2017) réalisée sur 113 revues publiées dans les journaux SSCI et SCI entre 1999 et 2014 montre que les modèles les plus mentionnés sont : le modèle ARCS (Keller, 1979), le modèle Gagne et Briggs (1979) et le modèle 4C/ID (van Merriënboer, Clark, & Crook, 2002). Nous nous attacherons dans cette partie à décrire ces modèles afin de pouvoir déterminer lequel est le mieux adapté à la création de formations basées sur la création d'un drone.

4.1.1 Le modèle des 9 étapes de l'enseignement (Robert Gagné 1985)

Les neuf étapes ci-après comportent des considérations à prendre en compte lors de la conception d'une formation ; cependant, elles ne constituent pas une marche à suivre impérativement (certaines étapes peuvent être réarrangées voir négligées). Selon ses auteurs, ce modèle fournit une « checklist » des éléments qu'il faut prendre en compte afin de maximiser les chances de réussite des formations proposées (Gagné, 1985).



Figure 4 : Neuf événements d'instruction de Robert Gagné créé par Kaylee Ranocchia (2014)

Étape 1 : attirer l'attention.

Cette étape a comme objectif principal de capter l'attention de l'apprenant. Cela peut s'effectuer par exemple en présentant un contexte, une histoire, un problème ou une situation nouvelle en lien avec l'objet à apprendre. De ce fait, cela permet d'impliquer l'apprenant dans le processus d'apprentissage.

Etape 2 : proposer un objectif d'apprentissage

Traditionnellement réservé à l'instructeur, il est parfois difficile de le décrire par ces derniers. Cependant décrire les objectifs d'apprentissage permet aux apprenants de mieux cerner ce qu'ils vont apprendre, ce qui favorise l'appropriation et donne un sens éclairant à ce qu'ils apprennent et pourquoi.

Etape 3 : stimuler le rappel de connaissances antérieures

Cette étape permet à l'apprenant de le centrer à ce qu'il va potentiellement compléter dans ce qu'il a à développer tout en lui permettant de reconstruire les savoir antérieurs et qu'il utilisera pour faire le lien entre les deux temps. Ce rappel est généralement effectué par le biais de rappels oralisés par l'intervenant ou par le biais de questionnaires portant sur les enseignements précédents ou encore sur la construction de mind-map³.

Etape 4 : présenter le contenu

Il s'agira d'énoncer ce qui sera effectué et de séquencer les informations qui sont données afin d'éviter la surcharge cognitive et de faciliter le rappel lors des autres cours.

Etape 5 : guider l'apprenant

Il s'agit ici d'un temps fort dans l'accompagnement de l'apprenant en lui permettant de cerner sa manière d'apprendre. Ainsi aider l'apprenant à « apprendre comment apprendre » diminuera sa frustration tout en lui permettant de développer sa métacognition ce qui l'aidera lors de futures expériences.

³ Mind-Map : Une carte mentale (ou mind-map) est un diagramme qui est élaboré pour représenter des idées, des tâches ou d'autres concepts ayant un lien avec un mot-clé ou une idée centrale.

Etape 6 : permettre à l'apprenant d'utiliser ses nouvelles compétences

Les nouvelles compétences développées par l'apprenant pourront être appréciées dans des situations nouvelles et pourront par exemple être appliquées dans le cadre de simulations proposées par le formateur. Si le scénario dans lequel l'apprenant applique ses nouvelles connaissances est concret, il pourra plus facilement mettre en application ce qu'il a appris en formation.

Etape 7 : fournir un retour

Peut être réalisé sous forme de quizz ou de commentaires. Il faut dire à l'apprenant s'il a fait du bon travail et pourquoi, sinon lui proposer un accompagnement personnalisé.

Etape 8 : évaluer la performance de l'apprenant

Il s'agira ici de mettre en place des dispositifs d'évaluation qui vont donner la possibilité de voir si l'apprenant a ancré la formation à laquelle il a participé et ainsi de mesurer ses performances. Cela signifie aussi qu'il est nécessaire de communiquer des informations générales sur la progression des apprenants.

Etape 9 : favoriser la rétention et la réutilisation des savoirs

Fournir à l'apprenant la possibilité d'appliquer ce qu'il a appris durant la formation en différant la période et la situation qui semt préférées en dehors du cadre de la formation. En effet le fait que l'apprenant puisse réinvestir ce qu'il a entendu et construit au cours de la formation est une trace non négligeable de son apprentissage.

Les travaux de Gagné (1985) ont permis un glissement du champ de recherche de l'ID d'un paradigme behavioriste à un paradigme cognitiviste. Ce modèle linéaire concentre la majeure partie des éléments qui font que l'on apprend.

4.1.2 Le Modèle ARCS de John Keller (1987)

Selon John Keller (1987), le processus d'ingénierie pédagogique est constitué de 4 composants : l'attention, la pertinence, la confiance et la satisfaction (attention, relevance, confidence et satisfaction : ARCS).

L'attention

John Keller a développé à la fin des années 70 (Keller 1979) un modèle théorique dans lequel la motivation est un impératif aux apprentissages. Dans ce modèle, l'attention de l'apprenant est nécessaire à l'émergence de la motivation. Ainsi dans le cadre du modèle ARCS, le but de l'enseignant est donc dans un premier temps d'attirer l'attention de l'apprenant vers le stimuli approprié (Keller & Suzuki 1988). Cette attention peut être gagnée de deux manières :

- en surprenant l'apprenant et ce, par exemple en utilisant l'actualité, une incongruité ou des événements improbables ;
- en attirant l'attention de l'apprenant par la stimulation de la curiosité de l'apprenant en proposant par exemple un problème à résoudre

Pour maintenir cette attention à un niveau optimal, l'auteur propose plusieurs stratégies :

- L'utilisation d'exemples concrets.
- La participation des acteurs en introduisant un exercice de participation active de l'apprenant (brainstorming, jeu de rôle)
- L'utilisation de l'humour (quand c'est approprié) par des jeux de mot, ou d'une introduction humoristique ou des analogies amusantes pour expliquer un concept...
- L'utilisation d'incongruités, d'éléments en conflits avec le contenu ; exemple l'introduction d'éléments en contradiction avec le propos énoncé afin d'engendrer le débat ou jouer l'avocat du diable pour pouvoir discuter.
- La stimulation par la recherche d'informations en intégrant des activités de résolution de problème à intervalle régulier

- La variabilité des situations en utilisant différents supports (vidéo ou texte), user de prosodie pour ne pas parler de manière monocorde, scinder le groupe en deux pour effectuer une étude de documents à mettre en discussion ...

La pertinence

Si le contenu d'une formation est jugé pertinent c'est-à-dire qu'il a du sens pour l'apprenant, celui-ci sera d'autant plus engagé dans le processus d'apprentissage. Utiliser un langage et des exemples familiers aide à faire naître cette impression de pertinence. Selon le modèle ARCS, il existe 6 stratégies qui permettent de rendre une formation pertinente.

- **Utiliser l'expérience de l'apprenant** : il faut mettre en évidence le fait que les connaissances qu'il a précédemment acquises aideront l'apprenant à acquérir les connaissances ciblées par la formation
- **Montrer l'intérêt de la formation** : démontrer la valeur intrinsèque de la formation et faire le lien avec les buts futurs des apprenants
- **Montrer les utilisations futures de la formation** : donner des exemples concrets d'application de ce que les apprenants vont apprendre durant la formation
- **Utiliser le besoin d'accomplissement** : afin de stimuler les étudiants proposer des activités ardues mais ayant peu de chance d'aboutir sur un échec
- **Donner l'exemple** : solliciter les apprenants les plus performants afin de trouver une assistance en tant que tuteurs. Être soi-même expert dans le domaine enseigné
- **Laisser le choix aux apprenants** : proposer aux apprenants différentes façons de réaliser le travail qui leur est demandé. Prendre en compte les choix personnels qu'ils ont fait pour réaliser ce qui est demandé.

La confiance

Il faut s'assurer que l'apprenant puisse réussir tout en lui proposant une difficulté qui donnera du sens à son succès. La confiance exerce une influence sur la persévérance de l'apprenant durant la formation, il existe 4 stratégies différentes qui permettent d'augmenter la confiance de l'apprenant en ses capacités.

- **Donner les objectifs et les prérequis de la formation** : cela permet à l'apprenant d'estimer la probabilité de succès
- **Favoriser le développement des apprenants** : tout au long de la formation, l'apprenant doit comprendre qu'il y a un lien entre les efforts qu'il produit pour la formation et les connaissances et compétences qu'il développe par le biais de cette formation
- **Fournir des retours d'expérience** afin de renforcer l'internalité de l'apprenant vis-à-vis de ses réussites
- **Favoriser l'impression de contrôle de l'apprenant** : l'apprenant doit toujours croire que ses réussites sont le résultat de ses efforts.

La satisfaction

Dans ce modèle, la satisfaction est basée sur la motivation et peut être intrinsèque ou extrinsèque. Afin de maintenir l'apprenant motivé, il faut lui donner l'opportunité d'appliquer les connaissances et compétences nouvellement acquises. Il faut également lui donner des retours qui permettent un renforcement du comportement souhaité. Si les apprenants sont satisfaits des résultats de leurs apprentissages, ils seront motivés pour apprendre. La satisfaction est un concept proche de la confiance, aussi si la tâche proposée représente un défi, l'apprenant sera d'autant plus satisfait en cas de réussite.

4.1.3 Le modèle 4C/ID (4 components / Instructional design) de van Merriënboer (2002)

La méthode d'apprentissage de ce modèle consiste en la résolution d'un problème complexe par l'apprenant. Pour ce faire, ces derniers seront amenés, à déployer une procédure et à réaliser un ensemble de tâches spécifiques qui sont ciblées par la formation car elles permettent de développer les compétences et connaissances souhaitées. L'apprenant réalise ces tâches en environnement réel ou simulé tout en étant assisté en fonction de sa progression à un niveau plus ou moins élevé par le formateur. Au fur et à mesure que l'apprenant progresse, les tâches deviennent de plus en plus complexes et requièrent des « informations de soutien ». De plus, dans ce genre de configurations, l'apprenant peut naviguer librement dans cet environnement d'apprentissage complexe et peut avoir besoin, lorsqu'il est bloqué par un problème qui n'a pas été anticipé par le formateur, de « JIT informations » (informations de support) afin de poursuivre sa progression sans être freiné.

Selon le modèle 4C/ID, les formations d'apprentissage complexes peuvent être décrites par composants de base.

1. Les tâches d'apprentissage : ce sont des tâches qui doivent permettre à l'étudiant de développer des schèmes de réflexion transposables à d'autres situations et dans une certaine mesure des automatismes qui seront déployés pour les aspects récurrents de certaines tâches. Ces méthodes pédagogiques visent principalement l'induction de schémas d'abstraction par le biais d'expériences concrètes fournies par la tâche. Les étapes de conception de ces tâches sont :

- concevoir la tâche
- séquencer et ordonner la tâche et les sous-tâches
- fixer les objectifs de performance.

2. Les informations de support : ce sont les informations qui sont indispensables à la réalisation de la tâche. Elles font le pont entre les connaissances antérieures de l'apprenant et la tâche qu'il réalise. Les étapes pour concevoir des informations de supports sont les suivantes :

- créer les informations de support
- analyser les stratégies cognitives déployées pour réaliser les tâches
- analyser les modèles mentaux⁴.

3. Les informations procédurales (Just in time information) : ce sont les informations qui permettent aux apprenants d'apprendre à exécuter les tâches d'apprentissage. Les informations de support sont principalement d'ordre pratique et permettent l'intégration d'informations procédurales. Les informations « juste à temps » ou procédurales sont utilisables pour les tâches d'apprentissage (qui sont les tâches qui permettent à l'apprenant de comprendre l'objet de la formation) mais également pour les exercices pratiques qui sont des tâches permettant de s'entraîner après avoir réalisé les tâches d'apprentissage.

Les étapes sont :

- créer les informations relatives aux procédures
- analyser les règles cognitives mises en œuvre dans l'exécution effective
- analyser les connaissances préalables nécessaires à l'utilisation de ces informations.

4. Les exercices de pratique : ce sont des éléments fournis aux apprenants afin qu'ils apprennent des règles d'actions pour pouvoir réaliser les éléments procéduraux des tâches d'apprentissage et automatiser ces règles d'action.

⁴ Ce sont des modèles mobilisés par les apprenants afin que la tâche d'apprentissage à laquelle ils sont confrontés passe de l'état initial à l'état final (van Merriënboer et al., 2003).

4.2 Evaluation à des fins d'amélioration de la formation

Le projet TINA-M2P a pour objectif de proposer des formations en « mode projet » qui permettent le développement de compétences à la 3Dexpérience et à la fabrication additive. On pose que l'expérience avec la plateforme permettra aux étudiants de développer des compétences qu'ils pourront transposer à d'autres projets mobilisant la plateforme TINA-M2P. En matière d'évaluation des formations, le modèle le plus connu et le plus utilisé en psychologie du travail est le modèle de Kirkpatrick (1959). Depuis sa création ce modèle a de nombreuses fois été modifié et amélioré (Kraiger & al, 1993 ; Beech & Leather, 2006 ; Kirkpatrick, 2007). Ces nouvelles versions ou variantes ont cependant toutes en commun une évaluation se déroulant à quatre niveaux.

- **Niveau des réactions** : la réaction est principalement associée à la satisfaction de l'apprenant à l'issue de la formation. L'évaluation de la satisfaction se fait généralement par le biais de questionnaires soumis à l'apprenant, on y mesure le degré de satisfaction de l'apprenant envers les différents aspects de la formation.
- **Niveau des apprentissages** : ce niveau correspond aux compétences acquises durant la formation. Des tests écrits peuvent être utilisés afin d'estimer le changement de niveau de connaissances, le changement de niveau de compétences peut lui être mesuré par le biais de simulations (Kirkpatrick, 2007).
- **Niveau des comportements** : il s'attache à déterminer si les compétences nouvellement acquises sont transposées dans d'autres contextes (le transfert d'apprentissage). Ce niveau s'évalue par questionnaires, entretiens ou observations.
- **Niveau des résultats** : Ce dernier niveau consiste en l'évaluation de l'incidence de la formation sur les résultats obtenus. Elle se base donc sur des indices économiques (production, augmentation des ventes, diminution des arrêts de travail) définis en amont de la formation.

4.2.1 Niveau des réactions : évaluation de la satisfaction et analyse des commentaires

Afin de mesurer les différents degrés de satisfaction des apprenants, il convient de poser des questions concernant le contenu de la formation, les actions pédagogiques du formateur et les conditions matérielles dans lesquelles la formation s'est déroulée. Dans l'étude de Le Louarn & Pottiez (2010), on retrouve ces trois dimensions de la satisfaction (ANNEXES 8 p 387). L'échelle « contenu de la formation » contient des questions relatives à la qualité des supports pédagogiques, à la pertinence du contenu de la formation ou à l'impression de progrès ressenti par l'apprenant.

L'échelle action pédagogique quant à elle comporte des questions relatives aux actions entreprises par le formateur : est-ce que le formateur a fait preuve de pédagogie ? Maîtrisait-il son sujet ?

Enfin l'échelle relative aux conditions de formation questionne l'apprenant sur la qualité du matériel utilisé ou sur la durée de la formation.

On recourt également aux commentaires des étudiants. Cette pratique est empruntée à l'Evaluation de l'enseignement par l'étudiant (EEE). Pratiquée depuis les années soixante dans les universités anglo-saxonnes, l'EEE se généralise en Europe notamment sous l'impulsion, entre autres, du processus de Bologne (Rege Colet, 2010). L'EEE a montré que les commentaires écrits des étudiants étaient très utiles car ils fournissent un grand nombre d'informations sur les formations dispensées (Berthiaume & Sylvestre, 2012).

Cependant ces écrits sont produits de manière désorganisée et doivent être analysés de manière systématique afin d'être réellement exploités à des fins d'amélioration des formations (Le Duc, Dillenbourg & Ricci, 2012). Bocquillon et al. (2014) proposent, afin de pallier cette faiblesse, d'effectuer une analyse thématique des contenus des commentaires produits par les étudiants (pages 184 à 187 de ce document). L'analyse thématique découpe un texte en unité de sens (Derobertmasure & Dehon, 2012), ces unités forment ensuite un corpus qu'il s'agira d'étiqueter unité par unité en fonction du contenu de ces dernières. Une analyse thématique peut se faire de manière inductive (on part des unités afin de dégager les thèmes et sous thèmes qui composent l'ensemble du corpus) ou déductive (les thèmes sont prédéfinis et chaque unité est affecté à un thème ou à un autre). Les thèmes dégagés doivent être exhaustifs (chaque élément doit entrer dans un thème/sous thème) et exclusifs (un élément ne peut pas appartenir à deux thèmes différents) ce qui implique une forte intervention de l'analyste.

Chapitre 5 : problématique et processus d'investigation

Le but du projet TINA M2P est de créer des formations au plus proche de l'activité réelle de création d'un drone. C'est pourquoi il semble pertinent de se tourner vers la démarche de gestion de projet proposée par l'ergonomie de l'activité. Cette démarche propose d'analyser l'activité réelle afin de pouvoir définir ou redéfinir si besoin les objectifs du projet puis de proposer des scénarios de simulation. Cette démarche qui en plus de coller parfaitement avec le modèle d'ingénierie pédagogique 4C/ID (qui préconise une utilisation de tâches au plus proche de l'activité réelle) fait intervenir tous les acteurs à chaque étape du projet. Cette démarche participative permet des interactions entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre offrant de opportunités d'enrichissement du projet.

Etant donné que l'analyse des activités réalisées lors de la primo conception du drone a pour finalité la création de formation, nous avons choisi comme cadre théorique la didactique professionnelle. Dans cette optique l'analyse du travail peut se faire par le biais des buts, des théorèmes en actes, des règles d'action ou des concepts organisateurs afin d'en percevoir les tenants et les aboutissants. Les données recueillies permettront de créer des situations de simulation de l'activité basées sur l'activité effective. Ces situations de simulation sont ensuite utilisées auprès des apprenants afin que ces derniers développent les compétences liées aux tâches réalisées lors de ces simulations. Dans le cadre de TINA-M2P, il n'y a pas de simulateurs comme on pourrait en trouver dans le domaine de l'aéronautique (Full Flight Simulator qui reproduit fidèlement l'environnement physique des pilotes ainsi que les réactions d'un avion) ou du nucléaire (des simulateurs pleine échelle reproduisant le fonctionnement du réacteur). En ce sens les situations de simulation proposées par TINA-M2P se rapprochent de celles que l'on peut rencontrer dans le domaine de la sécurité civile (Rogalski, 1995; Rogalski & Antolin, 1997). Dans ce genre de situation de simulation, l'ensemble des éléments est simulé par des humains que ce soient des instructeurs ou d'autres apprenants. Ce type de situations de simulation presque entièrement médiatisées par des humains sont de fait fidèles à la situation de référence (Rogalski 1998). Cette similitude fait que dans le cadre du projet

TINA-M2P la question la plus cruciale est de savoir quelles situations de références doivent être simulées compte tenu des acquisitions visées et des possibilités qu'offrent la 3DExpérience.

PROCESSUS D'INVESTIGATION

Le projet TINA-M2P a pour objectif de créer des formations permettant aux apprenants de créer un drone par le biais de la 3Dexpérience et de l'impression 3D. Dit autrement, notre objectif dans ce projet est de déterminer l'ensemble des situations de références qui ont permis la création du drone lors de la primo création, de les adapter pour en générer des situations de simulation et ainsi, permettre aux apprenants de réaliser les tâches qui leur sont demandées. Nous avons donc ici deux conceptions de situation de simulation. La première est celle utilisée dans le cadre de l'ergonomie de l'activité (Barcellini et al., 2013) et a pour but de mettre à l'épreuve les prescriptions existantes. La simulation vise alors à faire « jouer » leur travail futur à des opérateurs et opératrices sur la base des scénarios de prescription proposés par les concepteurs et de scénarios d'action issus de l'analyse de situations existantes. Ces scénarios sont ensuite modifiés (d'où le terme de scénario) afin de prendre en compte les feedback proposés par les opérateurs (difficultés, impasses ou désaccords dans la réalisation de l'activité simulée) puis validés par l'ensemble des acteurs.

La seconde conception de situation de simulation est celle utilisée en didactique professionnelle (Rogalsky, 1993) à des fins de formation et est issue d'une transposition didactique de situations de références mobilisant les compétences cibles de la formation. La situation de simulation a dans cette optique un rôle de médiation pour l'apprenant qui joue cette simulation (encadré par le formateur) et la situation de référence.

La principale différence entre ces deux situations de simulation est leur objectif. Dans un cas la situation de simulation a pour but de faire ressortir les problèmes rencontrés par les opérateurs par rapport aux prescriptions. Dans l'autre cas, elle permet à l'apprenant d'acquérir les compétences cibles de la formation.

Dans le cadre du projet TINA-M2P nous avons choisi une approche centrée apprenant. C'est pourquoi les prescripteurs ont extrait de la situation initiale (la primo-conception du drone) les situations de références contenant les compétences cibles de la

formation. Par une transposition didactique nous avons élaboré des situations de simulation (situation de simulation en didactique ou scénarios en ergonomie) que nous avons ensuite mises à l'épreuve lors des phases de test puis modifiées sur la base des données recueillies auprès des apprenants. En somme, nous avons effectué une simulation de situation afin d'éprouver nos situations de simulation et de les modifier par le biais des feedbacks proposés par les apprenants.

Le défi réside dans le fait que la création d'un drone requiert l'application de connaissances en ingénierie système, en mécanique, en optimisation de structure, en choix des matériaux, en électronique, en modélisation dynamique et en impression 3D. Ainsi des professionnels spécialistes de ces disciplines, des ergonomes, des psychologues, des didacticiens professionnels, des experts en 3DExpérience et des stagiaires en génie mécanique devront collaborer pour l'élaboration des formations.

Afin de répondre aux exigences de ce projet nous avons fait le choix d'utiliser la notion d'objet intermédiaire (Vinck & Laureillard, 1996). Ce sont notamment leurs rôles de médiation de traduction et de facilitation des interactions qui nous intéressent. Ainsi un OI créé en début de projet puis modifié tout au long du projet portera en lui les points de vue de l'ensemble des acteurs notamment de ceux qui, comme les stagiaires en génie mécanique, n'interviendront qu'en début de projet. Ainsi, leurs points de vue parviendront aux autres acteurs. L'OI permettra également de faciliter la coordination et la coopération de différents acteurs du projet. Enfin l'OI permettra de faciliter les interactions entre professionnels provenant de disciplines différentes.

Afin de créer un OI qui nous permette d'extraire les situations de référence qui ont pu être observées lors de la primo création du drone, nous avons fait le choix de nous tourner vers les techniques de modélisation des tâches utilisées en IHM car les situations de références renvoient également à un ensemble de tâches et d'acteurs dans un dispositif organisé (Coulet, 2011). Nous avons fait le choix de nous pencher plus particulièrement sur les méthodes HTA, MABTA, GTA, CTT, CUA et MAD afin de déterminer laquelle utiliser en vue de créer notre OI. L'OI, dans sa première version, prendra une forme arborescence hiérarchique de tâches qui comprendra l'ensemble des tâches réalisées lors de la primo création du drone. Il sera créé au fur et à mesure de la primo création du drone par le biais d'observation et d'entretiens menés auprès des stagiaires. Il sera ensuite utilisé dans le cadre de la collaboration au sein d'une équipe pluridisciplinaire et devra donc être

assez simple pour être facilement appréhendable par des non spécialistes de l'ergonomie tout en fournissant une vision précise de l'ensemble des tâches qui ont été réalisées lors de la primo création du drone.

Dans le but de concevoir les formations, l'utilisation de groupe de discussion focalisée semble être une bonne méthode. En effet, il sera demandé aux participants de dégager les situations de simulation qui pourront être utilisées dans le cadre des formations TINA-M2P à partir des données contenues dans l'OI. Les solutions n'étant pas connues à l'avance, le fait que le groupe de discussion focalisée favorise les échanges entre participants et produise des solutions plus diversifiées et innovantes (Davila & Dominguez, 2010) permettra de répondre au mieux aux exigences du projet TINA-M2P. Il serait alors possible de procéder matière par matière en organisant des groupes de discussion focalisée composés de 2 universitaires experts dans une matière, d'un expert de la 3DExperience en charge de la création des formations et d'un psychologue chargé d'animer le groupe de discussion focalisée afin de pallier les faiblesses de cette méthodologie.

Une fois les parcours pédagogiques conçus, la création des formations se fera en utilisant un modèle d'ingénierie pédagogique. Sur la base de notre recherche de la littérature, nous avons déterminé les modèles les plus utilisés en ingénierie pédagogique et trouvé le modèle le plus adapté aux projets. TINA-M2P ayant pour objectif de former les apprenants par la création d'un drone, c'est le modèle 4C/ID (Van Merriënboer et al., 2002) qui semble le plus adapté étant donné qu'il se base sur une méthode d'apprentissage par problème complexe. Ce modèle semble d'autant plus pertinent que les auteurs soulignent que les apprentissages sont efficaces lorsque les supports pédagogiques sont réalisés sur la base de tâches authentiques. Une fois les supports pédagogiques des formations créées, ces dernières seront testées dans le cadre de simulations dans lesquelles les apprenants devront réaliser une partie du drone. L'évaluation sera réalisée en suivant une variante du modèle de Kirkpatrick (1959) proposée par Beech & Leather en 2006. L'évaluation se déroulera en 4 étapes, évaluation des réactions, des apprentissages des comportements et des résultats. L'évaluation des réactions se fait par le biais d'un questionnaire de satisfaction en fin de formation. Cette évaluation de la formation par l'apprenant couplé à une analyse thématique des commentaires (Berthiaume & Sylvestre,

2012) semble pertinente pour donner un premier retour aux acteurs du projet TINA-M2P et améliorer les supports de formation.

Ce travail de thèse propose **un cadre théorico-méthodologique pour le développement d'une plateforme ergonomique qui constitue un support de formation et vise également à instruire le rôle du psychologue ergonomiste dans ce cadre**. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons trois hypothèses.

En utilisant les concepts provenant de la didactique professionnelle et de l'ergonomie de l'activité, le psychologue ergonomiste est capable d'élaborer une démarche participative de création de formations basée sur l'activité réelle.

Sur la base de l'analyse du travail, le psychologue peut créer des objets qu'il pourra ensuite mobiliser afin d'optimiser et de coordonner le travail des différents collectifs de travail coopérant dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire.

En utilisant des modèles issus de l'ingénierie pédagogique et de la psychologie du travail, le psychologue ergonomiste peut proposer une méthodologie de conception, de création, d'évaluation et d'amélioration des formations.

Partie 2

Le développement de la conception

Chapitre 6 : Déroulement du processus d'investigation/intervention

6.1 L'élaboration d'un dispositif de création de formation

Dans le cadre du projet TINA-M2P nous avons développé une méthodologie s'inspirant de l'ergonomie de l'activité. En effet nous avons fait le choix d'observer l'activité qui sera demandée d'effectuer aux apprenants afin de la modéliser pour pouvoir la recréer dans le cadre de formations au sein d'environnements de simulation pour tester la formation. Les retours fournis par les participants aux tests nous permettront d'améliorer la formation afin d'obtenir de meilleurs résultats et d'améliorer la satisfaction des participants.

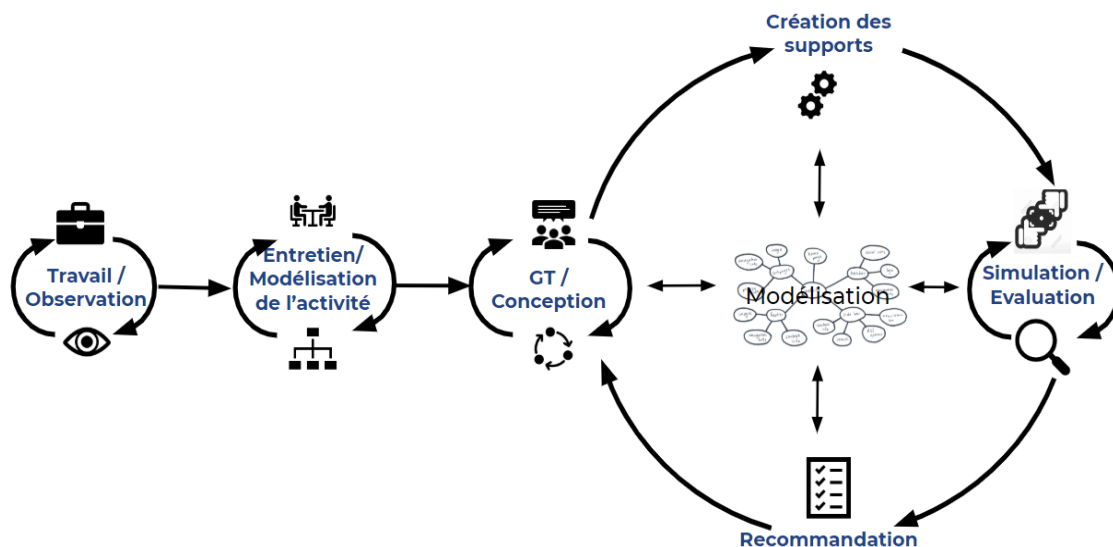


Figure 5 : Schématisation de la méthodologie de création d'un module de formation dans le cadre du projet TINA-M2P

La première étape « travail/observation » est menée auprès de deux étudiants en master 2 de génie mécanique à l'UFR MIM. La création du drone s'effectue dans des conditions réelles (stages de fin d'études). Elle mobilise la 3DExperience et l'impression 3D. Le travail que les deux étudiants ont produit en situation a fait l'objet d'une observation outillée. Les données recueillies et analysées ont permis de créer une première version de l'OI dont le formalisme est une bibliothèque de fichiers contenant l'ensemble des données que nous avons recueillies lors de la phase d'observation. Le traitement des données débouche sur une modélisation de l'ensemble des tâches réalisées lors de la primo-conception (ANNEXES 1 p 241).

La deuxième étape « Entretiens/modélisation de l'activité » vise à enrichir l'OI par une série de groupes de discussion focalisée (ANNEXES 2 p 245) où les stagiaires revenaient sur l'activité de création du drone. Ces GDF devraient permettre d'affiner l'objet intermédiaire en y injectant les représentations qu'ont les stagiaires du travail qu'ils ont accompli durant la primo-conception (ANNEXES 3 p 263).

La troisième étape « GT/Conception » met en scène des groupes de travail composés d'enseignants, d'un spécialiste dans l'utilisation de la 3DExperience et d'un psychologue. Ces groupes de travail ont pour but de concevoir, sur la base des informations contenues dans l'objet intermédiaire, la partie du processus de création du drone concernée par la matière dans laquelle les enseignants sont spécialisés. Le but de ces groupes est d'enrichir l'objet intermédiaire afin qu'il puisse fournir les informations nécessaires à la création des formations (ANNEXES 4 p 281).

La quatrième étape vise la « création des supports ». Les supports pédagogiques nécessaires à la création du drone sont créés. Ils se basent sur les informations contenues dans l'objet intermédiaire qui a été enrichi au fur et à mesure par l'ensemble des acteurs du projet afin qu'il puisse répondre aux exigences de l'ingénierie pédagogique (ANNEXES 5 p 363).

La cinquième étape « simulation/évaluation » vise à tester les formations qui ont été créées (ANNEXES 6 p 369). Ces formations se déroulent toutes en deux parties. Une première partie théorique où les enseignants dispensent un cours magistral dans leur matière de prédilection en lien avec la fabrication additive, puis une partie pratique où les apprenants sont amenés à créer une partie du drone qui nécessite l'application de ce qu'ils ont appris durant le cours qui vient de leur être dispensé et l'utilisation de la 3DExperience. Un système d'évaluation de la formation est mis en place afin de recueillir le feed-back des étudiants par rapport à la formation, et ce à des fins d'amélioration (ANNEXES 8 p 387).

La sixième étape « recommandations » renvoie à l'étape où les retours recueillis lors de l'évaluation sont compilés et formalisés afin de pouvoir être présentés à ceux qui ont conçu et créé la formation. Ces données servent de pistes d'amélioration continue des formations qui sont ensuite à nouveau testées et apprécier les effets de ces améliorations.

Les trois premières étapes permettent la conception de modules de formation au plus proche de l'activité réelle étant donné que les modules sont basés sur les données recueillies lors de la primo-conception du drone. Ces données sont ensuite transmises aux concepteurs de la formation afin qu'ils puissent élaborer des modules basés sur ce qui a été réalisé lors de la primo-conception.

Les étapes suivantes ont pour objectif de permettre la création et l'amélioration des différents modules de formations que propose le projet TINA-M2P ; le tout dans une démarche d'ergonomie participative médiatisée par un objet intermédiaire.

6.2 L'observation du travail et la création de l'objet intermédiaire

Dans un premier temps nous avons effectué une phase d'observation participante auprès des stagiaires en ingénierie mécanique. En effet, dans le cadre du projet TINA-M2P 2 étudiants en master de génie mécanique à l'UFR MIM ont été recrutés afin de réaliser, durant les 6 mois de leur stage de fin d'étude, un drone capable de voler en utilisant exclusivement la 3Dexpérience et l'impression 3D. Durant cette phase de primo-création du drone, nous avons accompagné les stagiaires dans les locaux de l'UFR MIM durant toutes les étapes de la création du drone : de l'élaboration du cahier des charges à l'impression du corps du drone. Nous les avons également observés durant les différentes réunions qui ont eu lieu avec leur maître de stage. Elles incluaient ce que les stagiaires réalisaient, dans quel but, le lien entre les différentes étapes, une description de leur lieu de travail (une salle toute équipée mise à leur disposition ou en extérieur lors des premiers tests de vol du drone), mais également les éléments de vocabulaire qui nous étaient étrangers, les outils utilisés et les personnes qui ont été sollicitées quand ils se trouvaient en difficulté (le maître de stage, l'ingénieur système, le formateur à l'utilisation de la 3Dexpérience etc.). Cette observation a été réalisée sans pour autant solliciter les stagiaires plus que nécessaire afin de ne pas perturber leur travail

Cette observation avait pour objectif de nous permettre d'effectuer l'ébauche d'un modèle informel des tâches. Modèle regroupant toutes les informations concernant les éléments de structure des tâches réalisées. Après avoir recueilli suffisamment de données, nous avons réalisé l'OI en lui-même. Ce dernier a pris la forme d'une modélisation hiérarchique des tâches comportant une description détaillée de chacune d'entre elles. Le but était de créer un objet faisant le pont entre l'ergonomie et l'ingénierie mécanique afin de permettre une intercompréhension entre nous et les stagiaires. Cette intercompréhension avait pour objectif de permettre aux stagiaires de compléter l'OI pour qu'il soit une représentation la plus fidèle possible des activités réalisées lors de la primo-création du drone. Nous souhaitons aussi faire en sorte qu'il soit le reflet des intentions des stagiaires, par le biais du processus de représentation rétrospective de l'OI. Cette étape d'observation a également permis aux stagiaires en mécanique de s'approprier le but du projet et notamment ce qui leur serait demandé plus tard une fois le drone en état de voler, à savoir : nous aider à compléter l'OI en y insufflant leur point de vue et leurs connaissances sur l'ensemble des tâches qui ont été réalisées.

L'immersion dans le monde de l'ingénierie mécanique que cette phase d'observation a induit, nous a également permis d'acquérir certaines notions importantes en mécanique ainsi que le langage spécialisé utilisé par les ingénieurs.

En parallèle de cette observation participante, un travail de recherche bibliographique a été effectué afin de trouver la méthode de modélisation répondant le mieux à nos attentes (une modélisation qui serait le support des échanges entre professionnels provenant de disciplines différentes).

6.2.1 La sélection d'une méthode de modélisation la plus adaptée à nos besoins

Afin de déterminer une forme de modélisations à utiliser, nous nous sommes résolus à expérimenter les différentes méthodes présentées plus tôt afin de les comparer sur la base de différents critères de sélection. Pour rappel, la modélisation sera utilisée dans le cadre de groupes de travail multidisciplinaires et devra être une représentation fidèle des tâches réalisées par les stagiaires lors de la primo création du drone. Les différentes versions de modélisations « optimiser topologiquement la version n du bras » réalisées par les stagiaires lors de la primo construction du drone sont présentées dans les sous parties successives.

6.2.1.1 La méthode HTA

La méthode de modélisation HTA repose sur une décomposition des tâches en sous tâches jusqu'à atteindre les tâches dites élémentaires qui sont les actions physiques menées par l'opérateur. Les tâches sont liées entre elles par un plan qui indique si elles sont séquentielles ou non.

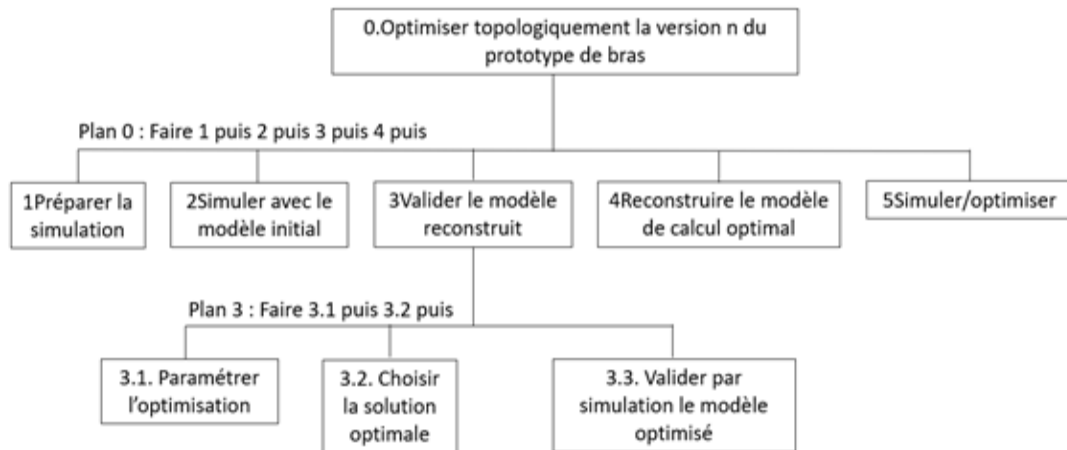


Figure 6 : Modélisation de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » en suivant la méthodologie HTA

Dans cette modélisation de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras », nous pouvons voir que l'ensemble des sous-tâches qui la constituent suivent un plan séquentiel. Il en va de même pour les sous-tâches constitutives de la tâche « Valider le modèle reconstruit ».

6.2.1.2 La méthode CUA

Le diagramme de flot de travail CUA décrit une série de scénarios réalisés par les différents rôles. La Figure 7 ci-après illustre plusieurs scénarios pour l'application 3DExperience autour des rôles de Collaborateur et Chef de projet. Le premier scénario consiste à Modéliser le drone. Ce scénario est multiutilisateur puisqu'il est associé à la fois aux deux rôles. Il est également collaboratif, ce qui est indiqué via les deux rectangles : on observe que « Modéliser le drone » sont au même niveau. Les deux derniers scénarios décrivent la coopération entre les utilisateurs. En effet, le scénario Optimiser topologiquement le bras du drone, tandis que le scénario Valider la forme optimisée du bras du drone est réservé au Chef de projet. Le lien entre les deux scénarios et le décalage vertical indiquent l'enchaînement temporel.

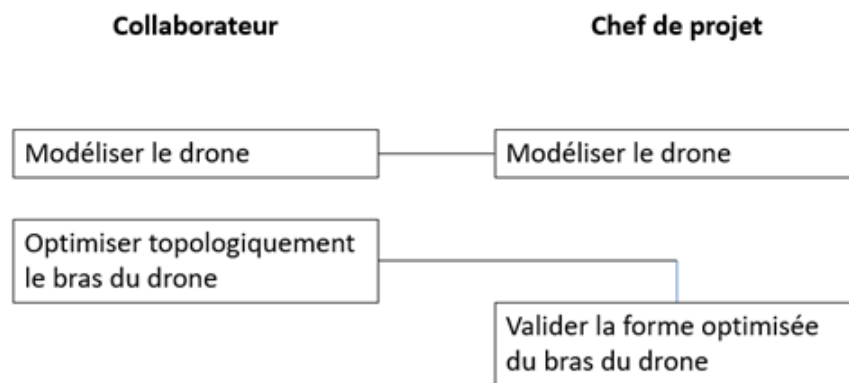


Figure 7 : Diagramme du flot de travail pour la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » d'après la méthode de modélisation CUA

Les différents scénarios sont ensuite détaillés textuellement afin d'identifier, le détail de l'activité, les utilisateurs, le but du scénario, ainsi que son contexte. La Figure suivante illustre une telle description pour le scénario collaboratif de création d'un soldat.

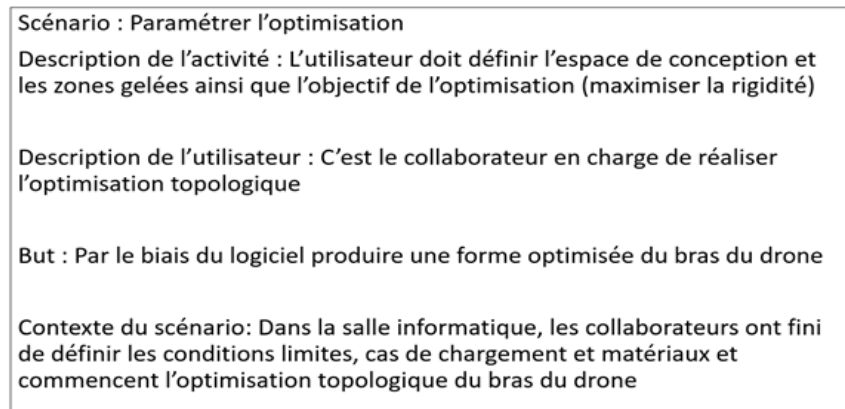


Figure 8 : Définition du scénario « Paramétrer l'optimisation » selon CUA

L'étape suivante consiste à décrire le modèle de tâches pour chacun des scénarios. Le modèle présenté à la Figure suivante traduit le scénario "Préparer la simulation". Les tâches sont organisées en colonne, avec un acteur associé à chaque colonne. Un encadré décrit une tâche abstraite. Celle-ci est détaillée en termes de tâches collaboratives (notée CTI pour Instance de Tâche Collaborative) et en termes de tâches individuelles (notée ITI pour Instance de Tâche Individuelle). La tâche "Préparer la simulation" est décrite par cinq tâches successives : Identifier les conditions limites, Définir les cas de chargement, Identifier les surfaces fonctionnelles, Identifier le matériau utilisé et Valider.

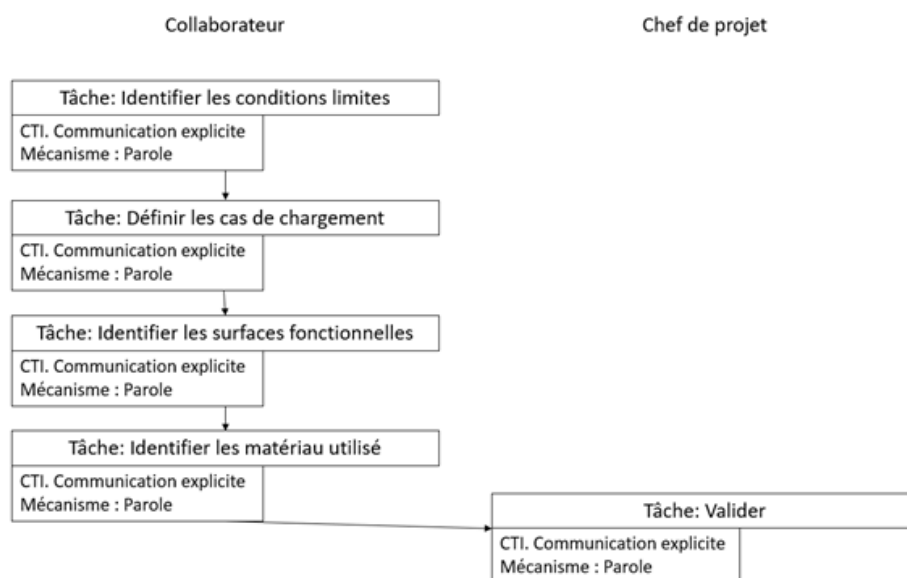


Figure 8 : Modèle de Tâche CUA pour le scénario « préparer la simulation »

6.2.1.3 La méthode GTA

Comme dit plus haut, GTA a été développé pour modéliser les tâches dans un environnement coopératif et rendre compte de sa complexité ; pour ce faire, le modèle s'appuie sur quatre types de représentations : Un arbre de tâches au formalisme simple du fait du nombre réduit de concepts de l'ontologie, aucun opérateur de composition n'est imposé. Ainsi le concepteur est libre d'attribuer aux tâches des prés et post conditions, des déclencheurs de tâches.

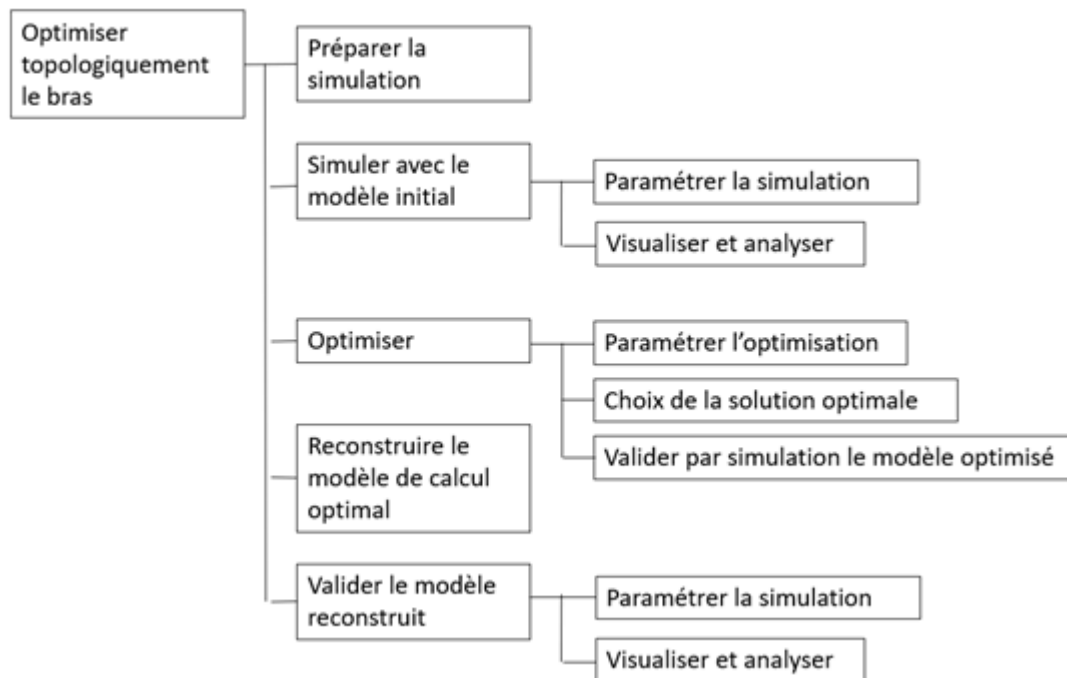
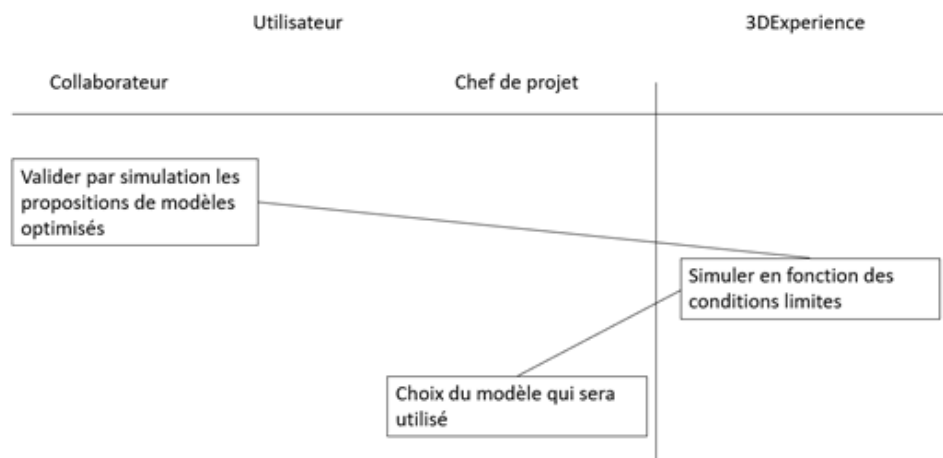


Figure 9 : Arborescence hiérarchique de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » selon la méthode de modélisation GTA

Une représentation de la dynamique de l'activité sous forme de diagramme



d'activité

Figure 10 : Diagramme d'activité de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » selon la méthode GTA

Un diagramme de classe afin de représenter les objets présents dans l'environnement.



Figure 11 : Diagramme de classe de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » selon la méthode GTA

Une représentation de l'environnement physique et culturel (principalement du point de vue des usages).

Action utilisateur	Action interface	Computation
Choisi une taille de maillage (clavier)	Affiche le maillage choisi tableau	Applique le maillage choisi à la pièce

Figure 12 : Exemple de représentation de l'environnement physique pour l'action « choisir le maillage » sur 3DExpérience selon la méthode GTA.

6.2.1.4 La méthode CTT

Afin de réaliser une modélisation CTT, il convient dans un premier temps d'effectuer une décomposition hiérarchique des tâches réalisée puis d'identifier les liens temporels qui lient ces tâches les unes par rapport aux autres (en référence aux huit connecteurs temporels), enfin il faudra déterminer à quel type de tâches chacune appartient (parmi les 4 types de tâches possibles : tâches abstraites, tâches de l'application, tâches utilisateur et tâches d'interaction), et ce, en fonction des objets et actions associées. Ci-dessous la représentation graphique des différents connecteurs temporels et des différents types de tâches.

III	[]	I[]I	(>
Concurrence	Choix	Concurrence avec synchronisation	Désactivation
I=I	>>	[]> >	I>
Indépendance d'ordre	Activation	Activation avec passage d'information	Suspension Reprise

Figure 12 : Représentation graphique des différents types de connecteurs temporels proposés par la méthode de modélisation CTT d'après l'outil CTTE

Symbole	Signification
	Tâche abstraite
	Tâche de l'application
	Tâche de l'utilisateur
	Tâche d'interaction

Figure 13 : Représentation graphique des différents types de tâches proposées par le modèle CTT d'après l'outil CTTE

La relation de la figure 14 ci-dessous est de type « activation ». Elle relie les sous-tâches qui composent les tâches « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » et « Valider le modèle reconstruit ». Nous pouvons également constater que cette arborescence est constituée des quatre types de tâches. En effet, les tâches « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras », « préparer la simulation » et « Choisir la solution optimale » sont de type « tâches abstraites, les autres appartiennent à la famille des « tâches d'interaction », « simuler/optimiser » est une tâche d'application, « Valider le modèle reconstruit » est une tâche d'interaction. Enfin, « Simuler avec le modèle initial », « Reconstruire le modèle de calcul optimal », « Paramétrer l'optimisation » et Valider par simulation le modèle optimisé », sont quant à elles, des tâches de l'utilisateur.

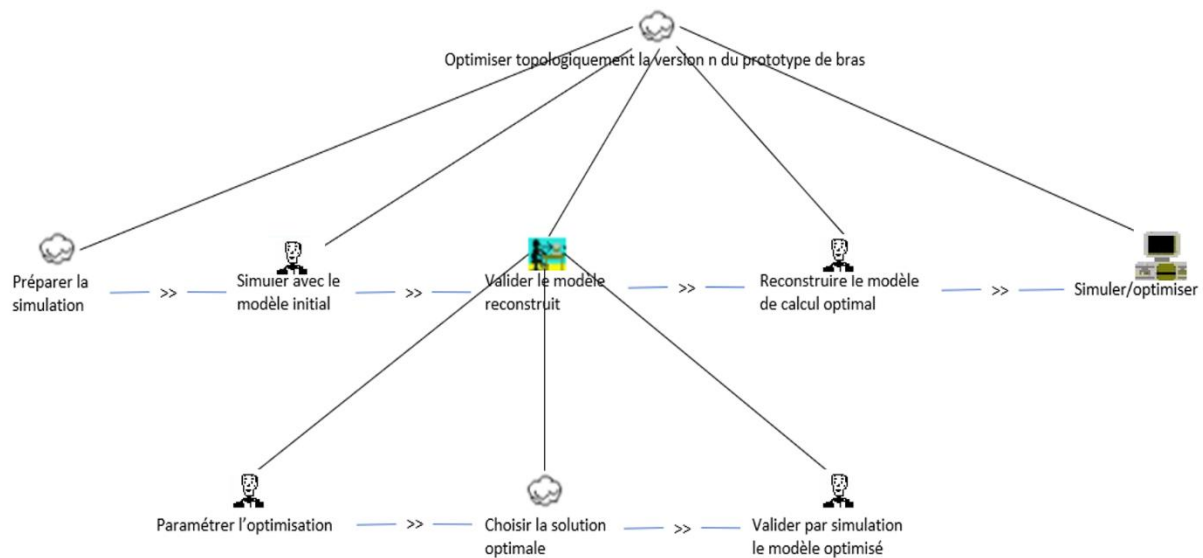


Figure 14 : Modélisation de la tâche « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » en utilisant la méthode de modélisation CTT

6.2.1.5 La méthode MABTA

La Figure ci-dessous décrit le modèle des rôles et des utilisateurs de la 3DExperience. Les différents utilisateurs sont représentés par la lettre U et un numéro, (le formalisme est le suivant : U1 U2...Un) dans un rectangle. MABTA propose de hiérarchiser soit les utilisateurs, soit les rôles et d'associer à chaque utilisateur un rôle. Ces deux relations transparaissent dans l'agencement spatial des différents rectangles qui constituent le modèle. Ainsi le rectangle le plus haut est soit hiérarchiquement supérieur aux rectangles en dessous, soit le rectangle le plus haut représente le rôle de l'utilisateur représenté dans un rectangle plus bas. La Figure suivante illustre deux rôles que nous avons identifiés : le rôle de Chef de projet qui est endossé par l'Utilisateur 1 et le rôle de Collaborateur qui est joué par l'Utilisateur 2. Un rôle nommé Utilisateur a été ajouté dont les rôles de Chef de projet et de Collaborateur sont la spécialisation.

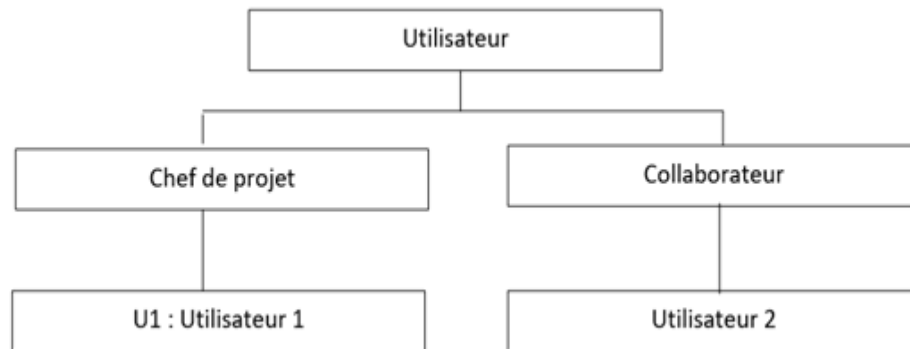


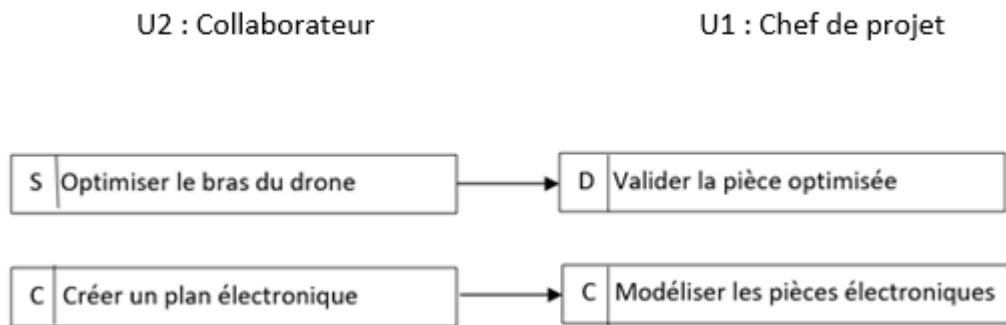
Figure 15 : Modèle de rôles et des utilisateurs selon la méthode de modélisation MABTA

Ensuite la modélisation MABTA propose de décrire la collaboration entre les utilisateurs par le biais d'un modèle de tâches de groupe. Les tâches sont classifiées en 3 types de tâches.

- Les tâches de coordination (C)
- Les tâches de prise de décision (D)
- Les tâches mono-utilisateur (S)

Une colonne est dédiée à chaque utilisateur du système afin de décrire les tâches qu'il sera amené à effectuer. Les relations d'influence sont ensuite créées afin de symboliser les liens qui existent entre les différentes tâches collaboratives. Ces liens signifient que réaliser une tâche exerce une influence sur la réalisation d'une autre tâche.

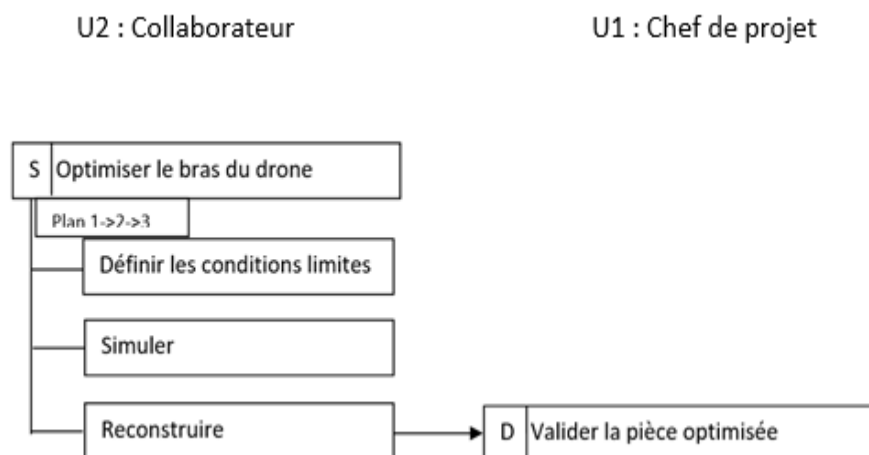
Dans notre cas, l'optimisation du bras du drone est une tâche effectuée par un seul collaborateur. La pièce obtenue doit ensuite faire l'objet d'une validation par le chef de projet. Afin d'illustrer les tâches de coordination nous avons pris l'exemple d'un collaborateur qui crée le plan électronique afin de déterminer les pièces nécessaires tandis que le chef de projet lui s'occupe de les modéliser afin qu'elles puissent être prises en compte dans la CAO.



*Figure 16 : Modèle de tâche de groupe selon la méthode de modélisation
MABTA*

MABTA propose ensuite d'affiner ces tâches par le biais d'un modèle hiérarchique de tâche. Le modèle hiérarchique de tâches décompose les tâches en sous tâches. La temporalité qui existe entre les différentes tâches est représentée par un label Plan, suivi d'un ordre de réalisation des sous-tâches.

La répartition des tâches entre les utilisateurs est quant à elle représentée par l'utilisation de colonnes. Ainsi, nous décomposons la tâche Optimiser le bras du drone en 3 sous-tâches successives : Définir les conditions limites, Simuler, reconstruire en deux sous tâches successives.



*Figure 17 : Décomposition hiérarchique des tâches selon la méthode de modélisation
MABTA*

Enfin, les auteurs de MABTA préconisent de réaliser un modèle de l'interface graphique (cf. exemple ci-dessous).

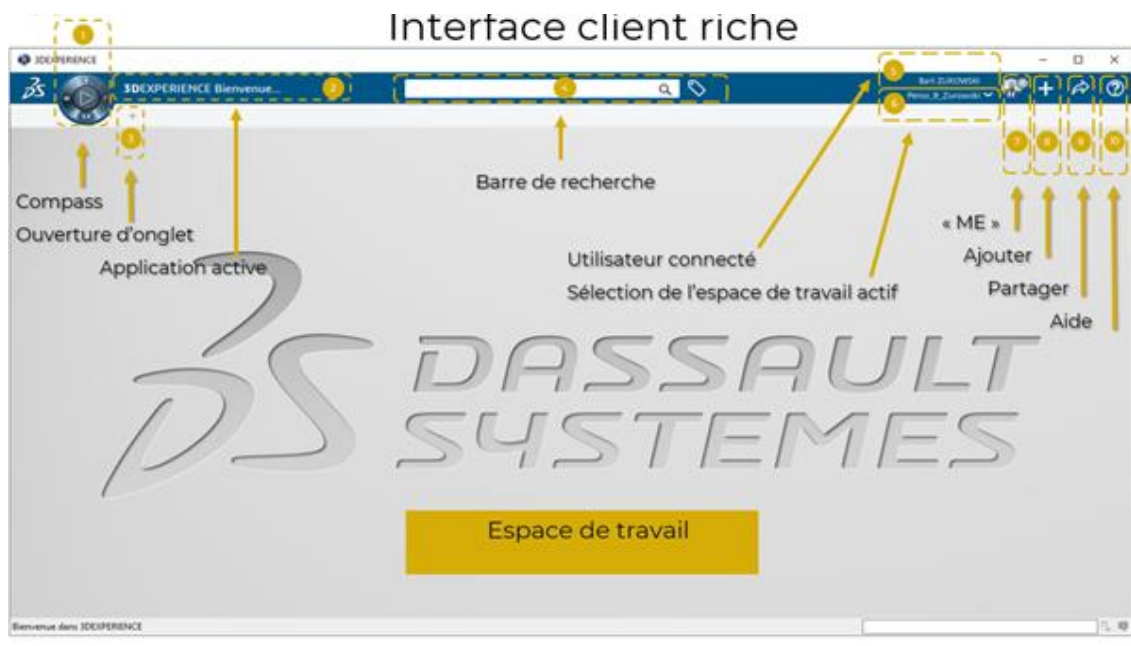


Figure 18 : Exemple de modèle de l'interface graphique détaillée

6.2.1.6 La méthode MAD

Afin de réaliser une modélisation MAD, il faut effectuer une hiérarchisation des tâches et des sous-tâches identifiées puis appliquer les opérateurs temporels qui lient chacune de ces tâches. Les opérateurs de temps sont représentés de la manière suivante :

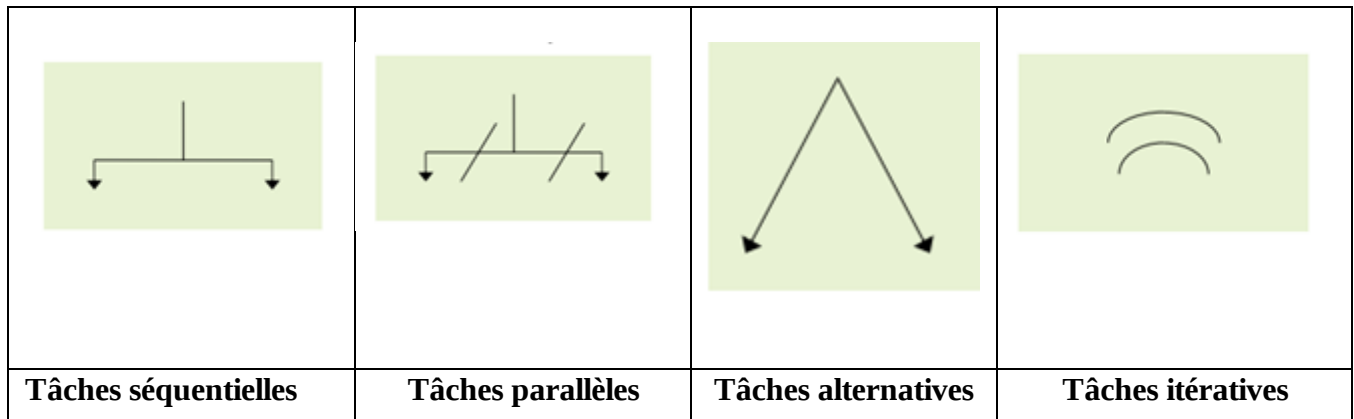


Figure 19 : Représentation graphique des opérateurs temporels selon la méthode de modélisation MAD

Dans la figure ci-après, nous pouvons voir, grâce aux opérateur temporels en forme de flèche, que l'ensemble des sous-tâches qui constituent les tâches « Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras » et « Valider le modèle reconstruit » se déroulent de manière séquentielle.

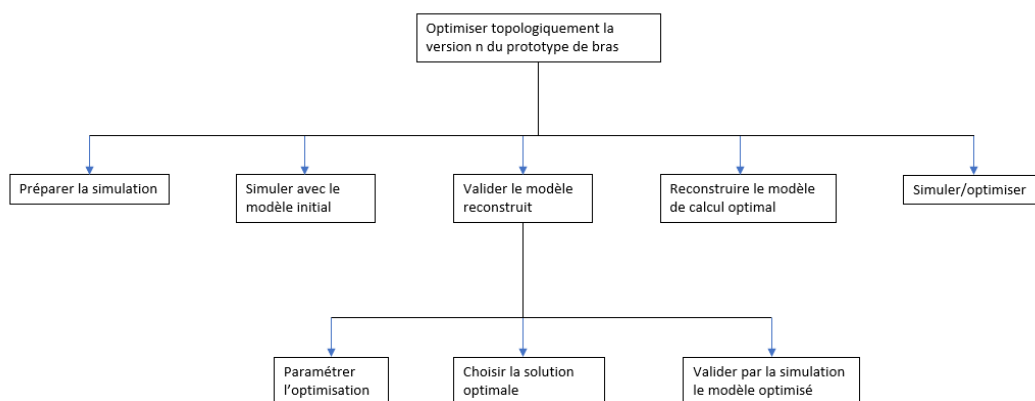


Figure 20 : Modélisation des tâches selon la méthode de modélisation MAD

Le modèle MAD, en plus des opérateurs temporels propose des éléments d'identification (au nombre de 2) et des éléments de structures (au nombre de 6) afin de caractériser la tâche. Ces éléments permettent de décrire la tâche sous forme de fiche comme celle ci-dessous (Tricot, 1998).

NOM : P 1.4.2 Optimiser la modélisation du prototype de bras	
ÉTAT INITIAL : Un ordinateur où le client lourd de la 3DExperience est installé	ÉTAT FINAL : non différent donc non-visible : les sujets n'ont pas de signal de fin.
BUT : Obtenir une version optimisée du bras du drone	
PRÉCONDITIONS : Respect du cahier des charges, Respecter le volume défini par le bras non optimisé	POSTCONDITIONS :
DONNÉES UTILISÉES : Données du cahier des charges, Les données produites lors de la modélisation du bras non optimisé	
OUTILS UTILISÉS : 3Dexperience, SIMULIA, CATIA et ENOVIA	
STRUCTURE DE LA TÂCHE : Itérative	
Tâche composite : P1.4.2 : Optimiser la modélisation du prototype P1.4.2.1 : Optimiser la version n du prototype de bras P1.4.2.1.1 : Préparer la simulation P1.4.2.1.2 : Simuler avec le modèle initial P1.4.2.1.2.1 : Paramétrer la simulation P1.4.2.1.2.2 : Visualiser et analyser P1.4.2.1.3 : Simuler/Optimiser P1.4.2.1.3.1 : Paramétrer l'optimisation P1.4.2.1.3.2 : Choisir la solution optimale P1.4.2.1.3.3 : Valider par simulation le modèle optimisé P1.4.2.1.4 : Reconstruire le modèle de calcul optimal P1.4.2.1.5 : Valider par simulation la modèle reconstruit P1.4.2.1.5.1 : Paramétrer la simulation P1.4.2.1.5.2 : Visualiser et analyser P1.4.2.2 : Choisir et argumenter le choix de la version n+1 du prototype de bras	

Figure 21 : Exemple de fiche descriptive de la tâche reprenant les attributs de la tâche proposée dans la méthode de modélisation MAD

Dans un premier temps le nom et le numéro de tâches sont mentionnés, ce sont les éléments d'identification puis les éléments de structure, état initial, état final, but, préconditions, post conditions ainsi que les données/outils utilisés. L'absence de postconditions s'explique par le fait que les résultats de cette tâche sont le bras finalisé du drone validé par le collectif durant la réalisation de la tâche, qui ne fait donc plus l'objet de modifications. La structure de la tâche quant à elle donne une indication sur les opérateurs temporels articulant les sous-tâches qui la constituent.

6.2.1.7 Tableau récapitulatif

Afin de choisir quel type de modélisation nous utiliserons, il convient de rappeler l'utilisation qui en sera faite.

- La modélisation représentera l'ensemble des tâches réalisées dans le cadre de la primo-création du drone. La représentation graphique ne doit pas être trop complexe pour ne pas rendre la modélisation illisible. Il ne faudra donc qu'un seul type de représentation des tâches afin de ne pas complexifier de manière superflue la modélisation (si nécessaires, des détails pourront être ajoutés par le biais de fiches) et une représentation graphique simple.
- La modélisation servira de support aux échanges d'un groupe de travail pluridisciplinaire, il ne faut pas que les participants soient ralentis par des difficultés de compréhension de symboles. Les opérateurs temporels devront donc être complets mais pas complexes.
- Une fiche sera associée à chaque tâche afin de faciliter la compréhension de ce qui a été réalisé et dans quel but. C'est pourquoi la technique de modélisation choisie devra donner une description complète de la tâche afin de nous permettre de réaliser ces fiches sans pour autant multiplier les représentations graphiques de la tâche.
- Enfin, étant donné qu'un logiciel de mind-mapping sera utilisé afin de formaliser le modèle de la tâche il nous a semblé indispensable que la modélisation apparaisse sous forme d'arborescence hiérarchique des tâches.
- Nous pouvons voir que seule la technique MAD remplit toutes nos exigences, c'est pourquoi nous l'avons retenue pour formaliser notre modélisation des tâches et créer les fiches associées à chacune d'entre elles.

	Un type de tâche	Représentation graphique simple	Connecteurs temporels complets	Connecteurs temporels simples	Description complète de la tâche	Représentation graphique unique	Arborescence hiérarchique de tâche
CUAA	X	O	X	O	X	O	X
CTT	O	O	X	O	O	X	X
MABTA	O	X	O	X	O	O	X
GTA	X	X	X	X	X	O	X
HTA	X	X	O	X	O	X	X
MAD	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des différentes méthodes de modélisation et leur intérêt dans le cadre de notre projet

6.2.2 Création de l'OI modélisation des tâches

L'un de nos objectifs était de créer un objet intermédiaire qui soit une arborescence hiérarchique des tâches réalisées par les stagiaires lors de la primo-construction du drone. Nous souhaitions également qu'à chacune des tâches soit associée une fiche et que le tout puisse être enrichi et modifié tout au long du projet. Nous voulions également que in fine cet objet intermédiaire contienne toutes les informations nécessaires au bon déroulement des modules de formations tournant autour de la conception ou la construction d'un drone. Pour atteindre ces différents objectifs nous avons fait le choix de recourir à un logiciel de mind-mapping appelé free-mind. Cet outil en plus d'être open source avait l'avantage d'être assez facile à prendre en main, modifiable facilement et surtout permettait de créer des liens hypertextes pour chaque tâche dénommée. Ainsi, un clic sur le nom de la tâche ouvrait automatiquement la fiche descriptive de cette dernière.

Comme nous l'avons dit plus tôt (6.1 L'élaboration d'un dispositif de création de formation p.) dans ce manuscrit, cette recherche de la méthode de modélisation la plus adaptée pour notre OI s'est déroulée en parallèle de l'observation des stagiaires lors de la phase de primo-crédation du drone. La méthode de modélisation MAD nous a permis d'orienter notre observation participante en nous focalisation sur les tâches et les buts qui leurs sont associés ainsi que sur les connecteurs temporels qui lient les tâches les unes aux autres. En effet, l'élaboration de l'OI modélisation des tâches repose sur de nombreuses notes manuscrites prises durant l'observation participante (Figure 22 p121). Nous pouvons voir ci-dessous que la méthode MAD a fortement influencé la forme que ces notes ont prises car ce sont principalement les buts (encadrés ci-dessous en jaune), les intitulés des tâches (encadré ci-dessous en rouge) et les connecteurs temporels existants entre ces tâches qui y apparaissent (encadrés ci-dessous en vert).

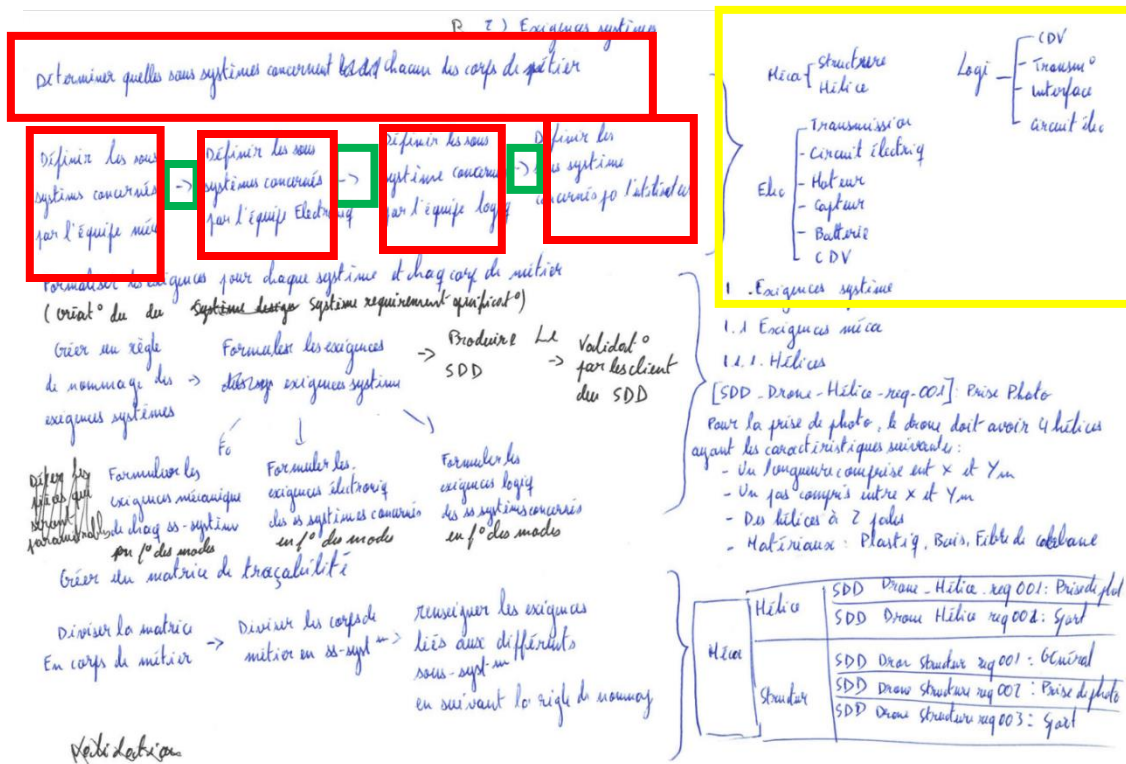


Figure 22 : exemple de notes manuscrites prises durant l'observation participante

En effet comme représenté sur cet exemple de notes manuscrites (figure 22), les éléments qui se situent à droite de l'accolade constituent un exemple de ce qui est attendu une fois que les tâches situées à gauche de l'accolade ont été réalisées. A titre d'exemple, l'intitulé de la première tâche abstraite « Déterminer quelles sous-systèmes concernent chacun des corps de métier » abouti au schéma à droite de l'accolade et pour ce faire, il faut exécuter en séquence les sous-tâches « définir les sous-systèmes concernés par l'équipe méca », « définir les sous-système concernés par l'équipe électronique », définir les sous-systèmes concernés par l'équipe logique » et définir les sous-systèmes concernés par l'utilisateur ». Il en va de même pour les tâches abstraites « formaliser les exigences pour chaque système et chaque métier » et « Créer une matrice de traçabilité » qui composent également cette fiche.

Nous avons procédé ainsi durant toute notre observation participante et avons pu diviser l'activité de primo création du drone en 105 tâches élémentaires et 49 tâches abstraites qui apparaissent dans l'OI modélisation des tâches (figure 23 p123, 24 p123, 25 p125 et 26 p125). Afin d'obtenir une arborescence complète des tâches réalisées, il nous a fallu créer le squelette général de l'activité des stagiaires. C'est pourquoi l'OI n'a pu être finalisé que bien après que le drone ait été achevé car l'organisation générale des tâches devait être adaptée et lisible pour l'ensemble des acteurs du projet.

Cependant l'outil ne permettait pas d'indiquer facilement les opérateurs temporels de la méthode MAD. C'est pourquoi il a fallu adapter la formalisation du modèle aux contraintes de l'outil :

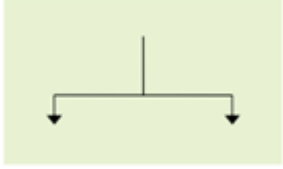
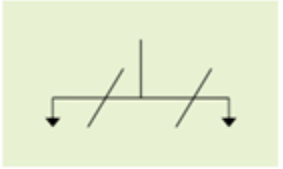
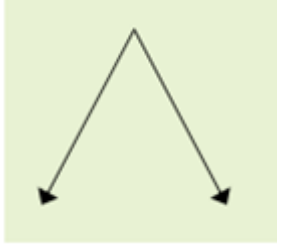
	→ 1. Modéliser le support des éléments électroniques → 2. Modéliser le châssis → 3. Modéliser le capot → 4. Modéliser le bras → 5. Modéliser le train d'atterrissage La relation séquentielle serait caractérisée par une numérotation des tâches indiquant l'ordre dans lequel elles doivent être accomplies
	→ Déterminer les sous-systèmes concernés par l'équipe mécanique → Déterminer les sous-systèmes concernés par l'équipe électronique → Déterminer les sous-systèmes concernés par l'équipe logicielle Les tâches parallèles seraient caractérisées par l'absence de numéro dans le nom de la tâche
	2. Programmer la carte ARDUINO → - Utiliser un code informatique déjà existant → - Créer de zéro un code informatique La relation alternative stricte serait caractérisée par l'ajout du signe «-» avant le nom de la tâche
	→ 1. Optimiser topologiquement la version n du prototype de châssis → 2. Valider la version n+1 du prototype de châssis La relation itérative serait caractérisée par la notation n et n+1 dans le nom de la tâche. La version n+1 de l'itération précédente étant la version n de l'itération actuelle

Figure 23 : Adaptation du formalisme de la méthode MAD à l'outil utilisé

La manière la plus intuitive afin de modéliser l'activité est de suivre l'ordre chronologique des tâches réalisées. Cependant dans notre cas, suivre l'ordre chronologique des tâches qui ont été réalisées nous aurait amené à une modélisation tentaculaire très peu lisible. En effet, il n'était pas rare que les stagiaires que nous avons observés reviennent régulièrement sur des pièces déjà créées alors qu'ils travaillaient sur une tout autre pièce du drone. Ce constat nous a amené à choisir une hiérarchisation des tâches le modèle RFLP afin de faciliter la compréhension de la modélisation des tâches. RFLP (Requirements Functions Logic Physic) « est une méthode itérative de conception basée sur les principes de l'ingénierie système » (Retho, 2015, p.21), de plus, c'est une méthodologie de conception bien connue et utilisée fréquemment en ingénierie, ce qui a également guidé notre choix. Elle consiste à réaliser les projets d'ingénierie en distinguant 4 parties différentes.

Le R (requirement-exigences) : consiste à déterminer les exigences auxquelles le drone devra répondre (par exemple : le drone devra comporter 4 hélices)

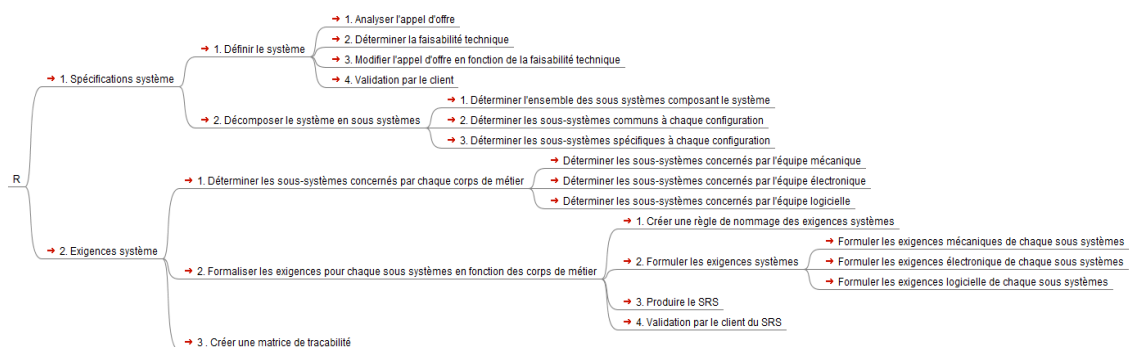


Figure 24 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie R de l'OI

Le F (fonction-fonctions) : consiste à déterminer ce que le système doit réaliser (par exemple : le drone devra voler)

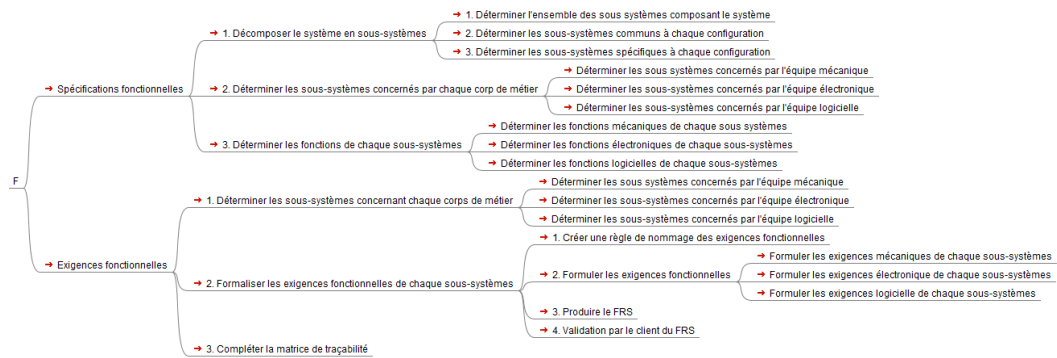


Figure 25 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie F de l'OI

Le L (logic-logique) : consiste à associer les fonctions avec des composants réels qui réalisent les fonctions (par exemple : un contrôleur de vole qui devra être programmé afin de permettre au drone de voler de manière stable)

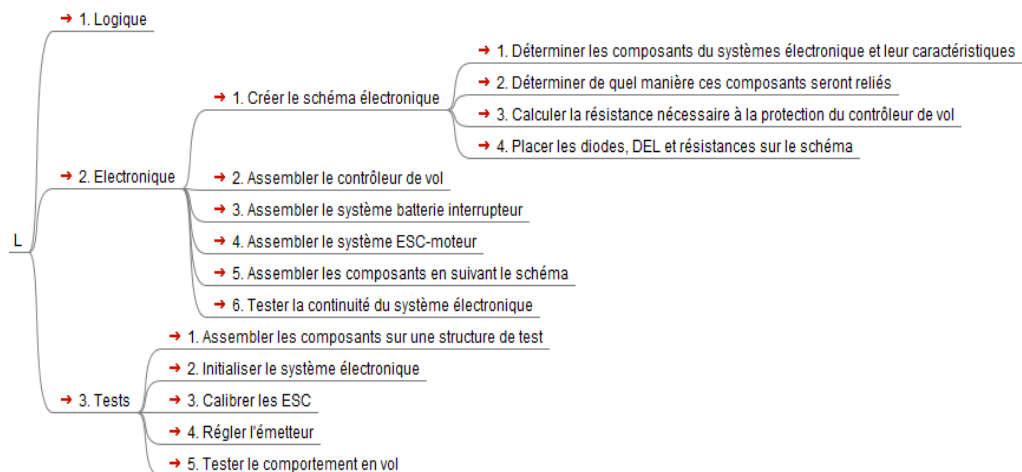


Figure 26 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie L de l'OI

Le P (physic-physique) : consiste en l'intégration et l'installation des composants dans un système physique (par exemple : le contrôleur de vol devra être intégré au drone et relié aux moteurs qui feront tourner les hélices).



Figure 27 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie P de l'OI

Une fois toutes les tâches hiérarchisées et connectées les unes par rapport aux autres, nous avons utilisé les éléments de structure de chaque tâche afin d'élaborer l'ébauche d'une description du travail qui a été réalisé. N'étant pas expert de la discipline, ces descriptions se bornaient généralement à décrire le but qui était atteint une fois la tâche réalisée et dans quelles conditions la tâche était réalisée.

Le processus de développement de l'OI décrit a été reproduit pour la conception des autres modules de la plateforme TINA-M2P. Pour éviter des répétitions, nous allons nous limiter à la description du processus appliqué à la conception du module d'optimisation des structures. Ainsi dans la modélisation originale, la partie optimisation du bras du drone se présentait ainsi

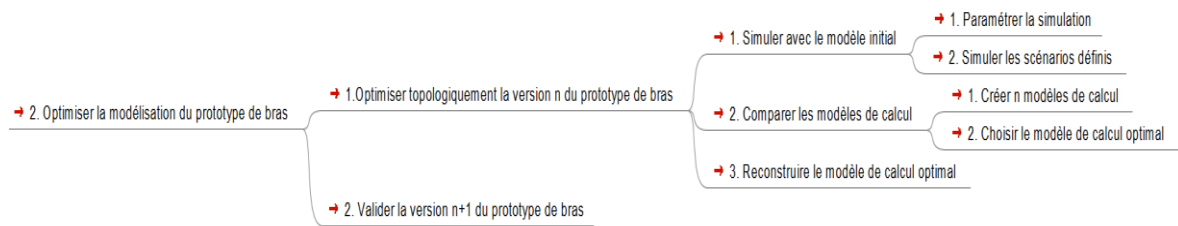


Figure 28 : Illustration de la tâche « Optimiser la modélisation du prototype de bras » et des sous-tâches qui la compose utilisées pour notre OI

Nous pouvons voir que nous avons déjà à ce stade du projet pu déterminer que l'optimisation du prototype de bras était un processus itératif qui nécessitait une comparaison entre plusieurs versions du bras du drone modélisé par CAO puis optimisé via le logiciel 3DExpérience.

Cependant la description des tâches dans les fiches est très approximative. Par exemple la tâche « reconstruire le modèle de calcul optimal » est désigné comme « Le modèle de calcul étant issue d'une simulation il doit être reconstruit afin de pouvoir constituer un modèle CAO ». Cet état de fait montre bien que lors de cette première phase d'observation et de création de l'objet intermédiaire modélisation, nous n'avons pu accéder qu'à la partie de l'activité relative aux buts. En effet nous avons construit notre modélisation et nos fiches descriptives de tâches qu'en fonction de ces derniers. Si nous voulons produire un objet intermédiaire qui puisse servir de support à des groupes de spécialistes dans leurs domaines respectifs, il nous faudrait obtenir davantage de détails.

6.3 Enrichissement de l'objet intermédiaire par les créateurs du drone

Dans les faits, nous avons fait en sorte que les tâches et sous tâches de l'intégralité de la modélisation que constituent notre OI soient issues d'une négociation entre nous et les stagiaires en charge de la primo-crédation du drone. Cette négociation nous a semblé nécessaire afin que nous puissions comprendre leur point de vue et en être les garants étant donné que leur participation au projet n'était que temporaire et que la création de formations au plus proche de l'activité réelle est le but du projet TINA-M2P. Etant donné leur statut d'expert pour ce qui est des tâches qu'ils ont réalisées, nous leur avons également permis d'affiner, en injectant des détails techniques ainsi que des précisions quant aux tâches élémentaires réalisées, les ébauches de description de tâches que nous avions réalisées par le biais des fiches descriptives des tâches (ANNEXES 3 p 263).

6.3.1 Animation de groupes de discussion focalisée afin d'enrichir l'objet intermédiaire

Les groupes de discussion focalisée avec les stagiaires étaient organisés autour de l'objet intermédiaire (figure 29 p130 et ANNEXES 1 p 241) et enregistrés à l'aide d'un magnétophone sur le lieu de travail des stagiaires (afin que ces GDF se déroulent dans l'environnement le plus neutre possible). Une transcription des échanges qui ont eu lieu pour ce qui est de la partie optimisation topologique du drone se trouve en ANNEXES 2 (p 245). Dans un premier temps l'objet intermédiaire a été présenté aux stagiaires. Nous avons pu leur expliquer, durant notre observation participante, que l'arborescence n'était que l'une des nombreuses représentations possibles de l'ensemble des tâches qu'ils avaient réalisées afin de créer le drone. Ainsi ils ont pu comprendre que l'OI (figure 28 p 127) en l'état était la représentation que nous, en tant qu'ergonome et néophyte, avions du travail qu'ils avaient accompli. Nous souhaitons que cette représentation soit étayée par leur point de vue plus technique et plus précis.

Nous leur avons également montré que l'arborescence suivait la logique RFLP décrite plus haut afin de la rendre plus lisible pour eux. Il était ensuite expliqué aux stagiaires comment fonctionnait l'OI, que les tâches les plus abstraites étaient sur le côté gauche de la modélisation, que plus on se dirigeait vers la droite de l'OI plus les tâches étaient « pratiques » et que les tâches se situant au bout de l'arborescence étaient dites élémentaires et qu'elles constituaient les tâches qu'ils avaient effectivement réalisés.

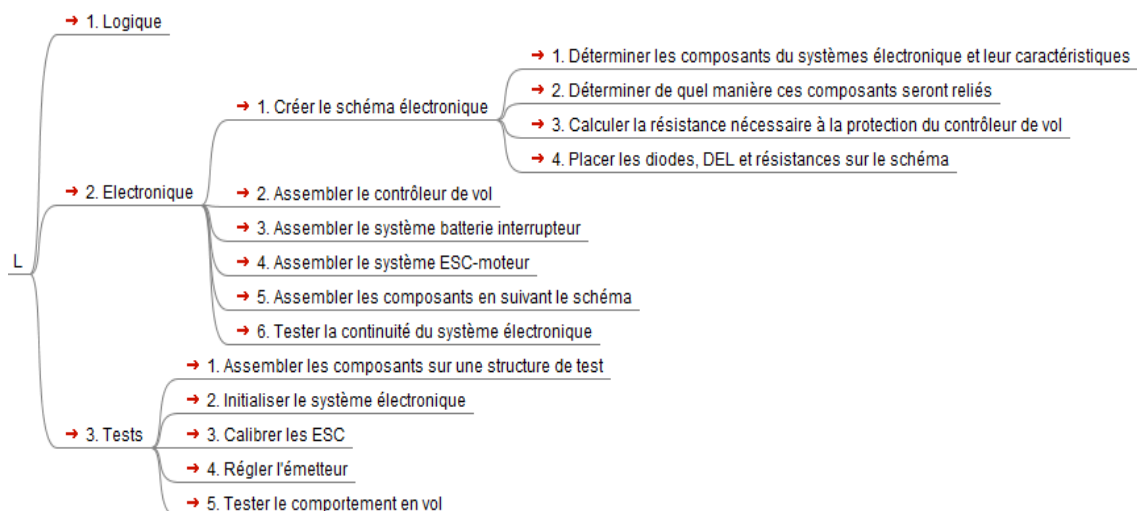


Figure 29 : Illustration de l'ensemble des tâches appartenant à la catégorie L de l'OI

Puis nous leur avons montré que derrière chaque tâche et sous-tâche de l'arborescence se trouvait une fiche descriptive de la tâche (ANNEXES 1 p 241). Ainsi l'arborescence permettait de décrire aux stagiaires les liens temporels existant entre chacune des tâches qu'ils avaient réalisées et la fiche quant à elle décrivait comment et dans quel but ils avaient réalisé cette tâche. En effet à chaque fois que les stagiaires produisaient quelque chose (un cahier des charges, la modélisation d'une pièce en 3D, l'impression d'une pièce, la création d'un circuit électrique, etc.) durant la phase de primo création du drone, nous leur demandions de nous expliquer comment et pourquoi ils avaient produit cet artefact. Ce n'était pas à proprement parlé des entretiens en « pourquoi ? comment ? » cependant les données recueillies par le biais des réponses à la question « pourquoi » nous ont permis de formaliser l'arborescence et les réponses obtenues grâce aux questions en « comment » nous ont permis d'instruire les fiches descriptives.

Ils étaient ensuite invités à s'approprier et à modifier l'OI modélisation ainsi que les fiches descriptives qui la constitue. L'objectif étant, que aussi bien l'arborescence que les fiches, soient aussi précises que possible, ce qui n'était pas encore le cas étant donné que l'OI était issu de nos seules observations. Etant donné que nous utilisions le Logiciel FreeMind que les stagiaires ne maîtrisaient pas (logiciel permettant de visualiser la modélisation hiérarchique des tâches et d'accéder aux différentes fiches descriptives), nous avons la charge de la navigation et des modifications apportées à l'OI. Ces modifications de l'OI ne pouvaient se faire sans notre assentiment. Cette confirmation de notre part était nécessaire afin de s'assurer que le contenu de l'OI soit toujours issu d'un consensus entre nous et les stagiaires. Ainsi les point de vue des deux parties étaient respectés et intégrés à l'OI. Nous nous assurons essentiellement du fait que les nouvelles tâches proposées respectaient les contraintes de la modélisation MAD (l'intitulé des tâches devait contenir un verbe, ils devaient nous décrire les buts et sous but, les conditions d'exécution, les connecteurs temporels entre les sous-tâches, etc.). Nous devions également valider le niveau de granularité de ces tâches afin de ne pas surcharger l'arborescence. Par exemple, nous préférons inclure une succession d'actions procédurales à la fiche descriptive d'une tâche si ces actions avaient un même but plutôt que de créer un ensemble de tâches élémentaires afin de les décrire. Enfin nous ne donnions pas notre assentiment avant de nous être assurés d'avoir parfaitement compris ce que les stagiaires avaient réalisés. Ceci dans le but d'être en mesure de pouvoir décrire ce qui a été fait durant la primo-crédation une fois les stagiaires sortis du projet et ainsi assurer notre rôle facilitateur accompagnant l'objet intermédiaire.

6.3.2 Résultats de l'enrichissement de l'objet intermédiaire

Comme déjà mentionné, afin d'éviter les redondances, nous avons fait le choix de nous pencher uniquement sur les tâches qui concernent le module d'optimisation des structures. Ce choix, effectué avec les porteurs du projet TINA-M2P, a également été fait car l'optimisation topologique peut en fonction des données mises à disposition de l'apprenant être utilisée comme simple initiation à l'utilisation de la plateforme ou à une formation avancée nécessitant une recherche approfondie de la part des apprenants si aucune donnée ne leur était fournie. Nous nous sommes plus particulièrement penchés sur la partie optimisation topologique du bras du drone car c'est cette partie de la structure du drone qui se prête le mieux à l'optimisation.

Ci-dessous se trouve une comparaison avant-après enrichissement de la modélisation (figure 30) pour ce qui concerne les tâches en rapport avec le module d'optimisation des structures.

Avant enrichissement

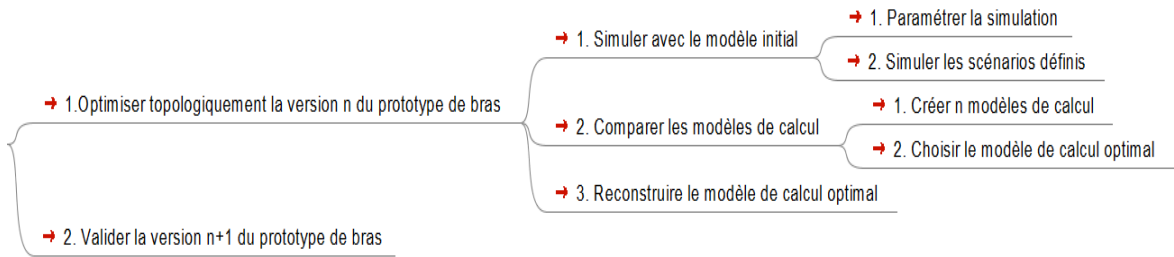


Figure 30 : Illustration des tâches qui concernent l'optimisation topologique avant l'enrichissement de l'OI par les stagiaires

Après enrichissement

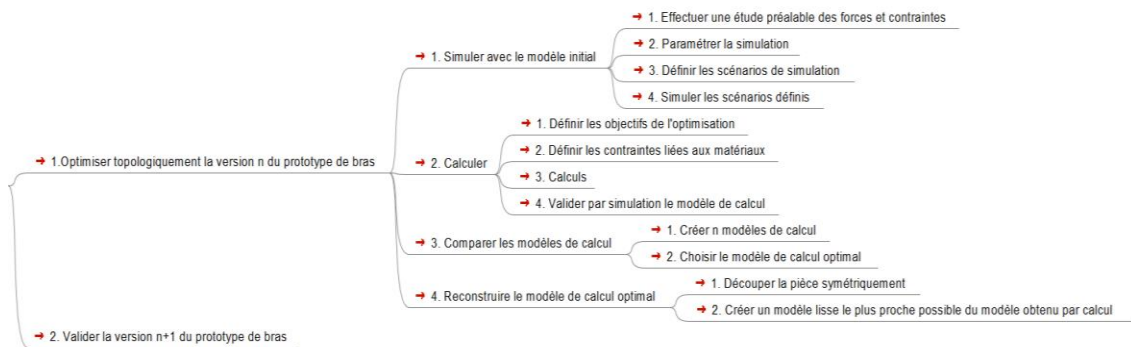


Figure 31 : Illustration des tâches qui concernent l'optimisation topologique après l'enrichissement de l'OI par les stagiaires

Nous pouvons voir que la modélisation des tâches a été fortement étayée grâce aux apports des stagiaires en charge de la primo-crédation du drone. En effet, entre la figure 29 et la figure 30, la tâche abstraite « 2. Calculer » a été ajoutée. Cette tâche purement technique nous a échappé en tant que simples observateurs. En effet, il faut pratiquer et utiliser la 3DExpérience afin d'avoir conscience que cette tâche existe et qu'elle est importante lors de l'optimisation topologique d'une pièce. Nous pouvons également voir qu'au niveau des tâches « 1. Simuler avec le modèle initial » et « 4. Reconstruire le modèle de calcul optimal », des sous-tâches ont été ajoutées par les stagiaires afin de mieux détailler les séquences d'actions qu'ils ont effectuées afin de pouvoir réaliser ces tâches abstraites. L'objectif de l'OI étant de servir de support de conversation à des professionnels provenant de champs différents mais également de leur permettre de voir tout le travail que demande la création d'un drone dans l'optique de proposer des formations au plus proche de l'activité réelle, la modélisation se devait d'être la plus précise possible. Le fait que ce soit principalement des tâches élémentaires qui ont été ajoutées nous montre deux choses. Que lors de notre observation participante nous n'avons eu accès qu'aux buts et sous-buts que les stagiaires cherchaient à atteindre. A savoir que l'optimisation topologique d'une pièce a pour point de départ une pièce à géométrie simple, qui sera ensuite modélisée afin de pouvoir simuler les forces qui s'appliquent sur elle et retirer la matière superflue aboutissant à une pièce à géométrie complexe. Et que nous n'avons accès qu'à la surface de l'activité des stagiaires car nous n'étions pas spécialistes en mécanique. Les groupes de discussion focalisée nous ont permis d'entrer plus en profondeur et de séquencer de manière beaucoup plus précise ce que les stagiaires ont réalisés. Ainsi nous pouvons dire que le fait de leur avoir demandé de compléter nos observations nous a permis d'accéder aux règles d'actions ; et ainsi d'instruire les tâches élémentaires qui nous avaient échappées durant l'observation.

P-10 : Ok alors du coup pour paramétrer la simulation j'ai marqué euh il s'agira de définir les zones de la pièce où les forces sont appliquées, les zones fonctionnelles qui ne peuvent pas être modifiées et les contraintes auxquelles la pièce sera soumise.

S2-8 : D'accord c'est pas mal mais avant ça on a fait des recherches

S1-7 : Oui il fallait qu'on sache les valeurs forces à mettre pour les simulations

P-11 : ah ok du coup il y a une étape avant bah on va la rajouter directe alors deux secondes voilà euh du coup comment on peut appeler ça euh effectuer une étude des forces

S1-8 : oui voilà par exemple

P-12 : ok

S2-9 : ouais enfin pas que parce que ok le moteur et les hélices engendrent une force mais du coup le bras est en tension et quand il vole ça dépend de la masse du drone du coup moi je dirais aussi contraintes

P-13 : ok donc Effectuer une étude des forces et des contraintes

S2-10 : ok c'est bon

Cet extrait est celui où la tâche « 1.paramétrer la simulation » de la figure 29 p 130 est traitée. Suite à la proposition émise en P-10, les stagiaires apportent immédiatement des informations sur les règles d'action. En effet, les informations pertinentes (poids du drone, puissance des moteurs, caractéristiques des hélices, etc.) utilisées dans le but de paramétrer la simulation doivent tout d'abord être recherchées avant de pouvoir commencer le paramétrage.

Ainsi, nos observations nous ont permis de déterminer le but, à savoir paramétrer une simulation et les stagiaires nous ont apportés des règles d'action, ce qui nous a amené à créer une sous-tâche supplémentaire afin que notre OI soit le plus précis possible.

P-16 : ok ensuite

S2-11 : comparer les modèles de calcul euh du coup je lisais ça mais du coup pour comparer les modèles de calcul il faut déjà les créer les modèles

S1-11 : oui c'est ça du coup il faudrait développer ça

S2-12 : ouais on pourrait mettre les différentes étapes de l'optimisation qui permet de créer les modèles genre le maillage les matériaux et tout ça

S1-12 : ouais ouais du coup au début on on dit que l'on veut maximiser la rigidité et minimiser le poids ensuite et ensuite bah vu que le résultat dépend du matériau utilisé il faut entrer les valeurs du coefficient de poisson et tout ça

S2-13 : oui il y a ça aussi

S1-13 : et donc du coup ce que tu obtiens après ça tu dois de nouveau faire une simulation dessus afin de valider le modèle que tu as obtenu

S2-14 : voilà c'est ça et là tu fais ça plusieurs fois et après seulement tu arrives à l'étape suivant que P a trouvé comparer les modèles de calcul

P-17 : ok donc on rajoute une tâche que l'on divise en sous tâches

S2-15 : bah d'abord tu donnes les objectifs de l'optimisation rigidité et masse

P-18 : Ok donc Définir les objectifs de l'optimisation ensuite vous parliez des matériaux il me semble

S2-16 : voilà c'est ça tu renseignes les caractéristiques des matériaux euh tu pourrais mettre définir les contraintes liées aux matériaux

P-19 : ok je mets ça deux secondes

S2-17 : Ensuite tu lances les calculs

P-20 : ok donc calculs

Dans cette séquence, nous pouvons voir qu'après avoir brièvement décrit les différentes tâches réalisées, S, en S1-11, propose d'ajouter une étape avant la tâche « comparer les modèles de calcul » sur la base de la version originale de l'OI (Figure 29 p130). Les stagiaires proposent une dénomination pour cette nouvelle tâche « calcul » que l'on retrouve dans l'OI enrichi (Figure 30 p133).

Ces modifications nous ont permis de passer de 4 tâches abstraites à 5 tâches abstraites pour l'optimisation topologique du bras (pour rappel, les tâches élémentaires constituent les « feuilles de l'arborescence » tandis que toutes les tâches composées de sous-tâches sont dites abstraites). Le nombre de tâches élémentaires est quant à lui passé de 6 à 13 (Figure 30 p133). Cette augmentation du nombre de tâches élémentaires peut s'expliquer par un apport massif d'informations concernant les règles d'actions de la part des stagiaires. Cet apport se ressent aussi au niveau du nombre de fiches descriptives des tâches. En effet, sans compter le nombre conséquent de fiches ajoutées par les stagiaires, les fiches préexistantes ont été complétées. A titre de comparaison voici un tableau reprenant les différences de contenus entre les fiches descriptives des tâches avant et après enrichissement

Nom de la tâche	Description de la tâche avant enrichissement	Description de la tâche après enrichissement
Paramétrer la simulation	Il s'agira de définir les zones de la pièce où les forces sont appliquées, les zones fonctionnelles qui ne peuvent pas être modifiées (car comprenant des pas de vis) et les contraintes auxquelles la pièce sera soumise.	Il s'agira ici de définir les paramètres des scénarios de simulation : Définir le matériau à utiliser (si pas en base de données créer le matériau : module de Young ; coefficient de Poisson ; limite d'élasticité) La zone à geler ce sont les zones fonctionnelles (vis etc.) que le logiciel ne doit pas altérer lors de l'optimisation. La finesse du maillage qui détermine la précision de la simulation et donc de l'optimisation (un maillage plus fin ne change pas forcément les résultats) Les forces auxquelles la pièce sera soumise, leur point d'application et leur valeur maximale. Les contraintes auxquelles sera soumise la pièce.
Simuler les scénarios définis	Les scénarios permettent de simuler les mouvements des pièces lorsqu'elles sont soumises à différents scénarios (envol, vol stationnaire, port d'une charge etc.)	Sur la base de scénarios, le logiciel va simuler les comportements de la pièce lorsqu'elle est soumise à différentes forces (définies par les scénarios). Permet de visualiser les déformations et mouvements qui affectent la pièce lorsqu'elle est soumise aux forces définies dans les scénarios. Permet de connaître les zones les plus soumises à l'effort.

Créer n modèles de calcul	Le modèle de calcul est dupliqué et soumis à divers scénarios de simulation afin de déterminer quel modèle est optimal	Il s'agira de dupliquer le modèle de calcul obtenu lors de l'étape précédente. Une fois dupliqué, ce modèle sera soumis à un scénario de simulation différent de ceux déjà appliqués. Les données recueillies à partir de la validation du modèle dupliqué seront comparée avec celle d'autres modèles dupliqués. Cette opération est à répéter autant de fois que nécessaire afin de créer un échantillon de modèle qui nous permettra de déterminer le modèle optimal.
Choisir le modèle de calcul optimal	Le modèle de calcul choisi est celui qui permet de réduire au maximum la masse tout en gardant les caractéristiques mécaniques du modèle d'origine	A partir des modèles dupliqués, il faudra déterminer quel est le modèle qui a le rapport « masse – contrainte supportée » le plus avantageux. L'utilisateur peut définir lui-même ses priorités (poids, élasticité, volume, etc.). Le modèle ainsi sélectionné est considéré comme étant le modèle optimal
Reconstructuire le modèle de calcul optimal	Le modèle de calcul étant issue d'une simulation il doit être reconstruit afin de pouvoir constituer un modèle CAO	Il s'agira d'utiliser les différents outils de CAO surfacique afin de reproduire un modèle fonctionnel et fabricable au plus près du modèle de calcul optimal.
Valider la version n+1 du prototype de bras	La version optimisée du bras est validée par le collectif afin de pouvoir passer à la modélisation des autres parties du drone	La version optimisée du prototype de bras doit être validée par le collectif afin qu'elle devienne la version imprimable du bras.

Tableau 2 : Comparaison du contenu des fiches descriptives des tâches avant et après le premier enrichissement de l'OI

Nous pouvons voir que beaucoup de vocabulaire technique a été ajouté suite à l'enrichissement de l'objet intermédiaire, des termes comme « élasticité » « module de Young » « zone à geler » sont importants (comme vous pouvez le voir dans l'extrait ci-dessous) pour l'intercompréhension entre spécialistes de la mécanique et nous étaient complètement étrangers.

P-31 : alors du coup pour la tâche paramétrer la simulation j'ai mis il s'agira de définir les zones de la pièce où les forces seront appliquées, les zones fonctionnelles qui ne peuvent être modifiées et les contraintes auxquelles la pièce sera soumise

S1-23 : ouais c'est déjà pas mal alors je pense qu'on va pouvoir être plus précis

S2-28 : oui

S1-24 : donc là on détermine les paramètres qu'on va rentrer dans la simulation du coup d'abord il faut qu'on définisse le matériau utilisé là vu qu'on est en imprimante 3D ce sera du PLA ou de l'ABS du coup ce qui t'intéresse c'est le coefficient de Poisson, le module de Young et la limite d'élasticité ensuite oui tu as parlé de la zone fonctionnelle ça c'est important car il ne faut pas enlever de matière

P-32 : oui c'est par exemple l'endroit où le bras est fixé au châssis du drone

S1-25 : voilà c'est sur si l'optimisation enlève de la matière à cet endroit, le bras ne sera pas utilisable donc du coup c'est ce qu'on appelle les zones à geler

P-33 : ok c'est noté

Les stagiaires ont également apporté des précisions sur les outils utilisés ainsi que sur la méthodologie déployée. Il est certain que cet ajout de vocabulaire appartenant au champ de l'ingénierie mécanique facilitera la compréhension, des participants aux groupes focalisés ayant pour but la conception des parcours pédagogiques, de ce que les stagiaires ont réalisé.

6.3.3 La posture de l'ergonome

Afin de clarifier la posture de l'ergonome durant cette étape du processus de création des formations, nous avons effectué une analyse thématique des productions du psychologue en charge de mener les groupes de discussion focalisée (ANNEXES 2 p 245). Pour ce faire nous nous sommes inspirés d'une méthodologie utilisée dans les groupes de discussion à visée philosophique (Specogna & Saint-Dizier de Almeida, 2018). Nous avons effectué le même type d'analyse des actions communicationnelles qui a été réalisée auprès des participants. Nous avons analysé les actions de l'ergonome et avons donc adapté la grille de lecture utilisée dans le cadre de l'étude à notre cas spécifique.

		ni	fi
<i>Interventions initiatives (qui initient des phases) ou réactives initiatives (qui initient des phases mais sur la base de ce qui a déjà été produit) adressées au collectif</i>	énonce une question	8	11.59%
	fait une synthèse	4	5.8%
	(pré) clôture la séance	1	1.45%
	Demande de faire une synthèse	1	1.45%
	Demande des prises de parole	2	2.9%
	Apporte une information	2	2.9%
<i>Interventions réactives adressées à un membre ou au collectif</i>	Demande de clarifier le discours	2	2.9%
	Demande une formulation adaptée	1	1.45%
	Demande des informations complémentaires	18	26.08%
	Ratifie (via la réitération d'une proposition ou d'un segment, un phatique)	20	28.99%
	Apport : soumettre une déduction	10	14.49%

Tableau 3 : Analyse des actions communicationnelle de l'ergonome durant le groupe de discussion focalisée réalisé avec les stagiaires dans le cadre du module d'optimisation topologique

Le tableau 3, indique que la posture de l'ergonome durant cette étape consiste essentiellement à demander des informations complémentaires (26,08% des interventions de l'ergonome) et à ratifier ce qui est dit par le groupe de discussion focalisée (28.99%). Ainsi, plus de la moitié des interventions de l'ergonome dans cette phase du projet vise à comprendre ce que les stagiaires ont réalisé et à s'assurer que ce savoir est bien validé par les deux parties. Ceci afin de pouvoir, par la suite, enrichir les points de vue des concepteurs avec les détails qui semblaient les plus importants aux yeux des stagiaires, ces derniers ayant effectivement créé un drone par le biais de la 3Dexpérience.

S2-2 : Après ce sera surtout S1 qui pourra en parler vu que c'est une partie importante de son mémoire, il a plus bossé dessus moi j'ai fait que pour le capot et euh il y avait moins à optimiser.

P-3 : Ouais mais quand il optimisait il te renvoyait la pièce après pour que tu euh comment vous dites déjà

S1-3 : Reconstruire

P-4 : Ouais voilà parce que le modèle qui sort de l'optimisation n'est pas exploitable en l'état

S1-4 : Oui c'est ça et là c'est S2 qui s'occupais de la CAO pour la pièce

La partie soulignée montre bien que le psychologue s'est approprié le procédé que les stagiaires ont mis en place mais que son manque de maîtrise du vocabulaire technique le pousse à effectuer une demande d'information complémentaire.

Les ratifications quant à elles s'illustrent très bien dans le type d'échange suivant :

P-26 : D'accord donc on peut dire créer un modèle lisse sur la base du modèle de calcul.

S2-23 : oui on peut dire ça moi ça me va

S1-20 : Oui enfin ce qui est important aussi c'est d'être bien calqué sur le modèle de calcul pour qu'il y ait le plus de gain de matière

S2-24 : oui c'est vrai

P-27 : ok donc on peut ajouter le plus proche possible du modèle de calcul

S1-21 : oui comme ça c'est bon

S2-25 : voilà c'est bien comme ça

P-28 : ok je note ...

Plusieurs propositions sont émises en P-26 et P-27 afin de trouver l'intitulé de la tâche. Un consensus est ensuite trouvé entre les deux stagiaires (S1-21 et S2-25). Une fois la solution trouvée, l'intitulé est modifié sur l'OI puis ratifié par le psychologue (P-28). Il en va de même pour tous les éléments de l'Objet intermédiaire.

Par ailleurs, un grand nombre (14.49% des productions de l'ergonome) d'actions de type « soumettre une déduction » est également effectué. Ces actions apparaissent lorsque l'ergonome a bien compris les concepts et les étapes qui ont été réalisées par les stagiaires. L'extrait suivant illustre parfaitement cet état de fait.

S1-24 : donc là on détermine les paramètres qu'on va rentrer dans la simulation du coup d'abord il faut qu'on définisse le matériau utilisé là vu qu'on est en imprimante 3D ce sera du PLA ou de l'ABS du coup ce qui t'intéresse c'est le coefficient de Poisson, le module de Young et la limite d'élasticité ensuite oui tu as parlé de la zone fonctionnelle ça c'est important car il ne faut pas enlever de matière

P-32 : oui c'est par exemple l'endroit où le bras est fixé au châssis du drone

S1-25 : voilà c'est sur si l'optimisation enlève de la matière à cet endroit, le bras ne sera pas utilisable donc du coup c'est ce qu'on appelle les zones à geler

Dans cet extrait nous voyons que le stagiaire en S1-24 utilise un grand nombre de termes techniques (PLA, ABS, coefficient de Poisson, module de Young, limite d'élasticité) et que l'ergonome en P-32 tente de déduire que les pièces du drone concernées par cette assertion afin de vérifier s'il a une bonne compréhension de ces concepts.

Enfin 11.59% des productions de l'ergonome sont de type « énonce une question ». Comme indiqué ci-dessous, ces interventions correspondent, , au passage d'une tâche à l'autre (P-36) ou à des points importants que le psychologue tient à éclaircir (P-35).

P-35 : et du coup il n'y a pas de terme que quelqu'un qui ne connaît pas la 3DExpérience ne comprendra pas ?

S2-30 : attends euh non c'est bon c'est des termes que tous les ingé méca pourront comprendre

P-36 : parfait donc ensuite Simuler les scénarios définis ?

En P-35 le psychologue demande si une personne qui n'a pas d'expérience dans l'utilisation de la plateforme pourra comprendre les éléments intégrés dans l'OI. En effet, il se doit de garder à l'esprit que les personnes qui utiliseront l'OI par la suite ne seront pas toutes expertes dans l'utilisation de la 3DExpérience.

On aurait pu penser que l'ergonome aurait dû apporter de nombreuses informations (comment l'OI fonctionne, le cadre dans lequel l'OI est utilisé, la suite des événements, etc.) cependant, ce n'est pas le cas. Le fait que le psychologue n'ait que peu d'informations à apporter (seulement 2.9% des actions communicationnelles) peut être lié au fait que l'étape précédente du projet était une observation participante des stagiaires en charge de la primo création du drone. Ainsi les sujets étaient déjà au courant de ce qui leur serait demandé durant ces groupes de discussion focalisée. De plus si vous observez bien l'objet intermédiaire (Figure26 p125) vous remarquerez que l'optimisation topologique n'intervient que dans la partie physique de l'arborescence hiérarchique des tâches, ce qui explique que les stagiaires n'aient pas besoin d'explication, ils étaient déjà rompus à l'exercice.

Ainsi, nous pouvons conclure que la posture du psychologue durant cette étape du projet est celle d'un apprenant qui doit comprendre les mécanismes et les dynamiques qui lui ont échappés et qui régissent l'activité de ceux dont il a observé et modélisé l'activité. Cette étape est nécessaire afin de pouvoir restituer ces éléments aux autres membres du projet. Il doit également s'assurer d'avoir la même vision du travail effectué que ceux qui l'ont effectué afin de pouvoir faire entendre ce point de vue aux acteurs du projet qui auront la charge de dispenser les formations. L'OI une première fois enrichi, son rôle ainsi que celui du psychologue en charge de l'animation des groupes de discussion focalisée, sera de permettre aux concepteurs des formations de prendre en compte les points de vue des stagiaires qui ont réalisé la primo création du drone. L'enjeu étant de développer un support de formation qui réponde aux besoins des utilisateurs en situation réelle de résolution de tâches.

6.4 Conception des formations par le biais de groupes de discussion focalisée médiatisés par l'objet intermédiaire

Une fois l'OI modifié puis validé par les personnes ayant réalisé la primo-construction du drone (ANNEXES 3 p 263), l'arborescence hiérarchique des tâches a été présentée au comité de pilotage de projet afin que ses membres puissent définir le nombre de modules nécessaires ainsi que les sujets que ces derniers aborderont afin de réaliser l'ensemble des tâches composants l'arborescence. C'est ainsi qu'il a été décidé que 7 modules portant sur des matières différentes seraient nécessaires afin de pouvoir réaliser la totalité des tâches requises pour réaliser le drone :

- un module d'optimisation des structures
- un module d'ingénierie système
- un module de conception assistée par ordinateur (CAO)
- un module d'électronique
- un module de choix des matériaux
- un module de modélisation dynamique
- un module de fabrication additive

Ces modules recouvrant l'ensemble des tâches à réaliser afin de fabriquer un drone, il sera possible d'utiliser les supports créés à la fois dans le cadre d'un cours sur un thème prédéfini ou dans le cadre d'un projet visant la fabrication entière ou partielle d'un drone. Afin de concevoir ces modules, des groupes de discussion focalisée ont été organisés pour déterminer les tâches qui seront réalisées dans le cadre des différents modules. Chacun de ces groupes était composé de deux personnes enseignant dans le supérieur dans la même matière que celle du module en cours de conception, d'un spécialiste dans l'utilisation de la 3DExpérience et d'un psychologue ergonomiste en charge de l'animation des groupes de discussion. Les enseignants provenaient du LCOMS, de l'ESPE Lorraine, du LEM3, de l'IRT-M2P, de l'entreprise Altran, de l'IUT GMP de Metz, de l'ERPI (ENSGSI). L'expert en 3DExpérience était mis à disposition par l'UPS Ditetex.

6.4.1 Des groupes de discussion focalisée pour concevoir des formations

Ci après, nous allons décrire la composition, le déroulement des GDFOI pour en extraire les résultats obtenus.

6.4.1.1 La composition des GDFOI

Nous avons également fait le choix d'utiliser la méthode des GDFOI afin de concevoir les modules de formation proposés dans le cadre du projet TINA-M2P. Chacun des GDFOI était conçu comme suit :

- chaque module a pour responsable un expert du domaine qui est chargé de dispenser des cours dans l'enseignement supérieur ; l'enseignant chercheur responsable est le du module de formation. Le but est de permettre à l'enseignant d'utiliser ses compétences afin de faire le lien entre les tâches que devront réaliser les apprenants et les concepts/principes théoriques qu'ils devront utiliser afin d'y parvenir. De plus le fait qu'il soit responsable du module rendait sa présence pertinente dans le cadre d'une approche en ergonomie participative,
- pour proposer un autre point de vue provenant d'une personne ayant les mêmes compétences et la même légitimité que le responsable de formation, est sélectionné un enseignant-chercheur volontaire sélectionné par le responsable du module de formation :. Nous avons choisi de confronter ces points de vue afin de permettre de faire émerger des idées nouvelles qui ne seraient pas apparues si soit l'un soit l'autre des experts du domaine avait été présent lors du GDFOI. De plus, que cet enseignant chercheur soit amené à dispenser les formations produites dans le cadre TINA-M2P rendait sa participation pertinente dans une approche en ergonomie participative,

- pour créer des supports de formation (étape suivante du processus) a été sollicité un expert et formateur en 3Dexpérience. Cette personne était la même pour tous les GDFOI de conception de formation. Ses compétences dans l'utilisation de la plateforme devaient permettre de déterminer la faisabilité sur 3Dexpérience et donc la validité des idées nouvelles proposées par les enseignants chercheurs. Le fait qu'il soit expert de la plateforme avait également pour objectif de bien circonscrire les outils utilisés. Le fait qu'il ait la charge de la création des formations rendait d'office sa présence pertinente dans le cadre d'une approche en ergonomie participative ;
- présence d'un psychologue qui a participé à l'ensemble des groupes de discussion focalisée. Du fait de notre formation initiale en psychologie du travail, de notre statut gestionnaire du projet et des nombreuses observations que nous avons menées au préalable nous assurons 4 rôles durant ces GDFOI. Nous étions animateurs des GDFOI, nous étions les facilitateurs accompagnant l'OI, nous nous assurons que les formations conçues soient au plus proche de l'activité réelle de création d'un drone et nous étions médiateur entre les stagiaires et les autres membres du GDFOI afin de pouvoir au mieux apporter leurs points de vue afin d'enrichir la discussion. Enfin en tant que créateur du processus de création des formations dans le cadre du projet TINA-M2P, notre présence était pertinente dans le cadre d'une approche en ergonomie participative.

Aussi, le groupe ainsi constitué a généré la richesse des points de vue nécessaire à la commande d'élaboration du produit.

6.4.1.2 Le déroulement des différents GDFOI

Les groupes de discussion focalisée portant sur la conception des modules de formation ont tous été réalisés en amont de la création des supports de formation et du test de celle-ci. Les GDFOI se déroulaient au sein de l'UFR MIM, de l'IRT-M2P ou de l'InSIC dans une salle de réunion afin que les participants se trouvent dans un lieu neutre. Ils étaient tous enregistrés par le biais d'une caméra puis transcrits. Nous disposions d'un grand écran afin que l'objet intermédiaire soit facilement accessible pour tous les participants.

Lors du premier groupe de discussion focalisée que nous avons organisé afin de concevoir un parcours de formation ayant pour thème l'optimisation topologique, nous n'avons pas établi de procédure précise. En effet, c'était le tout premier GDFOI réalisé dans le cadre de la phase de conception des modules de formation. Nous ne connaissions que les résultats que nous escomptions obtenir à savoir :

- que nous voulions que le GDFOI, à partir des données de l'OI, détermine les tâches que pourront effectuer des apprenants dans le cadre d'un module de formation portant sur l'optimisation topologique d'une ou plusieurs pièces d'un drone.
- que les données que nous avons recueillies auprès des stagiaires devaient être conservées afin de pouvoir par la suite créer des formations au plus proche de l'activité réelle
- que les modifications apportées à l'OI soient issues d'un consensus entre toutes les parties composant le GDF car ces mêmes parties seraient par la suite amenées à collaborer dans le cadre de la création et du déploiement des formations conçues lors de ces GDFOI

Cette incertitude quant à la marche à suivre durant ces groupes de discussion focalisée nous a amené à procéder comme décrit ci-dessous en laissant un maximum de marge de manœuvre aux participants quitte à prendre plus de temps avec ce premier GDFOI pour ensuite en tirer une démarche standardisée. C'est avec cet objectif en tête que nous avons mené le premier groupe de discussion focalisée de la phase de conception des formations comme décrit ci-dessous et dont vous trouverez la transcription des échanges en ANNEXES 4 p 281 .

Dans un premier temps, le projet était présenté à l'ensemble des participants du groupe de discussion focalisée. Nous leur avons expliqué que le projet avait pour but de permettre l'apprentissage de leur matière par la création d'un drone ou d'une partie de celui-ci, que le projet comprenait 7 modules et que 6 autres équipes travaillaient également sur le projet mais pour des matières différentes (les membres des autres équipes étaient également présentés). Nous expliquions également que les apprenants étaient obligés d'utiliser la 3Dexpérience afin de concevoir le drone, ce qui expliquait la présence d'un expert dans l'utilisation de la 3Dexpérience. Le psychologue ergonomiste se présentait lui comme l'animateur du groupe de travail qui avait pour principal objectif de faciliter les échanges entre les participants tout en restituant le travail réalisé en amont par les stagiaires.

Puis l'objet intermédiaire a été présenté aux participants. Il leur a été expliqué que le psychologue ergonomiste avait suivi pendant 6 mois des stagiaires en fin d'études de la filière génie mécanique de l'UFR MIM. Que ces stagiaires avaient créé le drone en partant de zéro et qu'ils avaient dû passer par toutes les étapes, de la création du cahier des charges avec le commanditaire, à l'impression et l'assemblage du drone en passant par la création de la partie électronique du drone. Il était également mentionné que le psychologue ergonomiste quant à lui avait effectué une observation de la résolution par les stagiaires et sur cette base, réalisé une arborescence hiérarchique des tâches telle que réalisée par les deux stagiaires, que cette arborescence avait pu être modifiée par les stagiaires afin qu'ils la valident. Ceci dans le but de montrer que l'OI n'était pas le fruit de l'abstraction d'une seule personne mais bien un travail de résolution effectué par les deux stagiaires, se voulant aussi fidèle que possible du travail réalisé pour créer le drone.

Il était ensuite expliqué aux participants comment fonctionnait l'OI, que les tâches les plus abstraites étaient sur le côté gauche de l'OI, que plus on se dirigeait vers la droite de l'OI plus les tâches étaient « pratiques » et que les tâches se situant au bout de l'arborescence étaient dites élémentaires et qu'elles constituaient les tâches qu'avaient effectivement réalisé les stagiaires. Puis il a été montré que derrière chaque tâche et sous-tâche de l'arborescence se trouvait une fiche descriptive de la tâche et que ces fiches avaient été proposées par le psychologue ergonomiste puis modifiées et validées par les stagiaires (ANNEXES 3 p 263).

Enfin nous expliquions aux participants que le but de ce groupe de discussion focalisée était de définir les contours d'un module d'enseignement sur la base de l'arborescence hiérarchique des tâches et que pour ce faire ils devaient sélectionner les tâches qui seraient les plus susceptibles d'être intégrées à un cours portant sur l'optimisation topologique. Ces tâches seraient l'occasion pour les étudiants d'effectuer une optimisation topologique tout en apprenant à utiliser la 3DExperience. Afin que les échanges entre concepteurs et créateurs de formation (pour rappel, c'est l'expert en 3DExperience qui implémentera les supports pédagogiques), il a également été proposé aux membres du groupe de discussion focalisée de modifier l'arborescence afin d'arriver à un consensus en ce qui concerne les tâches qui pourraient être utilisées dans le cadre d'un module d'optimisation topologique, leur hiérarchie, leur terminologie et leur description. Le tout sans pour autant altérer l'essence des modifications et des apports des stagiaires en charge de la primo création du drone.

A l'issue de ce premier GDFOI (ANNEXES 4 p 281) qui a duré 2 heures et 15 minutes nous avons réussi à déterminer les tâches qui pourraient être utilisées afin que les apprenants puissent mettre en pratique l'optimisation topologique d'une partie du drone et avons commencé à modifier l'OI afin de lui donner une forme qui fasse consensus pour les 3 parties. Les participants durant ce groupe de discussion focalisée ont abordé à plusieurs reprises les éléments devant être déterminés afin de pouvoir passer à l'étape suivante (la création des formations). C'est pourquoi nous avons fait le choix de réaliser une analyse structuro-fonctionnelle de ce GDFOI. En effet l'analyse structuro-fonctionnelle des productions des participants au GDFOI nous a permis de dégager les familles d'activité communicationnelle réalisées par les participants durant leur activité conception de formation. Une fois ces familles extraites, elles nous ont servi de base à l'élaboration d'un programme de travail standard pour chaque GDFOI de TINA-M2P. Programme qui nous a permis d'obtenir les informations indispensables pour le bon déroulement de l'étape suivante. Nous avons ainsi pu élaborer à l'issue de ce premier GDFOI le programme suivant :

- 1.Présenter le projet et la modélisation
- 2.Définir les contours du module d'enseignement sur la base de la modélisation
- 3.Procéder à un consensus sur la terminologie de chaque tâche du module
- 4.Construire un consensus sur le contenu de chaque tâche du module
- 5.Déterminer les connaissances et compétences liées à l'ingénierie et à l'utilisation de la 3D Expérience que chaque tâche permet de développer
- 6.Déterminer les connaissances indispensables pour participer au module
- 7.Déterminer les Informations dont les étudiants ont besoin afin de pouvoir travailler (objectifs, contraintes client/système/procédés contenu dans le cahier des charges ou non, etc.)
- 8.Déterminer les modalités de déroulement et d'évaluation du module

Ce programme a, dans un premier temps, été validé par les participants des deux premiers GDFOI, puis par le comité de pilotage du projet TINA-M2P. Cependant, ce programme ayant été créé dans le cadre du projet TINA-M2P nous ne pouvons pas savoir s'il est transposable en l'état à d'autres situations. Il faudrait reproduire cette méthodologie de création de formation et comparer les programmes obtenus à ce stade du projet.

Le groupe de discussion focalisée organisé autour de la conception du module d'optimisation topologique a duré 3h06 minutes et a permis d'arriver jusqu'à l'étape 7 du programme. Toutes les tâches et leurs contenus ont été adaptés à chacun des membres du groupe. Les informations nécessaires aux apprenants afin que ces derniers puissent réaliser une optimisation topologique ont été déterminées. Cependant, nous avons rencontré un problème pour ce qui est des connaissances et compétences développées par les apprenants au cours du module de formation. En effet, les participants ont eu beaucoup de difficultés à déterminer des intitulés pour ces éléments. C'est pourquoi entre le deuxième et le troisième groupe de discussion focalisée, nous avons compilé les référentiels de compétences des DUT sciences et génie des matériaux, génie mécanique et de productique, génie électrique informatique industriel et des BTS conception réalisation de systèmes automatiques, conception et industrialisation en microtechnique et BTS conception de produits industriels. Ces compétences ont été triées par matière, le document ainsi obtenu devait proposer des exemples de formulation de compétences afin de faciliter la tâche aux participants.

Le dernier groupe de discussion focalisée organisé autour de la conception du module d'optimisation topologique a duré 2h 6 minutes et a permis de finir le programme et ainsi obtenir toutes les informations nécessaires à la création puis à l'évaluation du module de formation en optimisation topologique.

La conception du module de choix des matériaux a quant à lui nécessité deux groupes de discussion focalisée de 1h54 et 2h06. Ils étaient constitués de deux enseignants chercheurs en charge d'une UE de choix des matériaux dont l'un était également le responsable du module choix des matériaux de TINA-M2P, d'un psychologue et d'un expert formateur en 3DExpérience et se sont déroulés dans une salle de réunion au sein de l'IRT-M2P. Lors du premier GDFOI nous avons pu venir à bout des 4 premières étapes du programme et sommes arrivés à un consensus sur les tâches constitutives du module, leur description et leur terminologie. Nous avons pu modifier l'OI afin qu'il corresponde aux attentes de chacune des parties prenantes de ce GDFOI. Il nous a fallu un GDFOI supplémentaire afin d'arriver à un consensus sur les prérequis de participation à la formation, les compétences et connaissances apportées, les données à partir desquelles les apprenants pourront travailler et les modalités d'évaluation du module. Aucun travail supplémentaire n'a été nécessaire entre ces deux GDFOI.

Le GDFOI de Création assistée par ordinateur s'est déroulé en un groupe de discussion focalisée de 4h16 minutes. L'ensemble des points du programme a pu être traité en une seule fois. Le GDFOI était composé des deux enseignants chercheurs en charge d'une UE portant sur la CAO d'une psychologue et d'un expert en 3DExpérience. Par soucis pratique, les GDFOI se sont déroulés dans une salle de réunion au sein de l'InSIC. L'OI était également projeté sur grand écran afin de faciliter l'accès et les groupes de discussion focalisée étaient également enregistrés via un magnétophone.

Pour ce qui est du GDFOI du module d'impression 3D, 3h et 12 minutes ont été nécessaires afin de finir l'ensemble du programme. Il s'est déroulé au sein de l'UFR MIM à l'instar des GDFOI du module d'optimisation topologique. Le groupe de discussion focalisée était composé de deux enseignants chercheur en charge d'une UE portant sur la fabrication additive, d'un psychologue et d'un expert formateur en 3DExpérience.

Le GDFOI en charge du module Ingénierie des exigences a terminé la conception de ce dernier en 2 heures et 56 minutes. Pour des soucis pratiques, l'un des participants était en Visio tandis que les autres étaient dans les locaux de l'UFR MIM dans une salle de réunion. Afin qu'il soit accessible à tous, le PC utilisé pour la vidéoconférence envoyait également une vidéo en direct de l'OI en cours de modification. Une fois encore, le GDFOI était composé du responsable du module de formation, d'un enseignant chercheur en charge d'un enseignement ingénierie système, d'un psychologue et d'un expert formateur en 3DExpérience.

La conception du module de modélisation dynamique a fait l'objet d'un groupe de discussion focalisée d'une durée de 3 heures 20 minutes. Il s'est déroulé au sein de l'UFR MIM dans une salle de réunion équipée d'un grand écran afin que l'OI soit accessible à tous les participants. Deux enseignants chercheur en charge d'un enseignement de modélisation dynamique dont le responsable du module ainsi qu'un psychologue et un expert formateur en 3DExpérience participaient à ce GDFOI.

Enfin, du fait de la crise sanitaire, nous n'avons pas pu participer à la conception du module de formation à l'électronique. Cependant l'expert formateur en 3DExpérience avec qui nous avons collaboré durant tout le projet et qui s'était approprié notre méthodologie a pu mener à bien les groupes de travail en charge de la conception du module de formation à l'électronique. L'OI n'a pas été modifié comme pour les autres groupes, mais il a tout de même servi de support de communication et a ainsi contribué à récolter les données nécessaires à la création du module de formation en électronique.

6.4.2 Résultats obtenus par le groupe de discussion focalisée

Les membres du groupe de discussion focalisée ont déterminé que c'était la partie « optimiser topologiquement le bras du drone » qui comportait les tâches les plus en adéquation avec la création module d'optimisation des structures. En effet le bras du drone est une des zones qui subit le plus de contraintes liées au système et aux forces que ce dernier subit. Couplé avec le fait que le drone se doit d'être le plus léger possible cette pièce permet d'obtenir les résultats d'optimisation les plus importants et impressionnants. C'est pourquoi, c'est l'optimisation du bras du drone qui a spécifiquement été choisi.

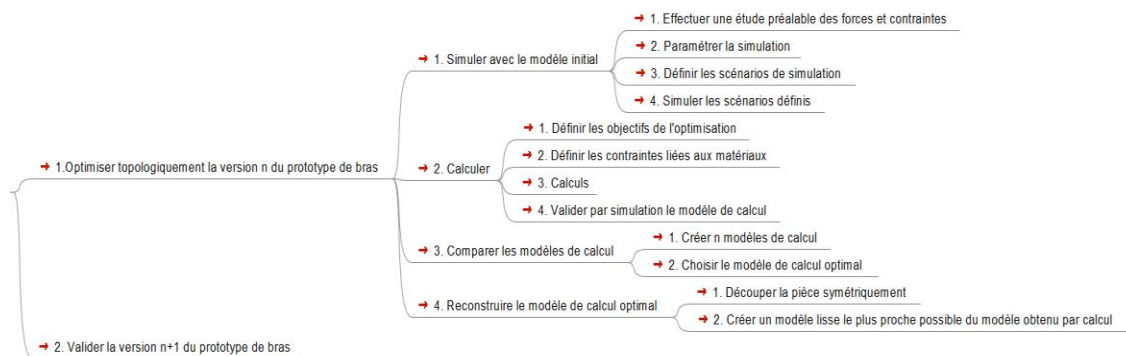


Figure 32 : Représentation de l'ensemble des tâches de l'OI sélectionnées par le GDF afin de faire l'objet d'un module de formation portant sur l'optimisation topologique

Après avoir suivi les différentes étapes que nous avons mentionnées plus haut, le groupe a convenu que l'arborescence ci-dessous était celle qui serait le mieux adaptée à un module ayant pour sujet l'optimisation topologique. En effet, après le premier enrichissement de l'objet intermédiaire nous avons obtenu une modélisation bien plus complète pour ce qui est des tâches élémentaires et donc ce que les apprenants devraient effectivement réaliser pour réussir une optimisation topologique.

Cependant afin de pouvoir passer à la création des supports de formation (informations procédurales selon le modèle 4C/ID), il était nécessaire d’aboutir à un consensus entre les enseignants chercheurs en charge de la conception du module et l’expert en 3DExperience en charge de la création des supports pour que la maîtrise d’œuvre, les créateurs, mais également la maîtrise d’ouvrage⁵ (l’OI étant également présenté dans le cadre des réunions du comité de pilotage du projet) aient la même image de ce qui allait être produit et de ce que les apprenants devraient réaliser durant le module.

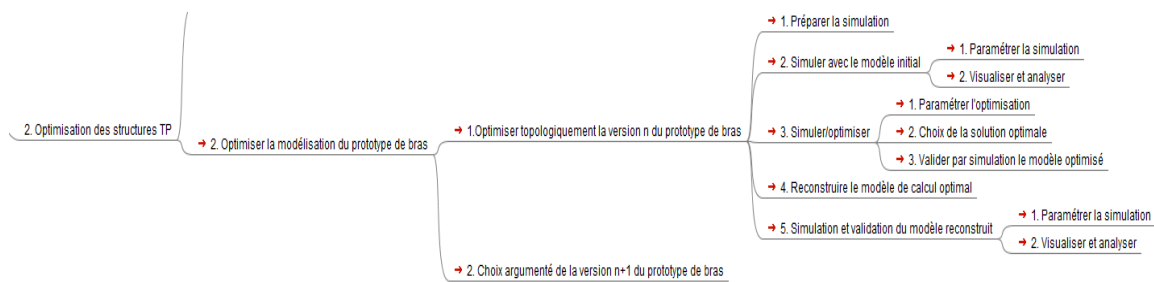


Figure 33 : Résultat du consensus auquel les participants du GDF ont aboutis pour ce qui est des tâches que les apprenants devront réaliser durant le module d’optimisation topologique

Initialement, cette partie de la modélisation était composée de 13 tâches élémentaires, 4 tâches de deuxième ordre et une tâche de troisième ordre. Après modification, elle ne comporte plus que 10 tâches élémentaires, 3 tâches de deuxième ordre et une tâche de troisième ordre. De haut en bas nous pouvons voir les différences suivantes.

⁵ La maîtrise d’ouvrage, aussi dénommée maître d’ouvrage est la personne pour qui est réalisé le projet. Elle est l’entité porteuse d’un besoin, définissant l’objectif d’un projet, son calendrier et le budget consacré à ce projet.

- La tâche élémentaire « préparer la simulation » a été ajoutée et les tâches « effectuer une étude préalable des forces et contraintes » et « définir les scénarios de simulation » ont été effacées. Ceci tient dans le fait que les membres du groupe ont décidé que ces dernières devaient être réalisées en amont de la simulation et ont donc été intégrées à la tâche « préparer la simulation »
- Dans la sous-tâche « Simuler avec le modèle initial » on peut voir que « simuler les scénarios définis » a été remplacé par « visualiser et analyser ». Les membres du groupe ont choisi cette nouvelle dénomination car l'ancienne se résumait à cliquer sur un bouton ; pour eux, l'important était l'analyse des résultats proposés par le logiciel.
- Les tâches « calculer » du modèle initial ont été renommées « simuler/optimiser » car les calculs sont réalisés par le logiciel, le groupe ne trouvait pas pertinent de faire apparaître ce détail au niveau de la dénomination de la tâche. Les tâches élémentaires « Définir les objectifs de simulation » et « définir les contraintes liées aux matériaux » ont été fusionnées dans la tâche « paramétrer l'optimisation » car l'une n'allait pas sans l'autre, il était donc préférable de les intégrer à la fiche explicative afin de rendre l'arborescence hiérarchique des tâches plus lisible.
- Nous pouvons également remarquer que les tâches « comparer les modèles de calculs », « calculs » et « valider par simulation les modèles de calcul » ont été écartées et que la nouvelle arborescence passe directement de « Paramétrer la simulation » à « Choisir la solution optimale ». Après avoir compris les intentions des stagiaires grâce aux ressources de l'OI, ils en ont conclu qu'ils avaient effectué une série d'opérations qui, bien que pertinentes, augmentaient inutilement la difficulté de l'optimisation étant donné la simplicité de la structure à optimiser. C'est l'un des rares éléments de la modélisation initiale qui a été écarté.
- La tâche « Valider par simulation le modèle de calcul » a remplacé « Valider la solution optimale » afin que l'énoncé de la tâche soit cohérent avec les modifications que nous avons décrites précédemment.

- Les tâches élémentaires « découper la pièce symétriquement » et « créer un modèle lisse le plus proche possible du modèle de calcul » ont été intégrées à la fiche descriptive de la tâche « reconstruire le modèle de calcul optimal » car les membres du groupe ont jugé qu'elles étaient trop procédurales pour apparaître et qu'elles rendaient la modélisation moins lisible.

On peut voir dans l'arborescence modifiée la tâche « Simuler et valider le modèle reconstruit » puis « Choix argumenté de la version n+1 du prototype de bras ». Ces deux tâches faisaient à l'origine partie de la tâche « Valider la version n+1 du prototype de bras ». Les membres du groupe ont décidé de scinder cette tâche afin qu'il y ait clairement un ensemble de tâches liées aux manipulations effectuées lors de l'optimisation des structures et un autre ensemble où les apprenants, à l'aune des résultats obtenus, prennent la décision de choisir telle solution technique plutôt que telle autre en donnant leurs arguments.

Pour ce qui est des fiches descriptives des tâches, les membres du groupe de discussion focalisée ont fait le choix de toutes les regrouper en une seule et unique fiche qui reprenait la description de toutes les tâches élémentaires ainsi que toutes les informations nécessaires. Cette fiche comporte :

- une estimation faite par les enseignants du niveau minimal de l'apprenant pour qu'il puisse participer au module.
- les notions qui doivent avoir été abordées au préalable afin de pouvoir réaliser les tâches qui leur seront demandées dans le cadre du module d'optimisation topologique
- une liste des compétences attendues. Afin de servir de support aux discussions des membres du groupe de discussion focalisée, nous avons compilé les référentiels de compétences des DUT science et génie des matériaux, génie mécanique et de productique, génie électrique informatique industriel et des BTS conception réalisation de systèmes automatiques, conception et industrialisation en microtechnique et BTS conception de produits industriels.

- Les participants ont pu trouver une formulation possible des compétences développées par les apprenants lors des modules, soit directement dans la liste, soit en reformulant l'intitulé de la compétence.
- Une description détaillée de tout ce que devront réaliser les étudiants dans le cadre du module pour qu'ils réussissent l'optimisation des structures qui composent le drone. Cette liste exhaustive a été réalisée dans le but de permettre le développement de supports pédagogiques.

A la suite de cet enrichissement, la modélisation n'est plus hiérarchisée en fonction du modèle RFLP mais en fonction des 7 modules qui ont été préalablement définis. L'arborescence ainsi que la fiche descriptive liées à chacun des modules (ANNEXES 5 p 363) servent de guides pour le créateur des supports pédagogiques qui permettront aux apprenants de réaliser les tâches nécessaires à la fabrication du drone ou d'une partie de ce dernier.

6.4.3 La posture de l'ergonome

Toujours dans l'optique de clarifier la posture de l'ergonome durant cette étape du processus de création des formations. Nous avons effectué la même analyse des actions communicationnelles de l'ergonome que lors des groupes de discussion focalisée organisés auprès des stagiaires. Cette fois-ci l'analyse porte sur les actions communicationnelles de l'ergonome en charge d'animer les groupes de discussion focalisée dans le cadre de la phase de conception des formations (ANNEXES 4 p 281).

		Ni (effectifs absolus)	Fi (effectifs relatifs)
<i>Interventions initiatives (qui initient des phases) ou réactives initiatives (qui initient des phases mais sur la base de ce qui a déjà été produit) adressées au collectif</i>	Enonce une question	12	7,14%
	Rappelle la consigne	6	3.57 %
	Fait une synthèse	7	4.17%
	Demande d'énoncer ou de se remémorer la question	3	1.79%
<i>Interventions réactives adressées au collectif (g) ou à un membre (p)</i>	Rappelle la consigne	4g	2.38%
	Apporte une information	53g 19 p	31.55% 11.31%
<i>Interventions réactives adressées à un membre</i>	Informe d'un terme adéquat	2	1.2%
	Demande de clarification	16	9.52%
	Demande des informations complémentaires	25	14.88%
	Ratifie (via la réitération d'une proposition ou d'un segment, un phatique)	13	7.74%
	Soumettre une déduction	5	2.98%
	Demande d'approfondir dans le même registre	3	1.79%

Tableau 4 : Analyse des actions communicationnelle de l'ergonome durant le groupe de discussion focalisée réalisé avec personnes en charge de la conception du module d'optimisation topologique

Nous pouvons voir que lors des groupes de discussion focalisée ayant pour but de concevoir les parcours de formation que suivront les apprenants, la principale activité de l'ergonome consiste à apporter des informations que ce soit par rapport au projet, à l'objet

intermédiaire et à son fonctionnement ou au travail qui a été effectué lors de la primo création. En effet 42,86% des productions de l'ergonome avaient pour but d'apporter des informations au groupe ou à un des membres du groupe. Nous allons dans un premier temps décrire les différents cas de figure où l'ergonome apporte des informations.

6.4.3.1 Apport d'informations relatives au Projet TINA-M2P

Ce premier extrait permet d'amorcer l'activité en groupe de discussion focalisée en expliquant à tous les intervenants extérieurs au projet les objectifs du projet ainsi que nos partenaires.

UP 3 Alors est ce que tu as une présentation du projet TINA pour
P 5 euh oui tout à fait le projet TINA c'est des formations pour les professeurs en ingénierie mécanique et ensuite est venu TINA M2P où là on a commencé à faire une formation pour les étudiants en ingénierie et aux professeurs afin d'apprendre à maîtriser la 3Dexperience et la fabrication additive et les connaissances pour les unes et juste apprendre à utiliser les outils pour les autres. Et du coup l'idée de TINA M2P c'est d'apprendre en construisant un drone en mode projet
UP 4 Ok donc les partenaires de ce projet du projet TINA M2P?
P 6 C'est donc l'IRT M2P l'académie des technologies euh Dassault systeme, L'ESPE L'UFR MIM , Ditex et ALTRAN, le 2LPN et l'université de Lorraine
...
P 7 Voila c'est ça et en fait le module optimisation topologique c'en est un parmi d'autres tu vois on va essayer de faire un maximum de modules dans différentes matière mais tous auront pour objet la création d'une partie du drone

6.4.3.2 Apports d'informations quant aux objectifs du groupe de discussion focalisée

L'extrait suivant montre comment l'ergonome explique les consignes au groupe, l'arborescence hiérarchique des tâches est présentée aux participants qui comprennent assez rapidement de quoi il s'agit. Il faut ensuite expliquer aux participants les modifications qu'ils devront apporter à l'OI en définissant un parcours de formation. En l'occurrence, il s'agit de faire comprendre que l'un des buts de la séance est de définir quelles parties de la modélisation (c'est-à-dire quelles tâches) pourront être effectuées dans le cadre d'une formation portant sur l'optimisation topologique de pièces de drone. Le passage suivant illustre comment nous expliquions le fait qu'il faille sélectionner les tâches qui seront réalisées par les apprenants dans le cadre des formations.

UP 31 du coup aujourd'hui tu veux savoir qu'est ce qu'on va allumer pour l'optimisation topologique c'est ça. Tu vas le mettre d'une autre couleur à un endroit ou à un autre dans l'arbre

P 30 bah en fait je vais tout simplement créer un autre arbre qui sera l'arbre module optimisation topologique (ouvre la partie optimisation topologique) où je vais prendre des morceaux de l'arborescence globale (ouvre l'arborescence globale) et je vais ainsi séparer les tâches que devront faire les étudiants lors du module d'optimisation topologique

UP 32 d'accord donc on travail avec la carte c'est ça ?

P 31 Voilà

UP 33 on travail avec ça ok donc là et après donc sur le module d'optimisation il va falloir aussi

6.4.3.3 Apport d'informations quant à ce qui a été réalisé par les stagiaires

Les informations apportées par l'ergonome se rapportent également à ce qui a été effectué lors de la phase de primo création afin de faire comprendre aux participants du groupe de discussion focalisée ce que les stagiaires ont réellement réalisé. Ces informations permettent aux concepteurs d'avoir une idée plus claire de ce que les apprenants réaliseront réellement et non pas ce qu'ils pensent que les apprenants devront faire. Ces informations leurs permettent d'arriver à un consensus quant à ce que les apprenants devront réaliser durant la formation. Dans l'extrait suivant, on peut voir que UP avait des doutes quant à l'approche qu'avaient choisi les deux stagiaires afin d'effectuer une optimisation topologique, mais en échangeant avec UM et avec les informations apportées par le psychologue en P 91 et qui étaient tirées de l'OI, un consensus a pu être établi.

UP 128 Donc pour faire l'optimisation il faut déjà avoir dessiné un bras euh modélisé un bras
P 90 euh c'est comme ça qu'ils ont fait eux mais après comme vous le dites

UM 88 Ils ont bien fait parce que en général tu pars d'une version initiale donc que tu analyse
que tu simules et que après tu regardes les résultats et après quand tu fais l'optimisation tu vas
comparer par rapport à cette configuration initiale en disant bon bah j'ai gagné de la matière
j'ai euh mes efforts ils sont euh mieux répartis ou euh

P 91 et donc en fait eux ils ont pas appliqué cette méthodologie c'est euh ils ont fait une
version n qu'ils ont transformé en version n+1 optimisée et ils ont modifié cette version n+1
donc ils ont simulé de nouveau pour obtenir la meilleur version possible. Il y a vraiment eu
une dialectique en NH et ND parce que ND ne s'occupait que de la CAO et NH optimisait les
propositions de ND

UP 129 Oui parce que le truc a été modifié plein de fois quand tu veux faire de l'optimisation
tu as un point de départ après tu le fabrique tu le test et puis tu reviens tu remodifie

6.4.3.4 Les demandes d'informations complémentaires.

La deuxième action communicationnelle la plus importante du psychologue au niveau de ces groupes de discussion focalisée est la demande d'informations complémentaires (14.88%). En effet, bien que les stagiaires aient réalisé le la primo création du drone, ils n'étaient pas experts dans le domaine. Or les personnes en charge de dispenser les formations et de les concevoir doivent pouvoir atteindre l'intercompréhension. On peut voir dans l'extrait ci-dessous que le psychologue en demandant plus de détails (P130) permet aux experts en charge de la conception des formations d'arriver à un consensus pour ce qui est de l'une des fiches descriptives qui servira de base à la création des formations (D62).

P 130 ok (ajoute une tâche visualiser les résultats) et du coup le maillage est dans paramétrer la simulation ?

UP 202 d'accord les zones à geler donc là les zones à geler les zones fonctionnelles identifiées dans l'étape une hein

UM 133 oui

UP 203 le matériau euh on le choisit on peut laisser ça comme ça finesse du maillage oui les forces auxquelles ça aussi ça a été identifié dans l'étape une alors ici ça va pas ici tu mets identifier les paramètres de scénarios de simulation et là tu parles de maillage

P 131 ça fait pas partie du paramétrage de la simulation enfin

UP 204 oui mais pas des scénarios

UM 134 les scénarios c'est pas après c'est pas en trois ou quatre ? le quatre ça va être simuler nan c'est le trois ça alors c'est quoi définir les scénarios alors

D 62 ça devrait être dans paramétrer la simulation

6.4.3.5 Les demandes de clarification

Constituant 9.52% des productions du psychologue, la demande de clarification est la troisième activité la plus importante du psychologue dans le cadre de ces groupes de discussion focalisée. Dans l'extrait ci-dessous l'un des participants va à l'encontre de ce qui est indiqué sur l'objet intermédiaire. En P139 la demande de clarification est implicitement demandée. S'ensuit un échange entre les experts de l'optimisation topologique et de la 3DExpérience afin de déterminer ce qu'il se passe réellement d'un point de vue du logiciel. Une fois la proposition faite en UP 222 validée par le groupe, elle est ratifiée puis ajoutée à l'Objet intermédiaire.

P 139 l'optimisation sera calculée ?

UM 153 parce que là nous on était juste ici sur simuler avec le modèle initial (montre la partie simuler avec le modèle initial de la modélisation) et après l'optimisation c'est calculé mais en réalité quand tu le fais dans le modèle dans 3DExpérience les deux se font en même temps tu peux pas dire je vais faire que l'un pas pas l'autre

D 78 pas vraiment en même temps mais tu vas faire la première avant de faire la deuxième

UM 154 oui je veux dire que si quelqu'un veut faire la conception complète du drone (désigne l'ensemble de la modélisation) il va pas dire je m'affranchie de l'étape une, il est obligé de faire les deux en même temps

D 79 nan c'est pas vraiment qu'il les fait en même temps c'est qu'il est obligé de faire la première pour pouvoir débloquent supplies

...

P 140 c'est contraint par le logiciel en fait

UM 159 ouai ouai d'accord ok

UP 220 donc simuler avec le modèle initial enfin simuler le la version n alors on est d'accord donc tu paramètre la simulation c'est ce qu'on a dit où il y a les zones fonctionnelles et après simuler c'est pas simuler c'est post-traiter enfin c'est observer c'est ça ? Ce que tu appelle simuler

P 141 simuler les scénarios préalablement définis en fait c'est juste

UP 221 donc là sur la base des scénarios

P 142 le logiciel va simuler voila

UP 222 et là tu vois tu peux mettre visualiser

P 143 donc visualiser (ajoute une partie visualiser sur la fiche de la partie simuler avec le modèle n du bras)

6.4.3.6 L'énonciation de questions

Enfin nous pouvons voir qu'une part importante des actions communicationnelles du psychologue vise à énoncer des questions (7.14% des productions du psychologue). Dans cet extrait par exemple, l'un des experts en optimisation topologique nous montre qu'il existe en fait différents types d'optimisation en mécanique et qui pourraient s'appliquer dans le cas d'un drone. Afin de choisir l'intitulé du module de formation le psychologue intervient afin qu'il n'y ait pas de confusion plus tard lors de ce groupe de discussion focalisée.

P 44 Mais comment est-ce qu'on pourrait alors dans ce cas nommer le module

UM 50 optimisation de structures parce que c'est ça qui englobe tous les procédés tu vois par exemple pour l'optimisation de forme tu passe d'une plaque rectangulaire trouée à une ellipse à cause de la forme de la plaque

UP 69 alors là je comprends ce que c'est en fait l'optimisation paramétrique l'optimisation de dimensionnement c'est tu as un seul paramètre dans l'optimisation, c'est un seul paramètre. Et dans l'optimisation de forme tu peux avoir plusieurs paramètres par exemple tu peux changer à la fois l'épaisseur et euh

UM 51 Si un élément je suis d'accord sur un élément euh structural ou sur une partie tu peux dire ça

UP 70 parce que même en termes d'algo, même mathématiquement entre optimisation de forme et optimisation de paramètre c'est pareil il y a juste un paramètre en plus

UM 52 oui sur les algorithmes c'est les mêmes hein peu importe l'optimisation c'est tu vas faire tourner des boucles pour minimiser une fonction objective l'optimisation c'est ça hein c'est minimiser une fonction objective après dans la fonction objective il y a des paramètres euh des variables de conception et ça suivant l'optimisation que tu fais tu n'as pas le même nombre de variables de conception.

6.4.3.7 La création d'un espace intersubjectif

Parallèlement à ces analyses, nous avons pu remarquer que l'OI avait eu un impact sur le comportement de l'ergonome dans le cadre des groupes de discussion focalisée. En effet, le fait que notre OI étant marqué par une très grande incomplétude et que nous n'avions pas de langage commun afin de pouvoir l'utiliser de manière optimale. L'ergonome, dans son rôle d'accompagnateur de l'OI a été conduit à créer un espace intersubjectif et à mobiliser des compétences nécessaires à l'intercompréhension comme « comprendre » et « se faire comprendre ».

gUM 10 quand tu dis mind map c'est l'arborescence de tâches
gUP 12 C'est là c'est c'est ce que tu vois là c'est tout l'arborescence
gP 14 Ouai Ouai
gUM 11 D'accord parce que moi je comprenais plutôt comme si tu veux faire telle partie du drone il faut faire telle tâche
gUP 13 Oui du coup c'est pas vraiment du mind-mapping
gUM 12 et ce que tu disais moi je l'imagine plutôt bah optimisation topologique en L3 ils cliquent dessus et ils voient où est ce que tu as besoin de ce niveau là dans tout ça
gP 15 ça c'est ce que l'on espère faire à la fin mais là on est vraiment qu'au début parce que moi en fait c'est pas vraiment une mind map c'est une modélisation hiérarchique des tâches on appelle ça et en fait je me suis servie d'un logiciel de mind map pour rendre ça plus interactif et animer les groupes de travail
gUM 13 c'est de l'ordonnancement ou quelque chose comme ça
pP 16 oui tout à fait
pUP 14 et donc là de ce que par exemple si on veut qu'est ce après je sais pas du coup l'objectif de la réunion d'aujourd'hui c'est de dire ok on va faire l'optimisation topologique
pP 17 Ouai voilà on va faire de l'optimisation topologique et du coup quelle tâche on peut bien réaliser et sur quelle partie du drone

Dans cet extrait (ANNEXES 4 p 281) nous pouvons noter qu'afin de permettre aux participants de mieux appréhender l'OI, le psychologue ergonomiste utilisait le terme de mind map qui est un terme de langage commun. C'est à partir de cet extrait qu'il a pu introduire le concept de modélisation hiérarchique des tâches auprès des participants. L'OI que nous avons proposé dans le cadre de TINA-M2P avait également pour but de faire échanger différents mondes lorsque ces échanges ont lieu, le psychologue ergonomiste mobilise l'écoute, le recadrage et la relance si nécessaire.

gUP 23 en dehors de ça il y a rien d'autre sur lesquelles on a pu voire de l'optimisation et c'est pour ça que l'optimisation intervient sur châssis et capot et sur les bras voila c'est tout

gD 1 d'habitude les bras ils font partie intégrante du corps

gUP 24 Alors soit

gD 2 c'est la première chose qui m'a sauté aux yeux c'est pourquoi on a pas fait ça d'un bloc

pP 21 c'est à cause de la taille de l'imprimante en fait du coup tu ne peux pas sortir le drone d'un bloc

gUP 24 Oui parce que dans le cahier des charges faut que ce soit réalisable dans un lycée ou autre et du coup on est limité par la dimension des imprimantes du coup pour les lycées c'est des imprimantes à 20 par 20 ou 30 par 30 donc ça fait partie du cahier des charges

gD 3 ok et du coup on pourrait peut-être intégrer cette option justement en fonction de ce qu'ils ont

gUP 25 Après dans les paramètres que l'on a imaginé dans la CAO bon après il faudra un peu enfin oui on a imaginé un paramètre de taille quoi tu choisis peut-être 3 modèles imaginons tu choisis un petit un moyen et un grand le moyen grand tu dissocie les bras de la structure et le petit tu le fais d'un bloc et dans ce cas-là tout serait solidaire

gD 4 Ouais

Dans cette séquence (ANNEXES 4 p 281) on peut voir que l'expert en 3DExpérience et l'enseignant chercheur échangent sur la base des données contenues dans l'objet intermédiaire. Puis, suite à l'intervention gD2 le psychologue ergonome intervient en rappelant l'un des impératifs du projet qui est de pouvoir imprimer en 3D le drone ce qui induit une contrainte de taille pour les pièces à imprimer.

Durant cette phase du projet l'ergonome est un personnage ressource qui fournit aux différents acteurs du projet des informations relatives au projet dans son ensemble. Il tient également son rôle de facilitateur accompagnant l'objet intermédiaire en créant un espace intersubjectif permettant aux participants d'interagir avec l'OI. OI d'où l'ergonome tire les ressources nécessaires afin d'aider à la conception des formations. Le tout en proposant aux concepteurs un cadre afin que les formations créées par la suite tiennent compte de l'activité réelle de création d'un drone.

Il permet également de favoriser la communication entre professionnels provenant de différents domaines afin de parvenir à des terrains d'entente qui leur seront indispensables lors de leurs futures collaborations dans le cadre du projet TINA-M2P.

Suite à cette étape, l'objet intermédiaire contenait toutes les informations nécessaires afin de pouvoir créer les formations, les outils dont les apprenants auraient besoin, les modèles des pièces sur lesquelles ils allaient devoir travailler etc. L'OI fera office (pour reprendre les mots de nos collaborateurs) de « CookBook » afin de leur permettre de créer une formation à l'optimisation topologique.

6.4.4 L'élaboration des consignes à fournir aux groupes de discussion focalisée

Comme nous vous l'avons déjà dit, le module d'optimisation topologique a été le premier à être traité dans le cadre du projet TINA-M2P. C'est pourquoi nous n'avons pas pu donner au groupe de discussion focalisée d'instructions précises afin d'aboutir au résultat que nous souhaitions. Afin de pallier cet état de fait nous avons réalisé une analyse structuro-fonctionnelle de la transcription des échanges (ANNEXES 4 p 281) qui se sont déroulés lors du groupe de discussion focalisée de conception du module d'optimisation topologique. Sur la base des éléments que cette analyse a mis en exergue, nous avons pu proposer un programme sur mesure reprenant toutes les étapes essentielles qui se sont déroulées lors du premier groupe de discussion focalisée. Ledit programme est détaillé en page 153. Ce programme a été appliqué pour les autres groupes de discussion focalisée qui se sont déroulés dans le cadre du projet TINA-M2P et nous a permis d'obtenir toutes les données nécessaires à l'élaboration du CookBook indispensable à la création des supports de formation des 7 modules proposés dans le cadre du projet TINA-M2P.

6.5 Création des supports de formation sur la base des informations contenues dans l'objet intermédiaire

Nous arrivons à l'avant-dernière étape de la création du module d'optimisation topologique. Maintenant que le «CookBook » (terme utilisé en ingénierie mécanique pour définir la marche à suivre afin de créer un système) était prêt, l'enjeu était de trouver un modèle théorique d'ingénierie pédagogique qui favoriserait la compréhension de l'optimisation topologique et des concepts qui lui sont liés. Comme nous l'avons dit plus haut il existe pléthore de modèles en ingénierie pédagogique, c'est pourquoi nous nous sommes fiés à une méta-analyse qui nous a permis de dégager trois principaux modèles. Le modèle ARCS de Keller, le modèle des 10 étapes de Gagnes et Briggs et le modèle 4C/ID de Vanmeeringbauer. Or il s'avère que le Modèle 4C/ID se base sur l'apprentissage par la résolution d'un problème complexe par l'apprenant. C'est donc ce modèle qui nous a semblé le plus pertinent pour le cas du projet TINA-M2P étant donné que l'essence du projet est de créer une formation permettant à l'apprenant de se former en construisant un objet complexe nécessitant de réaliser un ensemble de tâches.

Ce modèle préconise de prendre en compte 4 composants afin de créer des formations efficaces.

- **Les tâches d'apprentissage :** ce sont des tâches qui doivent permettre à l'étudiant de développer des schèmes de réflexion transposables à d'autres situations et dans une certaine mesure des automatismes qui seront déployés pour les aspects récurrents de certaines tâches. La conception de l'environnement doit respecter la cohérence et la complexité des tâches réalisées en contexte authentique.
- **Les informations de support :** ce sont les informations qui sont indispensables à la compréhension de la tâche. Elles font le pont entre les connaissances antérieures de l'apprenant et la tâche qu'il réalise.
- **Les informations procédurales (Just in time information) :** ce sont les informations qui permettent aux apprenants d'apprendre à exécuter les tâches d'apprentissage. Les informations de support sont principalement d'ordre pratique et permettent l'intégration d'informations procédurales. Les informations « juste à temps » sont utilisables pour les tâches d'apprentissage mais également pour les exercices pratiques.
- **Les exercices de pratique :** ce sont des éléments fournis aux apprenants afin qu'ils apprennent des règles d'actions pour pouvoir réaliser les éléments procéduraux des tâches d'apprentissage et d'automatiser ces règles d'action.

Ainsi, les tâches d'apprentissage que nous allons utiliser dans le cadre du module d'optimisation des structures sont celles qui ont été définies lors de l'étape précédente. C'est pourquoi nous avons réalisé, avec le groupe de travail, une liste de prérequis afin que les apprenants qui participent au module d'optimisation des structures soient dans la capacité de réaliser les tâches qui leur seront demandées. Notre rôle a donc été de créer un support pédagogique comportant des informations de support et des informations procédurales afin que les apprenants puissent comprendre et réaliser les tâches que nous leur demandons dans le cadre de travaux pratiques dont l'objectif est la conception d'une partie du drone.

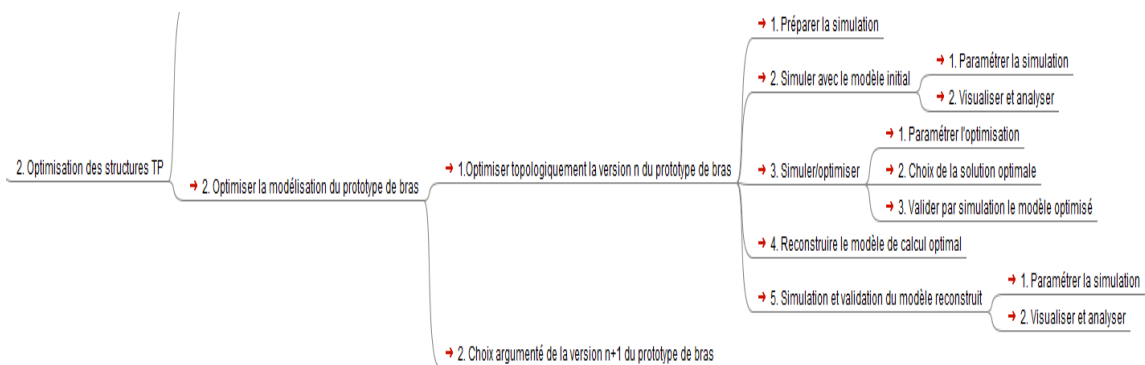


Figure 34 : Tâches d'apprentissage du module d'optimisation topologique

Nous avons créé les supports pédagogiques en respectant les tâches apparaissant dans l'objet intermédiaire à l'issue de la phase de conception. Etant donné que nous nous occupons des informations de support et des informations procédurales, nous avons fait le choix de faire en sorte que les premières planches du support de formation (ANNEXES 6 p 369) permettent aux étudiants de faire le lien entre ce qu'ils savent déjà et notre module d'optimisation topologique. Les planches suivantes quant à elles suivent scrupuleusement les tâches élémentaires que propose l'OI.

- Les planches 2 à 5 (ANNEXES 6 p 369) sont introductives et ont pour objectif de situer l'optimisation topologique dans la chaîne de fabrication. Il est montré qu'une fois la pièce créée par CAO, il est intéressant de l'optimiser topologiquement car cela réduit son poids et donc l'empreinte carbone de la conception. Les apprenants devant savoir modéliser une pièce par CAO, cette partie introductive contient les informations de support.
- Les planches 8 à 15 (ANNEXES 6 p 369) contiennent les informations procédurales permettant à l'apprenant de réaliser les tâches « Simuler avec le modèle initial » et « Simuler et valider le modèle reconstruit ». En effet, ces deux tâches sont composées des mêmes sous-tâches « paramétrer la simulation » et « Visualiser et analyser » ; elles nécessitent les mêmes informations procédurales afin de pouvoir être réalisées. Ainsi dédier des planches différentes à ces deux tâches aurait engendré une répétition dans le support pédagogique.

- Les planches 15 à 22 (ANNEXES 6 p 369) contiennent les informations procédurales permettant à l'apprenant de réaliser la tâche « Simuler/optimiser » ainsi que l'ensemble des sous tâches qui la constitue
- Les planches 27 et 28 (ANNEXES 6 p 369) fournissent les informations procédurales nécessaires à l'apprenant pour qu'il puisse réaliser la tâche « Reconstruire le modèle de calcul »

Les tâches « Préparer la simulation » « simuler et valider le modèle reconstruit » ne font l'objet d'aucune planche. Ceci s'explique par le fait que la tâche « préparer la simulation » ne contient aucun élément procédural réalisable sur la 3DExpérience. En effet cette tâche consiste essentiellement en la recherche d'informations relatives aux caractéristiques de la pièce à optimiser. Il n'était donc pas nécessaire de créer des planches pour cette tâche. Nous avons également fourni à l'apprenant une série d'exercices afin qu'il puisse s'entraîner à effectuer une optimisation topologique sur des chaises, un cadre de vélo ou encore une pince utilisée en cobotique.

Un fois cette étape réalisée, l'objet intermédiaire était constitué des planches qui figurent en ANNEXES 6 p 369 ainsi que des pièces modélisées en 3D afin que les étudiants puissent s'entraîner. Cependant, ces planches, avant d'être incorporées au cours d'optimisation topologique dont les enseignants chercheurs qui participaient au projet avaient la charge, devaient être testées auprès d'apprenants afin de savoir si elles leur permettraient d'optimiser une des pièces du drone. C'est pourquoi il a été décidé qu'une batterie de simulation de formation à l'optimisation topologique allait être réalisée. Ces formations seraient évaluées puis améliorées afin de pouvoir déterminer leurs caractéristiques (durée, public concerné, etc.)

6.6 Evaluation et amélioration de la formation

L'évaluation de la formation devait initialement être réalisée en suivant le modèle de Beech et Leather (2006) qui s'inspire du modèle de Kirkpatrick (1959). Ainsi nous devions recueillir les réactions des apprenants, déterminer ce que la formation leur avait apporté en termes d'acquisition, puis plus tard si la formation avait eu un impact dans leur façon de réaliser les tâches ciblées par la formation. L'enjeu de cette étape était d'adopter une approche centrée apprenant afin de voir si les supports de formation que nous avions fournis étaient suffisants pour réaliser les tâches demandées et d'avoir un retour de leur part sur ce qui était perfectible. Nous avons donc effectué 5 simulations de formation au sein de l'IUT GMP de Metz. Elles avaient également pour but d'élaborer une fiche descriptive des formations (figure 39 p 198) contenant une estimation du temps nécessaire à la réalisation de cette dernière, les outils utilisés, mais également ce qui était attendu de la part des étudiants à la l'issue dela formation.

Cependant du fait de la crise sanitaire nous n'avons pu effectuer que deux tests sur les réactions des apprenants, le premier nous a permis d'améliorer nos supports pédagogiques et le second de voir si ces modifications avaient eu des effets. Voici les résultats de ces tests.

6.6.1 Description de l'échantillon

59 étudiants volontaires en première année de DUT GMP (33) à l'IUT GMP de Metz ou de licence pro Fabrication additive (26). Pour chacun d'entre eux, la formation d'optimisation topologique de TINA-M2P était leur premier contact avec la 3DExperience. Ces étudiants ont été soumis au questionnaire (ANNEXES 8 p 387) à l'issue de 5 sessions de formation (cf . tableau ci-dessous).

Groupe	Date	Formation	Effectifs
A	09/01/2020	DUT	11
B	16/01/2020	DUT	8
C	13/02/2020	Licence	11
D	05/03/2020	DUT	14
E	12/03/2020	Licence	15

Tableau 5 : Présentation de l'échantillon des apprenants

Sur la base de plusieurs questionnaires d'évaluation de la satisfaction des participants à une formation, nous avons élaboré un questionnaire pour TINA-M2P. Ce questionnaire est composé de trois sous-échelles : conditions de formation, contenu de la formation et actions pédagogiques. Les participants devaient répondre grâce à une échelle d'accord-désaccord en 5 points à un total de 14 énoncés.

6.6.2 Présentation du questionnaire de satisfaction

La satisfaction vis-à-vis du contenu de la formation est mesurée grâce aux énoncés suivants :

1) Les objectifs de cet enseignement étaient clairs
2) Les supports utilisés étaient clairs
3) J'ai l'impression d'avoir atteint les objectifs de cet enseignement
4) A l'issue de cette formation je suis satisfait du résultat de mon travail.
5) Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce cette formation

Tableau 6 : Sous échelle « contenu de la formation » du questionnaire de satisfaction

La satisfaction quant aux conditions de formation est mesurée grâce aux énoncés suivants :

1) L'ambiance générale de cet enseignement était propice au travail
2) Le matériel mis à ma disposition m'a permis d'accomplir tout ce que l'on m'a demandé
3) Je disposais des connaissances préalables nécessaires pour aborder cet enseignement
4) La cadence à laquelle se déroulait l'enseignement était trop intense
5) Cet enseignement était trop court

Tableau 7 : Sous échelle « conditions de formation » du questionnaire de satisfaction

La satisfaction vis-à-vis des actions pédagogiques du formateur est mesurée grâce aux énoncés suivants :

1) Les explications données par l'enseignant étaient satisfaisantes
2) L'enseignant faisait ressortir les savoirs essentiels
3) L'enseignant a su montrer de réelles qualités pédagogiques (disponibilité, écoute, qualité d'échanges etc.)
4) Le déroulement de l'enseignement était dynamique et stimulant

Tableau 8 : Sous échelle « actions pédagogiques » du questionnaire de satisfaction

Le questionnaire était agencé de la manière suivante et a été administré à la fin de chaque formation par le biais de google form (cf. ANNEXES 8 p 387).

Numéro	Question
1	L'ambiance générale de cet enseignement était propice au travail
2	Le matériel mis à ma disposition m'a permis d'accomplir tout ce que l'on m'a demandé
3	Je disposais des connaissances préalables nécessaires pour aborder cet enseignement
4	La cadence à laquelle se déroulait l'enseignement était trop intense
5	Cet enseignement était trop court
6	Les objectifs de cet enseignement étaient clairs
7	Les supports utilisés étaient clairs
8	Les explications données par l'enseignant étaient satisfaisantes
9	L'enseignant faisait ressortir les savoirs essentiels
10	L'enseignant a su montrer de réelles qualités pédagogiques (disponibilité, écoute, qualité d'échanges etc.)
11	Le déroulement de l'enseignement était dynamique et stimulant
12	J'ai l'impression d'avoir atteint les objectifs de cet enseignement
13	A l'issue de ce TP je suis satisfait du résultat de mon travail.
14	Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP

Tableau 9 : Questions composant l'échelle de satisfaction du questionnaire TINA-M2P

Il a été également proposé aux participants d'expliquer leur position en répondant à la question « pourquoi ? » apparaissant après chaque question. Afin de traiter ces verbatims, la méthode de l'analyse thématique a été utilisée (Bocquillon et al., 2015).

6.6.3 Validité de l'échelle

La valeur de l'alpha de Cronbach de l'échelle de satisfaction est de 0.8631. Nous pouvons en déduire que notre échelle jouit d'une forte cohérence interne.

	Alpha	Std Alpha	R drop
Cond1	0.8562	0.8787	0.5303
Cond2	0.8645	0.8884	0.2897
Cond3	0.8567	0.8794	0.5002
Cond4	0.8764	0.8794	0.2316
Cond5	0.8818	0.8959	0.1449
Cont1	0.8510	0.8741	0.6370
Cont2	0.8435	0.8689	0.7197
Cont3	0.8429	0.8701	0.6966
Cont4	0.8392	0.8443	0.7736
Cont5	0.8463	0.8725	0.6458
Peda1	0.8524	0.8754	0.5767
Peda2	0.8493	0.8724	0.6225
Peda3	0.8436	0.8667	0.7410
Peda4	0.8478	0.8719	0.6488

Tableau 10 : Coefficients de cohérence interne du questionnaire TINA-M2P

Nous pouvons voir que les R drop, alpha et alpha standardisés des différents items sont à un niveau acceptable, il n'y a pas lieu, à ce niveau de l'analyse, d'écarter un seul item de notre échelle de satisfaction.

Validité structurelle

Analyse en composante principale afin de confirmer l'existence d'un facteur général de satisfaction des participants.

Item	Facteur 1
Cond1	0.486
Cond2	0.357
Cond3	0.510
Cond4	0.190
Cond5	

Cont1	0.639
Cont2	0.770
Cont3	0.785
Cont4	0.821
Cont5	0.724
Peda1	0.658
Peda2	0.753
Peda3	0.815
Peda4	0.722

Tableau 11 : Résultats de l'analyse en composante principale à 1 facteur du questionnaire TINA-M2P

La proportion de variance expliquée par le facteur général de satisfaction est de 0.405. Les items cond4 et cond5 sont très faiblement saturés au facteur général de satisfaction, ils ne seront donc pas pris en compte pour la suite des analyses.

Item	Facteur 1
Cond1	0.481
Cond2	0.361
Cond3	0.510
Cont1	0.635
Cont2	0.772
Cont3	0.784
Cont4	0.819
Cont5	0.725
Peda1	0.656
Peda2	0.759
Peda3	0.815
Peda4	0.725

Tableau 12 : Résultats de l'analyse en composante principale à 1 facteur du questionnaire TINA-M2P après modification

La proportion de variance expliquée par le facteur général de satisfaction est de 0.469. Cette solution factorielle va dans le sens de l'existence d'un facteur général de satisfaction qui sous-tend les réponses des participants au questionnaire que nous avons proposé.

Analyse en facteurs communs à 3 facteurs rotation varimax afin de confirmer l'existence des trois composantes de la satisfaction

Item	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Cond1	0.135	0.278	0.386
Cond2		0.127	0.547
Cond3	0.289		0.542
Cont1	0.532	0.234	0.300
Cont2	0.578	0.244	0.502
Cont3	0.952	0.268	0.128
Cont4	0.602	0.319	0.253
Cont5	0.596	0.270	0.348
Peda1	0.274	0.923	
Peda2	0.333	0.537	
Peda3	0.211	0.559	
Peda4	0.251	0.583	

Tableau 13 : Résultats de l'analyse en facteur commun à 3 facteurs du questionnaire TINA-M2P

Cette solution à trois facteurs explique 0.602 de la variance totale (0.221 pour le facteur 1, 0.207 pour le facteur 2 et 0.174 pour le facteur 3).

- Les items cont1, cont2, cont3, cont4 et cont5 sont fortement saturés au facteur 1 qui pourrait être renommé « Contenu de la formation »
- Les items peda1, peda2, peda3 et peda4 sont fortement saturés au facteur 2 qui pourrait être renommé « Actions pédagogiques »
- Les items cond1, cond2 et cond3 sont fortement saturés au facteur 3 qui pourrait être renommé « Conditions de formation ».

Cette solution factorielle va dans le sens de l'existence des dimensions de conditions de formation, de contenus de formation et d'actions pédagogiques toutes constitutives d'un facteur général de satisfaction des participants.

6.6.4 Analyse thématique

Afin d'améliorer le support de formation, une analyse thématique des remarques laissées par les participants des groupes A, B et C a été réalisée. Cette analyse a révélé 3 thèmes principaux : La plateforme 3DExpérience, les supports pédagogiques et le déroulement du cours, tous trois décomposés en 3 sous thèmes : les remarques positives, négatives et constructives. Ce sont les remarques constructives et négatives qui ont pu aider à l'amélioration de la formation. Vous trouverez ces dernières ci-dessous.

Plateforme 3D expérience	
Négatif	Constructif
Nous maîtrisons les bases des logiciels de conception, toutefois je pense qu'aborder la 3d expériences est un peu prématuré aux vues de l'état d'aboutissement de ce logiciel	C'est nouveau et on ne nous a jamais parlé de 3D expérience
Difficile à prendre en main avec beaucoup d'applications	Le logiciel est complexe et demande un certain temps de prise en main
Logiciel assez compliqué à première vue	
Trop de fonctions dispatchées	
Non car le logiciel est à l'opposé de quelque chose d'intuitif	
Non je n'ai pas assimilé les bases du logiciel à cause de la difficulté de prise en main du logiciel qui n'est qu'un skin appliqué à Catia v5 mais très compliqué a utilisé sans être parfaitement formé	
Logiciel très peu intuitif	

Tableau 14 : Commentaires appartenant au thème « Plateforme 3DExpérience »

Supports pédagogiques	
Négatif	Constructif
Je disposais des connaissances en design mais pas dans les darkboard	Il fallait plus d'exercices
Certains sujets vagues avec manques d'expérience, partage des fichiers, notions de maturité, et navigation avancée	Je ne peux pas dire que je manie le logiciel parfaitement mais avec de l'entraînement je peux me perfectionner
Un peu trop d'écriture par moment	Car je connais déjà le logiciel Catia
Largué trop vite	J'ai déjà utilisé des logiciels de CAO tel que CATIA
Pas du tout j'ai juste gagné un mal de crane et perdu 4h	Pas vraiment d'objectifs lors de ce cours à part la découverte du logiciel
Beaucoup de points abordés, qui ne se maîtrisent qu'avec le temps	Il y a quelques points où les explications ne sont pas très claires comme par exemple la fonction de révision.
Je n'ai pas bien compris la 2ème partie de ce cours	PDF à simplifier et condenser
Ce n'est pas fou non plus ce que j'ai fait	Le pptx était de bonne qualité mais difficile à suivre dû au peu de temps de la séance
	Il y' avait trop de texte
	Il faudrait plus de temps pour tout connaître
	Non pas vraiment, car juste découvert le logiciel
	Peut-être quelques oublis, besoin du PDF de présentation
	En grande partie grâce aux ressources PDF qui sont de très bons pense bêtes
	Oui, mise à part l'explication sur les bookmarks.
	Je me sentais parfois perdu malgré le PDF

Tableau 15 : Commentaires appartenant au thème « Supports pédagogiques »

Déroulement du cours	
Négatif	Constructif
4h d'affilées...	Difficile de suivre et de réaliser les manipulations
Beaucoup trop rapide je n'avais pas le temps de faire ce que l'enseignement disait et allait trop vite dans ses explications	Certains détails ont été montrés ou expliqués trop rapidement
Trop lent	Assez intense, beaucoup des nouvelles ateliers/applications découverts et une seule pause de 25 minutes environ
4h sont trop courtes pour un logiciel aussi complexe	Oui car le déroulement de l'explication par étape permet une bonne ambiance
Impossible de comprendre parfaitement le logiciel en seulement 4 H	Bien pour une découverte mais trop court pour retenir réellement les infos
Trop cours pour un logiciel aussi grand	J'aurais préféré un module plus long pour que l'on se fasse vraiment la main sur la 3D Expérience, de plus j'aurais préféré avoir cet enseignement en début d'année pour pouvoir m'en servir tout au long de l'année
Beaucoup trop chargé de nouvelles informations je n'ai pas eu le temps de découvrir le logiciel	Quelques heures supplémentaires pourraient être bénéfiques
Avis trop flou sur le logiciel après seulement quatre heures d'utilisation	Pas assez long pour maîtriser le logiciel qui est assez complexe
Trop court pour tout retenir	L'étendre sur plusieurs séances ou trouver un moyen de partager des connaissances parties par parties

Ambiance hardworking a la limite de la rupture d'anévrisme	Je ne suis pas au courant de l'objectif final de l'enseignement, cependant je pense avoir eu une bonne première approche.
Logiciel compliqué donc difficile de rendre l'enseignement dynamique	Avec 1 ou 2 heures plus au niveau personnel sans problème
	4H ne sont pas assez conséquentes pour être formé
	Impossible à prendre en mains sans un support et un approfondissement des bases
	Il faut plus de temps pour assimiler les bases
	Un entraînement personnel me sera nécessaire afin d'appliquer les notions de ce TP
	Rythme pas trop lent ce qui permet de rester concentré malgré quelques moments de "flottement"
	Il y avait des explications mais pas assez longues

Tableau 16 : Commentaires appartenant au thème « Déroulement du cours »

6.6.5 Amélioration des supports de formation sur la base de l'analyse des commentaires

Afin d'améliorer les supports de formation, nous avons examiné les résultats des analyses thématiques tels que présentés précédemment, avec l'expert en 3DExpérience chargé des formations et du développement informatique des supports pédagogiques. N'ayant pas la possibilité d'agir sur les volumes horaires qui nous étaient alloués et ne pouvant pas modifier à loisir l'interface de la 3DExpérience nous nous sommes concentrés sur les commentaires qui concernaient les supports pédagogiques que nous avions créés (ANNEXES 9 p 400).

Les commentaires qui nous ont semblé les plus pertinents et les plus présents étaient ceux relatifs à la clarté du support « PDF à simplifier et condenser », « besoin du PDF de présentation », « grâce aux ressources PDF qui sont de très bons pense bêtes », « le pptx était de bonne qualité mais difficile à suivre dû au peu de temps de la séance » et « Je me sentais parfois perdu malgré le PDF ». Nous en avons déduit qu'il nous était possible de modifier les supports pédagogiques afin qu'ils rendent mieux compte du chemin à parcourir dans le logiciel pour trouver les fonctions et de réduire le nombre d'éléments contenus dans les diapos afin de les rendre plus lisibles.

Voici quelques exemples des principales modifications que nous avons apportées à nos supports.

Nous avons d'une part, lorsque c'était possible, ajouté en bas de chaque diapositive la barre de menu de l'interface utilisateur de la 3DExpérience et entouré en rouge les parties à ouvrir afin d'accéder à la fonction qui était évoquée dans la planche



Figure 35 : Exemple de supports pédagogiques avant amélioration



Figure 36 : Exemple de supports pédagogiques avec ajout d'éléments

Nous avons également réduit le nombre d'éléments présentés dans certaines diapos qui nous semblaient trop chargées. Ici on passe d'une planche qui comporte cinq éléments différents et décrit deux manipulations différentes à deux planches comprenant trois éléments, une manipulation par planche et proposant plus de représentations de l'interface utilisateur de la 3DExpérience.

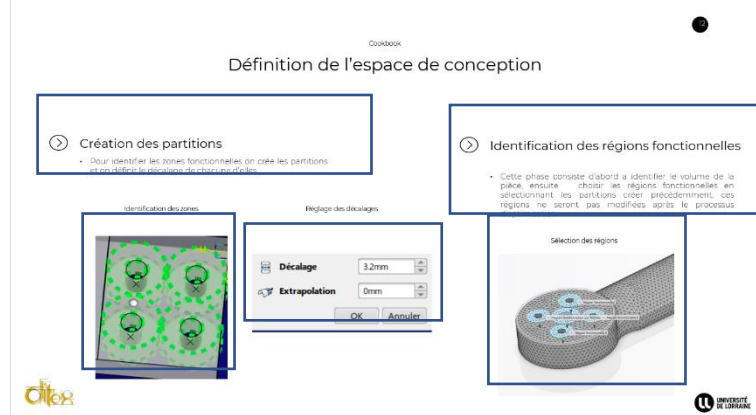


Figure 37 : Exemple de supports pédagogiques avant amélioration

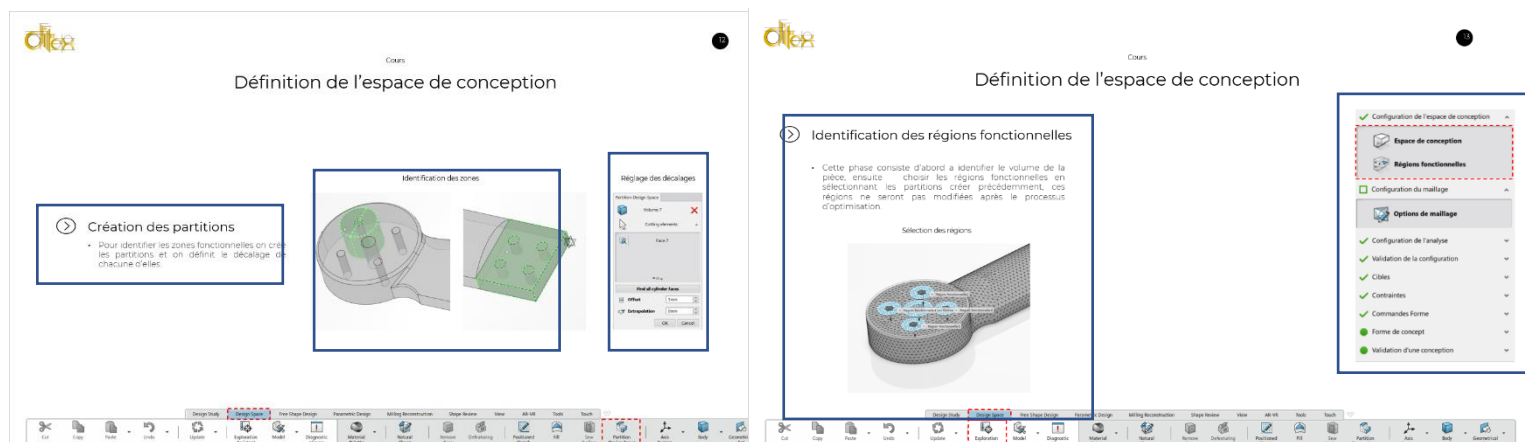


Figure 38 : Supports pédagogiques dont le nombre d'éléments a été réduit avec ajout d'éléments de l'interface utilisateur de la plateforme

Afin de tester si les modifications apportées avaient eu un effet, nous avons réalisé de nouvelles sessions de formation et avons comparés les résultats obtenus au questionnaire TINA-M2P avec ou sans amélioration des supports pédagogiques.

6.6.6 Evaluation des supports améliorés

Ces formations se déroulaient dans les mêmes conditions de formation que précédemment (avec le même formateur expert de la 3DExpérience et les mêmes tâches), seul le support pédagogique différait. Plus précisément, la formation modifiée a été déployée lors des 2 dernières sessions de formation.

Formation initiale	Formation avec support de cours original	Formation avec support de cours modifié
IUT GMP	19	14
Licence	11	15
Total	59	

Tableau 17 : Effectif des sujets en fonction de la version du support de cours et de la formation initiale suivie

Effet du groupe sur les scores obtenus, en fonction de la version du cours

Ici nous testons les effets du groupe en fonction de la version du support sur les scores aux différentes échelles. Pour se faire nous créons trois nouvelles variables qui sont les scores totaux obtenus à l'échelle de satisfaction.

Intitulé	Codage	Description
sccond	0 à 12	Somme des scores obtenus à l'échelle condition de formation
sccont	0 à 20	Somme des scores obtenus à l'échelle contenu de la formation
scpeda	0 à 16	Somme des scores obtenus à l'échelle action pédagogique
sctot	0 à 48	Somme des scores obtenus à l'échelle satisfaction

Tableau 18 : Bible de codification des nouvelle variables créées afin de réaliser les comparaison avant/après

Pour ce qui est de la version originale du support

Caractéristiques statistiques de l'échantillon :

Echelle	Moyenne	Ecart-type	Skewness	Kurtosis
Condition de formation	9.733	2.258	-1.088	0.345
Contenu de la formation	13.533	2.824	-0.958	0.455
Actions pédagogiques	12.667	3.187	-1.481	-0.089
Satisfaction	35.933	8.792	-1.230	1.573

Tableau 19 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants lors des formations réalisées avec la version originale du support de formation

Echelle	F value	Pr(>F)
Condition de formation	0.383	0.685
Contenu de la formation	0.084	0.92
Actions pédagogiques ²	0.596	0.558
Satisfaction	0.321	0.887

Tableau 20 : Résultats des ANOVA visant à déterminer si l'appartenance à un groupe fait varier significativement le score obtenu au questionnaire si l'on a suivi la formation avec la version initiale du support de formation

Pour ce qui est de la version modifiée du support de cours

Echelle	Moyenne	Ecart-type	Skewness	Kurtosis
Condition de formation	10.20	1.521	-0.768	0.519
Contenu de la formation	15.759	4.369	-0.145	0.455
Actions pédagogiques	14.483	1.682	-0.789	-0.659
Satisfaction	40.448	4.702	-0.48	-0.426

Tableau 21 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants lors des formations réalisées avec la version modifiée du support de formation

Echelle	F value	Pr(>F)
Condition de formation	0.209	0.651
Contenu de la formation	0.044	0.836
Actions pédagogiques	1.109	0.302
Satisfaction	0.419	0.523

Tableau 22 : Résultats des ANOVA visant déterminer si l'appartenance à un groupe fait varier significativement le score obtenu au questionnaire si l'on a suivi la formation avec la version modifiée du support de formation

Aucun des tests qui ont été réalisés n'ont pu mettre en évidence des différences significatives dans les scores obtenus, nous pouvons donc en conclure que : pour une même version du support, le fait d'appartenir à un groupe d'étudiants particulier n'a pas d'influence sur les scores obtenus à l'échelle de satisfaction par les participants. Il en est de même pour les sous-échelles constitutives de l'échelle de satisfaction.

Effets de la version et effet du groupe sur les scores obtenus

Echelle	Moyenne	Ecart-type	Skewness	Kurtosis
Condition de formation	9.966	1.929	-1.158	1.0367
Contenu de la formation	14.627	3.828	-1.051	1.438
Actions pédagogiques	13.559	2.699	-1.783	0.017
Satisfaction	40.448	4.702	-1.533	0.979

Tableau 23 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants lors de l'ensemble des formations

Effets du groupe

Ici nous testons les effets du groupe sur les scores obtenus par les participants aux différentes échelles.

Echelle	F value	Pr(>F)
Condition de formation	0.512	0.727
Contenu de la formation	1.341	0.267
Actions pédagogiques	2.112	0.119
Satisfaction	1.536	0.205

Tableau 24 : Résultats des ANOVA visant déterminer si l'appartenance à un groupe fait varier significativement le score obtenu au questionnaire

Les tests réalisés ne révèlent pas de différences significatives dans les scores obtenus, nous pouvons donc en conclure que le fait d'appartenir à un groupe d'étudiant particulier n'a pas d'influence sur les scores obtenus à l'échelle de satisfaction par les participants. Il en est de même pour les sous-échelles constitutives de l'échelle de satisfaction.

Effets de la version

Ici nous testons les effets des différentes versions du support utilisés lors des formations sur les scores obtenus par les participants aux différentes échelles.

Echelle	F value	Pr(>F)
Condition de formation	0.887	0.35
Contenu de la formation	5.358	0.0242*
Actions pédagogiques	5.298	0.1512
Satisfaction	2.904	0.0938

Tableau 25 : Résultats des ANOVA visant déterminer si le fait d'avoir assisté à la formation avec l'une ou l'autre version des supports de formation fait varier significativement le score obtenu au questionnaire

Echelle	Moyenne	
	Avant	Après
Contenu de la formation	13.533	15.759

Tableau 26 : Moyenne des résultats obtenus en fonction de la version des supports de formation

Mis à part pour la sous-échelle « contenu de la formation », aucun des tests n'a mis en évidence de différences significatives dans les scores obtenus. De fait, nous pouvons uniquement en conclure que les modifications apportées à la formation ont augmenté de manière significative la moyenne des scores obtenus par les participants pour la sous échelle « contenu de la formation ». Cependant nous pouvons observer que l'échelle « action pédagogique » a une valeur de p de 0.0512. Il est alors envisageable qu'avec un plus grand échantillon, nous aurions pu obtenir des résultats significatifs.

Ici nous testons les effets des différentes versions du support utilisées lors des formations sur les scores obtenus par les participants aux différents items de l'échelle.

Item	Moyenne	Ecart-type	Skewness	Kurtosis
Cont1	3.338	0.659	-0.868	1.363
Cont2	3.119	0.892	-1.144	1.687

Cont3	2.61	1.067	-0.65	0.089
Cont4	2.864	0.973	-0.997	1.146
Cont5	2.694	1.038	-1.071	0.768

Tableau 27 : Caractéristiques de la distribution des scores obtenus par les apprenants à l'ensemble des items de la sous-échelle « contenus de la formation »

Echelle	F value	Pr(>F)
Cont1	2.795	0.1
Cont2	3.845	0.0548
Cont3	1.697	0.198
Cont4	3.596	0.063
Cont5	6.702	0.012*

Tableau 28 : Résultats des ANOVA visant à déterminer si le fait d'avoir assisté à la formation avec l'une ou l'autre version des supports de formation fait varier significativement le score aux items de la sous échelle « contenus de la formation »

Item	Moyenne	
	Avant	Après
Cont1	3.2	3.483
Cont2	2.9	3.345
Cont3	2.433	2.793
Cont4	2.633	3.103
Cont5	2.366	3.034

Tableau 29 : Moyenne des résultats obtenus aux items de la sous-échelle « contenus de la formation » en fonction de la version des supports de formation

Mis à part pour l'item « cont5 », aucun des tests n'a pu mettre en évidence des différences significatives dans les scores obtenus, nous pouvons donc en conclure que les modifications apportées à la formation ont augmenté de manière significative la moyenne des scores obtenus par les participants pour ce qui est de l'item « cont5 ». Cependant nous pouvons voir que les items cont4 et cont2 ont respectivement des p de 0.063 et 0.0548. Il est alors envisageable qu'avec un plus grand échantillon, nous aurions pu obtenir des différences significatives.

Intitulé	Codage	Description
Cont 1	0 à 4	Question : Les objectifs de cet enseignement étaient clairs
Cont 2	0 à 4	Question : Les supports utilisés étaient clairs
Cont 3	0 à 4	Question : J'ai l'impression d'avoir atteint les objectifs de cet enseignement
Cont 4	0 à 4	Question : A l'issue de ce TP je suis satisfait du résultat de mon travail.
Cont5	0 à 4	Question : Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP

Tableau 30 : Bible de codification de la sous-échelle « Contenus de la formation »

6.6.7 Syllabus optimisation topologique

A l'issue de ces différents tests, nous avons été en mesure de produire une fiche descriptive de la formation (figure 39). Cette fiche synthétise toutes les informations que nous avons produites durant les différentes phases du processus de création du module de formation (les tests nous ont permis de déterminer la durée du module de formation, de confirmer les livrables attendus ainsi que les outils utilisés et les GDFOI de la phase de conception nous ont donné les compétences attendues, le format d'évaluation de l'apprenant et les objectifs du module). Elle sera utilisée comme présentation des modules qui ont été créés par le biais de notre OI. Ces fiches ont été réalisées pour chacun des modules et ont été validées par les enseignants chercheurs en charge des modules de formation et par le comité de pilotage de TINA-M2P. Vous trouverez ci-dessous la fiche descriptive du module de formation en optimisation topologique qui a servi de modèle pour les autres :

Titre du module : 006 - Optimisation Topologique (+8h)

1. Objectifs du module

Durant le module, les étudiants devront réaliser, dans un premier temps, l'optimisation topologique d'une pièce composant le drone puis avec une approche inverse, un design génératif d'une structure complète d'un deuxième drone a partir de ses composants.

Compétences attendues à l'issue du module:

- Analyser des situations et des usages associés au système que l'on souhaite modéliser (Conditions limites ; cas de chargement)
- Formuler un problème de mécanique avec ses conditions limites et l'aborder de façon simple
- Mettre en place les conditions de fonctionnement de l'objet technique (identifier les surfaces fonctionnelles)
- Effectuer une simulation numérique
- Effectuer une Analyse critique des améliorations apportées

Liste des livrables :

- Pièce du drone optimisé
- Structure du drone optimisé

Recommandations pour l'évaluation de l'apprenant

Réalisation par l'apprenant d'une optimisation de pièces de drone

Liste des applications et outils 3DEXPERIENCE utilisés :



2. Réalisations techniques du projet

- 006 - Optimisation Topologique.pdf :
Support abordant l'optimisation topologique d'une pièce ainsi que des exercices pratiques. (Fichier format pdf de 18 pages)
- 006 - Design Génératif.pdf :
- Support abordant l'approche inverse afin de réaliser un design génératif a partir de composants et surfaces fonctionnelles d'un drone. (Fichier format pdf de 10 pages)

Figure 39 : *Fiche descriptive du module d'optimisation topologique*

Résumé

Dans cette partie nous avons pu élaborer notre questionnaire de satisfaction composé de trois sous-échelles, une sous-échelle de conditions de formations, une sous-échelle de contenus de la formation et une sous-échelle d'action pédagogique. Nous avons ensuite vérifié la consistance interne de l'échelle puis effectué une série d'analyses factorielles afin de voir si l'on retrouvait un facteur général de la satisfaction et si 3 facteurs d'ordre inférieur étaient présents et correspondaient aux items de nos sous-échelles afin de pouvoir les nommer.

Nous avons également réalisé une analyse thématique des commentaires que les apprenants ont émis en réaction aux questions de notre questionnaire de satisfaction lors d'un premier test en condition réelle de notre module d'optimisation topologique. Cette analyse thématique nous a offert des pistes d'amélioration de nos supports de formation.

À la suite de cette amélioration, nous avons effectué une nouvelle session de test du module de formation afin de voir si l'amélioration de nos supports de formation avaient eu ou non un effet sur les scores obtenus par les apprenants à notre échelle de satisfaction. Pour se faire nous avons réalisés une série d'ANOVA et nous nous sommes aperçus que des différences de scores significatives avaient été enregistrées pour ce qui est de l'item « Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP » de la sous-échelle « contenus de la formation ».

Partie 3

Discussion et conclusion générale

Chapitre 7 : Discussion

Comme précédemment énoncé, cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de création de formation sur plateforme spécifique. Ledit projet, TINA-M2P créé sous l'impulsion de deux organismes, la fondation de l'académie des technologies qui a obtenu des fonds provenant d'entreprises privées et l'IRT-M2P qui elle, a obtenu des fonds publics. Les projets soutenus par les IRT ne voient le jour que si 50% des fonds ont déjà été trouvés auprès d'un partenaire provenant du privé et si le projet présente un intérêt scientifique. Ainsi les deux partenaires devaient trouver un intérêt au projet TINA-M2P. L'intérêt du projet du point de vue de l'académie des technologies était la production de formations pouvant être utilisées dans le cadre de la formation d'étudiants ou de professeurs en génie mécanique mais aussi la création d'un partenariat entre une entreprise française et une université avec l'implantation de la plateforme 3Dexpérience de Dassault Système au sein de l'université de Lorraine. La visée de l'IRT-M2P étant à la fois applicative et scientifique, un projet de thèse a été financé dans ce cadre afin que soit développé un processus de création d'un support de formation sur plateforme numérique disposant d'une assise scientifique.

7.1 L'assise scientifique du processus de conception

Cette assise scientifique se base sur trois champs : l'ergonomie, la didactique professionnelle et l'ingénierie pédagogique. Dans les faits, le projet TINA-M2P ambitionne de créer un ensemble de formations au plus proche de l'activité réelle et s'adosse à la création d'un drone pour permettre aux apprenants d'aborder divers concepts et développer les compétences nécessaires à ce type de situation.

Afin de déterminer les opportunités de formation qu'offre la création d'un drone par le biais de la 3DExperience mais également les limites de la plateforme dans la réalisation de cette tâche, des stagiaires en fin d'étude en génie mécanique ont été sollicités afin de créer un drone en utilisant la 3Dexpérience et l'impression 3D (ce que nous appelons la primo-crétion du drone). Se baser sur l'activité réelle pour développer des supports de formation s'inspire de la didactique professionnelle. La didactique professionnelle distingue l'activité productive et l'activité constructive. L'activité productive est une activité qui permet à l'être humain de transformer le réel ; en parallèle, l'activité constructive a pour effet de modifier le travailleur lui-même. En somme le travailleur apprend de son travail, c'est pourquoi l'un des fondamentaux de la didactique professionnelle est que l'apprentissage est indissociable de l'activité (Pastré, 2006). Ainsi une analyse de l'activité réalisée par le stagiaire durant la primo création du drone a permis d'identifier les situations de référence permettant une activité constructive pour l'apprenant et ce, matière par matière. Rappelons que la création d'un drone requiert des connaissances dans de nombreux domaines (Ingenierie système, électronique, mécanique etc.). Ainsi, en s'appropriant les données issues de la primo conception, des spécialistes de ces différentes matières pourront se saisir de telle ou telle étape de la création du drone afin de disposer d'un support de formation pour leur spécialité. Pour rappel, la didactique professionnelle trouve ses origines à la croisée de quatre champs disciplinaires, l'ingénierie de formation, la psychologie ergonomique, la psychologie du développement et la didactique des disciplines. C'est pourquoi nous avons fait le choix de nous tourner également vers la psychologie ergonomique et l'ingénierie pédagogique afin d'élaborer notre méthodologie de création des formations.

7.2 Le développement d'un cadre théorico-méthodologique

Une caractéristique du projet TINA-M2P est de faire coopérer de nombreux professionnels provenant de disciplines différentes toutes participatives de la conception du drone. C'est pourquoi nous nous sommes référés à la notion d'objet intermédiaire afin de créer un objet qui facilitera les échanges et la coordination entre les différents acteurs du projet, en plus de cristalliser les points de vue des acteurs ayant modifié cet objet. En effet, chaque acteur qui modifie l'objet intermédiaire y laisse son empreinte, ses intentions de conception ainsi que la représentation qu'il avait des tâches à accomplir (Vinck, 2009).

L'objet intermédiaire a été développé sur la base des données recueillies auprès des stagiaires lorsqu'ils étaient en train de réaliser la primo-conception du drone. Pour formaliser les données recueillies, nous avons étudié les différentes méthodes de modélisation de l'activité existantes. Il nous a semblé pertinent de nous tourner vers les modélisations utilisées en IHM étant donné que l'outil principal utilisé par les stagiaires lors de la primo-création du drone était la 3DExp  rience. La finalité de l'utilisation de l'objet intermédiaire étant la création de formation, nous nous sommes tournés vers les méthodes de modélisation de type HTA.

En effet la méthode de modélisation HTA (formalisée par une arborescence hiérarchique des tâches) était initialement utilisée pour la création de formation (Couix, 2007). Nous avons trouvé 6 méthodes de modélisation directement dérivées de HTA et utilisées en IHM, CTT, GTA, MAD, MABTA HTA et CUA. Afin que l'OI soit une représentation fidèle de l'activité de création d'un drone tout en proposant un support permettant des interactions entre tous les acteurs du projet, nous avons fait le choix d'utiliser une modélisation de type MAD. En effet, des modélisations comme GTA, MABTA et CUA proposent de représenter l'activité au moyen de différents types de diagrammes. Cette multiplicité de représentations multiplie également la complexité de l'OI ce que nous voulions absolument éviter étant donné que l'OI devait faciliter les échanges entre professionnels d'horizons différents. Pour ce qui est de HTA et de CTT, ils sont l'un et l'autre aux antipodes en termes de complexité de leur arborescence hiérarchique des tâches. D'un côté CTT propose pas moins de 8 connecteurs temporels et 4 types de tâches différentes ce qui dans le cas de la création du drone aurait engendré une complexité de la modélisation qui nous aurait desservi. De l'autre côté la méthode HTA avec son système de plan est, elle, trop simpliste et ne permet pas de rendre compte des liens qui unissent les tâches. Enfin seule la méthodologie MAD permet par le biais de ses éléments de description des tâches, de créer des fiches riches et ce pour chacune des tâches. C'est pourquoi nous avons choisi la méthode de modélisation MAD pour formaliser notre objet intermédiaire.

La modélisation de l'activité a permis aux décideurs du projet d'établir sur la base de leurs connaissances académiques que l'activité de création du drone pouvait faire l'objet de 8 modules de formation portant sur différentes matières. Des groupes de discussion focalisée médiatisés par l'OI et le psychologue ergonome ont été réalisés afin de déterminer quelles situations de référence pourraient être traduites en situation de simulation afin de permettre l'acquisition de compétences dans lesdites matières (pour rappel : les situation de travail permettant de développer des compétences et si ces dernières sont visées par le processus de formation, on parle alors de situations de référence médiatisées par les situations de simulation soumises aux apprenants). Enfin, sur la base des données que nous avons recueillies grâce à ces groupes de discussion focalisée, les supports de formation ont été créés. Pour le développement de ces supports de formation, nous nous sommes référés à l'ingénierie de formation et aux nombreux modèles qu'elle propose pour créer des formations efficaces. Nous avons comparé les principaux modèles de l'ingénierie pédagogique afin de déterminer celui qui serait le plus pertinent relativement à notre approche. Comme le projet avait pour but de développer des formations au plus proches de l'activité réelle par le biais de la réalisation d'une tâche complexe (créer un drone), nous nous sommes naturellement tournés vers le modèle 4C/ID. Ce modèle est adapté à l'apprentissage de tâches complexe. Les modules de formation TINA-M2P proposent un format hybride comportant une partie cours dispensée par les enseignants, suivie d'une partie pratique où les enseignants proposent aux étudiants en mode projet, de concevoir un drone à partir de la plateforme en relative autonomie. Les informations et connaissances transmises durant le cours fournissent aux apprenants des informations de support. Ces informations concernent les explications sur l'organisation du domaine concerné et sur les tâches à réaliser pour le comprendre. Les informations procédurales et les exercices pratiques permettent aux apprenants de créer le drone en relative autonomie – relative, dans le sens où les enseignants sont présents durant la partie pratique et peuvent intervenir pour rappeler des connaissances, informations transmises durant la partie CM.

Nous pouvons voir que ces 3 champs (ergonomie, didactique professionnelle et ingénierie pédagogique) sont complémentaires et que la didactique professionnelle articule parfaitement tant d'un point de vue théorique que d'un point de vue pratique l'ergonomie et l'ingénierie pédagogique.

7.3 Un processus de conception intelligible et partageable

Il est à noter que ce processus de conception est partageable. En effet, ce projet a nécessité le concours d'une multitude d'acteurs, notamment lors de la tenue des groupes de discussion focalisée et des simulations de formation. Cependant seul le psychologue et le créateur des contenus pédagogiques qui endossait également le rôle d'expert en 3DExpérience étaient responsables de l'analyse de la primo-conception, de la création et de la modification de l'objet intermédiaire, de la tenue des groupes de travail ainsi que de la création et de l'amélioration des formations. Il s'est avéré que bien que n'étant pas originaire d'une filière d'ergonomie ou de psychologie, l'ingénieur d'étude qui a collaboré s'est approprié la méthodologie. Sensible à ce qui se jouait notamment lors de groupes de discussion focalisée, il intervenait de manière pertinente et pouvait aller jusqu'à animer lui-même les groupes de discussion focalisée. En effet, certains modules ayant été conçus durant la phase de rédaction de cette thèse, c'est l'ingénieur d'étude qui s'est chargé, avec le concours des enseignants de déterminer les situations de référence en utilisant l'OI et les informations qu'il contenait. Nous avons tout de même validé les modifications apportées à l'objet intermédiaire lors de ces groupes de travail et les modules de formation testés auprès d'apprenants.

7.4 Les modules développés

Nous n'avons abordé dans cette thèse que le cas du module d'optimisation topologique, cependant il faut rappeler que durant ce projet, cette méthodologie a abouti à la création de 7 modules de formation qui ont tous été validés par le comité de pilotage, par les enseignants chercheurs provenant du LEM3, du 2LPN, de l'ESPE, du LCOMS, de l'IRT-M2P, de l'InSIC ou de l'ENSGSI ainsi que par ingénieurs de chez ALTRAN, DITEX, de la fondation de l'académie des technologies ou de chez DASSAULT SYSTEME qui ont participé au projet. Ainsi pour chaque module, est précisé le matériel nécessaire (par exemple pour le module d'optimisation topologique, un modèle 3D d'un bras non optimisé est proposé), un syllabus décrivant les tâches que devra accomplir l'apprenant, la durée du module ainsi que les outils utilisés.

Les différents modules vont également être intégrés à la plateforme 3DExpérience de l'université de Lorraine pour qu'ils puissent être utilisés dans le cadre de formation en IUT ou en Licence/Master génie mécanique. Il est également prévu de profiter du fait que la plateforme soit internationale pour diffuser les formations TINA-M2P dans d'autres pays, c'est pourquoi, l'ensemble des formations proposées a été traduit en anglais. Il sera également possible pour des établissements n'étant pas équipé de machines à fabrication additive mais possédant tout de même des licences 3DExpérience, de bénéficier de formations. De plus étant donné que les modules de formation ont été créés sur la base de l'activité de stagiaires construisant un drone de la création du cahier des charges à l'envol effectif du drone, les formations que nous avons créées recouvrent l'ensemble du processus de fabrication d'un drone. Les enseignants ont ainsi la possibilité de proposer la création du drone en entier dans le cadre d'un projet à visée pédagogique ou d'exploiter seulement une partie du drone dans le cadre d'un module de formation si le format pédagogie par projet ne leur convient pas.

7.5 Un processus de conception itératif base sur une méthode de gestion de projet

La méthodologie de création de formation que nous avons proposée se base sur une méthode de gestion de projet en trois étapes (analyse du travail, simulation, accompagnement) utilisée en ergonomie de l'activité (Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013). En effet nous avons analysé l'activité de création de drone par des stagiaires afin de la modéliser. Nous avons ainsi pu créer des formations que nous avons ensuite testées lors de simulations auprès des apprenants. Les données recueillis lors de l'évaluation de ces simulations ont ensuite été soumises aux concepteurs des formations à des fins de modification. Cette méthodologie ayant pour origine l'ergonomie de l'activité - adaptée, dans notre cas, à la création de formation, - comporte beaucoup de ressemblance, avec un modèle issu de l'ingénierie pédagogique, le modèle ADDIE (Gustafson & Branch, 2002). ADDIE est un modèle de conception de dispositifs pédagogiques en 5 étapes qui sont, à l'instar de la méthodologie que nous avons développée, successives et itératives :

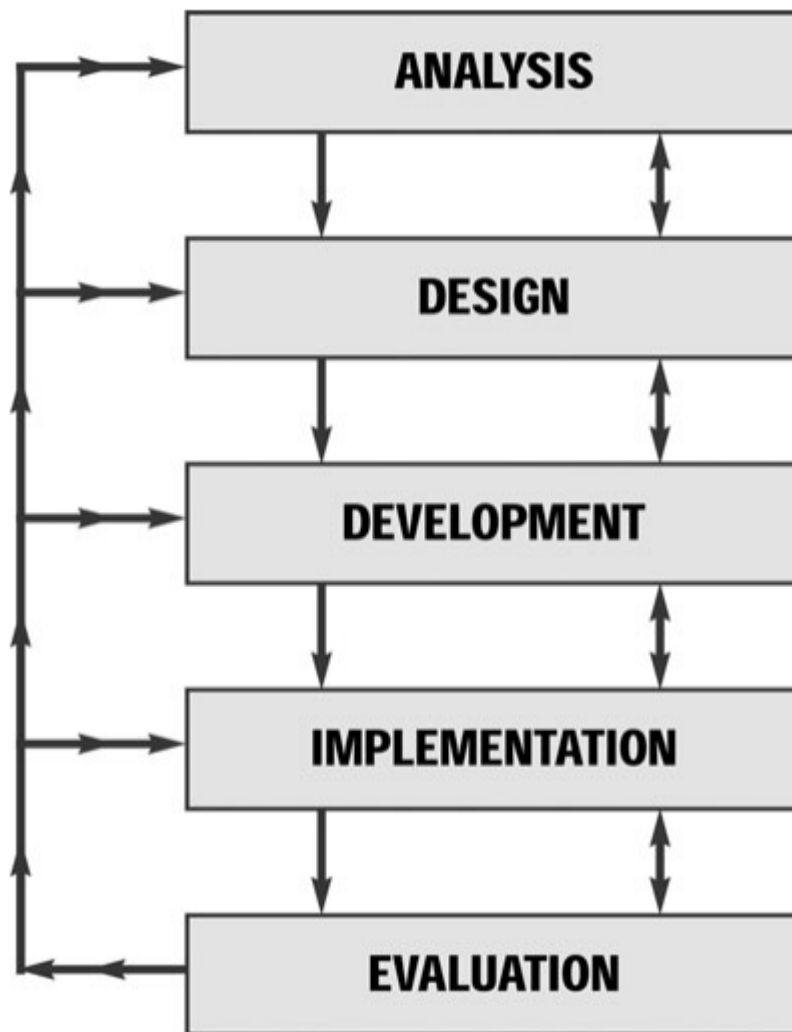


Figure 40 : Schématisation du modèle ADDIE (Molenda, 2003)

- Analyse : phase qui consiste à identifier tous les éléments permettant d’orienter la conception du dispositif de formation.
- Design : phase où sont spécifiés les objectifs de la formation, son architecture et tout ce qui a trait à la stratégie (mode de diffusion etc.).
- Développement : phase qui consiste à construire les outils et médias définis lors de la phase de conception.
- Implantation : renvoie à la phase où les apprenants ont accès au dispositif qui a été créé, c’est à ce moment-là que sont gérés les aspects pratiques de la formation.
- Evaluation : phase qui consiste à évaluer le dispositif sur 3 niveaux : ce que les apprenants ont appris, comment la formation a été perçue, quelles sont les retours

sur investissement (reprenant les 4 niveaux de la méthode d'évaluation de Kirkpatrick (2007)).

On peut voir que la phase d'analyse peut être comparable aux étapes « travail/observation » et « entretiens/modélisation » car elles partagent un même objectif, celui de fournir des éléments aux concepteurs de la formation afin qu'ils puissent prendre des décisions. La phase de design correspond à notre phase de « GT/Conception » où nous avons délimité les objectifs de notre formation. La phase de Développement correspond à l'étape de « création des supports du projet » TINA-M2P où nous avons donné corps aux idées qui sont nées lors de la phase de conception. Enfin les étapes Implantation et Evaluation rappellent la phase « Simulation/Evaluation » où les formations sont testées puis évaluées. Ces similitudes dans les structures de ces deux méthodologies et le fait que ADDIE soit l'un des modèles les plus utilisés en ingénierie pédagogique nous amène à penser qu'une méthodologie issue de l'ingénierie pédagogique n'est pas incompatible avec une approche en ergonomie participative centrée sur l'apprenant.

7.6 L'évaluation à des fins d'amélioration

Dans le cadre de cette recherche, l'évaluation de la satisfaction des apprenants à l'issue de la formation a débouché sur des résultats intéressants. En effet nous avons pu effectuer une première série de tests qui nous a par la suite permis d'améliorer nos supports de formation puis une autre série de tests avec les nouveaux supports. Ceci nous a permis d'effectuer des comparaisons avant/après par le biais des scores obtenus par les apprenants à notre échelle de satisfaction. Cependant, en raison de la pandémie, les tests n'ont pu être réalisés que sur un nombre restreint d'individus, il n'en reste pas moins que des différences significatives ont été observées. En effet, même si nos résultats de l'évaluation du dispositif ne révèlent pas de différences significatives dans les scores obtenus à l'échelle générale de satisfaction, nous pouvons voir qu'il y a eu un effet positif pour ce qui est de la sous-échelle « contenu de la formation ». Si l'on regarde plus précisément les réponses aux questions on peut voir que les réponses à l'énoncé « Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP » ont été bien plus positives suite aux modifications apportées à notre module de formation en optimisation topologique. Selon le modèle 4C/ID nous avons apporté des modifications aux informations procédurales. Ces modifications sont basées sur les commentaires que les apprenants ont produits en réaction aux énoncés de notre questionnaire de satisfaction.

En substance ces modifications avaient pour but de permettre à l'apprenant de se repérer plus facilement sur la plateforme en ajoutant un des éléments de l'interface utilisateur de la plateforme à toutes les planches de nos supports pédagogiques. Nous avons également diminué le nombre d'éléments présents sur les planches afin de les rendre plus visibles. Dans le modèle 4C/ID, la notion de charge mentale est centrale ; aussi, dans cette optique, les modifications que nous avons apportées ont pu diminuer la charge cognitive intrinsèque⁶ ce qui a permis aux apprenants de réaliser plus facilement les tâches d'apprentissage. Cette diminution de la charge cognitive a pu accentuer le sentiment d'efficacité perçu par les apprenants ce qui expliquera les meilleurs résultats obtenus au questionnaire de satisfaction par les apprenants ayant suivi la formation avec des supports améliorés. Ainsi sur la base des commentaires obtenus grâce aux questionnaires de satisfaction nous avons pu apporter des modifications à nos supports pédagogiques qui ont permis de réduire la charge cognitive de l'apprenant en situation de formation. Cette diminution a été décelée malgré le faible effectif de notre échantillon.

Du fait de la pandémie nous avons également été contraint de nous contenter de la première phase d'évaluation ainsi nous n'avons pu améliorer notre support de formation car dans l'impossibilité d'en mesurer l'impact au niveau des apprentissages effectifs des apprenants. A cette fin il était prévu de réaliser d'autres tests qui auraient donné lieu à une analyse de l'activité des apprenants afin de déterminer les apprentissages qui auraient pu avoir lieu et renseigner les compétences développées par les apprenants. La pandémie nous a purement et simplement privé de notre matériel et nous n'avons pas pu mener à bien nos investigations

⁶ La charge cognitive intrinsèque est liée à la réalisation de la tâche d'apprentissage et au traitement cognitif du support de celle-ci. Elle correspond à toutes les informations qu'il faut traiter pour apprendre (Bellec & Tricot, 2012).

7.7 La posture du psychologue ergonomiste

Dans le cadre de ce projet, nous avons également participé à une étude visant à mieux comprendre l'activité du psychologue ergonomiste lorsqu'il anime des groupes focalisés avec objet intermédiaire. Cette étude comparative a porté sur quatre études de cas (dont la nôtre) choisies pour leur diversité relativement notamment aux caractéristiques de leur OI (Saint-Dizier de Almeida & al, 2022).

De cette étude comparative et en référence à la littérature, il ressort que l'OI mobilisé pour notre étude a pour caractéristiques d'être marqué par une grande incomplétude. Aussi, si les autres objets sont formalisés dans un langage commun ou un langage expert partagé par les membres des GDF, nous concernant, un langage commun est à développer.

Aussi, nous avons pu voir dans le cadre de cette étude (Saint-Dizier de Almeida & al, 2022) que les caractéristiques des OI avaient une influence sur les comportements des ergonomistes qui les utilisaient dans le cadre des GDF. Dans notre cas, l'OI étant marqué par une très grande incomplétude et le langage commun étant à construire, l'ergonomiste a été conduit à créer un espace intersubjectif et à mobiliser des compétences nécessaires à l'intercompréhension comme « comprendre » et « se faire comprendre », comme nous avons pu le voir dans la partie 6.4.3.7. de ce manuscrit. Cependant, dans le cadre du Projet TINA-M2P, l'OI revêt également un aspect participatif. En effet l'OI lors de la réalisation de ces GDF avait déjà été modifié une première fois par les stagiaires. Afin que les données recueillies auprès des stagiaires soient considérées lors des prochains GDF, le psychologue ergonomiste est amené en GDF à représenter les stagiaires dont la participation à l'élaboration de l'OI est achevée et parfois à aller à l'encontre du collectif d'experts en rappelant la façon dont les tâches qui ont été effectivement effectuées par les stagiaires.

pUM 183 ouais mais là ce qu'on vient d'évoquer c'est ce qu'ils ont mis dans le 4 reconstruire le modèle (se réfère à la modélisation) c'est ça ?

pUP 249 non non on y est pas encore

pUM 184 ouais mais ce dont on vient de parler c'est ça c'est le 4

pUP 250 mais là on a fait le calcul qu'est ce qu'il fait ?

pUM 185 bah il te propose une forme

gP 163 alors de ce que je me souviens quand ils ont fait le truc, c'est genre ils ont fait leur scénario de modélisation, et en fait là tu as la pièce qui apparaît avec des parties en vert en bleu en rouge en jaune et en fait ce qu'ils disent c'est moi je veux pas que ça dépasse le rouge parce que le rouge c'est le point de déformation où ça ne revient plus en position et le pourcentage c'est comme ça qu'ils l'ont choisi. Enfin c'est ça qu'ils entendaient par faire le calcul

gUM 186 donc en gros le calcul il te donne comme je le disais au début c'est les variables de conception c'est de la pseudo densité où tu dis je mets de la matière ou je mets pas de la matière

pP 164 voilà voilà c'est ça

pUM 187 la densité c'est pas quelque chose de variable entre 0 et 1 à un point dans l'espace tu peux pas mettre 0.5 c'est à dire moitié matière moitié pas matière donc tu dois placer ton curseur à un endroit et du coup tu as une petite liberté sur le résultat de ton optimisation. donc au début tu as fait ce choix là après tu peux passer au 4 mais je sais pas du coup le 3 qu'est ce que c'est comparer les modèles de calcul parce que pour moi quand tu fais de l'optimisation tu c'est t'as une solution unique pour tous les cas de chargement

pP 165 alors en fait ils effectuaient plusieurs fois l'optimisation par exemple il faisait plusieurs fois l'optimisation avec les mêmes paramètres parce que parfois les résultats variaient enfin c'est ce qu'il m'expliquait et du coup ensuite il choisissait celui qui réagissait le mieux mais après je ne sais pas si c'est vraiment nécessaire ça

pUM 187 ok

pP 166 (se réfère à la fiche de la tâche calcul) regarde il s'agira de dupliquer le modèle de calcul obtenu lors des étapes une fois obtenu ce modèle sera soumis à un scénario de simulation différent de ceux déjà appliqués les données recueillies à partir de la validation du modèle

pUM 188 ok bah là du coup quand il dit scénario de simulation différents, c'est cas de chargement différent ?

pP 166 euh je ne sais pas

pUP 251 nan nan c'est c'est ouais moi je reprends le document

pUM 189 pour moi l'optimisation c'était pour tous les cas de chargement

pD 101 euh oui c'est comme ça je pense

pUP 252 oui pour tous les cas de chargement oui

pUM 190 oui ça veut dire que tu as un résultat pour tous les cas
pD 102 moi je pense qu'il a dû prendre un truc d'un cas de chargement puis d'un autre
pUM 191 pour créer un truc hybride entre les deux
pD 103 oui qui n'arrive pas forcément
pUP 253 non je pense que tu as un résultat par cas de chargement
pUM 192 oui mais la pièce que tu produis elle est unique comment tu fais pour choisir
gD 104 là j'en vois 3
pUM 193 selon les cas de chargement tu dois avoir des solution optimales différentes et si
c'est incompatible comment tu fais ?
pUP 194 parce que quand tu fais un scénario il te fait un optimisation il te donne une forme
comme ça ensuite tu fais un deuxième scénario il t'en fait un autre une troisième pareil il y a
aucune connexion entre les trois on est tout à fait d'accord et donc une solution obtenue ne
répond pas forcément aux autres cas de chargement

Dans cette séquence on peut voir qu'à partir du tour de parole pUM 184, le collectif estime que la phase de calcul est terminée et qu'il est souhaitable de passer à la tâche suivante. Afin de montrer qu'il y a une étape qui a été oubliée, le psychologue ergonomiste apporte des informations au collectif en gP 163. En pUM 187 l'expert explique que la partie en question est inutile ce qui amène le psychologue ergonomiste à utiliser les informations contenues dans l'OI en pP 166 afin de justifier du bienfondé de l'étape en question. Le désaccord est résolu en pUP 194 quand le deuxième expert démontre que l'étape est cohérente. Ainsi le psychologue ergonomiste en se référant aux données qu'il a recueillies dans le cadre de l'analyse de l'activité réelle a également contribué à l'enrichissement de l'OI.

7.8 Une recherche action inscrite dans le courant de l'ergonomie participative

La paternité du terme recherche action est attribué au psychologue allemand Kurt Lewin (1946) qui a avancé l'idée que des avancées théoriques pouvaient être réalisées en même temps que des changements sociaux. L'auteur décrivait la recherche action comme une spirale où le chercheur passe d'une description de l'existant vers un plan d'action (Catroux, 2002). La recherche que nous avons effectuée dans le cadre du projet TINA-M2P correspond à cette définition étant donné que c'est à partir de l'observation de l'activité réelle des stagiaires que nous avons pu élaborer un OI qui nous a permis ensuite de développer une méthodologie de création des formations du projet TINA-M2P. Pour les besoins de cette méthodologie nous avons élaboré un cadre théorico-méthodologique qui nous a permis de mettre en évidence les liens étroits qui étaient entretenus entre l'ergonomie, la didactique professionnelle et l'ingénierie pédagogique. De plus afin de pouvoir répondre de la manière la plus appropriée aux exigences du projet TINA-M2P, nous avons fait le choix d'adopter une approche d'ergonomie participative. Comme l'ont montré Daniellou (1987) et Daniellou et Garrigou (1992), le point d'orgue d'une démarche d'ergonomie participative confronte les représentations du travail qu'ont les opérateurs et les concepteurs afin de définir les nouvelles situations de travail. Cette méthodologie a été appliquée à toutes les étapes du projet.

La définition des différents modules de formation est issue d'une négociation entre la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage sur la base des données recueillies lors de la primo-crédation du drone. Le contour des modules de formations est également issu d'une négociation entre les concepteurs des modules de formation et les créateurs ces derniers. Enfin bien qu'il n'ait pas été possible d'intégrer directement des étudiants lors de la phase de création des modules de formation, il n'en reste pas moins que les données qui ont été utilisées lors de la conception et de la création des formations étaient issues de l'activité réelle d'étudiants lors de leur stage de fin d'étude. De plus des évaluations ont été réalisées afin de permettre aux apprenants de nous fournir des feed-back quant aux formations produites.

7.9 Les interactions entre l'OI et l'ergonome

Durant cette recherche nous avons également pu observer que l'ergonome avait un effet sur la nature de l'OI mais également de l'OI avait eu une influence sur la posture de l'ergonome.

En effet, nous avons créé un OI durant la phase d'observation, mais de par notre posture et les modifications que nous lui avons apporté au fur et à mesure du projet il a pu devenir le support des échanges entre professionnels provenant de champs différents. Ils ont pu créer un langage commun et l'ont insufflé dans l'OI modifiant peu à peu sa nature d'OI pour le transformer en objet frontière. Ainsi, le travail collectif et la posture de l'ergonome ont permis à notre objet, d'abord conçu comme objet intermédiaire de muter en objet frontière support des interactions entre plusieurs mondes tout gardant les codes de l'arborescence hiérarchique des tâches.

Il est également à noter que l'objet intermédiaire que nous avons créé nous a permis d'être médiateurs de personnes ne participant plus au projet mais dont le travail transparaissait dans l'OI. En adoptant cette posture de médiateur, l'ergonome a pu rendre intelligible les données que ces personnes ont insufflées dans l'OI. Ainsi nous avons, durant les GDFOI de conception des modules de formation, pris le parti des étudiants et pu faire entendre leur point de vue peut être même de manière plus efficace qu'eux-mêmes l'auraient fait car nous leur avons évité d'être soumis aux mécanismes d'influence (Statut d'expert de l'enseignant chercheur par rapport aux stagiaires). Ainsi l'OI a influencé notre posture en tant que participant au groupe de discussion focalisée.

Chapitre 8 : Conclusion

Ce travail de thèse a pris la forme d'une recherche action inscrite dans le cadre du projet TINA-M2P. Les financements proposés par les organisations de type IRT favorisent l'émergence de projets de recherche action. Dans ce cadre, nous avons proposé une méthodologie de création de formations sollicitant des principes provenant de l'ergonomie, de la didactique professionnelle et de l'ingénierie pédagogique et ce tout au long du processus de création. L'utilisation de méthodologies issues de l'ergonomie participative telles que les groupes de discussion focalisée, l'utilisation d'objets intermédiaires nous a davantage engagé dans une recherche action, qu'une recherche intervention.

L'une des particularités du processus de conception que nous avons proposé dans le cadre de TINA-M2P réside également dans sa mise en œuvre. En effet à chacune des étapes du projet, les objectifs n'étaient pas présentés de manière abstraite aux participants, mais comme un but à atteindre en termes de transformation de l'objet intermédiaire. Ainsi à l'issue de la primo-crédation le but était que l'OI soit une représentation fidèle de l'ensemble des tâches réalisées dans le cadre de la création du drone.

Les personnes en charge de la création du drone n'étant pas ergonomes, nous avons créé une ébauche de la modélisation qui a ensuite été complétée par les stagiaires en charge de la primo-crétion du drone. Ensuite, la phase de conception mobilisant les enseignants chercheurs, le psychologue ergonomiste et l'expert en 3DExpérience a permis d'isoler les situations de référence et d'aboutir à des consensus – ie. des solutions négociées entre la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre. Lors de la phase de création des formations, le but était de créer les supports pédagogiques permettant à l'apprenant de réaliser l'ensemble des tâches sélectionnées en amont. Le but de cette démarche était de réduire le niveau d'abstraction des objectifs du projet afin de réduire le nombre d'interprétations possibles et donc les confusions qui auraient pu altérer l'emploi de la plateforme par les apprenants. Il est probable que cette méthodologie soit applicable à d'autres plateformes, pourvu que ces dernières soient utilisées dans le cadre d'une activité professionnelle qui sera l'objet de la modélisation et qu'elles aient suffisamment d'outils à disposition pour couvrir l'ensemble de tâches effectuées lors de la réalisation de l'objet au centre des modules de formation.

Du fait de la crise sanitaire qui nous a frappés en 2020 et 2021, nous n'avons pu complètement tester nos modules de formation. Seule une évaluation des réactions a été effectuée. Bien qu'elle nous ait permis une première amélioration de la forme de nos supports pédagogiques, nous n'avons pas pu tester les acquisitions des apprenants. Pour se faire, il était prévu de soumettre les apprenants à un cas concret d'optimisation topologique d'une pièce et de produire un rapport qui aurait été évalué par l'enseignant chercheur responsable du module de formation.

Le dispositif d'évaluation des compétences a été développé, mais comme déjà mentionné, n'a pas pu être mis en œuvre. Pour définir la notion de compétence, nous nous sommes inspirés d'une définition issue de la didactique professionnelle proposée par Coulet en 2011 ; selon elle, une compétence est « *une organisation dynamique de l'activité, mobilisée et régulée par un sujet pour faire face à une tâche donnée, dans une situation déterminée* » (Coulet 2011). Afin d'opérationnaliser cette définition de compétence, Coulet propose le modèle d'analyse dynamique pour la description et l'évaluation des compétences (MADDEC). Ce modèle, à l'instar de la théorie de la conceptualisation dans l'action, se base sur la notion de schème et de double régulation de l'activité.

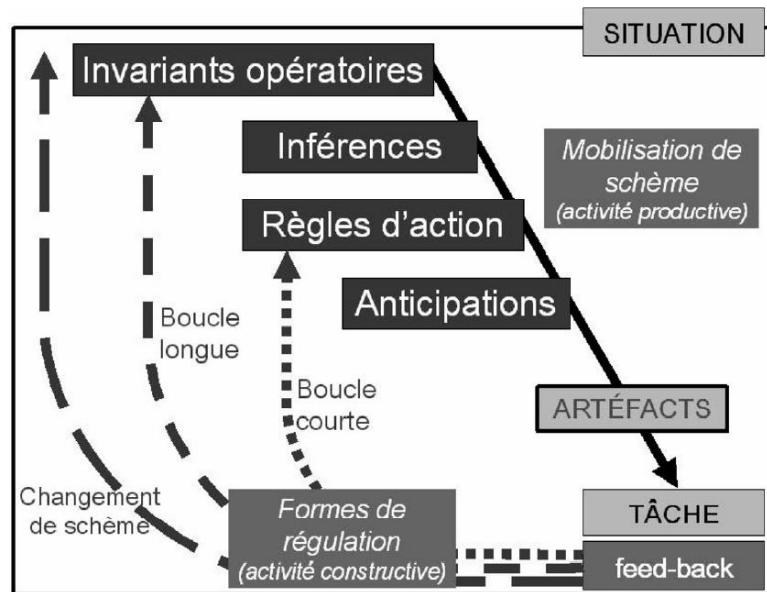


Figure 41 : Illustration du modèle MADDEC (Coulet 2011)

Ce modèle est composé de 4 éléments principaux. Le schème (composé des invariants opératoires, des inférences, des règles d'action et des anticipations), la situation, les artefacts⁷ et la tâche. Le schème est mobilisé pour le traitement d'une tâche et dans une situation déterminée via un ou plusieurs artefacts. Les composants du schème assurent la réalisation ajustée aux caractéristiques spécifiques de la situation et de la tâche. Ceci constitue l'activité productive de la compétence.

Confronté à la tâche, l'individu effectue trois types de régulation sur cette activité productive. Ces régulations constituent l'activité constructive de la compétence et permet l'ajustement du schème à la situation et à la tâche.

- La régulation en boucle courte qui a un effet sur les règles d'action. Elle affine et augmente l'efficacité de la règle d'action ou entraîne l'élaboration de nouvelles règles ou la reconstruction de règles existantes si ces dernières n'étaient pas efficaces.
- La régulation en boucle longue qui augmente le degré de vérité des invariants opératoires ou amende ces derniers s'ils sont jugés non pertinents.

⁷ En ergonomie, un artefact est un produit conçu par l'homme voué à être utilisé (Rabardel, 1995).

- Le changement de schème qui conduit le sujet à reconsidérer son activité dans son ensemble et pas seulement les ingrédients mobilisés lors de sa mise en œuvre.

De plus dans cette même étude, l'auteur montre qu'en fonction de leur niveau de compétences dans la réalisation d'une tâche, les personnes ne sollicitent pas les mêmes éléments du schème afin de décrire ce qu'ils ont effectué. En effet un novice utilisera des éléments provenant des règles d'action tandis que des individus experts eux utiliseront des éléments provenant des invariants opératoires afin de décrire leur activité. Ainsi dans le cadre de TINA-M2P il aurait été intéressant de déterminer les éléments ayant trait aux règles d'action et ceux ayant traités aux invariants opératoires pour chacune des tâches réalisées lors des situations de simulation. Pour se faire il faudrait former les experts en leur expliquant les concepts de schème, d'invariant opératoire, de règle d'action et d'inférence pour qu'ils puissent sur la base des données contenues dans l'objet intermédiaire extraire les différents composants du schème. Un fois ces éléments dégagés nous aurions pu fournir aux enseignants chercheurs une grille de lecture qui leur aurait permis d'évaluer le degré d'acquisition des compétences de chaque apprenant pour chacune des tâches à réaliser durant la formation. Ainsi, dans le cadre d'une évaluation où l'apprenant fournirait un compte rendu de ce qu'il a fait, l'acquisition des connaissances seraient sanctionnées par la qualité de l'écrit et l'intégration du schème (et donc les compétences) pourrait être estimé par le biais de la grille de lecture appliquée au document.

Bibliographie

- Adams, A., & Cox, A. L. (2008). Questionnaires, indepth interviews and focus groups. In P. Cairns et A. L. Cox (Dirs.), *Research Methods for human-computer interaction* (pp. 17-34). New-York : Cambridge University Press.
- Agan, J., Koch, L. J., & Rumrill Jr, P. D. (2008). The use of focus groups in rehabilitation research. *Work*, 31, 259-269.
- Annett, J., & Duncan, K. D. (1967). Task analysis and training design. *Occupational Psychology*, 41,211-227.
- Barcellini, F. (2015). *Développer des interventions capacitanes en conduite du changement. Comprendre le travail collectif de conception, agir sur la conception collective du travail.* [Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bordeaux], Bordeaux.
- Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développements des activités. In Falzon Pierre (Dir.). *Ergonomie constructive* (pp. 191-206). Paris : PUF
- Basque, J. (2017). *Ingénierie pédagogique et technologies éducatives* [texte rédigé pour le cours en ligne TED 6312 Ingénierie pédagogique et technologies éducatives]. Montréal : TELUQ. Récupéré le 11 mars 2022 de : https://ted6313v2.telug.ca/telugDownload.php?file=2014/04/19_TED6313_Texte_Intro_IP.pdf
- Bastien, J. M. C., & Scapin, D. L. (2001). Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception : l'approche MAD. C. In Kolski (Dirs.), *Systèmes d'information et interactions homme-machine. Environnements évolués et évaluation de l'IHM. Interaction homme-machine pour les SI*, (pp. 85-116), Paris : Hermes.
- Beech, B. & Leather, P. (2006). Workplace violence in the health care sector : A review of staff training and integration of training evaluation models. *Agression and Violent Behavior*, 11(1), p. 27-43.
- Beguin, P. (2007) Innovation et cadre sociocognitif des interactions concepteurs-opérateurs : une approche développementale. *Le Travail Humain*, 70(4), 369-390.

- Béguin, P. (2013). La conception des instruments comme processus dialogique d'apprentissages mutuels. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie constructive* (pp. 147-160). Paris : Presses Universitaires de France.
- Bellec, D., & Tricot, A. (2012). From isolated interacting element effect to part-whole effect ? *5th International Cognitive Load Theory Conference, Thallahassee*, 9-11 April.
- Bellemare, M., Marier, M., Montreuil, S., Allard, D., & Prévost, J. (2002). *La transformation des situations de travail par une approche participative en ergonomie : une recherche intervention pour la prévention des troubles musculo-squelettiques*. Études et recherches, Rapport IRRST, Montréal. Disponible sur : http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_824.html
- Berthiaume, D., & Sylvestre, E. (2012). *Guide d'interprétation des résultats de l'évaluation d'un enseignement*. Centre de soutien à l'enseignement (cse), Université de Lausanne. En ligne http://pedagogieuniversitaire.files.wordpress.com/2013/03/unil-cse_guide_interpretation_resultats_evaluation_v20121003.pdf
- Boccaro, V., Vidal-Gomel, C., & Rogalski, J. (2018). Analyse multiniveaux de l'activité de médiation des formateurs. In C. Vidal-Gomel & I. Vinatier (Éds.), *Analyse de l'activité : perspectives pour la conception et la transformation des situations de formation* (pp. 117-132). Rennes : Presses Universitaires de Rennes
- Bocquillon, M., Derobertmeasure, A., Demeuse, M., Kozłowski, D., & Artus, F. (2014). *Évaluation des enseignements par les étudiants : que nous disent les commentaires écrits des étudiants ?* [Conférence]. 28e Congrès de l'Association internationale de Pédagogie universitaire (AIPU), Pédagogie universitaire : entre recherche et enseignement, Mons, Belgique.
- Boutin, G. (2007). *L'entretien de groupe en recherche et formation*. Montréal : Éditions Nouvelles.
- Broberg, O., Andersen, V., & Seim, R. (2011). Participatory ergonomics in design processes: The role of boundary objects. *Applied Ergonomics*, 42(3), 464-472.
- Buchmann, W., & Landry, A. (2010) Intervenir sur les TMS. Un modèle des troubles musculo-squelettiques comme objet intermédiaire entre ergonomes et acteurs de l'entreprise. *@ctivités*, 7(2).
- Caens-Martin, S. (1999). Une approche de la structure conceptuelle d'une activité agricole : la taille de la vigne. *Éducation permanente*, 139, 99-114.

- Caens-Martin, S. (2005). « Chez moi on fait pas comme ça » : contribution de la didactique professionnelle à l'analyse du travail enseignant dans le guidage de l'expression de l'expérience vécue en entreprise par les apprentis. Actes des journées internationales sur l'information et l'éducation scientifiques. Chamonix.
- Caens-Martin, S., Specogna, A., Delépine, L., & Girerd, S. (2004). Un simulateur pour répondre à des besoins de formation sur la taille de la vigne, *Revue STICEF*, 11(1), 1-13.
- Caroly, S., & Barcellini, F. (2013). Le développement de l'activité collective. In P. Falzon (Dir.), *Ergonomie constructive* (pp. 33-46). Paris : Presses Universitaires de France.
- Catroux, M. (2002). Introduction à la recherche-action : modalités d'une démarche théorique centrée sur la pratique. *Cahiers de l'APLIUT*, 11(3), 8-20.
- Cole, M. (2009). Using Wiki technology to support student engagement: Lessons from the trenches. *Computers & education*, 52, 141-146.
- Conceição, C., Silva, G., Broberg, O., & Duarte, F. (2012). Intermediary objects in the workspace design process: means of experience transfer in the offshore sector. *Work*, 41, 127-135.
- Couix, S. (2007). Usages et construction des modèles de tâches dans la pratique de l'ergonomie : une étude exploratoire. [Mémoire de master Sciences de l'information et de la communication, CNAM Paris]. DUMAS
- Coulet, J.-C. (2011). La notion de compétence : un modèle pour décrire, évaluer et développer les compétences. *Le travail humain*, 74(1), 1-30.
- Coulet, J.-C. (2016). Les notions de compétence et de compétences clés : l'éclairage d'un modèle théorique fondé sur l'analyse de l'activité. *Activités*[En ligne], 13(1).
- Daniellou, F. (1987). Les modalités d'une ergonomie de conception, son introduction dans la conduite des projets industriels, *Note documentaire* ND 1647-129-87, Paris : INRS.
- Daniellou, F. (2004). L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. In P. Falzon, *Ergonomie* (pp. 359-373). Paris : PUF
- Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activités*, 4 (2), 77-83.
- Daniellou, F., & Garrigou, A. (1992). Human Factors in Design : Sociotechnics or Ergonomics ? In Helander, M., Nagamachi, M. (Dir.), *Design for Manufacturability. A systems approach to concurrent engineering and ergonomics* (pp. 55-63), Taylor and Francis, Londres.

- Davila, A., & Dominguez, M. (2010). Formats des groupes et types de discussion dans la recherche sociale qualitative. *Recherches Qualitatives*, 29(1), 50-68.
- Demers, F. (2010). La tentation de la généralisation : Retour réflexif sur cinq *focus group*. *Recherches Qualitatives*, 29(1), 110-128.
- Derobertmasure, A. (2012). *La formation initiale des enseignants et le développement de la réflexivité? Objectivation du concept et analyse des productions orales et écrites des futurs enseignants*. [Thèse de doctorat Université de Mons]. HAL.
- Detienne, F. (2006). Collaborative design: Managing task interdependencies and multiple perspective. *Interacting with Computers*, 18(1), 1-20.
- Diambra, J. F., McClam, T., Fuss, A., Burton, B., & Fudge, D. L. (2009). Using a focus group to analyze student's perceptions of a service-learning project. *College Student Journal*, 43(1), 114-122.
- Eitington, J.E. (2001). *The winning trainer: winning ways to involve people in training*. Boston : Butterworth-Heinemann.
- El Mostafa, H., Lenoir, Y. & Desjardins, J. (2012). La didactique professionnelle et la formation à l'enseignement : apports et questionnements. *Travail et apprentissages*, (2)10, 15-38.
- Falzon, P., & Mollo, V. (2009). Pour une ergonomie constructive : les conditions d'un travail capacitant. *Laboreal*, 5(1), 61-69.
- Fontana, A., & Frey, J. H. (2003). The Interview : From Structured Questions to Negotiated Text. In N. K. Denzin et Y. S. Lincoln (Eds.) *Collecting and Interpreting Qualitative Materials* (pp. 61-106). Thousand Oaks, CA : Sage Publications.
- Garrigou, A, Daniellou, F., Carballeda, G. & Ruaud, S. (1995). Activity analysis in participatory design and analysis of participatory design activity. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 15, 311-327.
- Gregori, N., Blanco, E., Brassac, C., & Garro, O. (1998). Analyse de la distribution en conception par la dynamique des objets intermédiaires. In Trousse B., Zreik K. (Eds). *Les objets dans la conception* (pp. 135-154), Paris : Europa.
- Garrigou, A., Brun, J.-P., Mohammed-Brahim, B., & Peeters, S. (2006). Ergonomie et prévention : une tentative de mise en tension réciproque. In G. Valléry & R. Amalberti (Dirs.), *L'analyse du travail en perspectives. Influences et évolutions* (pp. 157-172). Toulouse : Octarès Éditions.

- Hall-Andersen, L.B., & Broberg, O. (2014). Integrating ergonomics into engineering design: The role of objects. *Applied Ergonomics*, 45, 647-654.
- Hampden-Turner, C., & Trompenaars, F. (2006). Cultural Intelligence : Is Such a Capacity Credible? *Group & Organization Management*, 31(1), 56-63.
- Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Éléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du Travail*, 3, 291-316.
- Jeantet, A., Tiger, H., Vinck, D., & Tichkiewitch, S. (1996). La coordination par les objets dans les équipes intégrées de conception de produit. In de Terssac G., Friedberg E. (Dir.), *Coopération et conception* (pp. 87-100). Toulouse : Octares.
- Jourde, F., Laurillau, Y., & Nigay, L. (2015). Description des tâches avec un système interactif multiutilisateur et multimodal : Etude comparative de notations. *Journal d'Interaction Personne Système, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, 3(3), 1-33.
- Gagné, R.M., & Briggs, L.J. (1979). *Principles of instructional design* (2nd ed.). New York; Holt, Rinehart, and Winston.
- Genest, B. (2009). Des agents de nettoyage des écoles confrontés à la didactique professionnelle. *Travail et apprentissages*, 4, 57-74.
- Göksu, I., Özcan, K. V., Çakır, R., & Göktas, Y. (2017). Content analysis of research trends in instructional design models: 1999-2014. *Journal of Learning Design*, 10(2), 85–109.
- Grégori, N., Blanco ; E., Brassac C., & Garro , O. (1998). Analyse de la distribution en conception par la dynamique des objets intermédiaires, , in Trousse B., Zreik K. (Dir.). *Les objets dans la conception*, (pp 135-154), Paris : Europa.
- Gustafson, K. L., & Branch, R. M. (2002). What is instructional design? In Reiser, R, A. and Dempsey, J. V. (Dir.) *Trends and Issues in Instructional Design and Technology*. Columbus: OH, Merrill Prentice Hall.
- Jaunereau, A. (2009). Professionnalisation et apprentissage à l'aide d'un simulateur dans un environnement dynamique lié au vivant : apprendre à mettre en place une culture de colza. *Travail et apprentissages*, 4, 13-25.
- Judon, N. (2017). Rendre possible un espace intermédiaire de dialogue pour co-construire de nouvelles solutions de prévention dans un contexte d'incertitude Cas des travaux de revêtements routiers [Thèse de doctorat. Université de Bordeaux]. HAL

- Judon, N., Galey, L., Saint-Dizier de Almeida, V. & Garrigou, A. (2019). Contributions of participatory ergonomics to the involvement of workers in chemical risk prevention projects. *WORK : A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, 64(3), 651-660.
- Julien-Gauthier, F., Héroux, J., Ruel, J. et Moreau, A.C. (2013). L'utilisation de « Groupes de discussion» dans la recherche en déficience intellectuelle. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 24, 75-95.
- Kamberelis, G., Dimitriadis, G. (2008). Focus Groups : Strategic articulations of pedagogy, politics, and inquiry. In N. K. Denzin et Y. S. Lincoln (Eds.) *Collecting and interpreting qualitative materials* (pp. 375-402). Thousands Oaks, CA : Sage Publications.
- Kebir, Y., Saint-Dizier de Almeida, V., Fromy, P., & Collin, A. (2019). Un objet intermédiaire pour instruire l'évolution de la réglementation incendie. Actes du 54ème Congrès de la SELF, Université de l'Ergonomie : Comment contribuer à un autre monde ? Tours, 25, 26 et 27 septembre 2019 (actes 6 pages dans Ergo-Abstracts).
- Keller, J. M. (1979). Motivation and instructional design: A theoretical perspective. *Journal of Instructional Development*, 2(4), 26 - 34.
- Keller, J.M. (1987). Development and use of the ARCS model of instructional design. *Journal of Instructional Development*, 10(3), 2-10.
- Keller, J. M., & Suzuki, K. (1988). Use of the ARCS Motivation Model in courseware design. In D. H. Jonassen (Dir), *Instructional designs for microcomputer courseware* (pp. 401–434). Lawrence Erlbaum Associates.
- Kirkpatrick, D. L. (1959). Techniques for evaluating training programs. *Journal of the American Society of Training Directors*, 13, 3–9.
- Kirkpatrick D. L., (2007). "The Four Level of Evaluation", *Info Line*, 0701, 1-16.
- Kitzinger, J. & Barbour, R. (1999) *Developing Focus Group Research: Policy, Theory and Practice*, London: Sage
- Kitzinger, J. (2004). Le sable dans l'huître : analyser des discussions de focus group. *Bulletin de psychologie*, 57(3), 299-307.
- Koslowski, A., Morge, L., & Specogna, A.(2020). Influence de la spécialité des enseignants de Sciences industrielles de l'ingénieur (S2I) sur leur modélisation des chaînes d'énergie. *RDST - Recherches en didactique des sciences et des technologies* , ENS Éditions, 45-74. [<10.4000/rdst.3018>](#). [<hal-02021494>](#)

- Kraiger, K., Ford, J. K., & Salas, E. (1993). Application of Cognitive, Skill-Based, and Affective Theories of Learning Outcomes to New Methods of Training Evaluation, *Journal of Applied Psychology*, 78(2), 311-328.
- Krueger, R. A., & Casey, M. A. (2000). *Focus Groups : a practical guide for applied research* (3 ed.). Thousand Oaks : Sage Publications.
- Kruse, J. W. (2009). *Teaching and assessing philosophical issues of technology in an 8th grade science classroom*. 10th International History, Philosophy, and Science Teaching, South Bend.
- Latour, B. (1994). Une sociologie sans objet ? Remarques sur l'interobjectivité. *Sociologie du Travail*, 4(36), 587-607.
- Leclerc, C., Bourassa, B., Picard, F., & Courcy, F. (2011). Du groupe focalisé à la recherche collaborative ; avantages, défis et stratégies. *Recherches Qualitatives*, 29(3), 145-167.
- Le Duc, I., Dillenbourg, P., & Ricci, J.-L. (2012). *L'analyse des commentaires des étudiants dans les évaluations de l'enseignement montre qu'ils sont plus sensibles au fond qu'à la forme*. [Conférence]. Actes du 27^e congrès de l'Association internationale de Pédagogie universitaire, *Quelle université pour demain ?*, Trois-Rivières (Québec).
- Le Louarn, J.-Y., & Pottiez, J. (2010). *Validation partielle du modèle d'évaluation des formations de Kirkpatrick*, [Conférence]. 21^e congrès de l'AGRH, Saint-Malo.
- Leplat, J. (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail. Contribution à la psychologie ergonomique*. Paris : PUF
- Lewin, K. (1946) Action research and minority problems, in G.W. Lewin (Ed.) *Resolving Social Conflicts*. New York: Harper & Row (1948)
- Lim, Y.K. (2004). *Multiple Aspect Based Task Analysis (MABTA) for User Requirements Gathering in Highly-contextualized Interactive System Design*. [Conférence]. 3rd annual conference on Task models and diagrams, Prague, Czech Republic.
- Mer, S., Jeantet, A., & Tichkiewitch, S. (1995). Les objets intermédiaires de la conception, in Caelen, J., Zriek, K. (Dir.). *Le communicationnel pour concevoir* (pp. 21-41,). Paris : Europa.
- Métral, J.-F. (2012). La didactique professionnelle : vers une didactique de l'action professionnelle ? *Travail et apprentissages*, 10, 85-105.

- Mayen, P. (2001). *Développement professionnel et formation : une théorie didactique*. [Thèse pour l'habilitation à diriger des recherches en Sciences de l'Éducation, Université Pierre Mendès], Grenoble.
- Mayen, P., & Arnaud, S. (1999). *Sortir de la boucle infernale : essai de maîtrise dans trois abattoirs de porcs*. [Conférence] Actes du 34^e congrès de la SELF, Caen, 15-17 Septembre 1999, 147-153.
- Mayen, P., & Specogna, A., (2005). Conseiller : une activité et un jeu de langage professionnel. In Filliettaz L & J-P Bronckart (Dir.), *L'analyse des actions et des discours en situation de travail. Concepts, méthodes et applications* (pp 99-113). Bibliothèque des Cahiers de l'Institut de Linguistique de Louvain BCILL.
- Mayen, P., Ferron, O., Humblot, J.-P. & Bazile, J. (2006). *Introduire un référentiel de situations dans les référentiels de diplôme en BTS*. Rapport de recherche de l'unité propre « Développement professionnel et formation » pour le ministère de l'Agriculture. Département des Sciences de la formation et de la communication, Enesad.
- Mayen, P. & Tourmen, C. (2009). Les jurys de VAE ont-ils quelque chose à apprendre ? In Savoyant, A. et Mayen, P. (Eds.). *Élaboration et réduction de l'expérience dans la validation des acquis de l'expérience*. Marseille : Relief 28, Cereq, 59-69.
- Mayen, P., Métral, J.-F., & Tourmen, C. (2010). Les situations de travail : références pour les référentiels. *Recherche et formation*, 64, 31-46.
- Mayen, P. & Pin, J.P. (2010). L'activité des personnes ordinaires en VAE. *Rapport de recherche remis à l'institut Jacotot de Bourgogne*, juin 2010.
- Molenda, M. (2003). In search of the elusive ADDIE model. *Performance and Improvement*, 42(5), 34-36.
- Nahon, P., & Arnaud S. (2000). *Transfert méthodologique et valorisation des actions et des résultats obtenus vers les acteurs de la filière [porcine]*, rapport Ouest-Ergonomie.
- Ndao, M.L., Arfaoui, S., Kebir, Y., Atarodi, S., Pignault, A., & Saint-Dizier de Almeida, V. (2019). *Le rôle de l'ergonome dans un processus de conception collaboratif : le cas de la conception d'un serious game dédié à la sensibilisation à des métiers de l'agriculture*. Actes du 54^{ème} Congrès de la SELF, Université de l'Ergonomie : Comment contribuer à un autre monde ? Tours, 25, 26 et 27 septembre 2019.
- Oudart, A.-C. (2008). « Répondre au nom de » : la difficile tâche des charges de la relation clientèle. *Mélanges*, 30, 113-125.

- Pablo, R., Specogna, A., & Saint-Dizier de Almeida, V. (2019). *Conception ergonomique d'une formation utilisant les outils de l'industrie du futur*. EPIQUE 2019, 10ème conférence de psychologie ergonomique, Doctoriales, Lyon, 9-11 juillet.
- Paquette, G. (2004). L'ingénierie pédagogique à base d'objets et le référencement par les compétences. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, 1(3), p. 45-55.
- Pastré P. (1999). La conceptualisation dans l'action : bilan et nouvelles perspectives . *Éducation permanente*, 139, 13-35.
- Pastré, P. (2005). *Apprendre par la simulation*. Toulouse : Octarès.
- Pastré, P. (2006). Que devient la didactisation dans l'apprentissage des situations professionnelles ? In Lenoir, Y. et Bouillier-Oudot, M.-H. (Dir.), *Savoirs professionnels et curriculum de formation de professionnels* (pp. 321-344). Québec : Presses de l'Université Laval,
- Pastré, P. (2009). *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Toulouse : Octarès.
- Pastré, P. (2011). *La didactique professionnelle : approche anthropologique du développement des adultes*. Paris : PUF.
- Pastré, P., Mayen, P. & Vergnaud, G. (2006). Note de synthèse sur la didactique professionnelle. *Revue Française de Pédagogie*, 154, 145-198.
- Paternò, F., Mancini, C., & Meniconi, S. (1997). ConcurTaskTrees: A Diagrammatic Notation for Specifying Task Models. *INTERACT*. Sidney, Autralie: Chapman & Hall.
- Paternò F. (2000). *Model-Based Design and evaluation of Interactive Applications*. Springer-Verlag
- Patton, M. Q. (2002). *Qualitative Research and Evaluation Techniques* (3 ed.). Thousand Oaks : Sage Publications.
- Petit, J., Dugué, B. & Daniellou, F. (2011). L'intervention ergonomique sur les risques psychosociaux dans les organisations : enjeux théoriques et méthodologiques. *Le Travail Humain*, 74(4), 391-409.
- Piaget, J. (1947). *Psychologie de l'intelligence*. Paris : Colin.
- Piaget, J. (1968). *Le structuralisme*. Paris: Presses Universitaires de France.

- Pinelle, D., Gutwin, C., & Greenberg, S. (2003). Task Analysis for Groupware Usability Evaluation: Modeling Shared-Workspace Tasks with the Mechanics of Collaboration, *ACM Transactions on Computer Human Interaction*, Volume 10(4), 281-311.
- Ranocchia, K. (2014). *Robert Gagne: Unique Learning and Teaching Aspects*. Récupéré le 4 avril 2021 de : <http://robertgange.blogspot.ca/>
- Rege Colet, N. (2010). *L'évaluation à l'épreuve d'un dispositif d'académisation de la formation des enseignants*. Genève : Actes du Congrès AREF.
- Reiser, R. A. (2001). A history of instructional design and technology: Part II: A history of instructional design. *Educational technology research and development*, 49(2), 57-67.
- Retho, F. (2014). Méthodologie collaborative d'aide à la construction de produits virtuels pour la conception d'aéronefs à propulsion électrique. [Thèse de Doctorat Centrale-Supélec]. HAL
- Rogalski, J. (1995). From real situations to training situations: conservation of functionalities. In J.-M. Hoc, C. Cacciabue, & E. Hollnagel (Dirs.), *Expertise and Technology: Cognition and Human-Computer Cooperation*. (pp. 125-137). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Rogalski, J., & Antolin, P. (1997), Training in open dynamic environment management: The case of operational management in public safety. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* ,2, 1867-1872.
- Rogalski, J. (2014). Nouvelles pistes de recherche et évolutions de la didactique professionnelle. *Travail et Apprentissages*, 13, 139-154.
- Rogalski, J., & Colin, B. (2018). Le rôle du formateur dans l'articulation des compétences acquises sur simulateur et des compétences cibles (« terrain ») , *Activités* [En ligne], 15-2 | 2018, mis en ligne le 15 octobre 2018, consulté le 18 octobre 2018. URL : <http://journals.openedition.org/activites/3333> ; DOI : 10.4000/activites.3333
- Saint-Dizier de Almeida, V., Arfaoui, S., Judon, N., Kebir, Y., Pablo, R., Ndao, M.L., Specogna, A., & Garrigou, A. (2022 à paraître). L'animation des groupes focalisés autour d'objets intermédiaires en ergonomie participative. *Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*, 131-132 (3-4), 221- ? [PsyncInf]
- Samurçay, R., & Rogalski, J. (1998). Exploitation didactique des situations de simulation. *Le Travail Humain*, 61 (4), 333-359.

- Specogna, A., & Saint-Dizier de Almeida, V. (2018). Discussion à visée philosophique, une ressource de la professionnalité enseignante ? Quelle variabilité ? Quelle invariabilité de l'activité ? *Phronesis*, 7(2), 28-36.
- Sperandio, J.C. (2003). Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie, *Le Travail humain*, 27-75.
- Star, S.L., & Griesemer J. (1989). Institutional ecology, 'Translations' and Boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley's museum of vertebrate zoology . *Social Studies of Science*, 19(3), 387-420.
- Tardif, J., & Dubois, B. (2010). Construire des dispositifs en vue de l'évaluation et du développement des compétences: comment? In Paquay, L., Van Nieuwenhoven, C. et Wouters, P. (Dirs.). *L'évaluation, levier du développement professionnel* (pp. 133-146). Bruxelles : De Boeck.
- Tourmen, C. (2007). *Les compétences des évaluateurs : le cas des évaluateurs de politiques publiques*. [Thèse de doctorat, Université de Grenoble II].Theses.fr
- Tourmen, C. (2008). Les compétences des évaluateurs de politiques publiques. *Formation-Emploi*, 194, 53-63.
- Tourmen, C. (2010). *Quelles activités ? quelles compétences ?* [Conférence] colloque international de l'AREF, 13-16 septembre 2010, Genève, Suisse.
- Tourmen, C. (2014). Usages de la didactique professionnelle en formation : principes et évolutions. *Savoirs*, 36(3), 9-40.
- Tourmen, C. (2014). Quand la didactique professionnelle s'intéresse aux apprentissages culturels. *Travail et Apprentissages*, 13, 94-118.
- Tricot, A., & Plégat-Soutjis, F. (2003). Pour une approche ergonomique de la conception d'un dispositif de formation à distance utilisant les TIC. *Sticef*, 10.
- Van Belleghem, L., & Barcellini, F. (2011). *Cours ergonomie et conception : modèles et outils pour l'action*. Cnam, Paris.
- Van der Veer, G. C., Lenting, B. F., & Bergevoet, B. A. (1996). GTA: Groupware task analysis modeling complexity. *Acta Psychologica*, 91(3), 297–322.
- Van Merriënboer, J.J.G. & Kirschner, P.A. (2001). Three worlds of instructional design: State of the art and future directions. *Instructional Science*, 29, 429–41.

- Van Merriënboer, J.G., Clark, R.E., & de Croock, M.B. (2002). Blue-prints for complex learning: The 4C/ID Model. *Educational technology, research and development*, 50(2), 39-64.
- Van Merriënboer, J.J.G., Kirschner, P.A., & Kester, L. (2003). Taking the load off a learner's mind: Instructional design for complex learning. *Educational Psychologist*, 38: 5–13
- Van Belleghem, L. (2018). La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives. *@ctivité*, 15(1).
- Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. In Barbier, J.-M. (Ed.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action* (pp. 275-292). Paris : PUF.
- Vergnaud, G. (2001). *Forme prédicative et forme opératoire de la connaissance*. Actes du Colloque GDM 2001 « La notion de compétence en enseignement des mathématiques, analyse didactique des effets de son introduction sur les pratiques de la formation », Jean Portugais (Ed.), Montréal, mai 2001. En ligne : <http://smf4.emath.fr/Enseignement/TribuneLibre/EnseignementPrimaire/ConfMontrealmai2001.pdf>
- Vermersch, P. (1994). *L'entretien d'explicitation en formation initiale et en formation continue*. Paris : Esf.
- Vidal Gomel, C., & Rogalski, J. (2007). La conceptualisation et la place des concepts pragmatiques dans l'activité professionnelle et le développement des compétences. *@ctivités*, 4(1), 49-84.
- Vinck, D. (1999). Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales, *Revue Française de Sociologie*. 11, 385-414.
- Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. Vers la prise en compte du travail d'équipement. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 1(3) 51-72.
- Vinck, D., Jeantet, A., & Laureillard P. (1996). Objects and Other Intermediaries in the Sociotechnical Process of Product Design: an exploratory approach, In Perrin, J., Vinck, D. (Dirs.). *The role of design in the shaping of technology* , (pp. 297-320, 5), COST A4 Social Sciences, Bruxelles: EC Directorate General Science R&D.
- Vinck, D. ,& laureillard, P. (1996). Coordination par les objets dans les processus de conception, in *Représenter, Attribuer, Coordonner* (pp. 289-295). Paris : CSI, Écoles des Mines.

- Warin, B.(2016) *Ingénierie pédagogique des systèmes d'enseignement supérieur. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*. [Thèse de HDR, Université du Littoral Côte d'Opale]. HAL
- Watson, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological Review*, 20, 158-177.

ANNEXES

ANNEXES 1 : Fiches composant l'OI à la suite de l'observation de la primo-conception (Optimisation topologique)

[Simuler les scénarios définis](#)

Les scénarios permettent de simuler les mouvement des pièces lorsqu'elle sont
soumises à différent scénarios (envole , vole stationnaire, port d'une charge etc.)

Créer n modèles de calcul

Le modèle de calcul est dupliqué et soumis à divers scénarios de simulation afin de déterminer quel modèle est optimal

Choisir le modèle de calcul optimal

Le modèle de calcul choisi est celui qui permet de réduire au maximum la masse tout en gardant les caractéristiques mécaniques du modèle d'origine

|

Reconstructuire le modèle de calcul optimal

Le modèle de calcul étant issue d'une simulation il doit être reconstruit afin de pouvoir constituer un modèle CAO

ANNEXES 2 : Retranscription GDF phase de primo-création (Optimisation topologique)

P : Psychologue

S1 : Stagiaire 1

S2 : Stagiaire 2

P-1 : Bon alors cette fois-ci on va s'attaquer à l'optimisation topologique que vous avez fait pour le drone.

S2-1 : Ok du coup on fait comme les autres fois

S1-1 : Bah ouais

P-2 : Oui oui c'est ça on fait comme pour tout le reste de la modélisation donc je vais déjà vous montrer ce que moi j'ai observé et après vous me dites ce qui va pas ok ?

S1-2 : Ok

S2-2 : Après ce sera surtout S1 qui pourra en parler vu que c'est une partie importante de son mémoire, il a plus bossé dessus moi j'ai fait que pour le capot et euh il y avait moins à optimiser.

P-3 : Ouais mais quand il optimisait il te renvoyait la pièce après pour que tu euh comment vous dites déjà

S1-3 : Reconstruire

P-4 : Ouais voilà parce que le modèle qui sort de l'optimisation n'est pas exploitable en l' tat

S1-4 : Oui c'est ça et là c'est S2 qui s'occupais de la CAO pour la pièce

P-5 : Donc voilà tu vois que tu as joué un rôle dans l'optimisation

S2-3 : Ouais ok ok

P-6 : Alors donc euh deux secondes que je retrouve ah oui alors donc je l'ai déjà mis dans la partie physique du RFLP c'est bon pour vous

S1-5 : Ouais ouais

S2-4 : Ouais c'est bon parce que là c'est le moment où le drone va être fabriqué

P-7 : Ok ça marche du coup pour commencer j'ai choisi de mettre la tâche en itérative vu que S1 optimisais et que après vous validiez ou non l'optimisation et que euh ensuite si c'était pas valider vous recommenciez jusqu'à ce que ça vous convienne.

S2-5 : Après c'est pas nous qui décidions hein je reconstruisais la pièce et si les simulations étaient bonne bah c'était bon

S1-6 : Ouais

P-8 : Ok c'est noté mais du coup c'est bon pour vous le coté itératif du truc

S2-6 : Oui oui ça c'est ok

P-9 : D'accord ensuite euh en gros de ce que j'ai pu voir euh oui donc j'ai vous avez effectué des simulations avec le bras pas encore modifié et du coup vous avez choisi

des paramètres de simulation et ensuite vous avez réalisé les simulations en fonction des scénarios que vous avez choisi.

S2-7 : Ouais en gros c'est ça

P-10 : Ok alors du coup pour paramétrer la simulation j'ai marqué euh il s'agira de définir les zones de la pièce où les forces sont appliquées, les zones fonctionnelles qui ne peuvent pas être modifiées et les contraintes auxquelles la pièce sera soumise.

S2-8 : D'accord c'est pas mal mais avant ça on a fait des recherches

S1-7 : Oui il fallait qu'on sache les valeurs forces à mettre pour les simulations

P-11 : ah ok du coup il y a une étape avant bah on va la rajouter directe alors deux secondes voilà euh du coup comment on peut appeler ça euh effectuer une étude des forces

S1-8 : ou voilà par exemple

P-12 : ok

S2-9 : ouais enfin pas que parce que ok le moteur et les hélices engendrent une force mais du coup le bras est en tension et quand il vole ça dépend de la masse du drone du coup moi je dirais aussi contraintes

P-13 : ok donc Effectuer une étude des forces et des contraintes

S2-10 : ok c'est bon

P-14 : donc du coup il y a ensuite paramétrer la simulation ça c'est bon et donc après j'ai mis simuler les scénarios définis

S1-9 : Moi j'ajouterais une étape parce que simuler c'est avec le logiciel enfin c'est le logiciel mais il faut lui dire quoi faire enfin dans l'interface le logiciel te demande des scénarios de simulations

P-15 : ok bah du coup on peut ajouter comme tu l'as dit donc on peut dire euh définir les scénarios définis par exemple

S1-10 : ouais c'est ça

P-16 : ok ensuite

S2-11 : comparer les modèles de calcul euh du coup je lisais ça mais du coup pour comparer les modèles de calcul il faut déjà les créer les modèles

S1-11 : oui c'est ça du coup il faudrait développer ça

S2-12 : ouais on pourrait mettre les différentes étapes de l'optimisation qui permet de créer les modèles genre le maillage les matériaux et tout ça

S1-12 : ouais ouais du coup au début on on dit que l'on veut maximiser la rigidité et minimiser le poids ensuite et ensuite bah vu que le résultat dépend du matériau utilisé il faut entrer les valeur du coefficient de poisson et tout ça

S2-13 : oui il y a ça aussi

S1-13 : et donc du coup ce que tu obtiens après ça tu dois de nouveau faire une simulation dessus afin de valider le modèle que tu as obtenu

S2-14 : voilà c'est ça et là tu fais ça plusieurs fois et après seulement tu arrives à l'étape suivant que P a trouvé comparer les modèles de calcul

P-17 : ok donc on rajoute une tâche que l'on divise en sous tâches du coup la première vous avez dit c'est

S1-14 : euh alors déjà on avait dit quoi

S2-15 : bah d'abord tu donnes les objectifs de l'optimisation rigidité et masse

P-18 : Ok donc Définir les objectifs de l'optimisation ensuite vous parliez des matériaux il me semble

S2-16 : voilà c'est ça tu renseignes les caractéristiques des matériaux euh tu pourrais mettre définir les contraintes liées aux matériaux

P-19 : ok je mets ça deux secondes

S2-17 : Ensuite tu lances les calculs

P-20 : ok donc calculs

S2-18 : et enfin tu simule pour voir si le modèle est bon

P-21 : ok donc euh valider par simulation le modèle de calcul

S2-19 : oui voilà c'est ça

P-22 : ok je note euh et donc ça c'est les sous-tâches comment je pourrais appeler la

tâche

S1-15 : Bah en fait là c'est principalement des calculs réalisés par le logiciel

P-23 : Calculer

S2-20 : eu oui on peut dire ça

S1-16 : ouais on peut mettre ça pour le moment et si on trouve mieux plus tard

P-24 : oui oui oui bien sûr il y a pas de problèmes donc donc je note calculer voilà

S1-18 : donc ensuite comparer les modèles de calcul, créer n modèles de calcul, choisir le modèle de calcul optimal pour moi c'est ok

S2-21 : oui c'est ça

P-25 : ok et donc ensuite on a reconstruire le modèle de calcul optimal

S1-19 : ouais du coup je pense qu'on pourrait être plus précis

S2-22 : oui clairement il y a eu du boulot là quand j'ai reconstruit du coup vu que la pièce est symétrique en fait tu ne reconstruis que la moitié du modèle comme ça tu mets deux fois moins de temps à reconstruire un fois que tu as ta moitié de pièce en fait tu construis un modèle 3D autour du modèle de calcul parce que en fait le modèle de calcul est pas imprimable parce qu'il est trop complexe donc on reproduit un modèle qui a moins d'arrêtes et qui est plus lisse que le modèle de calcul ça rajoute un peu de matière mais au moins la géométrie de la pièce est moins complexe et donc imprimable

P-26 : D'accord donc on peut dire créer un modèle lisse sur la base du modèle de calcul.

S2-23 : oui on peut dire ça moi ça me va

S1-20 : Oui enfin ce qui est important aussi c'est d'être bien calqué sur le modèle de calcul pour qu'il y ai le plus de gain de matière

S2-24 : oui c'est vrai

P-27 : ok donc on peut ajouter le plus proche possible du modèle de calcul

S1-21 : oui comme ça c'est bon

S2-25 : voilà c'est bien comme ça

P-28 : ok je note et donc ensuite vous validez ou non le prototype de bras et si c'est pas validé on recommence

S1-22 : voilà c'est ça

P-29 : Ok donc maintenant on va s'attaquer aux fiches je on s'occupe déjà de celles que j'avais déjà fait

S2-26 : c'est partie

P-30 : du coup comme pour les autres fois on va surtout voir les tâches au bout des branches et on verra vite fait les tâches composées de sous-tâches

S2-27 : ça marche

P-31 : alors du coup pour la tâche paramétrer la simulation j'ai mis il s'agira de définir les zones de la pièce où les forces seront appliquées, les zones fonctionnelles qui ne peuvent être modifiées et les contraintes auxquelles la pièce sera soumise

S1-23 : ouais c'est déjà pas mal alors je pense qu'on va pouvoir être plus précis

S2-28 : oui

S1-24 : donc là on détermine les paramètres qu'on va rentrer dans la simulation du coup d'abord il faut qu'on définisse le matériaux utilisé là vu qu'on est en imprimante 3D ce sera du PLA ou de l'ABS du coup ce qui t'intéresse c'est le coefficient de Poisson, le module de Young et la limite d'élasticité ensuite oui tu as parlé de la zone fonctionnelles ça c'est important car il ne faut pas enlever de matière

P-32 : oui c'est par exemple l'endroit où le bras est fixé au châssis du drone

S1-25 : voilà c'est sûr si l'optimisation enlève de la matière à cet endroit, le bras ne sera pas utilisable donc du coup c'est ce qu'on appelle les zones à geler

P-33 : ok c'est noté

S1-26 : ensuite tu défini le maillage plus il est fin plus la simulation et l'optimisation sera précise mais plus il est fin plus le calcul sera long

S2-29 : et en plus au bout d'un moment ça sert plus à rien

S1-27 : oui voilà donc voilà une fois que tout ça c'est fait il te reste plus qu'à déterminer euh les forces et leur point d'application et les contraintes.

P-34 : ok voilà ça vous va écrit comme ça

S1-28 : oui c'est bon comme ça

P-35 : et du coup il n'y a pas de terme que quelqu'un qui ne connaît pas la 3DExpérience ne comprenda pas

S2-30 : attend euh non c'est bon c'est des termes que tous les ingé méca pourront comprendre

P-36 : parfait donc ensuite on passe à Simuler les scénarios définis

S2-31 : ok bah c'est pas mal ce que tu as écrit j'ajouterais juste que ça nous permet de voir les mouvements de la pièce, comment elle se déforme et quelles sont les zones les plus soumises aux efforts

P-37 : ok je note comme ça ça va ah oui il faut que j'ajoute les zones les plus soumises à l'effort voilà on passe à la tâche suivante

S1-29 : Créer n modèles de calcul donc eu le modèle de calcul est dupliqué et soumis à divers scénarios de simulation afin de déterminer quel modèle est optimale ok euh du coup j'ajouterais que chacune des versions devra subir des scénarios de simulations différents et que l'échantillon ainsi obtenu permettra de déterminer le modèle optimal

S2-32 : oui ce sera plus clair comme ça

P-38 : ok je vais reformuler voilà du coup on passe à la tâche suivante

S1-30 : ok du coup tu devrais plus parler de rapport entre la masse et les contraintes

S2-33 : après c'est surtout dans notre cas que la masse et les contraintes sont important dans d'autres cas de figure les critères importants peuvent être l'élasticité ou le volume

S1-31 : oui c'est vrai tu peux rajouter ça aussi je pense

P-39 : ok ça marche ça vous va comme ça

S1-32 : oui

S2-34 : oui

P-40 : allez tâche suivante reconstruire le modèle de calcul optimal

S1-33 : donc là le but c'est de produire un modèle de CAO qui soit fabricable tout en faisant en sorte que ce modèle soit au plus proche du modèle de calcul

S2-35 : oui et on utilise surtout des outils de CAO surfacique pour le faire

P-41 : ok surfacique modèle fabricable au plus proche du modèle de calcul optimal

S1-34 : c'est ça

P-42 : ok enfin la dernière tâche celle où vous validez le prototype de bras

S2-36 : oh bah là c'est simple on valide le prototype et on l'imprime

P-43 : ok ça marche donc du coup on va passer à la suite il va falloir que vous me donniez une description détaillée de ce que vous avez fait pour les tâches que l'on a ajouté tout à l'heure

S1-35 : ok ça marche

P-44 : Donc la première tâche que vous avez ajoutée c'est effectuer une étude préalable des forces et des contraintes

S1-36 : Bah pour celle là en fait c'est surtout une recherche bibliographique pour voir les valeurs maximales des forces que la pièce va subir.

S2-37 : oui par exemple on a choisi tel moteur avec tel hélice il faut voir quelle poussée maximale le moteur peut produire avec l'hélice et c'est ça qui nous permet de créer les scénarios de simulation

P-45 : d'accord du coup ça pourrait donner il s'agira ici de connaître les forces et les contraintes qui s'appliquent sur la pièce quand le système est en train de fonctionner ainsi que leurs valeurs maximales ceci nécessite une recherche bibliographique et permettra d'instruire les scénarios de simulation

S1-37 : oui c'est pas mal dit comme ça

S2-38 : après c'est pas une étape qui se fait sur la plateforme car tu n'as pas ce genre d'infos dessus

P-46 : oui c'est sûr mais c'est pas grave ça a été une partie importante de votre travail

S2-39 : ouais c'est sûr que ça prend pas mal de temps

P-47 : ok alors ensuite paramétrer la simulation ça on a déjà vu du coup définir les scénarios de simulation

S1-38 : alors ça en fait c'est juste l'aboutissement de ce que l'on a fait précédemment dans paramétrer la simulation on a donné les caractéristiques du système et dans cette partie on dit ce que le système va subir

P-48 : c'est ce que vous appelez les cas de chargement

S2-40 : Oui c'est ça

P-49 : ok alors ici on pourrait mettre euh

S1-39 : met que les scénarios permettent de déterminer les forces qui s'appliquent et qu'il faut déterminer tous les cas de chargement possible afin de s'approcher de la réalité

P-50 : ok qu'est-ce que tu dis de Les scénarios permettent de moduler les forces qui s'appliquent sur la pièce afin de pouvoir simuler tous les cas de chargement et s'approcher de la réalité.

S1-40 : ouais ça va comme ça

S2-41 : ok donc ensuite on a simulé les scénarios définis mmmm

P-51 : non celle-là on l'a déjà faite

S2-42 : ah oui ****

P-52 : du coup on passe à la partie calculer qui a quatre sous tâches donc la première c'est définir les objectifs de l'optimisation

S1-41 : bah là on dit juste au logiciel qu'on veut maximiser la rigidité tout en minimisant la masse et tu donnes l'objectif au logiciel

S2-43 : c'est en pourcentage

S1-42 : ouais

P-53 : ok donc je vous propose il faudra choisir les objectifs de l'optimisation généralement l'objectif est de maximiser la rigidité et minimiser la masse je mets généralement parce que tout à l'heure vous avez dit que parfois il pouvait y en avoir d'autres

S1-43 : ouais voilà c'est ça et il faut aussi dire que tu fixe un objectif au logiciel

P-54 : ok du coup je rajoute Il faut donner un objectif donné en pourcentage au logiciel

S1-44 : voilà

P-55 : ok

S2-44 : du coup maintenant c'est définir les contraintes liées aux matériaux

P-56 : exactement du coup qu'est ce qu'on pourrait dire ici

S2-45 : alors ici il faut entrer les caractéristiques du matériaux genre la contrainte maximum qu'il peut supporter et les contraintes liées à la fabrication par exemple le fait que le drone est symétrique et l'épaisseur du bras

P-57 : ok donc définir la contrainte maximum que le matériau peut supporter

S2-46 : voilà et ensuite les contraintes liées à la fabrication

S1-45 : met utilisation d'une contrainte de symétrie et d'une contrainte d'épaisseur

P-58 : ok ça marche donc ensuite c'est la tâche calculer

S1-46 : bah là en fait le logiciel calcul enfin il effectue l'optimisation topologique et ensuite nous on choisi le pourcentage de matière à garder le tout c'est de ne pas avoir de portions détachées du reste et qu'il n'y ai pas de zone rouge

P-59 : ok du coup je mets ça et du coup après on a le modèle de calcul

S1-47 : ouais voilà c'est ça

P-60 : ok donc ensuite on a valider par simulation le modèle initial

S2-47 : bah là tout simplement on effectue la même simulation que celle qu'on a fait avec le bras non optimisé pour voir si la solution tient le coup

P-61 : ok et c'est donc ça qui vous permettra de déterminer le modèle optimal

S2-48 : voilà c'est ça

P-62 : ok du coup je propose il faut appliquer la simulation utilisée pour le modèle initiale au modèle issue du calcul de l'étape précédente les données recueillies lors de cette étape seront réutilisée afin de déterminer le modèle optimal

S2-49 : ok c'est bon

P-63 : ok donc ensuite comparer les modèles de calcul ça on a fait oh bah du coup on à bientôt fini

S1-48 : ça c'est bien

S2-50 : oui c'est un peu dense comme exercice

P-64 : bon alors du coup on va se dépêcher du coup découper la pièce symétriquement qu'est ce que vous pouvez me dire là-dessus

S2-51 : eh bien en fait en générale quand tu dessine une pièce en CAO tu la fait symétrique c'est plus facile à dessiner et au niveau des contraintes en générale c'est plus efficace qu'une pièce asymétrique qui forcément sera déséquilibrée

P-65 : ok

S2-52 : donc vu que les pièces qui sont générées par optimisation topologique son généralement asymétrique eh bien là dans le cas du bras on la coupe en deux dans la longueur on reconstruit juste une moitié et on génère l'autre moitié par symétrie axiale

P-66 : d'accord donc si j'ai bien compris le modèle de calcul n'étant pas forcément symétrique il est nécessaire le couper afin d'obtenir au finale une pièce symétrique

S2-53 : voilà c'est exactement ça

P-67 : ok ça marche je le note

S2-54 : et donc ensuite c'est la reconstruction ça c'était ma partie et ce qui m'a pris le plus de temps

P-68 : oui je me souviens du coup comment on pourrait synthétiser ça

S2-55 : alors déjà le problème c'est que le modèle de calcul n'est généralement pas utilisable en l'état sa géométrie est trop complexe

P-69 : oui c'est pour ça que tu reconstruis un modèle au plus proche du modèle de calcul

S2-56 : voilà seulement il y a plein de méthodes pour reconstruire la pièce l'important c'est de trouver celle qui te va le mieux et d'utiliser des outils comme la projection d'esquisse ou les patches enfin voilà c'est pas mal de boulot

P-70 : ok donc on pourrait commencer par dire que le modèle de calcul n'étant pas utilisable en l'état il faut reconstruire la pièce au plus proche et qu'il n'y a pas de méthodes prédéfinies et qu'il faut se servir des outils à disposition

S2-57 : ok c'est bon

P-71 : ok on va passer aux tâches de niveau supérieur et ce sera bon ok alors pour simuler avec le modèle initial j'ai mis il s'agira d'effectuer des simulations sur la pièce originale afin d'obtenir les données qui permettront l'optimisation de cette dernière

S1-49 : ok ça c'est bon

P-72 : du coup ensuite il y a calcul celle là il va falloir la créer

S1-50 : bon bah là c'est assez simple tu peux dire que le logiciel va proposer une solution en fonction des matériaux des résultats obtenus lors de la simulation et des objectifs de l'optimisation

P-73 : ok j'écris ça du coup pour comparer les modèles de calcul j'ai mis il s'agira ici de créer et de comparer des variantes du modèle de calcul afin de déterminer un modèle optimal

S2-58 : oui bah là il n'y a pas grand-chose à ajouter vu que tout est expliqué dans les sous-tâches que nous avons créées

S1-51 : c'est sûr que les détails techniques sont plus dans les tâches qui sont toute à droite

P-74 : oui c'est vrai mais ça permet de structurer tout ce que vous avez fait allez donc ensuite c'est la tâche Optimiser topologiquement la version n du prototype de bras alors pour celle-là j'ai mis l'optimisation topologique du bras permet de réduire la masse du bras tout en conservant les caractéristiques physiques de ce dernier

S2-59 : moi j'ajouterais que la pièce que l'on obtient est tellement complexe qu'on est obligé d'utiliser la fabrication additive pour pouvoir la construire

P-75 : ok je note ça te maintenant la dernière et on a fini donc valider la version n+1 du prototype de bras du coup pour cette tâche j'ai simplement écrit que vous deviez tous valider la pièce obtenue après optimisation afin d'en faire celle qui sera imprimée.

S1-52 : moi ça me va et toi

S2-60 : c'est ok

P-76 : bon bah voilà on en a fini pour l'optimisation topologique du bras alors pour l'optimisation des autres pièces ce sera plus ou moins la même chose étant donné que le processus reste le même seule les pièces changent

S1-53 : oui c'est plus ou moins ça il y a de petites différences mais ça devrait aller

P-77 : ok je vais commencer par reproduire ce qu'on a fait aujourd'hui pour toutes les autres pièces et je vous solliciterai à nouveau

S2-61 : ok ça marche

ANNEXES 3 : Fiches composant l'OI à la suite du premier enrichissement de l'OI (Optimisation topologique)

1. Simuler avec le modèle initial

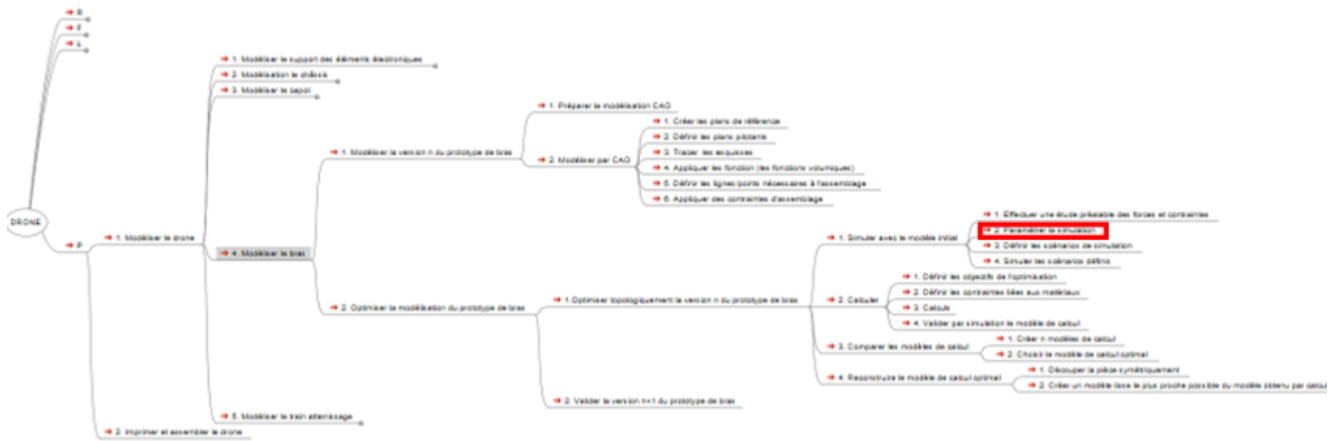


Description :

Il s'agira d'effectuer des simulations sur la pièce originale afin d'obtenir les données qui permettront l'optimisation de cette dernière.



2. Paramétrer la simulation



Description :

Il s'agira ici de définir les paramètres des scénarios de simulation :

1. Définir le matériau à utiliser (si pas en base de données créer le matériaux : module de Young ; coefficient de Poisson ; limite d'élasticité)
2. La zone à geler ce sont les zones fonctionnelles (visses etc.) que le logiciel ne doit pas altérer lors de l'optimisation.
3. La finesse du maillage qui détermine la précision de la simulation et donc de l'optimisation (un maillage plus fin ne change pas forcément les résultats)
4. Les forces auxquelles la pièce sera soumise, leur point d'application et leur valeur maximale.
5. Les contraintes auxquelles sera soumise la pièce.



Les scénarios pe

tous les cas de figure et s'approcher de la réalité.

4. Simuler les scénarios définis



Description :

Sur la base de scénarios, le logiciel va simuler les comportements de la pièce lorsqu'elle est soumise à différentes forces (définies par les scénarios). Permet de visualiser les déformations et mouvements qui affectent la pièce lorsqu'elle est soumise aux forces définies dans les scénarios. Permet de connaître les zones les plus soumises à l'effort.

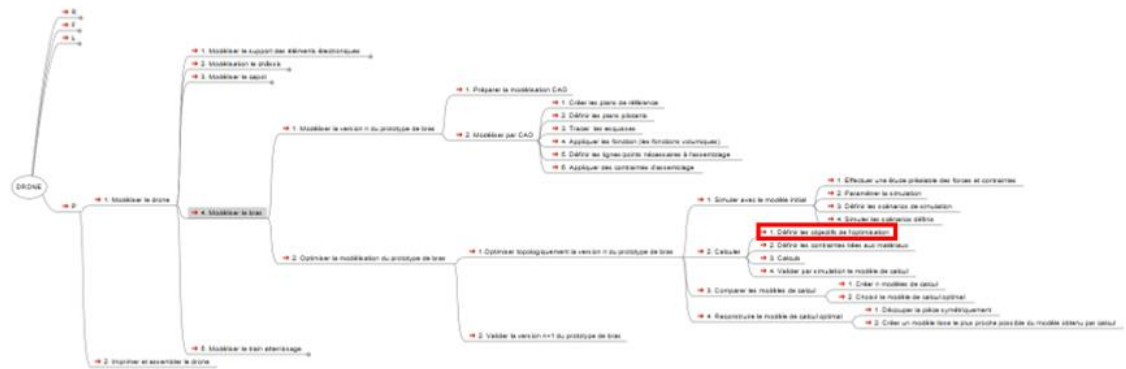
2. Calculer



Description :

Sur la base des résultats obtenus lors de la simulation et fonction des objectifs de l'optimisations topologique ainsi que du choix des matériaux, le logiciel va produire un nouveau modèle de pièce où la matière superflue sera supprimée.

1. Définir les objectifs de l'optimisation



Description :

Durant cette étape, il faudra choisir les objectifs de l'optimisation. Généralement l'objectif est de maximiser la rigidité et minimiser la masse. Il faut donner un objectif (donné en pourcentage) au logiciel.

2. Définir les contraintes liées aux matériaux



Description :

Contraintes liées aux matériaux : Définir la contrainte maximum que le matériau peut supporter.

Contraintes liées à la fabrication : Utilisation d'une contrainte de symétrie et d'une contrainte d'épaisseur.

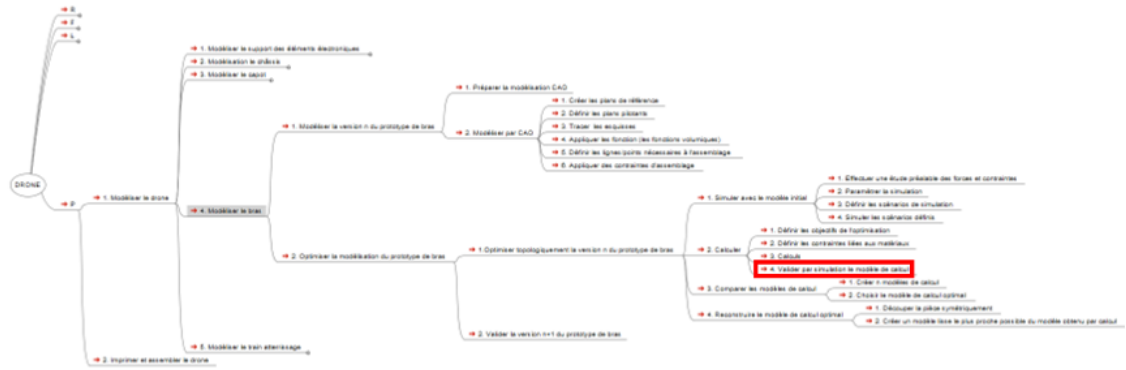
3. Calcular



Description :

Il s'agira de demander au logiciel d'effectuer le calcul puis de choisir la proportion de matière à conserver (il ne doit pas y avoir de portions détachées et pas de zone rouge). Enfin le solide du modèle de calcul sera généré.

4. Valider par simulation le modèle de calcul



Description :

Il faut appliquer la simulation utilisée pour le modèle initial au modèle issu du calcul de l'étape précédente. Les données recueillies lors de cette étape seront réutilisées afin de déterminer le modèle optimal.

3. Comparer les modèles de calcul



Description :

Il s'agira ici de créer et de comparer des variantes du modèle de calcul afin de déterminer un modèle optimal.

1. Créer n modèles de calcul



Description :

Il s'agira de dupliquer le modèle de calcul obtenu lors de l'étape précédente. Une fois dupliqué, ce modèle sera soumis à un scénario de simulation différent de ceux déjà appliqués. Les données recueillies à partir de la validation du modèle dupliqué seront comparées avec celle d'autres modèles dupliqués.

Cette opération est à répéter autant de fois que nécessaire afin de créer un échantillon de modèle qui nous permettra de déterminer le modèle optimal.

2. Choisir le modèle de calcul optimal



Description :

A partir des modèles dupliqués, il faudra déterminer quel est le modèle rapport « masse – contrainte supportée » le plus avantageux. L'utilisateur peut définir lui-même ses priorités (poids, élasticité, volume, etc.). Le modèle ainsi sélectionné est considéré comme étant le modèle optimal

4. Reconstruire le modèle de calcul optimal



Description :

Il s'agira d'utiliser les différents outils de CAO surfacique afin de reproduire un modèle fonctionnel et fabricable au plus près du modèle de calcul optimal.

2. Créer un modèle lisse le plus proche possible du modèle obtenu par calcul



Description :

Le modèle obtenu par calcul n'étant généralement pas fonctionnel/fabricable, il est nécessaire de reconstruire la pièce de telle sorte à obtenir des surfaces lisses au plus proche du modèle de calcul. Il n'y a pas de méthode canonique afin d'obtenir ce modèle, ainsi l'ingénieur doit utiliser les outils comme la projection d'esquisse, les patches, etc.

2. Valider la version n+1 du prototype de bras



Description :

La version optimisée du prototype de bras doit être validée par le collectif afin qu'elle devienne la version imprimable du bras.

|

1. Découper la pièce symétriquement



Description :

Le modèle de calcul n'étant pas forcément symétrique, il est nécessaire le couper afin d'obtenir au finale une pièce symétrique.

ANNEXES 4 : Retranscription GDF phase de conception (Optimisation topologique)

g S'adresse au groupe
p S'adresse à un participant

P Psycho
D Pro Dassault
UP universitaire professeur
UM universitaire maître de conf

gP 1 Alors aujourd'hui notre but c'est à partir de l'arbre, de l'arborescence des tâches que j'ai réalisé pendant mon stage ça va être de déjà définir ce qu'un module sur l'optimisation peut contenir en fait. Donc on va commencer par faire ça en tout premier. Si ça vous va donc euh

pUP 1 Tu veux qu'on travail aujourd'hui exclusivement sur l'optimisation topologique

gP 2 voila on fait que l'optimisation topologique. On regarde les tâches qui peuvent se rapprocher de près ou de loin à de l'optimisation topologique et on créé un module à partir de ça

pUP 2 D'accord _

pUM 1 Dans tout euh l'arbre des tâches qu'on a ici, l'optimisation topologique n'intervient qu'à un seul endroit ? Ou elle est un peu disséminée dans toute l'arborescence

gP 3 Alors moi des observations que j'ai pu faire elle est surtout intervenue lors de la modélisation du châssis et de la modélisation des bras Donc c'est là que les deux étudiants ont choisis d'utiliser l'outil

pUM 2 D'accord mais ça c'est un choix des étudiants qui ont travaillé sur le projet

gP 4 Ouai et puis enfin choix qu'ils ont justifié parce que dans leur mémoire de recherche ils ont après je sais qu'ils ont pas très bien justifié la manière dont ils ont optimisé la pièce mais le choix de ces pièces là pour l'optimisation avait été justifié

pUM 3 D'accord _

pUP 3 Alors est ce que tu as une présentation du projet TINA pour

gP 5 euh oui tout à fait le projet TINA c'est des formations pour les professeurs en ingénierie mécanique et ensuite est venu TINA 2 où là on a commencé à faire une formation pour les étudiants en ingénierie et aux professeur afin d'apprendre à maîtriser la 3Dexperience et la fabrication additive et les connaissances pour les une et juste apprendre à utiliser les outils pour les autres. Et du coup l'idée de TINA 2 c'est d'apprendre en construisant un drone en mode projet

pUP 4 Ok donc les partenaires de ce projet du projet TINA 2?

gP 6 C'est donc l'IRT M2P l'académie des technologies euh Dassault système, L'ESPE L'UFR MIM , Ditex et ALTRAN, le 2LPN et l'université de Lorraine

pUP 5 et donc l'IRT M2P et l'académie des technologie et l'université de Lorraine finance la thèse et le projet et les partenaires c'est le 2LPN pour la psychologie, l'ESPE pour les prof et DITEX pour la 3Dexperience

gP 7 Voilà c'est ça et en fait le module optimisation topologique c'en est un parmi d'autres tu vois on va essayer de faire un maximum de modules dans différentes matière mais tous auront pour objet la création d'une partie du drone

gUM 4 Et donc euh au final le euh c'est à dire que euh un prof de lycée ou peu importe le public on va dire donc là mes étudiants mes élèves je vais leur faire concevoir un drone c'est à dire qu'ils vont aller chercher tous les supports qui existent pour euh qu'ils aient les prérequis pour faire ce que je leur demande. Ou alors

gP 8 alors le lycée c'est la dernière étape d'abord on veut faire ça avec les Master ou les licences

pUM 5 Ok parce que je crois que dans le document que tu nous a envoyé tu disais euh c'est aiguiller les élèves ou les personne qui vont faire le drone vers la documentation ou vers les informations disponibles

pP 9 Voilà c'est ça

pUM 6 C'est pas forcément produire des cours ou donner des cours pour

pP10 Voilà c'est ça c'est le mode projet l'étudiant on lui dit tu créé un bras du drone

pUM 7 et après c'est à lui en fait d'aller chercher la matière les connaissances qui lui manque et le prof aiguille juste cette recherche si l'étudiant se plante

pP11 Oui voilà exactement c'est ça _

pUP 6 Donc le matériel pédagogique à la fin , les contenus ce sera quoi ?

pP 12 Ce sera en fait des euh bah il y aura une partie cours où le prof explique ce que c'est que l'optimisation topologique Parce que pour qu'ils réussissent un bras en mode projet il faudra des cours

pUP 7 Ok il y a forcément des cours oui oui d'accord alors donc il y a différents aspects il y a l'optimisation , la fabrication le système de contrôle du drone donc à partir de ton arborescence il faudrait faire apparaître des mots clés qui seraient peut être un chapeau pour un module de cours

gP 13 ce serait bien en effet

gUP 8 Donc on pourrait avoir là l'optimisation topologique, là la conception paramétrée et l'assemblage paramétré après il pourrait y avoir la customisation avec les macros etc et puis il peut y avoir l'électronique en on peut diviser le travail de conception en différents chapitres

gUM 8 Parce que en fait ce sont des chapeaux qui sont transverses dans toutes les tâches

gUP 9 alors m moi

gUM 9 Une fois que tu as identifié dans chaque tâche le contenu pédagogique, tu reviens et tu fais une modification commune dans plusieurs endroits

gUP 10 Alors c'est alors m moi c'est une des diffi c'est une des difficulté dans le traitement d'une mind map c'est ça

gP 13 Ouai les aspects transversaux

gUP 11 A un moment on en a discuté la dernière fois ce qui serait top tu vois c'est que tu as ça qui apparaît et puis euh tu as la mind map qui apparaît et puis tu as l'enseignant qui veut faire de l'optimisation topologique auprès d'étudiants de L3 donc il clique optimisation topologique licence L3 il clique entré et à la fin tu as un chemin c'est à dire que lui pour le niveau qu'on aura défini en terme d'apprentissage par l'étudiant et la map te renvoie à des supports des tutos et ça c'est le top quoi

gUM 10 quand tu dis mind map c'est l'arborescence de tâches

gUP 12 C'est là c'est c'est ce que tu vois là c'est tout l'arborescence

gP 14 Ouai Ouai

gUM 11 D'accord parce que moi je comprenais plutôt comme si tu veux faire telle partie du drone il faut faire telle tâche

gUP 13 Oui du coup c'est pas vraiment du mind-mapping

gUM 12 et ce que tu disais moi je l'imagine plutôt bah optimisation topologique en L3 ils cliquent dessus et ils voient où est ce que tu as besoin de ce niveau là dans tout ça

gP 15 ça c'est ce que l'on espère faire à la fin mais là on est vraiment qu'au début parce que moi en fait c'est pas vraiment une mind map c'est une modélisation hiérarchique des tâches on appelle ça et en fait je me suis servie d'un logiciel de mind map pour rendre ça plus interactif et animer les groupes de travail

gUM 13 c'est de l'ordonnancement ou quelque chose comme ça

pP 16 oui tout à fait

pUP 14 et donc là de ce que par exemple si on veut qu'est ce après je sais pas du coup l'objectif de la réunion d'aujourd'hui c'est de dire ok on va faire l'optimisation topologique

pP 17 Ouai voila on va faire de l'optimisation topologique et du coup quelle tâche on peut bien réaliser et sur quelle partie du drone

pUP 15 donc on va dire quoi on va dire l'optimisation topologique on va l'enseigner on va déjà définir le niveau c'est ça ? peut être M1 M2 L3 enfin L3 ou IUT Je sais pas est ce que c'est ça le but de la réunion

gP 18 Bah là en fait le but c'est de dire dans toutes les tâches qu'on a là lesquelles peuvent être intéressantes pour illustrer un cours d'optimisation topologique peuvent entrer dans un module d'optimisation topologique ayant pour sujet l'optimisation topologique

gUP 16 D'accord alors je vais juste replacer la conception du drone en fait la conception du drone tu vois un peu le truc c'est partie avec tous les partenaires Dassault système voulait un support de travail en mode projet qui permette d'apprendre à utiliser la plateforme et Dassault système eux fonctionnent avec des histoires donc il faut choisir une histoire donc au départ on a choisi le drone , donc ça ça a été défini assez vite et après qu'est ce qu'on allait mettre en terme de compétence ou peut être même des chapeaux on en avait déjà un peut réfléchi aux chapeaux et on l'a intégré au drone donc il y avait le paramétrage, l'optimisation topologique , la fabrication additive enfin toutes ces choses tous ces mots clés là

pUM 14 d'accord

gUP 17 Et euh je sais même plus ce que je voulais dire et euh bon voila c'est ça j'ai perdu l'idée que je voulais dire finalement ah si c'est ça et donc le paramétrage tu vois

donc quand on a défini ça c'était un drone customisable et donc dans l'analyse des systèmes qui a été faite par Sylvain de chez ALTRAN cette analyse des système a été le point de départ du travail de P donc toute ce actions tous ces mots clés viennent du drone

gP19 Ouai

gUP 18 Après il y a des éléments qui peuvent être utilisés pour un autre produit tu démarre toujours de la même façon et ensuite tu deviens spécifique au drone un peu sur la droite (montre la droite de l'écran) mais sur la gauche tu trouve des éléments qui sont très généraux (montre la gauche de l'écran) et qui pourront être réutilisé par les étudiants plus tard pour un tout autre produit

gP 20 Oui ce sont des éléments très généraux

gUP 19 Et donc dans l'histoire on imagine un client qui pourra choisir le type de drone un drone de course ou bien un drone qui porte une caméra enfin différents paramètres si tu veux tu vois le client peut customiser le drone

gUM 15 Oui les différentes options à choisir parmi des listes

gUP 20 Oui et il y a des qui qui peut pas ou sur lesquelles nous on va pas jouer par exemple si il choisit un drone de course ça va donner une certaine catégorie de moteur et d'hélice etc donc toute cette partie là dans les conception du drone on y touche pas c'est juste une sélection dans une base de donnée

gUM 16 ok ça on le prend tel-quel et on l'intègre au drone directement

gUP 21 et donc l'essentiel des choses sont prises tel-quel sauf les bras, parce que quand tu vas faire un drone de course tu va faire des bras courts quand tu vas faire un

drone qui prend des photos des bras longs donc les bras sur l'aspect mécanique c'est là dessus qu'on a imaginé l'optimisation

gUM 17 ok

gUP 22 Et donc après le châssis qui va venir supporter la carte électronique et éventuellement un caméra tout ce que tu veux. là aussi on s'est dit bah on peut faire de l'optimisation parce que le drone c'est un châssis enfin un couvercle une boîte un cœur, et les bras pour le moteur etc

gUM 18 oui

gUP 23 en dehors de ça il y a rien d'autre sur lesquelles on a pu voire de l'optimisation et c'est pour ça que l'optimisation intervient sur châssis et capot et sur les bras voilà c'est tout

gD 1 d'habitude les bras ils font partie intégrante du corps

gUP 24 Alors soit

gD 2 c'est la première chose qui m'a sauté aux yeux c'est pourquoi on a pas fait ça d'un bloc

pP 21 c'est à cause de la taille de l'imprimante en fait du coup tu ne peux pas sortir le drone d'un bloc

gUP 24 Oui parce que dans le cahier des charges faut que ce soit réalisable dans un lycée ou autre et du coup on est limité par la dimension des imprimantes du coup pour les lycées c'est des imprimantes à 20 par 20 ou 30 par 30 donc ça fait partie du cahier des charges

gD 3 ok et du coup on pourrait peut être intégrer cette option justement en fonction de ce qu'ils ont

gUP 25 Après dans les paramètres que l'on a imaginé dans la CAO bon après il faudra un peu enfin oui on a imaginé un paramètre de taille quoi tu choisis peut être 3 modèles imaginons tu choisis un petit un moyen et un grand le moyen grand tu dissocie les bras de la structure et le petit tu le fais d'un bloc et dans ce cas là tout serait solidaire

gD 4 Ouais

gUP 26 et donc dans la CAO quand tu fais de la CAO tu choisis ton modèle automatiquement ta CAO se met à jour soit c'est des assemblages soit c'est fait en une fois etc et tu fais de l'optimisation qui serait différente donc il y a plein de il y a plein il pourrait y avoir plein d'histoire en fait

gUM 19 Oui voilà

gD 5 Bah j'avais commencé à faire justement un mind-map par rapport euh à cette partie là qui serait plus la partie matériel et du coup il y aurait d'abord le choix du type de drone donc est ce que c'est un drone pour la vidéo ou est ce que c'est plus un drone pour faire de la course quoi et ensuite la taille et ensuite en fonction de la taille on avait différents cheminements pour sélectionner la solution optimale

gUP 27 parce que quand tu fais du paramétrage bon je parle un peu de paramétrage même si on est sûr de l'optimisation quand tu fais du paramétrage quand tu définis le paramètre taille et donc quand tu changes de paramètre là le but on va là aussi développer des supports pédagogiques pour introduire le paramétrage dans une CAO

c'est comment est ce que tu t'assures de la mise à jour de tous les éléments qui dépendent de ce paramètre là etc

gD 6 ok

gUP 28 donc tu as des méthodologies qui te permettent de faire ça alors quand tu met en œuvre un méthodologie pour 1 ou 2 paramètres quand tu en met pour 50 c'est exactement la même méthodologie en terme de scénario ça devient très vite complexe donc faut qu'on réfléchisse à c'est pour ça qu'on avait juste imaginé une taille et à la limite même une homothétie tu changes et ça grandi etc. Mais c'est vrai si tu veux aller plus loin le client tu lui fait apparaître une userform les étudiants savent faire ça en une semaine normalement ils savent faire ça tu fais apparaître une userform le client il choisit la couleur est etc qu'il veut mettre un autocollant est ce qu'il veut supporter une caméra quel est le poids total

gUM 20 Et ça s'actualise et il voit un peu le rendu de ce qu'il veut

gUP 27 et donc on va faire un support pédagogique sur la partie paramétrisation aussi

gP 22 et donc là du coup dans l'arborescence ce serait la partie logique ça qui était ici (ouvre la partie logique de l'arborescence). Elle est assez pauvre parce que au final NAD et NAI étaient quand même des ingénieurs en mécanique du coup ils se sont pas trop attachés à la partie logique mais du coup la userform je pense que ça irait très bien dans la partie logique genre créer une interface sur la 3Dexperience

pUP 28 Alors ça c'est la logique et en dessous c'est quoi c'est le physique ? (montre le bas de l'arborescence)

pP 28 Ouai voila c'est le physique (zoom sur la partie physique de l'arborescence)

gUP 29 Et dans le physique on voit donc modéliser le drone donc le capot etc et on voit en haut à droite préparer la modélisation CAO et créer les plans de référence

gP 29 Oui voila

gUP 30 Créer les plans de référence les plans pilotant le mot pilotant fait référence à du paramétrage pour moi enfin si il pilote tu peux le modifier et il influencera le reste du coup c'est une partie assez complexe

gUM 21 Pilotant c'est dans le sens du client ?

pUP 31 du coup aujourd'hui tu veux savoir qu'est ce qu'on va allumer pour l'optimisation topologique c'est ça. Tu vas le mettre d'une autre couleur à un endroit ou à un autre dans l'arbre

gP 30 bah en fait je vais tout simplement créer un autre arbre qui sera l'arbre module optimisation topologique (ouvre la partie optimisation topologique) où je vais prendre des morceaux de l'arborescence globale (ouvre l'arborescence globale) et je vais ainsi séparer les tâches que devront faire les étudiants lors du module d'optimisation topologique

gUP 32 d'accord donc on travail avec la carte c'est ça ?

gP 31 Voila

gUP 33 on travail avec ça ok donc là et après donc sur le module d'optimisation il va falloir aussi

gP 32 déterminer tout

gUP 34 alors les publics qu'on va viser admettons M1 M2 L3

gP 33 Bah je pense que une première phase ce serait de déterminer absolument toutes les tâches en lien avec l'optimisation topologique ensuite définir tous les savoirs qu'il faut pour réaliser une optimisation topologique

gUP 35 oui mais ça ça va dépendre du niveau que tu souhaites donner à ton cours

gD 7 Par niveau on pourra les classer par niveau ensuite si on détermine déjà toutes les possibilités

gP 33 oui voilà on est exhaustif au début comme ça on peut classer par ordre croissant de difficulté les savoirs

gUP 36 ok donc en fait ça va être une optimisation on va lister tous les prérequis

gP34 voilà

gUP 37 et après les prérequis on va prendre une partie et on va dire c'est pour L3 un autre pour M1

gP 35 voilà en fait je pensais prendre tous les prérequis et mettre différentes colories

pUP 38 et donc aussi pour préciser auprès de UM donc l'histoire globale c'est un drone alors personne ne pourra faire dans un cours enfin dans un cours tu peux pas même si tu inscrit ça dans un contexte de création de drone avec la fabrication additive tout ce que tu veux quand un enseignant d'IUT euh veut faire de l'optimisation topologique il peut présenter le contexte global et puis il va expliquer et il va dire bah nous on va juste faire ça. Du coup même si on s'adresse au lycée imagine il veut faire un peu de ci ou ça il y a pas forcément la fabrication à la fin qui va je sais pas ou alors dans le lycée

on va axer sur la fabrication et toutes les étapes d'optimisation sont juste quelques mots clefs pour un peu les sensibiliser à ça mais sans forcément qu'ils aillent faire de l'optimisation topologique et des trucs mathématique et tout ça

pUM 22 et donc par rapport à ce que tu dis par rapport au prof de lycée ou d'IUT qui veut axer simplement son travail sur une tâche est ce qu'il pourrait récupérer par ailleurs tout le reste d'un travail c'est à dire que il donne tel tâches à tels étudiants et tels autres tâches aux autres et ils peuvent quand même fabriquer le drone à la fin

pUP 39 il faudrait qu'ils soient très bien aiguillés alors

gD 8 en théorie il serait possible de créer un fichier paramétrage dans lequel il y aurait déjà tout ce qui est optimisation topologique déjà paramétré et prêt

gUP 40 oui et après l'enseignant dit bon bah là il y a juste à lancer le calcul et regardez sur la base de votre travail on peut faire ça

gD 9 oui il lance le calcul fait apparaître la userform et dit bah voila la conception paramétrée il peut un peu présenter l'intérêt de la conception paramétrée par rapport au contexte industriel

gUP 41 oui et après il peut dire bah regardez nous on démarre de ça et on prend ça et voila le résultat . Donc va falloir définir dans les prérequis il va y avoir les mots clés des connaissances et il y aura les supports avec lesquels il pourra bosser. Et en M2 par exemple pour faire de l'optimisation topologique si c'est en M2 là il peut y avoir un petit cours d'élément finis ou d'optimisation topologique que tu pourrais pas faire en L3 avec des trucs mathématiques des choses comme ça mais tout ça c'est ... parce qu'il y a vraiment beaucoup de chose. La difficulté c'est d'avoir un truc

gP 36 guidé

gUP 42 oui d'avoir un truc bien bien propre après c'est pour ça qu'il faut l'éprouver auprès d'étudiants faire des enquêtes est ce qu'il manque pas ci est ce qu'il manque pas ça et donc on a choisit l'optimisation topologique parce que c'est sur ce module que les étudiants ont travaillé l'année dernière et donc ils ont déjà produit un cook book pour faire de l'optimisation topologique sur la 3D expérience

gD 10 là le truc je l'imagine genre tu as un file de fichier qui sont prêts et euh genre ils sélectionnent les parties genre ils suivent le file et là où ils ont pas les compétences par exemple pour l'optimisation topologique ils utilisent les fichier mais après pour une autre partie ils font ça eux même si ils savent déjà le faire

gUM 23 Il y aurait donc une version déjà utilisable déjà toute faite et il faudrait juste la paramétrer

gD 11 ouai et dès qu'il s'écartent de leur chaîne de compétence enfin dès qu'ils reviennent dans leur chaîne de compétences ils font par eux même

gUP 43 Ouai c'est ça et sur le paramétrage ça c'est des choses qu'on fait et D aussi donc là il y a un peu d'innovation à faire même dans en dehors de l'aspect pédagogique mais aussi dans le support que tu peux proposer comment l'enseignant va piloter ça pour amener le cours aux étudiants ils y a des choses qui peuvent être intéressantes et c'est un peu ce que fait le compagnon tu sais . Le compagnon en tout cas l'aide CATIA c'est quand tu vas dans l'aide CATIA et que tu veux faire une chose eh bien il te file un fichier de départ tu fais ça et tu arrive à un fichier à la fin . Donc tu suis les étapes avec une sorte de prérequis au niveau des concepts tu fais évoluer ton produit afin de répondre aux objectifs visé par le petit élément pédagogique. Et tu as un point de départ qui est un CAO et un point d'arrivé qui est une CAO et tu regardes si ça marche. Bon bah voila très globalement le contexte. Donc on travail l'optimisation ,

le paramétrage pour ce qui est de nous les mécaniciens après il y a la partie élec avec l'ESPE avec RG

gP 37 et puis il y a JG qui s'est proposé de nous aider

gUP 44 voilà là c'est de la cobotique le contrôle la mécatronique. Donc il y a beaucoup d'aspects. nous en mécanique on ne maîtrise pas tout mais sur l'aspect optimisation topologique et assemblage paramétrage méthodologie de conception c'est là dessus qu'on se positionne

gUM 24 Donc là on va balayer ligne par ligne l'arborescence et on regarde si il y a un truc qui nous fait penser à l'optimisation topologique

gD12 Après euh nan mais parce qu'il y a l'optimisation topologique mais il y a aussi l'optimisation géométrique

gUP 45 moi je pense qu'on peut l'inclure là dedans

gD 13 ouai c'est bien parce que en plus quand les étudiants de licence ont pas le niveau pour réaliser une optimisation topologique ils peuvent juste faire une optimisation géométrique

gUM 25 Ouai dans ce cas on peut parler plus généralement d'optimisation des structures et dedans tu met optimisation de dimensionnement donc là c'est par exemple un bras donc quelle épaisseur tu lui donne euh il y a de l'optimisation de forme également donc est ce que tu as comment dire quand tu as une ellipse est ce que tu vas plutôt vers un cercle une ellipse allongée une ellipse vers le haut donc le contour est déjà définie et tu vas juste voire un petit peu vers quelle forme finale tu vas aller et après l'optimisation topologique là c'est vraiment le degré euh au dessus c'est à dire on a pas vraiment d'idée de la forme qu'il nous faut on prend un volume

complet, une surface complète de matière potentielle et euh le résultat c'est de dire il vaut mieux mettre de la matière dans cette zone là plutôt que dans cette zone là et on arrive à des formes qui n'étaient pas comment dire intuitées initialement On a vraiment des formes complètement libres et après il y a une quatrième partie d'optimisation c'est aussi l'optimisation de matériaux est ce que je prend des matériaux très simple ou est ce que je prend des matériaux avec des propriétés différentes dans des directions différentes et dans ce cas là je les orientes dans des directions différentes là je les orientes d'une certaine façon pour répondre le mieux aux sollicitations et donc pour moi il y a 4 parties d'optimisation après selon le public visé on peut aller sur l'une ou l'autre. Donc comme tu dis bah l'optimisation de dimensionnement de forme ça peut être euh. alors c'est différent de des des choses paramétrées parce que le paramétrage on va dire tu peux balayer plusieurs paramètres et tu test tu regarde lequel va être le mieux pour ton objectif là quand tu parles d'optimisation c'est tu as des paramètres mais tu vas aller vers la meilleure solution donc tu as des algorithmes qui vont minimiser un coût enfin une fonction objective euh pour aller vers cette chose là

gUP 46 et ça c'est intégré dans la 3DExperience

gUM 26 ouai d'accord

gUP 47 la topologique la géométrie euh la deuxième c'était quoi avec les ellipses ?

gUM 27 C'était l'optimisation de forme c'est juste un exemple que j'ai donné. tu prends une plaque trouée sur laquelle tu tire euh avec au centre un trou alors quelle est la meilleure forme est-ce que c'est un trou circulaire ? un trou elliptique ou une autre forme

gUP 48 Et tu passe pas du tout au carré

gUM 28 Tu peux mouai oui c'est vraiment le cas extrême mais non dans la plupart des cas tu garde une forme générale ça peut être un carré effectivement c'est juste que tu as le trou après il a le contour que tu lui donne

gUP 49 Mais c'est c'est là où je comprend pas

gUM 29 c'est à dire tu lui donnes un forme et tu peux pas enlever de la matière ou mettre de la matière sur le côté

gUP 50 Donc je vois pas trop la différence entre ça et l'optimisation de paramètre. Parce que si tu fais une ellipse avec 2 demi-axe tu met 2 paramètres et ta forme elle est paramétrée par 2 demi-axe

gUM 30 Oui oui tu peux paramétrer ta forme et elle est paramétrée par 2 demi-axe

gUP51 et c'est la même chose en fait c'est ça

gUM 31 oui oui c'est ça. En fait tu vas pas faire un balayage des paramètres et dire bah sur les 10 paramètres enfin les 10 valeurs de paramètres que j'ai testé celle là est la meilleure

gUP 52 ouai enfin dans la 3DExperience tu lui dit de réduire je sais pas tel ou tel truc en jouant sur les 2 paramètres. donc lui il va balayer tout un espace de test il va minimiser la fonction coût et voila et il va faire l'optimisation

gUM 32 donc il y a de l'optimisation derrière ok c'est pas juste un

gUP 53 oui il fait pas juste un plan d'expérience

gUM 33 oui un plan d'expérience

gUP 54 il a un algorithme de minimisation

gUM 34 ok

gUP 55 et donc c'est un peu la même famille que la première que tu disais

gUM 35 Ouais

gUP 56 et puis il y a l'optimisation topologique la vraie l'optimisation de forme et puis il y a l'optimisation de matériaux Mais donc je suis d'accord avec toi

gUM 36 et sur le public tu peux aller vers telle ou telle optimisation qui sera plus ou moins euh accessible

gUP 57 (montre l'arborescence) Et je suis d'accord donc sur la carte en fait tu peux faire tu as l'optimisation des structures optimisation du drone et tu peux mettre déjà 3 trucs

gP 38 d'accord

gUP 58 optimisation matériaux après on verra comment on organise ça

gUM 37 après quand tu parles de paramètres tu as toujours enfin dans tous les cas d'optimisation tu as des paramètres c'est juste que tu ne tu n'as pas le même nombre de paramètres et tu n'as pas la même signification. Je suis d'accord que le but c'est de trouver le meilleur jeu de paramètres pour euh alléger

pUP 59 et dans l'optimisation topologique tu as pas de paramétrage

pUM 38 Euh bah si les paramètres les paramètres c'est en fait dans toute ta tout ton volume de matière tu as une pseudo densité qui varie entre 0 et 1 0 c'est pas de

matière et 1 c'est que de la matière en gros tu as en chaque euh chaque points de l'espace tu as un paramètre

pUP 60 et c'est pas un paramètre euh géométrique

pUM 39 c'est pas physique comme paramètre

pUP 61 les autres c'est de la géométrie

pUM 40 oui c'est ça

pUP 62 d'accord donc l'optimisation de structure l'optimisation en fait le module c'est de l'optimisation de structure

pP 39 OK

pUP 63 Dedans tu as l'optimisation

gD 14 forme topo et matériaux

gUP 64 optimisation de forme

gUM 41 Géométrie

gD 15 Forme

gUM 42 sans oublier l'optimisation de dimension les dimensionnement de formes de structure de formes

gUP 65 donc optimisation des structures

gUM 43 des structures

gP 40 Des structures (Ecrit optimisation de structure sur la modélisation)

gUP 66 après structure on pourra mettre drone hein

gUM 44 et là tu as 4 volets le premier le plus simple c'est l'optimisation de dimensionnement

gP 41 ok (écrit optimisation de dimensionnement sur la modélisation)

gUM 45 donc à tu ne changes pas du tout la topologie ou la forme générale de sa structure c'est juste que tu met des parties plus ou moins épaisses et des parties plus ou moins larges euh ensuite tu as l'optimisation de forme la deuxième où là tu vas , la forme globale est la même mais euh tu peux euh voilà passer d'un cercle à une ellipse ou éventuellement un carré dans un cas limite

gP 42 d'accord (écrit optimisation de forme sur la modélisation)

gUM 46 après l'optimisation de matériaux où là tu ne touche pas aux dimensions ni à la forme simplement tu vas dire bah je prend euh un matériaux n'importe lequel parce qu'il y en a différents types même quand tu as du composite avec des euh avec différentes pile tu peux changer les orientations afin d'être plus ou moins résistant

gP 43 et puis je suppose que cette optimisation là dépend de l'utilisation que l'on fait de du drone

gUM 47 oui alors chaque fois que l'optimisation est faite euh ça comment dire c'est dans le cadre d'une certaine utilisation donc avec des conditions limites et des efforts de sollicitation de la de la pièce mais ça c'est valable pour toutes les 4 étapes

gP 43 ok et du coup on pourrait rajouter une petite partie du cahier des charges pour que l'étudiant ait conscience d'où vient le besoin d'optimisation

gUM 48 oui parce que chaque pièce que tu dimensionnes que tu conçois elle est euh elle est dans son environnement

gUP 67 oui et le cahier des charges n'est pas globale parce que tu peux pas présenter le même cahier des charges en optimisation topologique et en optimisation de paramètre l'optimisation topologique peut être plus large quelque soit la forme

gUM 49 oui voilà c'est ça

pUP 68 après pour moi l'optimisation de forme et de paramètre c'est la même chose en terme de mise en œuvre sur la 3DEXperience parce que en fait quand tu fais euh du moment que tu définis une forme par des paramètres de dimension optimiser les formes ou optimiser les dimensions pour moi c'est la même chose. Tu vois si une forme c'est euh c'est défini par des paramètres, demi axe, hauteur etc, après l'optimisation de forme elle passe par l'optimisation de ces paramètres là donc pour moi c'est la même chose. Mais tu peux scinder les deux

pP 44 Mais comment est-ce qu'on pourrait alors dans ce cas nommer le module

pUM 50 optimisation de structures parce que c'est ça qui englobe tous les procédés tu vois par exemple pour l'optimisation de forme tu passes d'une plaque rectangulaire trouée à une ellipse à cause de la forme de la plaque

gUP 69 alors là je comprend ce que c'est en fait l'optimisation paramétrique l'optimisation de dimensionnement c'est tu as un seul paramètre dans l'optimisation, c'est un seul paramètre. Et dans l'optimisation de forme tu peux avoir plusieurs paramètres par exemple tu peux changer à la fois l'épaisseur et euh

gUM 51 Si un élément je suis d'accord sur un élément euh structurale ou sur une partie tu peux dire ça

gUP 70 parce que même en terme d'algo, même mathématiquement entre optimisation de forme et optimisation de paramètre c'est pareil il y a juste un paramètre en plus

gUM 52 oui sur les algorithmes c'est les mêmes hein peu importe l'optimisation c'est tu vas faire tourner des boucles pour minimiser une fonction objective l'optimisation c'est ça hein c'est minimiser une fonction objective après dans la fonction objective il y a des paramètres euh des variables de conception et ça suivant l'optimisation que tu fais tu n'as pas le même nombre de variables de conception.

gP 45 donc du coup on met les 4 ou bien on

gUP 71 non moi je pense ça c'est bien par rapport à la 3DExperience au concept à la CAO ou au paramètre parce que quand on fait. Mais après quand on fait bouger des paramètres on peut changer la forme et on peut changer la longueur ou l'épaisseur etc. Par contre optimisation des matériaux c'est complètement déconnecté et optimisation topologique aussi c'est complètement déconnecté. ça dépend des paramètres des éléments finis.

gUM 53 bah ça dépend ce que tu appelles paramètre

gUP 72 longueur épaisseur euh des dimensions et euh voilà

gUM 54 ok dans ce cas là je suis d'accord . Mais on optimisation on appelle ça plutôt des variables de conception

pUP 73 alors qu'est ce que tu appelles variables de conception

gUM 55 bah les variables de conception c'est des épaisseurs des longueurs en optimisation de forme ça va être des rayons ou des arrondis des congés en optimisation de matière ce sera les pseudo densité que tu mets partout dans ta matière et optimisation de paramétrique bah ce sera les orientations

gUP 74 alors là le paramètre c'est en longueur

gUM 56 Oui du coup si tu adapte ton langage à celui du logiciel on peut parler de paramètre je suis d'accord

gD 16 on appelle ça toujours l'optimisation géométrique au final

gUP 75 Ouai et si l'optimisation eu géométrique ouai bah oui paramétrique

gP 45 Donc paramétrique ou géométrique ça c'est comme vous voulez

gUM 57 aller on met géométrique

gUP 75 et donc en terme de compétences visées ou de présentation. Enfin dans la mise en œuvre dans la 3DExperience on présente le paramétrage l'optimisation tout ça ça peut appartenir à un premier point que ce soit de la forme ou du dimensionnement parce que ce sera les mêmes outils

gP 46 d'accord

iUP 76 et du coup matériaux ce sera un autre outil topologique aussi

gD 17 pour les matériaux je ne sais pas lequel ce sera

gUP 77 Matériaux du coup matériaux il est intégré dans l'optimisation topologique

pD 18 Même le sens de pose de la matière et tout ?

gUP 78 ah non là tu fixe le matériel

gD 19 et en toute logique il y a aussi génératif euh design

gUM 57 par contre ce qui est possible de faire c'est de de faire des mette bout à bout ces différentes optimisations tu commence par l'optimisation topologique ça fait qu'au début tu ne sais pas trop la forme globale qui va répondre euh qui répond à ton à ton cahier des charges tu fais une première version du solide, tu dégage la forme générale. Cette forme générale tu peux la paramétrer donc là c'est optimisation de forme ou alors tu peux la paramétrer pour un choix de matériaux donc tu peux les cumuler et les faire à la chaîne

gUP 79 ouais on verra parce que tu vois sur l'optimisation de matériaux donc le module de Yung c'est un paramètre. et donc tu peux faire de l'optimisation avec la 3DExperience juste sur la valeur du paramètre. Il va te calculer des contraintes minimales pour une forme donnée et il va t'optimiser la valeur du module de Yung. Mais après pour aller au delà sur anisotrope isotrope enfin voilà des lois de comportement plus compliquées euh là CATIA est pas capable de le faire. Mais il peut te faire de l'optimisation de matériaux par rapport à un module de Yung donné quoi. Donc après il y aura des choses qui vont peut être euh qui vont peut être se recouper etc. Mais en tout cas ce qu'a fait NH c'est de l'optimisation topologique.

gP 47 Alors du coup là on a optimisation de matériaux optimisation topologique et optimisation géométrique donc il faudrait trouver les tâches qui entrent dans ces différentes sous catégories

gUP 80 du coup on va commencer par la topo alors du coup c'est quoi le R

gP48 c'est les requirement en fait c'est les exigences

gUP 81 ok alors définir le système, définir la faisabilité technique , modifier l'appelle d'offre en fonction de la faisabilité technique ça c'est pas des choses que l'on intègre

gUM 58 eu non je pense pas non

gUP 82 Mmm d'accord, créer une matrice de traçabilité etc. euh ça c'est plus de l'ingénierie système

gP 49 Ouai voila ça c'est de l'ingénierie système donc on en aura pas besoin non ?

gUP 83 oui donc ça on l'utilise pas. Le F c'est functional donc ça c'est aussi de l'ingénierie système donc ici ça reprend la même chose

gP 50 oui parce que dans les R ce sont des exigences qui sont associées à chaque sous système tandis que dans les F ce sont des exigences qui sont associées à chaque partie du système par exemple le bras supporte le le moteur il est rattaché au châssis du coup il doit transporter la force du moteur vers l'ensemble du système

pUP 83 Et ça c'est identifié dans la partie F

gP 51 oui voilà c'est ça et du coup c'est ça qui pourrait être intéressant dans un module d'optimisation topologique

gUM 59 bah là c'est ce qu'on appelle les conditions limites les efforts subis par les bras et tous les composants du drone

gP 52 ok donc on trouve ça dans formaliser les exigences fonctionnelles (ouvre la fiche "formaliser les exigences fonctionnelles") tiens regarde on a le exigences mécaniques exigences électroniques exigences logiciel donc du coup là ce qui nous intéresserait ce serait ?

gUM 60 les exigences mécaniques

pUP 84 donc on récupère tout le chemin de tout à droite jusque tout là haut (Montre des parties de la modélisation) et on les met sur la modélisation du module

gP 53 Oui voilà

gUP 85 et donc ces conditions limites sont valables pour tous les types d'optimisation. Parce que ça c'est le point de départ de tout

pD 20 tu peux les mettre en couleur comme ça on les verra bien

pP 54 oui bah là je vais carrément les déplacer pour créer une nouvelle modélisation comme ça ce sera plus visible. (copie colle une partie de la modélisation générale sur la modélisation du module optimisation topologique).

gUP 86 voilà et là on la met tout en haut parce que c'est commun à toutes les optimisations du coup il faut en mettre un pour chaque optimisation

gP 55 du coup on le fait apparaître là comme ça on sait qu'on en a besoin pour pouvoir effectuer la suite

gUM 61 Du coup l'entrée en matière pour le module d'optimisation topologique se fait par le cahier des charges

gP 56 et du coup est ce que l'optimisation des matériaux prend en compte les conditions limites

gUM 62 oui tout à fait

gP 57 ok du coup on pourra aussi l'ajouter sur celui-ci

gUM 63 mais là c'est c'est

gP 58 ça fait partie des exigences mécanique de chaque sous systèmes. Après ça me dérange un peu car simplement mettre les conditions limites c'est ne pas prendre en compte tout ce qui a été fait avant. Donc la tâche formuler les exigences mécaniques de chaque sous-systèmes eh bien il faut les déterminer ces sous systèmes

gUP 87 oui d'accord

gP 59 donc on peut peut-être

gUP 88 est ce que tout en haut (montre un point de la modélisation) en fait tout au bout il y a le drone et l'optimisation topologique bah on le fait pas sur le drone on la fait sur le bras donc pour arriver au bras il suivre un chemin où à un moment on croise l'optimisation topologique

gP60 voilà

gUP 89 par exemple déterminer les sous-systèmes le bras concerné par l'équipe mécanique

gP 60 ok du coup on enlève les sous-systèmes concernés par l'équipe électronique et l'équipe informatique

gUP 90 ok du coup on garde le châssis les bras tout ça

gP 61 après avoir répartis tous les systèmes on formalise les exigences

gUP 91 ça veut dire ?

gP 62 euh bah formaliser les exigences mécaniques du sous système

gUP 92 donc pas élec et logiciel

gP 62 ensuite produire le FRS

gUP 93 Je ne sais pas ce que c'est

gP 63 en fait c'est le fonctional requirement specification c'est de l'ingénierie système mais je sais pas si c'est intéressant. En fait c'est

gD 21 c'est la gestion des exigences ça non ? c'est la façon de créer les données à partir d'un cahier des charges les données numériques par exemple dire voila pour ce truc là il te faut un écran LCD donc euh tu dis par exemple le nombre de pixels que doit avoir l'écran LCD. et genre tu fais un retour vers la CAO qui dit que voila ça ça va . Ce que je dois faire en ce moment c'est faire le lien entre des paramètres et la gestion des exigences. et la gestion des exigences il faut avoir des données numériques qui doivent être un paramètre dans la CAO

gUP 94 d'accord ce qui n'existait pas sur CATIA apparemment parce que ça n'était pas en mode projet

gD 22 bah du coup la gestion des exigences ça c'est ENOVIA

gUP 95 ouai voila

gP 64 donc là c'est les exigences fonctionnelle donc on peut par exemple on peut débiter chacun des modules par ça

gD 23 bah oui en théorie la gestion des exigences ça vient juste après le cahier des charges et juste avant l'optimisation topologique

gP 65 une toute petite partie gestion des exigences

gD 24 c'est à dire tu lis le cahier des charges il y a des données qui vont ressortir tu les mets sous forme d'exigences

gUP 96 euhm en fait je sais pas du coup la question en fait c'est la complexité du truc en fait quand tu fais une optimisation topologique tu as juste besoin des conditions limites . qu'est ce que tu imposes est ce que tu bloque ça ce que tu as dit avant quelle sera la poussée du moteur le poids machin donc ça ça va donner les conditions limites et on pourra optimiser. Mais après ce qu'il fait peur c'est la complexité je veux dire ça va être énorme

gP 66 oui mais ça permet de contextualiser l'optimisation et de rendre ça un peu moins abstrait ça aide l'étudiant à

gD 25 l'idéal ce serait qu'on puisse en sélectionnant le niveau cacher des parties de l'arbre en fait

gP 67 oui voilà

gUP 97 alors dans l'optimisation mais là je parle sous couvert de UM il y a des étapes hein c'est ça les conditions limites. Alors par exemple quand tu fais optimisation des matériaux est ce que tu peux pas avoir à côté euhm

gUM 64 mais c'est c'est juste là c'est valable pour l'optimisation mais aussi simplement quand tu fais du calcul élément fini de l'analyse

gUP 98 donc là on est sûr de l'optimisation donc je vais t'expliquer parce que après quand un enseignant veut faire de l'optimisation topologique enfin moi si je veux faire de l'optimisation topologique, j'ouvre la modélisation et là je vois optimisation de matériaux et là moi je suis perdu c'est fini

gUM 65 il faudrait une entrée en matière pour que le prof comprenne ce qu'il a à enseigner

gUP 99 oui là on a optimisation donc du coup on part d'exigences fonctionnelles ce que l'on appelle les conditions limites c'est ce dont tu as besoin quand tu es enseignant en mécanique et que tu veux faire de l'optimisation topologique. Ces conditions sont données dans le cahier des charges. Donc quand tu veux faire de l'optimisation topologique tu fais ça après tu fais matériaux ou je sais pas quoi et les conditions limites c'est une terminologie bien spécifique à l'optimisation topologique de la mécanique et des calculs élément finis. Et ça c'est un truc qu'on ne peut pas éviter il faut donc l'inclure dans le module on ne peut pas parler d'exigence donc on va devoir changer de terminologie pour le module

gP 68 oui ok c'est pas un soucis ça

gUP 100 donc du coup on pourrait imaginer sur la modélisation un truc qui efface tout sauf l'optimisation pour ceux qui n'ont pas le niveau. Donc tu aurais 2 boîtes, une boîte qui contient tout le chemin pour l'optimisation topologique et une boîte pour toute la partie gestion des exigences. C'est à dire si l'enseignant ou si euh du coup un ingénieur système pourrait faire de l'optimisation topologique. Bah voilà il dit on veut faire de l'opti topo du coup comment en ingénierie système vous faite pour dégager les conditions limites dont on a besoin pour l'optimisation topologique. Il pourra alors justifier le contenu de son enseignement en ingénierie système par l'utilisation de l'optimisation topologique

gD 25 on est pas en train de faire ça à l'envers parce que en théorie les exigences fonctionnelles on va les voir arriver avant l'optimisation. Donc en fait cette partie ne devra pas être masquée mais elle devra être déjà faite quand on arrivera à l'optimisation topologique

gUP 101 ça ce sera déjà fait oui mais mais

gD 26 on peut imaginer ça sous forme de rappel ou de sensibilisation

gUP En fait ça ce qui est important de voir par rapport à toute l'arborescence euh telle qu'elle est là c'est que ça (montre la partie ingénierie système de la modélisation principale) ça parlera pas à un enseignant d'optimisation topologique

gD 27 en fait il faut reformuler les exigences fonctionnelles

gUM 66 à la limite on pourrait donner la modélisation telle qu'elle et dire voilà le cheminement qui amène à l'utilisation de l'optimisation topologique

p 69 on pourrait appeler ça prérequis fonctionnels peut être

gUP 102 Ok du coup on pourrait avoir une partie qui s'appelle conditions limites et comment on fait pour les obtenir et on peut associer une autre partie optimisation topologique qui est séparée mais indissociable de l'autre

gP 70 ok

gUP 103 les conditions limites sont déterminées par les exigences fonctionnelles qui sont détaillées à partir du cahier des charges etc

gP 71 oui ça m'a l'air bien

gUP 104 du coup on peut faire soit une note soit un cours entier sur la création des conditions limites. Mais donc nous ce qu'on a besoin d'avoir on a déjà besoin d'identifier les items topologique paramétrique géométrique enfin ce que tu veux. Pour faire de l'optimisation on a besoin de conditions limites qui sont données dans le cahier des charges euh par l'analyse du cahier des charges. Parce que après à la fin l'enseignant il faut vraiment que ça lui parle ça

gD 28 après on peut aussi changer le mot exigence fonctionnelle avec cahier des charges parce que tu vois c'est plus compréhensible

gUP 105 Ouai après je pense qu'il faut aussi que ça rappelle la terminologie utilisée dans l'autre module ou l'autre partie du projet c'est ça qui est complexe. Alors que la première carte du drone soit très complexe avec plein de détails mais après dans le support il faut que tout ça ça disparaisse parce que sinon tu vas perdre tout le monde

gP 72 ah oui mais de toute façon les fiches que j'ai créé elles sont faites spécialement pour ça. La partie pédagogique on peut dire que le module il commence comme ça enfin il y a. Mais ça c'est pas du tout un problème

iUP 106 et ça l'intitulé de la tâche (montre la tâche optimiser topologiquement le bras) ça peut être le titre d'un sous module du module d'optimisation d'optimisation topologique et ça en fait ça va être le démarrage. là quand t'es ici (montre la tâche déterminer les exigences fonctionnelles de chacun des sous systèmes) t'as pas fait l'optimisation topologique tu 'as pas fait le calcul ici

gP 73 euh non je ne crois pas

gUM 67 non

gUP 107 donc en fait on décline le besoin qui fait que l'on doit utiliser l'optimisation topologique. ça donne les conditions limites et après tu commence l'optimisation topologique

gUM 68 ouai du coup tu vas le mettre avant ou au dessus ou en dessous c'est des choses qui sont nécessaire mais après la question est de savoir où va l'optimisation géométrique

gUP 107 ouai ça aussi on le trouve dans le cahier des charge on a besoin des conditions limites, de la géométrie

gUM 69 une géométrie paramétrée ou alors une géométrie globale dans laquelle tu vas faire de la topo ?

gUP 108 alors paramétrer ça va être l'autre module là on a une géométrie qui n'est pas forcément paramétrée. En optimisation topologique tu ne créé pas de paramètre

gUM 70 ah oui là on s'occupe juste des optimisations

gUM 71 non non tu prends tout le volume

gD 29 Ouai il faut le volume max quoi

gUP 107 donc on a la géométrie

gD 30 Après tu auras les surfaces fonctionnelles que tu dois garder genre les perçage les

gUP 108 donc ça c'est pas les conditions limites mais tu as effectivement les surfaces fonctionnelles je ne sais pas comment c'est référencé dans la modélisation et après qu'est ce qu'on a d'autre

gP 74 eh bien on va regarder (ouvre la partie optimisation topologique de la modélisation principale) alors définir les objectifs, définir les contraintes liées aux matériaux, calcul,

gUP 109 Tu as tout ça et donc après quand on fait apparaître tous ces items là après on voit parce que on va avoir les 4 trucs là conditions limites et après on va faire le calcul c'est ça

gP 75 oui

gD 30 mais du coup oui c'est vrai que avant l'optimisation il y a une simulation qui est faite

gUP 110 Il y a une première simulation qui est faite

gD 31 et ensuite bah on a cas ouvrir le non même pas on ouvre sur la 3D Expérience et on regarde ce qu'ils demandent comme information parce qu'il y a toute la chaîne pour euh

gUP 111 mais sans forcément faire référence à 3DExperience quand tu veux faire de l'optimisation topologique tu as besoin d'avoir la géométrie les conditions limites le matériaux

gUM 72 bah tu c'est comme

pUP 112 ouai ta géométrie alors est ce que ta géométrie définie ton est ce qu'il peut ajouter de la matière en dehors de la géométrie

gUM 73 non il faut quand même définir un volume de base un volume de départ

pUP 113 mais le volume de base est ce qu'il peut être plus gros que ta géométrie initiale

pUM 74 oui tout à fait bah oui tu met ce que tu veux

pUP 114 donc il faut aussi définir un volume initiale

pUM 75 oui c'est un volume de base il y a pas forcément de géométrie mais un volume de base c'est sûr

pD 32 attend tout est dans leur façon de faire ils disent qu'il faut définir le volume

pUM 76 Mais pour faire de l'optimisation topologique tu fais comme euh de l'analyse un calcul classique et tu rajoutes simplement euh un objectif que tu veux minimiser ou maximiser et des contraintes les contraintes c'est des contraintes dans le sens choses à respecter donc critères à respecter

pUP 115 voilà c'est ça. Tu vois il a travaillé sur le bras NH le bras c'était un truc je sais plus exactement comment c'était initialement le bras c'était a un truc comme ça (dessine une ébauche du bras du drone sur le tableau) donc il est parti de ça avec ça et ça bon etc et après il a optimisé et le logiciel a fait des évidements des choses comme ça mais en fait quand tu veux faire de l'optimisation topologique c'est pas avec ça que tu pars l'optimisation. Ensuite tu défini les surfaces fonctionnelles

pUM 76 Oui tu mets quand même par exemple si tu sais que tu as des endroits où ta pièce sera attachée donc là tu fais un trou et tu met une zone à laquelle il ne touche pas tu met un

gUP 116 ok mais ça c'est le volume ça c'est une géométrie (désigne le croquis de bras). ça c'est un volume qui intègre les surfaces fonctionnelles (désigne la partie optimisation topologique de la modélisation générale) et puis les éléments de fixation et tout ce que tu veux mais sinon alors en gros tu pars de ça après NH est partie de là parce qu'il voulait que le bras reste dans un volume bien précis. Mais on avait pas nécessairement besoin de ça (désigne le croquis du bras). Donc on part avec un volume ou un domaine de base il faut les conditions limites les surfaces fonctionnelles enfin les trucs qu'on va pas toucher c'est les invariables je crois qu'ils appellent ça comme ça les invariants.

gP 76 c'est déjà dessus en fait (désigne la fiche paramétrer la simulation) j'ai déjà tout mis mais c'est dans la partie paramétrer la simulation

gUM 77 voila zone à geler ce sont les zones fonctionnelles

gUP 117 alors ça c'est de l'optimisation

gP 77 Ouai ça fait partie de l'optimisation en fait ça c'est tu as l'optimisation donc tu as simuler et en fait on l'a inclus dans optimiser topologiquement une version n du bras donc simuler avec le modèle et en fait c'est dans les paramétrages de la simulation

gUP 118 alors là ce que je comprend pas ici il y a écrit simuler le modèle ce qui est à droit ça veut dire quoi c'est ce qu'il faut pour simuler le modèle ou c'est ce qu'il faut pour pouvoir simuler le modèle

gP 78 pour simuler le modèle on fait ce qui est à droite toutes ces étapes (montre les tâches élémentaires de la partie simulation de la modélisation principale) et de manière sérielle parce qu'il y a les chiffres donc en premier on fait ça en second on fait ça etc.

pUM 78 Il faut respecter l'ordre

pP 79 Ouai voila c'est ça

gUP 119 ok donc le modèle initiale plus le modèle initiale c'est le volume initiale enfin le modèle euh en fait tu pars pas spécifiquement avec un proto

gUM 79 non là c'est euh si parce que en générale tu compare ton résultat d'optimisation avec une situation initiale en terme de masse en terme d'effort

gD 33 (montre la partie optimisation topologique de la 3D Expérience) Donc là tu as l'écran pour commencer la simulation. donc là tu vois la façon de ce qu'ils te demandent afin de réaliser l'optimisation donc d'abord l'espace de conception une zone fonctionnelle ensuit le maillage tu configure l'analyse en tout ce qui est charge scénario. euh ensuite tu la lance et tu as les cibles d'optimisation

gUM 79 c'est le choix de la fonction à minimiser ou à optimiser

gD 34 exactement. Ensuite euh contraintes de forme contre l'épaisseur

gUM 80 voila c'est ce que je disais c'est le deux types d'optimisation qu'il y a c'est

gUP 119 non je ne crois pas euh

gUM 81 comment qu'on sait où on en est

gUP 120 commande de forme tu dois pouvoir imposer quelque chose en plus de l'optimisation topologique

gD 35 oui voila c'est ça genre une symétrie

gUP 121 oui c'est ça

gD 35 donc ensuite tu as lancé tu t'occupe de la forme optimisée et puis tu as la vérification où tu peux tu peux choisir une des forme proposée donc voilà

gUP 122 donc optimisation topologique on va peut être adapter la terminologie par rapport à ce que l'on fait en cours. Alors donc paramétrer la simulation définir les scénarios de simulation ça c'est propre à la 3DExperience

pD 36 euh non alors les scénarios tu trouve ça sur tous les logiciels non normalement

pP 80 alors c'est simuler les forces qui s'appliquent sur l'objet afin de déterminer tous les cas de figure afin de s'approcher de la réalité ça c'est sur SIMULIA qu'il a fait ça

gUP 123 alors là ce qu'on va faire maintenant qu'on a trouver les tâches on va modifier la terminologie pour que ce soit le plus compréhensible possible parce que là ça va pas

gP 81 pas de soucis il faut juste me dire les terme qui sont les plus appropriés

gUP 124 donc si on prend l'arborescence globale c'est ici qu'ils ont optimisé le bras c'est dans modéliser le bras. donc ils ont d'abord fait le bras en CAO et après ils l'ont optimisé

gP 82 voilà ça fait partie de la modélisation du bras par contre ils sont partie d'un bras déjà dessiné

gD 37 parce que en fait sur euh sur la plateforme tu crées le volume en plus tu lui dit ça c'est le volume limite quand tu définie

gUP 125 mais tu vois si on regarde à droite (montre la partie optimiser topologiquement le bras) à droite de ce truc là il y a pas la géométrie de base c'est à dire que tu pars de la gauche et ensuite tu vas

gP 83 en fait elle est dans l'étape précédente la géométrie

gUM 82 Oui regarde elle est dans la version N du prototype de bras

gUP 126 ok du coup faut remonter mais c'est pas tout à droite

gP 84 Si regarde (montre la modélisation) en fait dans un premier temps ils ont modélisé le bras donc une forme simple et après ils ont optimisé cette forme simple en fait

pUM 83 en fait euh là euh le 1 où tu as la flèche (désigne la partie modéliser un prototype de bras) ça revient au 1 simuler avec le modèle initiale ? C'est la même chose non ?

gP 85 en fait j'ai utilisé version n et n+1 de prototype parce que en fait donc là ils ont créé un premier bras (désigne créer un version n de prototype de bras) et ensuite sur la base de ce premier bras ils ont effectué, ils ont simulé avec le modèle initiale donc le modèle initiale c'est le prototype n qui est le résultat de cette première étape

gUM 84 D'accord

gP 86 oui du coup D a eu le même problème parce que pour lui aussi c'était un procédé sériel mais c'était vraiment un processus itératif du coup je l'ai organisé comme ça

pUM 85 ok et quand tu dis modéliser et simuler quelle est la différence entre les deux étapes

gP 87 eh bien en fait

pD 38 c'est dessiner que tu veux dire je pense

gP 88 oui voila dessiner

pUM 86 ah bien voila c'est bien ce que je me disais c'est le dessin. Donc une fois que tu as dessiné la version n du prototype de bras (désigne la tâches modéliser la version n du prototype de bras) ici c'est l'entrée pour ça (désigne la tâche optimiser topologiquement la version n du prototype de bras)

gUP 127 ouai ouai ouai ok je comprend la lecture maintenant

gP 89 oui je suis désolé j'aurai dû expliquer dès le départ comme ça a été fait parce que pour moi c'est évident parce que ça fait longtemps que je suis dessus mais pour vous c'est pas la même

gUM 87 c'est pas grave maintenant on a compris _

gUP 128 Donc pour faire l'optimisation il faut déjà avoir dessiné un bras euh modélisé un bras

gP 90 euh c'est comme ça qu'ils ont fait eux mais après comme vous le dites

gUM 88 Ils ont bien fait parce que en général tu pars d'une version initiale donc que tu analyse que tu simules et que après tu regardes les résultats et après quand tu fais l'optimisation tu vas comparer par rapport à cette configuration initiale en disant bon bah j'ai gagné de la matière j'ai euh mes efforts ils sont euh mieux répartis ou euh

gP 91 et donc en fait eux ils ont pas appliqué cette méthodologie c'est euh ils ont fait une version n qu'ils ont transformé en version n+1 optimisée et ils ont modifié cette version n+1 donc ils ont simulé de nouveau pour obtenir la meilleur version possible. Il y a

vraiment eu une dialectique en NH et ND parce que ND ne s'occupait que de la CAO et NH optimisait les propositions de ND

pUP 129 Oui parce que le truc a été modifié plein de fois quand tu veux faire de l'optimisation tu as un point de départ après tu le fabrique tu le test et puis tu reviens tu remodifie

pP 92 oui voila c'est ce que j'ai voulu

gUM 89 après quand tu fais de l'optimisation la simulation avec le modèle initiale n'est pas obligatoire tu peux la faire si tu veux comparer mais tu n'es pas obligé de la faire au départ

gUP 130 bah là il falloir voir avec la 3DExperience parce que. Donc en fait ici on a modéliser le bras tu vois tu as un truc enfin modéliser la version n du bras ensuite en petit deux tu as optimiser le bras on pourrait avoir dans optimiser optimisation géométrique et optimisation des matériaux c'est ça. en fait le un deux trois il viendrait ici enfin il viendrait se rajouter ici (désigne la tâche optimiser la version n du bras) donc tu as module optimisation des structure ou module optimisation du bras je sais pas comment on dit ça. il faut tout présenter par rapport au bras

gP 93 bah après on est pas obligé de faire le bras on peut faire le châssis aussi parce que

gUP 131 ok ça peut être le bras ou le châssis de toute façon le châssis t'as le même

gP 94 ouai c'est exactement la même chose parce qu'ils ont appliqué exactement la même méthode

gUP 132 ok donc optimisation

gP 95 voilà faut voir quelles tâches on va faire faire aux étudiants dans le cours d'optimisation des structures. C'est vrai que toute la méthode n'entre pas dans optimisation topologique

gUP 133 oui la première partie c'est clairement de la CAO ça c'est modélisation par CAO euh le petit un c'est un truc de modélisation par CAO bah après on peut décider de le garder là si on veut plus de détails. et donc après on optimise donc pour faire l'optimisation topologique donc tu as un volume donc il faut simuler avec le modèle initiale

gP 96 voilà donc le modèle initiale c'est le volume de base

gUP 134 le volume de base

gP 97 donc je met volume de base à la place de modèle initiale

pUP 135 non non tu peux laisser ça comme ça enfin ce qu'on appelle initiale c'est pas initiale c'est n

pP 98 ouais n (remplace initiale par n dans simuler avec le modèle initiale)

gUP 136 Simulation de la version n

(remplace simuler avec la version n par simuler la version n du bras)

gUP 137 donc ça on est obligé ou pas

pUM 90 bah ça ça dépend de ce qu'on demande la 3DExperience mais la version n c'est le volume en fait tu auras

pUP 138 mais moi j'avais discuté avec NH parce qu'il l'a mis dans son rapport après on a parlé avec Dassault etc. non mais il y a des éléments qui m'ont échappés dans l'optimisation mais on peut laisser ça comme ça. on va dire qu'il faut faire une première simulation en va dire qu'il faut faire la première simulation

pUM 91 d'accord donc on

pUP 139 mais montre voir parce que ok donc ça il faut le faire effectuer une étude préalable des forces et des contraintes c'est quoi

gP 99 en fait ça c'est les forces et contraintes qui sont appliquées sur le drone

pUP 140 mais préalable ça veut dire quoi

gP 100 bah il. alors là c'est avant tout en fait il s'agit de connaître les forces et contraintes qui s'appliquent sur la pièce quand le système est en train de fonctionner ainsi que leurs valeurs maximales. ceci nécessite une recherche bibliographique et permettra d'instruire les scénarios de simulation

gUP 141 on peut modifier ça ou pas après tu le remettra ici en fait c'est connaître les conditions limites il s'agit d'identifier les conditions limites qui s'appliquent sur le système pendant que le système est en train de fonctionner

gUM 92 donc les conditions limites c'est liaison effort chargement température

gUP 142 ouai tu peux mettre ce que tu veux car tu identifie les conditions limites et entre parenthèse tu peux mettre comme ça

(modifie la fiche préparer la simulation)

gP 101 alors température

gUM 93 température liaison efforts

gP 102 et c'est tout ?

pUM 94 non bah tu as cas mettre trois petits points parce que suivant le contexte ça peut être un peu différent

pUP 143 alors qui s'applique sur la pièce quand le système est en train de fonctionner ainsi que leurs valeurs maximales euh

gUM 95 maximale ça veut dire que ça veut dire que ces condition là varient avec le temps

pUP 144 non non c'est pas ça qu'il voulait

gP 103 bah par exemple quand le drone est en vol stationnaire ou quand il monte eh bien ce ne sont pas les même valeurs qui enfin je suppose que c'était ça l'idée

gUM 96 alors du coup ça devient des cas de charge différent

gD 39 ouais c'est ça

pUP 144 mais tu vois par exemple ouais ouais c'est ça c'est t'as le drone par exemple il vole et t'as l'effort qui s'applique sur l'aile enfin je ne sais pas on va peut être faire comme ça en fonction du temps et tu vas chercher le cas le plus critique mais c'est pas forcément le maximum parce que ça peut être une combinaison

pUM 97 oui voila tu peux faire des cas de chargement différents que tu optimise suivant certains cas ou certains autres

gD 40 bah le logiciel lui ce qu'il va faire c'est qu'il va essayer d'avoir l'optimale pour tous les cas de chargement

gUP 145 alors qui s'applique sur la pièce quand le système est en train de fonctionner alors c'est pas un cycle de valeurs critiques c'est ici il faut aussi identifier les cas de chargement c'est ça

pUM 98 oui

gUP 146 critiques les cas de chargement critiques c'est comme ça qu'on pourrait le dire

gUM 99 bah critique je sais pas si c'est critique ou pas critique c'est juste des cas de chargement c'est à dire que quand c'est en fonctionnement voilà t'es en stationnaire ou t'es en vole bah voilà tu as des efforts différents

gUP 146 voilà et qui identifient des cas de chargement

gUM 100 à priori les liaisons seront toujours les mêmes mais c'est juste les efforts qui vont varier suivant l'utilisation que l'on en fait

gUP 147 voilà c'est ça les efforts ou la température

gUM 101 ou la température

gD 40 eux ils appellent ça cas de chargement

gUM 102 oui en générale c'est ça oui c'est une appellation assez classique quand même cas de chargement

gUP 148 est ce que tu peux mettre dans ta description après je ne sais pas comment tu as fait les autres. dans la description tu peux mettre un identifier les conditions limites

température liaisons efforts qui s'appliquent sur la pièce quand le système est en train de fonctionner petit deux identifier et définir les cas de chargement. (écrit les deux points sur la fiche préparer la simulation) Et est ce qu'on peut dire quelque chose sur les cas de chargement

gUM 103 de manière globale ou alors pour l'application au drone

gUP 149 pour le vol là par exemple pour l'application du vol

gUM 104 Oui alors ça peut être par exemple euh

gD 41 par exemple virage à droite tu vas actionner des moteurs qui seront plus utilisés à ce moment là que d'autres

gUM 105 oui par exemple bah le décollage euh station linéaire euh virage

gUP 150 oui c'est ça

gP 104 D'accord modifie la fiche préparer la simulation)

gD 42 chute. J'avais une jolie application enfin un jolie livre qui montrait ce qui se passait quand euh lors d'un crache

gUM 106 et après je suppose que tout ça ça va être issue de je pense à des étapes au début primaire quand tu vas définir le fonctionnement d'un drone qu'est ce qu'il va devoir faire

gUP 151 oui c'est les exigences fonctionnelles ça enfin les exigences fonctionnelles vont te dire ce que le drone va devoir faire mais ils ne vont pas forcément identifier les cas de chargement

pUM 107 nan mais par rapport à ça tu sauras définir quel cas est pertinent et quel ca ne l'est pas

gUP 152 et c'est ici qu'il faut aller voir (montre la partie cahier des charges fonctionnel de la modélisation)

gUM 107 mais c'est le lien après entre les deux savoir quels efforts correspondent à quelles exigences ou quelles te produit quel effort

gUP 152 et c'est ici qu'il faut le faire ça (désigne la partie exigences fonctionnelles de la modélisation)

gP 105 donc en gros en fait le prof aura besoin du d'un d'un outil enfin du FRS enfin du des exigences système et des exigences fonctionnelles sur lui afin de pouvoir aider les étudiants à définir ça

pUP 153 si l'enseignant a envie de faire ça il peut dire vous avez des exigences euh on va faire aujourd'hui un travail sur les cas de chargement à partir des exigences et donc là le mec il va dire là les étudiants vont travailler sur ça ça ça. et ils vont tien on a ça vole stationnaire. et ça c'est un travail mais c'est plus de l'o c'est ça peut constituer une tâche

gD 43 bah ça fait partie de l'optimisation mais on va dire que c'est ce qui se passe en amont

gUP 154 oui c'est vrai que ça fait partie de l'optimisation

gUM 108 oui tu en as besoin pour l'optimisation mais c'est pas enfin

gUP 155 bah c'est du cycle en V quoi

gUM 109 ouais

gUP 156 et définir le cas de chargement na na na est ce que tu peux ici indiquer que tu as besoin des exigences fonctionnelles

(écrit nécessite les exigences fonctionnelles sur la fiche préparer la simulation)

gP 106 euh je peux mettre

gUP 157 le point deux nécessite les exigences fonctionnelles

gUM 110 bah c'est ça quand tu dis recherche bibliographique bah la base la matière c'est les exigences fonctionnelles

gUP 158 mais après la recherche bibliographique eux ils ont fait de la recherche biblio pourquoi parce qu'il y a besoin de connaître les axes euh les conditions limites sur les bras et la vue parce que en fonction du ça dépend du moteur de l'hélice tout ce que tu veux et en faisant des recherches bibliographiques ils ont trouvé tout ça. ils ont trouvé un travail où des gens avaient fait des essais expérimentaux de ça le même moteur les même hélices et avec ça ils ont mesurés des efforts mais c'est pas vraiment

gUM 111 mais cette cette recherche là enfin ce qu'ils ont trouvé en fait c'est ce qui va faire le lien entre exigences fonctionnelles et cas de chargement

gUP 159 mais ça c'est un truc à déconnecter enfin c'est un truc qui est pas forcément

gUM 112 c'est la c'est le comment tu traduis

gUP 160 alors c'est pas forcément une recherche bibliographique ça peut aussi être faits par des calculs analytiques enfin tu peux faire ça mais ça nécessite avant tout les exigences pour identifier les scénarios

gUM 113 mais moi je n'appellerais pas ça recherche documentaire parce que les exigences fonctionnelles c'est un truc qui a déjà été définie dans le cadre du drone. Donc c'est traduire les exigences fonctionnelles en efforts par le biais d'une recherche documentaire

gP 107 oui mais vu que l'étudiant n'a pas fait les exigences

pUP 161 ah non non mais à l'enseignant par contre ça donne une indication. après nous évidemment il va falloir définir les cas de chargement nous il va falloir qu'on le fasse parce que quand un enseignant va vouloir faire de l'optimisation topologique à propos du drone bah nous bah il va falloir dans son support pédagogique là enfin support de cours eh bien on va lui dire nous les différents cas va falloir le faire ça

pP 108 oui d'ailleurs on peut trouver ça dans le FRS enfin le drone doit faire 800 grammes donc on a déjà cette donnée là

gUP 162 mais disons que les cas de chargement les conditions limites ça ça nécessite d'utiliser les exigences fonctionnelles

gUM 114 oui

gD 44 oui

gUP 163 donc tu peux mettre juste c'est même pas recherche documentaire c'est euh les conditions limites aussi d'ailleur

pUM 115 oui c'est tout les petit un et le petit deux

gD 45 du coup ici à cet endroit là on suppose déjà que l'étudiants a décidé quel type de gamme de moteur il veut quel type d'hélice et ça ça va déterminer les efforts

gUP 164 oui ça c'est au départ donc on dit que cette tâche nécessite de se référer aux exigences fonctionnelles

gP 109 c'est bon comme ça

gD 46 oui

gUP 165 et c'est tout je pense parce qu'une fois que tu as les exigences et après évidemment tu as besoin de traduire les exigences fonctionnelles en enfin je sais pas ce que tu avais dit

gUM 116 afin de les traduire en efforts selon

gUP 166 ouai en efforts ou en données d'entrée pour l'optimisation

gUM 117 ouais

(écrit nécessite de se référer aux exigences fonctionnelles afin de les traduire en données d'entrée pour l'optimisation sur la fiche préparer la simulation)

gUP 167 et les données d'entrée là en fait ça sert pour un et deux

gUM 118 ouais et ce que tu avais appelé scénario c'était en fait les différents cas de chargement

gUP 168 ceci nécessite de se référer aux exigences fonctionnelles afin de les traduire en et ça du coup c'est un autre travail on le traite pas mais en tout cas on suppose que c'est on sais exactement on connais les cas de chargement

gP 110 normalement le cahier des charges de NH et ND contient tout ça enfin ce qu'ils ont fait donc on a les données

gUP 169 donc effectuer une étude préalable des forces et des contraintes ça si l'enseignant il veut le faire. bah il va y avoir un truc derrière pour les identifier et donc si il veut pas le faire il aura en entrée les trucs que nous on aura identifié

pP 111 ouais c'est parfait

gUP 170 et puis c'est vrai NH comme là c'est on est quand même propre au bras et à la 3DExperience et donc NH avait trouvé cette ressource bibliographique avec les moteurs et tout ça donc si on veut détailler cette tâche là après enfin traduire les exigences fonctionnelles donc on va voir si l'enseignant va laisser les étudiants travailler sur chercher faire la recherche bibliographique développer des trucs analytiques et lui l aura déjà une solution c'est bah dans la littérature on a vu des essais tout ça on peut utiliser ça ça ça identifier ça ça ça mais ça constituera un truc à part mais à nous de travailler dessus pour les identifier et après on verra si ça constitue une tâche ou non ou bien si on le donne comme ça en entrée en disant bon on peut aller à droite à gauche soit par calcul soit par recherche bibliographique on a identifié ça ça et ça et c'est là dessus qu'on va travailler dans l'optimisation on verra après si on descend plus bas

gP 112 donc ça on le fera après donc c'est bon pour vous la description et l'intitulé de la tâche

gUM 119 oui ça me va donc on a déjà le volume et on a les conditions limites alors euh qu'est ce que tu as mis en dessous

gUP 171 effectuer une étude préalable des forces et contraintes alors euh ça c'est les forces et contraintes ça euh on renomme ça conditions limites ? on verra après si on renomme

pUM 120 Alors par contre ce qu'il manque là c'est les surfaces fonctionnelles et tout ça

pP 113 donc c'est alors ça es surfaces fonctionnelles c'est dans paramétrer la simulation ça je me souviens on l'avait vu tout à l'heure (ouvre la fiche de la tâche paramétrer la simulation) définir les matériaux à utiliser les zones à geler

pUP 172 ah et tu parles du maillage

gP 114 la finesse du maillage les forces auxquelles la pièce sera soumise enfin voilà ça en gros dans le cheminement de la 3DExperience c'est ce que le logiciel demande ça c'est le logiciel en fait ça c'est euh des tâches sur le logiciel

gUM 120 et est ce que c'est valable dans tous les cas d'optimisation ?

pD 47 Non

pUP 173 bah si mais c'est

gUM 121 mais là quand tu dis le petit cinq contraintes auxquelles sera soumise la pièce c'est pas ce qu'on avait définie au final dans l'étape d'avant

pUP 174 en fait ici je pense que c'est le logiciel c'est à dire quand tu ouvres le logiciel quand tu cliques c'est à ce moment là qu'il faut le remplir. c'est à dire avant tu le définis sur papier et après maintenant techniquement dans le soft qu'est ce que tu fais

pUM 122 ah ouais ok

pUP 174 mais c'est pour ça que c'est c'est

pP 115 ouais c'est une tâche technique en fait ça

pUP 175 nan mais ça devrait pas être présenté comme ça en fait enfin je sais pas qu'est ce que tu en penses UM ?

pUM 123 bah du coup ça fait un peu tuto utilisation soft en fait c'est en deux parties alors que

pUP 176 alors que les surfaces fonctionnelles c'est aussi quelque chose qui est un peu en amont et puis qui est pas forcément en lien avec le soft tu dois te poser la question euh où est ce que tu fixe les éléments

gP 116 ouais mais du coup ça ça intervient pas lors de la modélisation du coup ça

pUP 177 bah non quand il fait la modélisation c'est intégré mais après il peut y avoir des surfaces qui ne sont pas forcément c'est à dire que là tu as des vices etc mais tu peux avoir quelque chose qui est posé après je ne sais pas tu sais si tu as une structure comme ça et puis c'est à droite à gauche et pis après tu as enfin dans cette structure là qui est vissée à droite et à gauche tu peux avoir besoin de venir poser quelque chose dans le contacte enfin dans l'utilisation tu peux avoir quelque chose qui va venir en contacte à l'endroit là mais qui est pas modélisé dans la CAO

pP 117 ok

pUM 124 oui je sais pas imagine que tu as une machine de presse donc en dessous tu as la presse et quand tu dessine la presse cette surface là elle n'apparaît pas enfin c'est juste une surface elle n'est pas fonctionnelle il n'y a pas de trou il n'y a rien du tout donc quand tu fais la simulation tu peux dire que cette surface là on ne la bouge pas. donc il faut pouvoir définir les euh les surfaces fonctionnelles en plus

pP 118 ouais ok c'est avant cette étape faut les définir avant parce que là c'est utilisé

gUP 178 alors je pense qu'il faut le dissocier on a fait les conditions limites maintenant il faut définir les zones fonctionnelles mais il faut que ce soit une tâche à part enfin je pense

non ? c'est à dire que il faut se poser après la mise en oeuvre c'est autre chose mais c'est un peu là que tu te pose la question non ?

pUM 125 oui mais parce que si tu raisones dans le sens c'est où c'est l'utilisation de la 3DExperience il faudrait que au moment où tu le calcul où tu définis les choses tu les rentres au même moment. parce que là du coup c'est défini à un moment mais euh c'est seulement à l'étape d'après où tu le saisis dans 3DExperience

pP 119 parce que là c'est en fait ils avaient modélisés tout le drone et c'est une fois qu'ils avaient tout modélisé donc avec les points où se fixaient euh où se rencontraient les objets et après seulement ils ont fait ça

pUM 126 ok donc ils avaient toutes les données en fait et ils savaient quelles zones geler quelles zones ne rien faire

gUP 179 alors soit on construit ça par rapport au soft c'est approche logiciel donc on met les étapes qu'il faut suivre sur la plateforme et on ajoute qu'il faut s'appuyer sur une étude préalable des forces et des contraintes pour appliquer les forces et les contraintes et puis l'étude préalables des trucs et des machins mais en fait tout ça c'est quand même en même temps

gD 48 bah ici le numéro un c'est configuration de l'espace de conception donc euh là dedans tu choisis le volume de conception mais aussi l'espace à figer quoi et pour lui ça c'est deux objets

gUP 180 donc je sais pas si ça ça doit refléter l'utilisation du soft ou si ça doit refléter de façon général la réflexion et après la mise en oeuvre du soft c'est autre chose. c'est à dire que là ce sont des tâches mais je pense pas enfin après je sais pas est ce qu'on a besoin que ce soit des tâches détaillées par rapport à la manière dont le soft est réparé aussi donc si on va faire de l'optimisation topologique on va prendre un truc de départ identifié à partir des exigences de ça du fonctionnement le volume de base les conditions limites les

surfaces fonctionnelles les cas de chargement donc ça c'est une fois qu'on a identifié ça on fait la mise en oeuvre dans le soft. mais la mise en oeuvre dans le soft ce sera bah des tutos quoi tu cliques tu cliques tu cliques

gP 120 ouai mais ça on trouve dans la 3DExperience non ?

gD 49 bah ouais c'est écrit tu cliques ici tu sélectionne le maillage

gUP 181 donc je sais pas si il faut orienter ça en fonction de des parce que après on parle de maillage etc. je sais pas si on a besoin de suivre des étapes telles qu'elle sont présentées dans le logiciel

pD 50 bah on est un peu obligés en même temps

gP 121 ouais c'est vrai qu'il est guidant le logiciel

gD 51 et tu as besoin de certaines données donc si tu les rentres pas il voudra pas a lancer la simulation

gUP 182 je suis d'accord mais est-ce qu'on est obligés de présenter les trucs de la manière enfn en suivant les trucs

gD 52 comme ça ?

gUP 183 par exemple dans paramétrer la simulation tu sais pas trop ce que c'est effectuer bah de toute façon en fait tu vois ce qu'on a écrit volume conditions limites surfaces fonctionnelles et puis le dernier truc c'était quoi ?

gUM 127 qu'on avait mis au début dans les études préalables des forces et contraintes ? ou ce que tu as

gUP 184 ouais je sais plus le volume de base les conditions limites on en a parlé maintenant il y a les surfaces fonctionnelles qui sont à dissocier des conditions limites

gUM 128 oui

gUP 185 donc tu peux avoir un truc effectuer une étude préalable des forces et contraintes en fait c'est identifier les conditions limites petit deux c'est identifier les surfaces fonctionnelles c'est ça quand tu veux faire après à quel moment tu le rentres euh après il y a le maillage effectivement simuler les différents cas de chargement et après il y a un truc qui cerce non petit un effectuer petit deux définir euh (montre la fiche préparer la simulation) je sais pas alors tiens si tu ferme la feuille Word

gD 53 je pense que les données là ils en ont besoin tu vois genre volume euh contraintes limites eu conditions limites et tout ça il leur faut avant d'arriver dans le logiciel

gUP 186 eh bah c'est exactement ça mais ici tu met étude préalable étude préalable ça veut dire quoi ? ça veut dire que le logiciel est même pas ouvert

gD 54 ouais

gUP 187 tu grattes et tu cherche et tu grattes tu cherche quoi ? tu identifie les conditions limites les surfaces fonctionnelles et tes cas de chargement

gUM 129 c'est comme quand tu fais la partie précédente avec la CAO parce qu'au début tu as une mini étude CAO sur le papier avant de passer sur le logiciel

gUP 188 oui voilà c'est ça

gD 55 donc ensuite ils arrivent sur le logiciel et ils suivent pas à pas les données ils doivent les rentrer quoi

gUP 189 identifier les surfaces les cas de chargement euh qu'est ce qu'on a d'autre

gD 56 et là ça devient de la manip

gUP 190 ouais tu là tu viens et tac tac tac tu fais ça ok donc ça c'est le petit un après on verra si on rajoute du texte

gP 122 ouai on rajoutera

gUP 191 et donc là dans ton mind-map ça c'est le

gP 123 c'est l'étude préalable au lancement en fait à

gUP 192 petit un

gP 124 ouai en fait c'est le petit un c'est en fait ils cherchent toutes les info et après ils passent à la partie logiciel

gUM 130 ouais c'est comme ce que tu avais mis là avec préparer la modélisation CAO (montre la tâche préparer la modélisation CAO) bah là ça peut être préparer la simulation

gP 125 ouais préparer la simulation

pUP 193 et d'ailleurs ça tu vois ça tu peux le mettre après on verra mais ça tu peux le mettre là (se lève et monte sur l'écran où est affiche la modélisation) alors soit tu le met ici (pointe la tâche optimiser la version n du prototype de bras) et après tu met topologique géométrique machin soit tu le mets là (pointe la tâche préparer la simulation)

gP 126 préparer la simulation

pUP 194 oui voila mais simuler avec le modèle initiale en fat tu as besoin de faire préparer la simulation numérique

pP 127 ouais ok d'accord

gUP 195 ok après préparer la simulation numérique après simuler avec le modèle initiale c'est bah là c'est tu le fais dans le soft

gUM 131 ouai là on passe dans la 3DExperience

gUP 196 ouais c'est ça et ça on peut pas le mettre avant hein ça peut même être quand tu veux faire de l'optimisation. optimiser la modélisation du prototype de bras (désigne la tâche optimiser topologiquement le prototype n de bras) ouais ou bien met le là on verra bien. et donc ici c'est la pré-étude quoi ou pré-simulation enfin pas pré-simulation c'est préparer la simulation et là simuler avec la modèle initiale c'est dans la 3DExperience c'est ça

gD 57 oui oui c'est ça

gUP 197 et donc quand on veut simuler dans la 3DExperience c'est là qu'on suit les étapes

gD 58 c'est ça

gP 128 donc ça vous va comme ça (désigne la partie optimiser topologiquement la version n du prototype de bras)

pUP 198 alors paramétrer la simulation ça veut dire quoi ?

pD 59 bah c'est rentrer les infos que tu as développé en 1

pP 129 ensuite définir le scénario de simulation

gUP 199 tu choisis le cas de chargement dont tu vas t'occuper

gD 59 bah en fait tu les fais tous en même temps au finale hein faut juste les rentrer

gUM 132 tu optimises par rapport à tous les cas que tu peux rencontrer

gD 60 ça reste de la préparation la définition des scénarios moi je pense que c'est redondant

gUP 200 et simuler les ouais simuler les scénarios définis c'est quoi ? tu cliques sur run ?

gP 129 ah bah ça je crois oui

gD 61 en théorie oui

gUP 201 ok ensuite c'est visualiser les résultats

gP 130 ok (ajoute une tâche visualiser les résultats) et du coup le maillage est dans paramétrer la simulation

gUP 202 d'accord les zones à geler donc là les zones à geler les zones fonctionnelles identifiées dans l'étape une hein

pUM 133 oui

gUP 203 le matériau euh on le choisit on peut laisser ça comme ça finesse du maillage oui les forces auxquelles ça aussi ça a été identifié dans l'étape une alors ici ça va pas ici tu mets identifier les paramètres de scénarios de simulation et là tu parles de maillage

pP 131 ça fait pas partie du paramétrage de la simulation enfin

pUP 204 oui mais pas des scénarios

pUM 134 les scénarios c'est pas après c'est pas en trois ou quatre ? le quatre ça va être simuler nan c'est le trois ça alors c'est quoi définir les scénarios alors

pD 62 ça devrait être dans paramétrer la simulation

pUP 205 et tu as mis quoi dedans ?

(ouvre la fiche paramétrer la simulation)

pP 132 les scénarios permettent de

pUP 206 ouais donc ça on l'a déjà fait

pP 133 donc je le met je e fusionne

pUP 207 il est déjà fusionné

pP 134 ah d'accord donc je peux le supprimer (supprime la tâche instruire les scénarios de simulation)

pUP 208 ouais je pense je pense que paramétrer la simulation alors retourne voir dans paramétrer la simulation

pP 135 ok (ouvre la fiche paramétrer la simulation)

pUP 209 donc il s'agit ici de définir les paramètres des scénarios de simulation alors j'enlèverai enfin je mettrais les paramètres de simulation plutôt que des scénarios

pP 136 ça marche (remplace scénario par simulation dans la fiche paramétrer la simulation)

fin vidéo 11

pUP 210 Moi j'enlèverai selon les éléments. Alors définir le matériau utilisé si pas en base de donnée créer le matériau module de Jung, coefficient de poisson limites d'élasticités ok. les zones gelées disent que le logiciel ne doit pas altérer leurs données lors de l'optimisation. alors au point 2 à la fin entre parenthèse

pP 136 D'accord (modifie la fiche paramétrer la simulation)

pUM 135 là tu peux mettre les éléments identifiés dans l'étape une c'est à dire euh lors de l'étape précédente voila . la finesse du maillage non les forces appliquées oui auxquelles la pièce sera soumise

pUP 211 en fait les conditions limites le point 4 c'est les conditions limites et les cas de chargement ça vient après

pUM 136 qu'est ce que tu entend par point 5 contraintes ?

pD 63 Bah c'est la même chose je pense donc soit on met ici les cas de chargement ou alors on fait un point spécifique pour les cas de chargement

pUM 137 Et donc pour le point 4 et le point 5 c'est pareils ceux-là ils sont biens

pP 137 Mais là après c'est une phase où c'est le logiciel qui bosse donc le logiciel il guide en disant ce qu'il faut faire hein c'est ça D ?

pD 64 oui c'est ça parce qu'il fait ça en fait le logiciel

pP 138 Ouai voila il dit pas cas de chargement ou condition limites

gD 65 Ouais voila c'est ça il te dit contrainte cible attend (montre l'interface de la 3DExpérience) maillage configuration de l'analyse validation donc euh l'ensemble des choses qu'il faut faire quoi

gUM 138 ah bah alors si ici il faut reprendre les points par point

gD 66 C'est ça

gUM 139 donc tu reprend tout point par point et quand à un moment il y a un truc les contraintes. Ah bah là on va dire identifié précédemment identifié précédemment et mettre un code couleur ou quelque chose comme ça

gD 67 Mais c'est pas les forces ça s'appelle bien contrainte

pUM 140 Et les contraintes c'est dans la partie optimisation déjà ?

pD 68 euh oui oui attend

pUM 141 parce que là on est encore dans le modèle initial (montre la modélisation) et pas encore dans le calcul

pD 69 Ouais c'est dans configuration de l'analyse que tu mets tout ce qui est charge fixation et tout ça pour la simulation enfin pour la simulation initiale

pUM 142 ok c'est pas encore l'optimisation

pD 70 et c'est ensuite que tu passes jusqu'à la validation donc tu la lances

pUM 143 j'ai l'impression que l'optimisation elle comme à "cible"

pUP 212 Ouais c'est ça

pD 70 C'est ça

pUM 144 donc les paramètres de simulation il faut définir les matériaux la zone a geler donc c'est ok mais en fait zone à geler c'est dans l'optimisation

pD 71 Non zone à geler c'est la première chose c'est ce que le logiciel appelle configuration de l'espace de conception

gUP 213 Bah en principe le matériaux il est défini quand tu fais euh quand tu importes la CAO non ?

pD 72 Ah euh oui il peut ne pas être fait mais à ce moment là il te dira qu'il faut que tu le fasses

pUM 145 et donc là ce que tu as ouvert sur la 3DExpérience c'est ce qu'il faut ouvrir quand tu veux faire de l'optimisation topologique c'est ça ?

pD 73 Oui c'est l'application de CATIA pour produire des pièces à optimiser

gUM 146 et là on est déjà dans l'optimisation topologique dans l'arborescence ou c'est déjà ou c'est juste la création de la pièce ?

gUP 213 Non moi je pense que c'est la première simulation

gUM 147 ok c'est juste simuler

pD 74 oui c'est dans cette application là que tu fais la première simulation

pUM 148 ok mais du coup si tu veux faire juste de la simulation d'analyse de la pièce initiale tu as des choses que tu ne remplis pas ? ou c'est itératif ?

pD 75 bah en fait si tu passes si tu veux juste faire une analyse statique tu vas utiliser un autre truc

pUM 149 Ouais d'accord mais du coup il y a pas le petit 2 zones à geler tu auras pas de zone à geler dans ce cas là

pD 76 Non tu auras pas si tu veux juste faire une simulation statique sans utiliser la télé euh je veux dire la TIF tu as pas besoin

pUM 150 donc ça il faudrait le garder pour après (montre le 2 définir les zones à geler sur la modélisation)

pUP 214 donc la première simulation euh ouais il y a pas de zone à geler

pD 77 normalement là euh non si si justement c'est la première chose que tu fais c'est quand tu rentres la pièce tu définis l'espace de congélation et les régions fonctionnelles

pUP 215 ah d'accord donc quand même tu fais ça

pUM 151 même quand tu fais juste une analyse ?

pD 76 bah l'analyse elle fait partie de toute la chaîne pour faire l'optimisation

pUP 216 t'as les conditions limites d'optimisation qui sont les mêmes alors

pUM 151 d'accord mais alors du coup euh du coup comme c'est présenté c'est deux étapes que tu ne peux plus dissocier (montre la partie préparer la simulation de la modélisation)

pD 77 laquelle et laquelle ?

pUM 152 là dedans parce que si tu reviens euh ce qu'on avait dit initialement les gens pourront prendre des points en particulier et pas d'autres là du coup ils sont obligés de faire les deux en même temps parce que là simuler avec le modèle initial (montre la partie simuler avec le modèle initiale de la modélisation) et euh l'optimisation. Le modèle initiale c'est le deuxième 1 et l'optimisation ce sera calculé

pP 139 l'optimisation sera calculée ?

pUM 153 parce que là nous on était juste ici sur simuler avec le modèle initiale (montre la partie simuler avec le modèle initial de la modélisation) et après l'optimisation c'est calculé mais en réalité quand tu le fais dans le modèle dans 3DExpérience les deux se font en même temps tu peux pas dire je vais faire que l'un pas l'autre

pD 78 pas vraiment en même temps mais tu vas faire la première avant de faire la deuxième

pUM 154 oui je veux dire que si quelqu'un veut faire la conception complète du drone (désigne l'ensemble de la modélisation) il va pas dire je m'affranchie de l'étape une, il est obligé de faire les deux en même temps

pD 79 nan c'est pas vraiment qu'il les fait en même temps c'est qu'il est obligé de faire la première pour pouvoir débloquent supplies

pUM 155 Oui mais même au niveau de la mise en donnée donc de la création du modèle du coup c'est en même temps que c'est fait ou à la suite

pUP 217 J'ai pas compris le en même temps

pUM 156 Bah tout le point 1 et 2 en fait la mise en donnée c'est c'est euh ça se fait dans un seul bloc

pUP 218 don tu fais d'abord le 1

pD 80 oui tu es obligé

pUP 219 après tu fais le calcul et après tu fais le 2 hein ? c'est ça

pUM 157 ouais mais si tu es dans la logique de quelqu'un qui veut prendre juste des étapes

pD 81 bah tu peux t'arrêter au 1 mais tu pourras pas faire le 2 si tu as pas fait le 1. En fait le 1 est un jalon sans lequel tu peux pas passer à la suite quoi

pUM 158 après c'est vrai que c'est c'est le cas pour tout

pP 140 c'est contraint par le logiciel en fait

pUM 159 ouai ouai d'accord ok

pUP 220 donc simuler avec le modèle initiale enfin simuler le la version n alors on est d'accord donc tu paramètre la simulation c'est ce qu'on a dit où il y a les zones fonctionnelles et après simuler c'est pas simuler c'est post-traiter enfin c'est observer c'est ça ? Ce que tu appelle simuler

pP 141 bah simuler les scénarios préalablement définis en fait c'est juste voila

pUP 221 donc là sur la base des scénarios

pP 142 le logiciel va simuler voila

pUP 222 et là tu vois tu peux mettre visualiser

pP 143 donc visualiser (ajoute une partie visualiser sur la fiche de la partie simuler avec le modèle n du bras)

pUM 160 permet de visualiser les mouvements qu'elle fait parce qu'elle est soumise à des forces

pUP 223 Donc l'item là c'est l'analyse et la visualisation des résultats. cette étape là hein

pUM 161 oui c'est ça c'est l'analyse des résultats que le logiciel permet de visualiser

pUP 224 donc dans la modélisation, paramétrer la simulation on est d'accord tu as mis les cas de chargement hein regarde voir

pP 141 oui je regarde (ouvre la fiche paramétrer la simulation de l'OI) alors alors ici j'ai mis les contraintes auxquelles est soumise la pièce du coup j'ai mis entre parenthèse conditions limites et après alors il y a bien les cas de chargement. Je met juste cas de chargement ou bien il y a d'autres choses qui sont demandées par le logiciel ? On doit pas s'occuper du maillage ?

pD 82 non non c'est bon de toute façon là c'est des étapes qui sont guidées par le logiciel en fait donc on a as trop d'impacts dessus

pUP 224 ouais on va laisser comme ça le logiciel on verra ça plus tard

pD 83 oui ce sera plus simple de toute façon en gros c'est comme ça d'abord tu as espace de conception et régions fonctionnelles ensuite t'as configuration du maillage ensuite tu as configuration de l'analyse donc charge et tout ça

pP142 Ok c'est les cas de chargement

pD84 oui c'est ça ça comprend donc charge fixation conditions thermique cas de chargement connexion et actions.

pUP 225 après il faudrait regarder avec D c'est que là dans la mise en donnée ou préparer la simulation il faudrait ajouter mettre en donnée dans la simulation bah tu prend ici les noms de chaque items et en dessous tu me ici il faut définir le matériau etc et les zones à geler on s'appuie sur l'étape une afin de définir tout ça mais le matériau c'est pas tout de suite

pD 85 du coup il parle pas du matériau donc je pense que ils s'attendent à ce qu'on l'importe avec la pièce

pD 85 du coup il parle pas du matériau donc je pense que ils s'attendent à ce qu'on l'importe avec la pièce ce qui veut dire que sans doute quand tu l'importe et qu'il est pas configuré il va te demander de le faire

pP 143 ok donc je le met dans l'étude préalable enfin modifie la partie étude préalable.

pD 86 ouais parce que sinon il y a pas le matériau

pUP 226 donc tu peux tout simplement mettre définir le matériau à utiliser, si nécessaire et c'est tout. Donc c'est c'est peut être la première étape parce que si ton matériau est déjà dans la CAO et que t'ouvre la 3DExpérience il va pas te parler de matériau

pD 87 ouais du coup définir le matériau à utiliser ce serait en préambule à tout ça en tout cas c'est avant le point 1

pP 143 ok donc en préambule à ces étapes il faut définir le matériau à utiliser (modifie la fiche de la partie préparer la modélisation)

pUM 162 donc tu peux enlever le si nécessaire

pP 144 ah oui exacte

pUM 163 ensuite configuration de l'espace de conception donc là alors ça se fait comment ?

pD 86 bah on définit l'espace de conception puis la zone à geler ouais mais en général les espaces fonctionnels sont les zones à geler ça fait partie de la configuration de l'espace de conception

pP 145 donc c'est en point deux la zone à geler

pD 88 alors t'as en point 1 c'est configuration de l'espace donc le 1.1 c'est espace de conception 1.2 c'est espace enfin zones fonctionnelles

pP 146 ok je le note (modifie la partie préparer la simulation)

pUM 164 donc on fait au début tu as l'espace total et après dans l'espace total tu divises en espace de conception et zone à geler

pUP 227 ouais mais du coup il y a le même titre pour deux choses en fait tu as configuration de l'espace de conception et après définition de l'espace de conception

pD 89 donc on a définir l'espace de conception et après il y a définir les zones à geler

pP 147 ok donc on dit définir l'espace de conception puis définir les zones à geler que le logiciel ne va pas prendre en compte lors de l'optimisation ça vous va ? (modifie la partie préparer les simulation de ma modélisation)

pUP 228 ouais c'est bien comme ça

pUM 164 donc ça c'est le premier point ensuite le deuxième point il s'appelle configuration du maillage

pD 90 et dans la configuration du maillage il y a un truc qui s'appelle option options du maillage

pUM 165 ouais mais près on va peut être pas trop entrer dans les détails il faut juste mettre les étapes cruciales de l'optimisation topologique le fait que tu suives les recommandations de du logiciel

gUP 229 du coup le point 3 s'appelle configuration de l'analyse

pD 91 là tu auras plein de points donc charge fixation conditions thermiques les cas de chargement et les connexions

pUP 230 il y aura peut être je sais pas si on le dit ah confirmation de l'analyse (consulte la fiche de la tâche configuration de l'analyse) alors euh il y a juste les conditions limites et les cas de chargement qui sont définis lors de cette étape et comme toujours tu met identifiées dans l'étape une

pUM 165 l'étape d'après s'appelle validation de la configuration donc là c'est les 4 points et c'est ce qui permet de lancer le calcul par le logiciel et puis c'est bon

gP 148 (modifie la fiche configuration de la simulation) voilà c'est bon pour tout le monde ?

pUP 231 ok

pD 92 ouais c'est bon

pUP 231 et une fois que tu as ça t'as un truc qui s'appelle afficher les résultats et ça c'est pas ici parce qu'il faut déconnecter alors ce que tu as appelé simuler les scénarios définis, ça s'appelle visualiser et analyser bah sur la base des scénarios qui servent à voir le comportement de la pièce quand elle est soumise aux contraintes et du coup tu as écrit quoi là dessus

pP 148 bah attend je vais l'ouvrir (ouvre la fiche de la tâche visualiser et analyser

pUM 166 sur la base des scénarios qui servent à simuler le comportement de la pièce lorsqu'elle est soumise à différentes forces ou ça c'est bien on peut voir les différents mouvements qui affectent la pièce ça oui on peut garder ça

pUP 232 oui c'est bon on peut garder ça

pP 149 ok ça marche

pUP 233 ensuite dans l'arborescence une fois que tu as fait ça la première simulation après le petit 2 qui s'appelle calculer en fait là si tu tourne eh bien là tu vas optimiser

pP 150 ok donc optimiser la pièce

pUP 234 ouais enfin si tu veux tu peux dire que tu vas simuler en mode optimisation ouais voilà c'est ça c'est simuler et slash optimiser ensuite on a définir les objectifs de la simulation

pUM167 qu'est ce que tu as mis du coup

pP 151 juste deux secondes (ouvre la fiche de la tâche définir les objectifs de la simulation)

pUM 167 choisir les objectifs de la simulation maximiser la rigidité minimiser le poids afin de répondre aux objectifs donnés alors ça c'est un item en fait

pP 152 oui bah je l'ai mis en tâche sur la modélisation mais c'est vrai que ça pourrait constituer juste un point sur une fiche

pUM 167 oui c'est vrai que ce serait pas mal en plus ça rendre l'arborescence moins grande. tu peux par exemple mettre une tâche qui est paramétrer la simulation et on fait comme tout à l'heure petit 1 tu fais ça petit 2 tu fais ça etc.

pP 152 on est ok pour faire comme ça

pUP 234 oui oui

pD 93 ça roule

pP 153 ok ça marche modifie la modélisation

pUM 168 donc là tu peux avoir un truc qui est paramétrer la simulation par exemple

pP 154 ah oui mais ça y est déjà

pUM 169 mais c'est pas la même c'est à dire que dans le premier c'est tous les points 1, 2, 3, 4 et après quand on fait la simulation pour l'optimisation on fait 5, 6, 7, 8

pP 155 ah d'accord

pUP 235 c'est cible, contrainte, commande forme, forme de concept et autre et ça donc c'est le paramétrage de la simulation

pUM 170 de l'optimisation

pUP 236 oui de l'optimisation

pP 155 Paramétrer l'optimisation du coup

pUM 171 oui paramétrer l'optimisation

pP 156 d'accord je modifie (modifie la modélisation) comme ça on garde des énoncés différents pour chaque tâche c'est bien

pUP 237 voila et donc dans la fiche tu vas avoir comme premier truc cible

gP 157 ok du coup je créé la nouvelle fiche deux seconde (modifie la fiche de la tâche paramétrer l'optimisation)

pUP 238 du coup dans le doc on va reprendre les trucs du logiciel ce sera plus lisible ok alors on a un truc donc petit 1 cibles avec un s du coup c'est quoi ?

pD 94 bah c'est les cibles d'optimisation

pUM 172 et du coup ça va être quoi

pD 94 euh densité, poids, contrainte maximale c'est to objectif en somme du coup c'est le texte qui est déjà sur la fiche

pUP 239 donc le petit 1 s'appelle cibles

pUM 173 par contre du coup il va falloir enlever une partie de ton arborescence car ces étapes là vont être contenues dans cette fiche là

pP 158 ok ça marche

pUM 174 donc du coup on va l'appeler cibles pour reprendre les items du soft, du coup petit 2 ça va être contraintes avec un s. Alors qu'est ce que c'est ça

pD95 donc fréquences déplacement torsion

pUP 240 c'est des contraintes à respecter au sens ou euh c'est dans le sens où tu fais optimisation sous contrainte

pUM 175 ouais mais en anglais c'est pas stress c'est constraints du coup c'est des contraintes dans le sens où tu veux minimiser une fonction en respectant des critères c'est plus des critères à respecter que des contraintes en fait

pP 159 ok je note

pUP 241 bah spécifier la contrainte maximale autorisée dans la forme de concept

pUM 176 voilà bah après les critères à respecter ça peut être une contrainte maximal donc ça veut dire que en gros ton critère c'est rester que ta structure reste élastique ça peut être que les déplacements ne soient pas trop grands en gros t'as des fonctions f_0 à minimiser et t'as des contraintes, des fonctions $f(j)$ qui doivent être inférieures à une certaine valeur donc c'est soit des contraintes d'inégalité ou d'égalité

gUP 241Alors après il y a commande forme

gUM 177 ça je sais pas trop à quoi ça correspond

gD 96 ça c'est la symétrie et tout ça

gUM 178 ah d'accord dans cette logique là tu peux aussi mettre les procédés de fabrication que tu vas utiliser pour produire la pièce si tu veux que ce soit de

l'emboutissage de l'extrusion simple ou double et du coup après le soft prend ça en compte

gUP 242 Ensuite contraintes contraintes donc ça c'est voilà le cahier des charges. Mais tout ça aussi c'est pareil

gUM 179 Ouais c'est du cahier des charges du coup c'est comme le rest

gP 160 Ca ça a été préparé au préalable dans l'étape une

pUP 243 oui c'est ça. donc t'as un truc qui s'appelle commande forme après le soft valide ce que tu as fait c'est ça ?

pD 97 bah t'es pas obligé de mettre commande de forme mais tu auras pas de simulation si tu le met pas. donc vaut mieux la mettre au final

pUP 244 donc commande forme tu peux mettre définition des symétries par exemple etc. symétrie épaisseur max etc.

pP 161 voilà c'est fait (complète la fiche de la tâche paramétrer l'optimisation)

pUP 245 alors après je sais pas, forme de concept c'est quoi ? c'est quand tu lances le calcul?

pD 98 oui là tu lances le calcul

pP 162 ok donc là on est au 5 du coup c'est 5 calculer la forme

pUP 245 ouais voilà 5 calculer la forme c'est le calcul ouais tout simplement

gD 99 donc après il te propose plusieurs formes et la dernière étape c'est validation donc tu choisis une des forme mais il me semble que tu peux encore dessiner par dessus par exemple t'as la forme qui sera vraiment un peu brut et t'as un outils pour dessiner par dessus les surfaces pour les glisser

pUM 180 oui en général le résultat d'une optimisation topologique il est assez bah ça dépend du maillage t'as des choses vraiment très angulaires et du coup c'est pas quelque chose qu'on pourra produire tel quel donc soit tu as des outils qui te permettent directement tu peux faire du lissage soit tu vas directement un peu comme tu dis reconstruire avec des surfaces plus lisses une pièce en transparence

pUP 246 et du coup après le calcul tu choisis ton pourcentage ?

pUM 181 oui bah c'est dans les euh les contraintes et les critères par exemple ta cible c'est maximiser la rigidité et le critère c'est avec 40% de matière inversement si tu dit je veux minimiser la masse je veux que mon déplacement maximal soit 10 millimètres

pUP 247 calcul donc calcul tu met tes critères et tes contraintes et après tu lances le calcul

pUM 182 ouais

pUP 248 et alors qu'est ce que tu fais une fois que tu lances le calcul ?

pD 100 bah tu choisis le pourcentage

pUM 183 ouais mais là ce qu'on vient d'évoquer c'est ce qu'ils ont mis dans le 4 reconstruire le modèle (se réfère à la modélisation) c'est ça ?

pUP 249 non non on y est pas encore

pUM 184 ouais mais ce dont on vient de parler c'est ça c'est le 4

pUP 250 mais là on a fait le calcul qu'est ce qu'il fait ?

pUM 185 bah il te propose une forme

gP 163 alors de ce que je me souviens quand ils ont fait le truc, c'est genre ils ont fait leur scénario de modélisation, et en fait là tu as la pièce qui apparaît avec des parties en vert en bleu en rouge en jaune et en fait ce qu'ils disent c'est moi je veux pas que ça dépasse le rouge parce que le rouge c'est le point de déformation où ça ne revient plus en position et le pourcentage c'est comme ça qu'ils l'ont choisi. Enfin c'est ça qu'il entendaient par faire le calcul

gUM 186 donc en gros le calcul il te donne comme je le disais au début c'est les variables de conception c'est de la pseudo densité où tu dis je met de la matière ou je met pas de la matière

pP 164 voila voila c'est ça

pUM 187 la densité c'est pas quelque chose de variable entre 0 et 1 à un point dans l'espace tu peux pas mettre 0.5 c'est à dire moitié matière moitié pas matière donc tu dois placer ton curseur à un endroit et du coup tu as une petite liberté sur le résultat de ton optimisation. donc au début tu as fait ce choix là après tu peux passer au 4 mais je sais pas du coup le 3 qu'est ce que c'est comparer les modèles de calcul parce que pour moi quand tu fais de l'optimisation tu c'est t'as une solution unique pour tous les cas de chargement

pP 165 alors en fait ils effectuaient plusieurs fois l'optimisation par exemple il faisait plusieurs fois l'optimisation avec les mêmes paramètres parce que parfois les résultats variaient enfin c'est ce qu'il m'expliquait et du coup ensuite il choisissait celui qui réagissait le mieux mais après je ne sais pas si c'est vraiment nécessaire ça

pUM 187 ok

pP 166 (se réfère à la fiche de la tâche calcul) regarde il s'agira de dupliquer le modèle de calcul obtenu lors des étapes une fois obtenu ce modèle sera soumis à un scénario de simulation différent de ceux déjà appliqués les données recueillies à partir de la validation du modèle

pUM 188 ok bah là du coup quand il dit scénario de simulation différents, c'est cas de chargement différent ?

pP 166 euh je ne sais pas

pUP 251 nan nan c'est c'est ouais moi je reprend le document

pUM 189 pour moi l'optimisation c'était pour tous les cas de chargement

pD 101 euh oui c'est comme ça je pense

pUP 252 oui pour tous les cas de chargement oui

pUM 190 oui ça veut dire que tu as un résultat pour tous les cas

pD 102 moi je pense qu'il a dû prendre un truc d'un cas de chargement puis d'un autre

pUM 191 pour créer un truc hybride entre les deux

pD 103 oui qui n'arrive pas forcément

pUP 253 non je pense que tu as un résultat par cas de chargement

pUM 192 oui mais la pièce que tu produit elle est unique comment tu fais pour choisir

gD 104 là j'en vois 3

pUM 193 selon les cas de chargement tu dois avoir des solution optimales différentes et si c'est incompatible comment tu fais ?

pUP 194 parce que quand tu fais un scénario il te fait un optimisation il te donne une forme comme ça ensuite tu fais un deuxième scénario il t'en fait un autre une troisième pareil il y a aucune connexion entre les trois on est tout à fait d'accord et donc une solution obtenue ne répond pas forcément aux autres cas de chargement

pUM 194 et quand tu lances le le valider le calcul tu défini plusieurs cas de chargement donc le soft il va tous les prendre en même temps ou bien tu peux définir que un seul cas de chargement

pD 104 c'est une bonne question je chercherai

gUP 255 alors après tu as analyse des variantes donc est ce que c'est différentes variantes alors non là il a fait varier la cible et dans l'autres ce sont les cas de chargement qui sont différents

pUM 195 euh non quand tu parles de contraintes c'est pas des cas de chargement quand tu parle de contraintes c'est des critères à respecter

pUP 256 ouais mais euh ouais ouais ouais t'as raison donc il a fait un premier modèle et il a relancé une simulation afin de pouvoir l'optimiser topologiquement donc en fait il comprend tous les cas de chargement dans l'optimisation qu'il obtient à la fin tu avais raison. et donc du coup sur la pièce le bleu tu peux enlever et le rouge tu dois garder

pP 166 ouais voila c'est ce qu'ils ont fait

pUP 257 parce que ça c'est les surfaces fonctionnelles donc t'as du bleu et du rouge dans tes résultats de calculs

pUM 196 ouais ce sont les points chauds les zones les plus sollicitées en rouge ce sont les volumes sous contrainte et du coup avec le logiciel tu fais varier la matière jusqu'à ce qu'il y ait le moins de rouge et le moins de bleu possible pour obtenir un modèle optimal

pUP 258 ouais voilà c'est ça alors je pense que si tu met 0 pourcent il va garder que le rouge

pP 167 euh non non non je crois que justement 47,4 pourcent c'est le pourcentage qui fait qu'il n'y a plus que du rouge et qu'il n'y a plus aucune autre couleur enfin c'est la limite entre le vert et le rouge enfin c'est ce qu'il a dit

pUP 259 c'est ça ? ah ouais c'est ça ouais ça c'est la forme final

pP168 il m'a dit on gagne 50 pourcents de matière

pUM 197 ok

pUP 260 et donc ça c'est ce qu'il faut

pUM 198 effectivement quand tu fais le calcul d'optimisation topologique comme tu as pleins d'éléments qui sont dans le maillage et que tu as des pseudo densités sur chacun des éléments il peut arriver que selon où tu place le curseur t'as de la matière t'as plus de matière t'as de la matière et du coup ça c'est tu peux pas tu peux pas le produire donc il faut que tu déplaces un peu ton curseur qui sert à discriminer vide de plein pour avoir quelque chose que tu peux produire donc de la matière connectée donc c'est pour ça qu'il ont pas que du rouge car tout doit être connecté

pUP 261 après valider la forme c'est par rapport au curseur j'imagine

pUM 199 bah sachant que si enfin là le calcul rouge et bleu et les couleurs sont dû au fait que tu as toute la matière partout et donc si tu enlève le bleu tu auras plus cette répartition de la couleur quand tu vas refaire le calcul après

pUP 262 bien sûr

pUM 200 il y a une réorganisation

pUP 263 donc par rapport à ça il refait un calcul et à la fin il valide la forme avec les critères etc. et après il fait la reconstruction de surface

pUM 201 ouais du coup ça c'est l'étape d'après dans la modélisation

pUP 263 par contre ce que je comprend pas c'est que le soft te fasse choisir la quantité de matière à garder normalement la solution optimal c'est lui qui la trouve c'est pas à toi de choisir

pUM 202 non parce que là tu as enfin ta forme subjective c'est un seul critère, c'est une seule chose à minimiser ou à maximiser là tu as deux choses là tu voudrais maximiser la rigidité et minimiser la masse

pD 105 et du coup il faut que tu choisisses toi même quel critère est le plus important

pUP 264 alors dans ce cas j'ai une question, pourquoi est ce que dans le calcul d'optimisation tu lui dis pas tu dépasse pas la limite d'élasticité et tu enlève ce que tu veux où tu veux ? Moi je m'attendais à ça un module d'optimisation c'est j'ai une forme j'ai des conditions limites je dois pas atteindre la limite d'élasticité où que ce soit dans la forme et tu enlève la matière où tu veux et du coup il y a pas de pourcentage quand tu poses le problème comme ça

pUM 203 Oui mais là tu n'arrives pas à définir de fonctions objectives c'est comme ça tu ne peux pas formaliser le problème et du coup il faut le faire en plusieurs étapes, en itérant

pUP 265 ah oui c'est pour ça d'accord

gP 168 donc c'est pour ça qu'il a itéré

pUM 204 mais ce que tu peux faire sinon c'est tu minimise la masse et comme contrainte tu met que ta contrainte limite ne soit pas dépassée est ce que tu peux minimiser la masse ?

pD 106 oui tout à fait

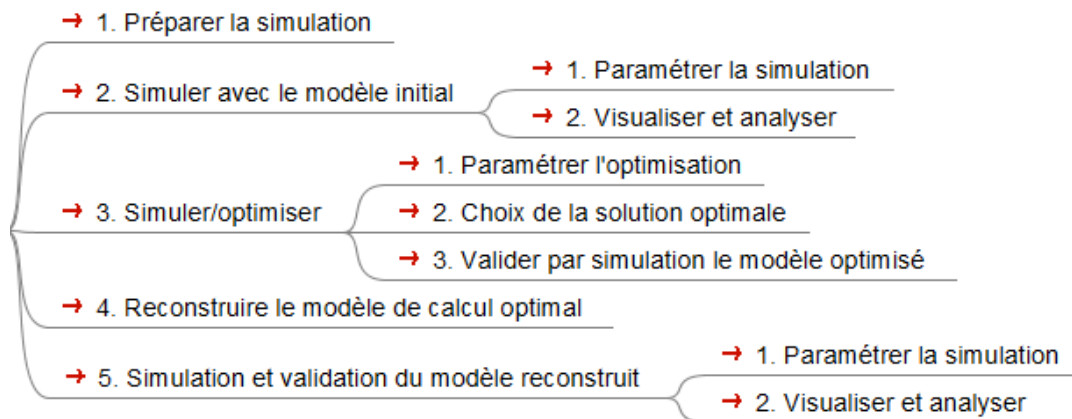
pUP 266 parce que tu as pas beaucoup de choix tu as que

pD 107 bah volume masse contrainte

pUM 205 oui si on raisonne juste en comportement donc en structure tu minimise la masse et tu maximise la rigidité ce que tu peux faire aussi c'est maximiser les fréquences propres la première fréquence propre et après le choix est assez restreint

ANNEXES 5 : Fiches composant l'OI à la suite du second enrichissement de l'OI (Optimisation topologique)

Fiche module optimisation topologique



Prérequis

Notions de physique et de mécanique :

- Efforts : force ponctuelle, surfacique, volumique, moment/couple
- Autre chargement : thermique, électrique, chimique, ...
- Couplage multi-physique
- Types de liaisons : encastrement, appui plan, appui simple, pivot, rotule, ...
- Contact entre pièces
- MMC mécanique des milieux continus
- Matériaux
- Notions de cinématique (décollage, vol stationnaire, virage)

Objectifs du module

1. Passer d'un cas réel à une modélisation.
2. identifier les conditions limites (liaisons, efforts, etc.)
3. définir les cas de chargement (décollage, vol stationnaire, virage etc.)
4. Identifier les surfaces fonctionnelles

5. Identifier le matériau à utiliser (module de Young ; coefficient de Poisson ; limite d'élasticité ; densité)
6. Ceci nécessite de se référer aux exigences fonctionnelles afin de les traduire en données d'entrée pour l'optimisation. Savoir modéliser les efforts réels :

Compétences attendues

- Analyser des situations et des usages associés au système que l'on souhaite modéliser (Conditions limites ; cas de chargement)
- Formuler un problème de mécanique avec ses conditions limites et l'aborder de façon simple
- Mettre en place les conditions de fonctionnement de l'objet technique (identifier les surfaces fonctionnelles)
- Recherche en autonomie des caractéristiques des matériaux utilisés (module de Young etc.)
- Définir les propriétés mécaniques en lien avec le procédé de fabrication additive (module de Young etc.)
- Fournir les bases nécessaires à la simulation numérique en conception
- Donner des connaissances fondamentales pour la formulation d'un modèle éléments finis avec les méthodes numériques qui lui sont associées.
- Réaliser des produits adaptés au procédé et vérifier leur conformité
- Analyse critique des améliorations apportées
- Fournir les bases nécessaires à la simulation numérique avec prise en compte du contact, de modèles de loi de comportement non linéaire et des non-linéarités géométriques.
- Utilisation avancée du code de simulation EF Abaqus.

1 . Préparer la simulation

1. identifier les conditions limites (température, liaisons, efforts, etc.)
2. définir les cas de chargement (décollage, vol stationnaire, virage etc.)
3. Identifier les surfaces fonctionnelles
4. Identifier le matériau à utiliser (module de Young ; coefficient de Poisson ; limite d'élasticité ; densité)

Ceci nécessite de se référer aux exigences fonctionnelles afin de les traduire en données d'entrée pour l'optimisation.

2. Simuler avec le modèle initial

Il s'agira d'effectuer des simulations sur la pièce originale afin d'obtenir les données qui permettront l'optimisation de cette dernière.

Utiliser les outils numériques libre/non pour la résolution de problèmes physiques

Apprécier les limites de validités des hypothèses simplificatrices émises (lors de l'étape précédente)

Analyser l'influence des paramètres du modèle numérique (maillage, formulation mathématique, etc.)

2.1. Paramétrer la simulation

Il s'agira ici de définir les paramètres de simulation :

1. Configuration de l'espace de conception :
2. Définir l'espace de conception ainsi que les zones à geler (zones fonctionnelles que le logiciel ne doit pas altérer lors de l'optimisation, **identifiées dans l'étape 1**).
3. Configuration du maillage (la finesse du maillage détermine la précision de la simulation et donc de l'optimisation (un maillage plus fin ne change pas forcément les résultats)
4. Configuration de l'analyse (conditions limites et cas de chargement etc. **identifiées dans l'étape 1**)

5. Validation de la configuration (permet de lancer le calcul)

NB Si nécessaire, en préambule, définir le matériau à utiliser (si pas en base de données créer le matériau (module de Young ; coefficient de Poisson ; limite d'élasticité)

2.2. Visualiser et analyser

Sur la base de scénarios, le logiciel va simuler les comportements de la pièce lorsqu'elle est soumise à différentes forces (définies par les scénarios). Permet de visualiser les déformations et mouvements qui affectent la pièce lorsqu'elle est soumise aux forces définies dans les scénarios. Permet de connaître les zones les plus soumises à l'effort.

3. Simuler/Optimiser

Sur la base des résultats obtenus lors de la simulation et fonction des objectifs de l'optimisations topologique ainsi que du choix des matériaux, le logiciel va produire un nouveau modèle de pièce où la matière superflue sera supprimée.

Utiliser les outils numériques libre/non pour la résolution de problèmes physiques

3.1. Paramétrer l'optimisation

1. Définir l'espace de conception et zones gelées
2. Cibles (Durant cette étape, il faudra choisir les objectifs de l'optimisation.
Généralement l'objectif est de maximiser la rigidité et minimiser la masse. Il faut donner un objectif (donné en pourcentage) au logiciel).
3. Contraintes (minimiser une fonction en respectant des critères)
4. Commandes/forme (définir les symétries, épaisseurs max etc.)
5. Lancer le calcul

Optimisation topologique (historique des méthodes d'optimisation des structures, intérêt et caractéristiques de la méthode, définition de fonctions objectif et contraintes, importance des cas de chargements, critique de la solution proposée)

3.2. Choix de la solution optimale

Contraintes liées aux matériaux : Définir la contrainte maximum que le matériau peut supporter.

Contraintes liées à la fabrication : Utilisation d'une contrainte de symétrie et d'une contrainte d'épaisseur.

3.3. Valider par simulation le modèle optimisé

Il faut appliquer la simulation utilisée pour le modèle initiale au modèle issue du calcul de l'étape précédente. Les données recueillies lors de cette étape seront réutilisées afin de déterminer le modèle optimal.

4. Reconstruire le modèle de calcul optimal

Il s'agira d'utiliser les différents outils de CAO surfacique afin de reproduire un modèle fonctionnel et fabricable au plus près du modèle de calcul optimal.

Le modèle obtenu par calcul n'étant généralement pas fonctionnel/fabricable, il est nécessaire de reconstruire la pièce de telle sorte à obtenir des surfaces lisses au plus proche du modèle de calcul. Il n'y a pas de méthode canonique afin d'obtenir ce modèle, ainsi l'ingénieur doit utiliser les outils du FGD (projection d'esquisse, patches, etc.).

Utiliser les outils numériques libre/non pour la résolution de problèmes physiques

En autonomie :

- Savoir analyser et exploiter un résultat d'optimisation topologique
- Conduire une analyse critique du résultat d'optimisation

5. Simulation et validation du modèle reconstruit

Simuler le modèle reconstruit afin de vérifier sa cohérence par rapport au cahier des charges (cas de chargement, conditions limites).

Si validé ok

Si pas validé retour à l'étape 3.2

5.1. Paramétrer la simulation

Il s'agira ici de définir les paramètres de simulation :

1. Configuration de l'espace de conception : Définir l'espace de conception ainsi que les zones à geler (zones fonctionnelles que le logiciel ne doit pas altérer lors de l'optimisation, **identifiées dans l'étape 1**).
2. Configuration du maillage (la finesse du maillage détermine la précision de la simulation et donc de l'optimisation (un maillage plus fin ne change pas forcément les résultats)
3. Configuration de l'analyse (conditions limites et cas de chargement etc. **identifiées dans l'étape 1**)
4. Validation de la configuration (permet de lancer le calcul)

NB Si nécessaire, en préambule, définir le matériau à utiliser (si pas en base de données créer le matériau (module de Young ; coefficient de Poisson ; limite d'élasticité)

5.2. Visualiser et analyser

Sur la base de scénarios, le logiciel va simuler les comportements de la pièce lorsqu'elle est soumise à différentes forces (définies par les scénarios). Permet de visualiser les déformations et mouvements qui affectent la pièce lorsqu'elle est soumise aux forces définies dans les scénarios. Permet de connaître les zones les plus soumises à l'effort.

ANNEXES 6 : Support pédagogique de l'optimisation topologique avant amélioration

1



2





Cookbook

Introduction

Ce document a pour but de vous apprendre réaliser une optimisation topologique à l'aide de la plateforme 3DEXperience.





➤ **Objectifs**

- Découvrir l'application Functional Generative Design
- Définir les différents paramètres pour lancer un calcul d'optimisation
- Générer des formes optimisées
- Créer des variantes et choisir le modèle optimal
- Valider et reconstruire le modèle final

➤ **Prérequis**

Notions basique en CAO (Part Design/Image and shape) et en analyse des structures

➤ **Formation recommandée**

- Companion Functional Generative Design
- Companion Part design
- Companion Sketcher



Cookbook

Introduction

Optimisation Topologique



La fabrication additive est aujourd'hui le meilleur procédé de fabrication permettant de réaliser des pièces avec des géométries très complexes, contrairement aux techniques d'usinage classiques, le poids total de ces pièces peut être optimisé en utilisant une méthode numérique qu'on appelle « optimisation topologique ».

On retrouve l'utilisation de l'optimisation topologique de plus en plus dans la conception des pièces industrielles pour optimiser leur design en fonction des contraintes fonctionnelles (Tenue mécanique, allègement ...), cette méthodologie permet des gains de temps considérables notamment en diminuant les itérations de calcul.



Volume fonctionnel utilisé



Résultat après optimisation topologique



Résultat après reconception



Cookbook



Principe

Optimisation Topologique

Le concept de l'optimisation topologique consiste d'abord à créer un modèle 3d ou en utilisant une pièce déjà existante sur laquelle on va appliquer les différentes forces et charges qu'elle peut supporter.

Ensuite le logiciel se charge de faire le calcul est généralement conditionné par quatre familles de données d'entrée (l'espace de conception, les surfaces de contact, les différents cas de charge, les contraintes géométriques).

Le logiciel va alors répartir la matière de la manière la plus optimale possible en enlevant les parties qui ne sont pas utiles (matière non soumise aux efforts transitant).

Une fois le modèle de calcul obtenu, l'étape suivante consiste à effectuer la reconstruction de la pièce de sorte à obtenir la géométrie idéale, car le modèle de calcul présente généralement une géométrie complexe avec de nombreuses zones creuses imbriquées, en reconstruisant la pièce on obtient une forme adéquate et fabriquable.



Cookbook



Functional Generative Design

Optimisation Topologique

Le Functional Generative Design (FGD) est une application de la 3DEXPERIENCE destinée à l'optimisation, l'analyse et la reconstruction de surfaces, l'atelier permet d'optimiser la topologie d'une pièce en respectant des contraintes et des objectifs préalablement définis comme la réduction de la masse ou la maximisation de la raideur.

L'application permet de :

- Définir les spécifications fonctionnelles d'une pièce (zones fonctionnelles, charges, ...)
- Générer et explorer les différentes solutions
- Valider un design pour la fabrication additive





Cookbook

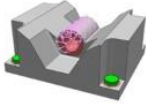
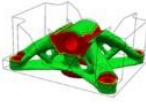
Functional Generative Design

Step by step

The complete process of generative designing involves three main stages. These stages can be further classified into sub-categories:

- 1. Defining functional specifications**
 - a. Defining geometrical inputs
 - i. Creating a Design Space
 - ii. Managing the Design Space (applying material, partitioning the Design Space and setting up the Design Space)
 - b. Setting up Analysis Model
 - i. Defining Loads and Load Cases
 - ii. Defining Boundary Conditions
 - iii. Defining Connections
 - c. Setting up Optimization Model
 - i. Defining Optimization Targets and Constraints
 - ii. Defining Shape Controls
- 2. Creating conceptual shapes and performing trade-off study**
 - a. Computing shapes
 - i. Selecting a shape after computation
 - ii. Generating the shape
 - b. Validating the selected shape
 - i. Simulating the shape
 - ii. Visualizing the simulation results
 - c. Managing variants and performing trade-off study



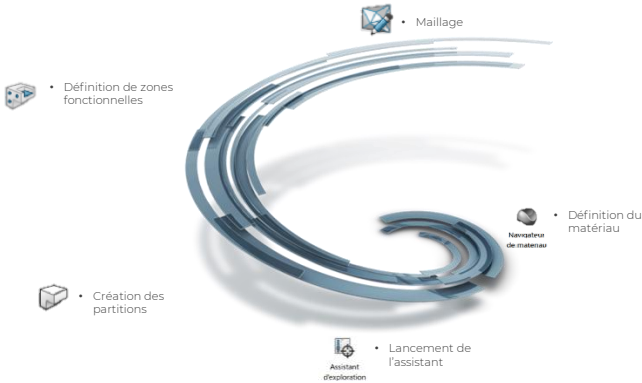





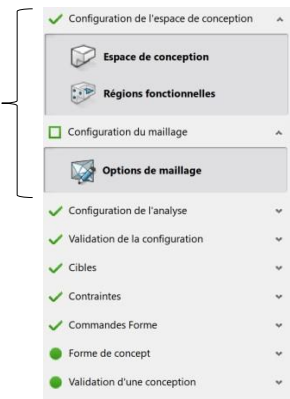
Cookbook

Etapas du Fonctionnal Generative Design

Définition de l'espace de conception









Cookbook

Définition de l'espace de conception

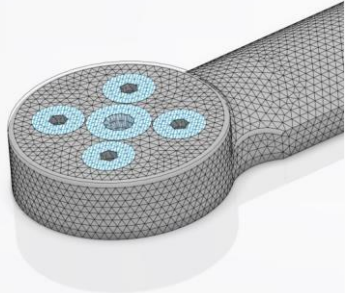
Résumé



Cette première partie montre comment appliquer le matériau à la pièce et comment créer les partitions afin de configurer l'espace de conception.

Une fois cette étape achevée, les zones fonctionnelles peuvent être identifiées.

- Les zones fonctionnelles représentent les zones figées qui à la fin du processus d'optimisation ne seront pas modifiées.
- Le FGD propose différents matériaux qu'on peut appliquer à la pièce ou créer un nouveau matériau et l'appliquer.
- Cette étape permet à l'utilisateur de paramétrer les partitions pour ensuite les identifier en tant que zones fonctionnelles.





Cookbook

Définition de l'espace de conception

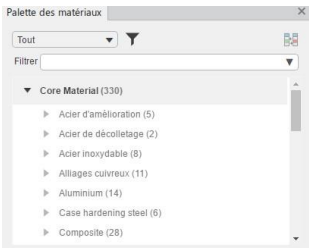
10



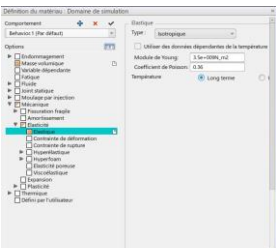
➤ Définition du matériau

- Appliquer un matériau en utilisant la base de données de la 3dexperience
- Créer un nouveau matériau

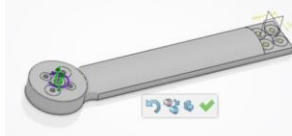
PaLETTE des matériaux



Création d'un matériau



Application d'un matériau



373

11

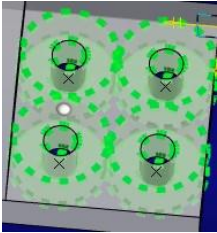
Cookbook

Définition de l'espace de conception

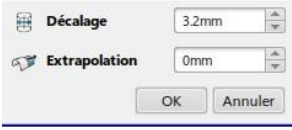
② Creation des partitions

- Pour identifier les zones fonctionnelles on crée les partitions et on définit le décalage de chacune d'elles.

Identification des zones



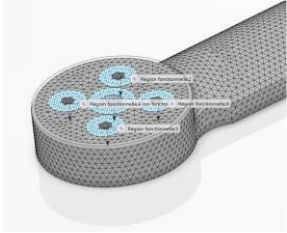
Règlage des décalages



③ Identification des régions fonctionnelles

- Cette phase consiste d'abord à identifier le volume de la pièce, ensuite choisir les régions fonctionnelles en sélectionnant les partitions créer précédemment, ces régions ne seront pas modifiées après le processus d'optimisation.

Selection des régions









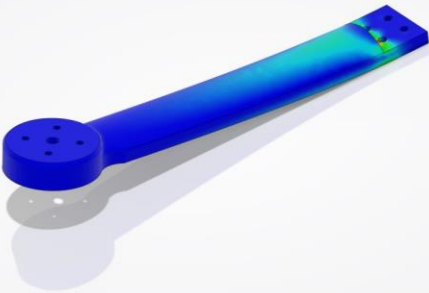
Cookbook

Configuration de l'analyse

Résumé

Cette étape constitue la base à fournir au logiciel pour le calcul, la solution sera dimensionnée et structurée en fonction de ces données (Cas de, charges, forces, contraintes ...).

- Il requis de définir les charges, les fixation et au moins un cas de charges autrement la configuration ne sera pas complète.
- Le FGD offre également la possibilité de définir les connections du solide ainsi que les conditions aux limites ces paramètres sont optionnels et non obligatoire.



Cookbook

Etapas du Fonctionnal Design l'analyse

Configuration de l'analyse

- Validation de la configuration
- Cas de chargement
- Définition des fixations
- Définition des charges
- Affichage des résultats

✓ Configuration de l'espace de conception

□ Configuration du maillage

✓ Configuration de l'analyse

Charges

Fixations

Conditions thermiques

Cas de chargement

Connexions

Abstractions

✓ Validation de la configuration

Valider une configuration

Afficher les résultats

✓ Cibles

✓ Contraintes

✓ Commandes Forme

● Forme de concept

● Validation d'une conception

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Cookbook

Configuration de l'analyse

➤ Application des charges

- Les charges sont les résistances mécanique externes qui sont appliquer a la structure, ils peuvent être sous forme de force, pression, moment ou accélération .

Les charges

	Pression
	Force
	Force distante
	Translation appliquée
	Chargement de type palier
	Couple distant

➤ Creation des fixations

- Cette phase consiste a déterminer comment la pièce est fixée dans les conditions réels

Les fixations

	Encastrement
	Déplacement fixe
	Rotule
	Charnière

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Configuration de l'analyse

② Application des charges

- Dans cette étape, on définit les combinaisons de charges appliquées à la pièce que l'on veut optimiser avec les différents scénarios de comportement.
- Pour ne pas devoir modifier les différentes charges, on peut régler le facteur de la charge appliquée, on peut aussi inverser la direction en entrant un chiffre négatif.

Les cas de charges

Eléments	Type	Cas de charg...	Cas de charg...	Cas de charg...	Cas de charg...
Contraintes					
Encastrement.1	Encastrement	☒	☒	☒	☒
Chargements					
Force.1	Force	☒ 1	☐ 1	☒ 1	☒ -1
Couple distant.1	Couple distant	☐ 1	☒ 1	☒ 1	☒ -1
Conditions thermiques					



Configuration de l'optimisation

Résumé

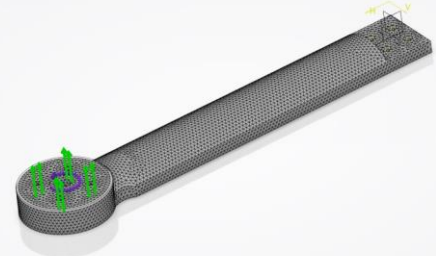
Cette section permet de définir la cible d'optimisation :

- ↑ Fréquence
- ↓ Masse
- ↑ Raideur

Elle permet aussi de définir des contraintes et commandes de formes :

- Symétrie
- Déplacement
- Fréquence

Une fois définis tout ces paramètres auront une influence majeure sur la forme obtenue après le calcul.



Cookbook

Etapas du Fonctionnal Generative Design

Configuration de l'optimisation

• Définition des contraintes de forme

• Définition des cibles d'optimisation

✓ Configuration de l'espace de conception

✓ Configuration du maillage

✓ Configuration de l'analyse

✓ Validation de la configuration

✓ Cibles

Cible d'optimisation

✓ Contraintes

Contrainte de fréquence

Contrainte de déplacement

Contrainte de tension

Contrainte de force de fixation

✓ Commandes Forme

Contrôle d'épaisseur

Contrainte de commande Forme

● Forme de concept

● Validation d'une conception

OptiEx

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Cookbook

Configuration de l'optimisation

➤ **Définition de la cible**

La cible d'optimisation constitue l'objectif de l'optimisation selon un critère définis.

Les critères de la cible d'optimisation qu'on retrouve sur le FGD sont :

- Maximiser la raideur : Afin de garder la rigidité de la pièce tout en diminuant la masse
- Maximiser la fréquence : Maximiser la fréquence la plus basse du corps
- Minimiser la masse : Minimiser la masse globale de la pièce

Cibles

Cible d'optimisation

Maximiser la raideur

% de masse cible de l'espace de conception

50

OK Annuler

➤ **Définition des contraintes d'optimisation**

Les contraintes d'optimisation restreignent le FGD de donner une forme incorrecte, sans cela l'optimisation n'est pas réalisable. Les contraintes d'optimisation qu'on peut définir sur le FGD sont:

- Contrainte de fréquence : Définit la fréquence maximale et minimale autorisée pour la forme calculée
- Contrainte de déplacement : pour spécifier le déplacement maximale autorisé pour la forme calculée
- Contrainte de stress : pour spécifier la contrainte de stress maximale autorisée
- Contrainte de serrage : pour spécifier la force maximale de serrage d'un boulon virtuel

Contraintes

Contrainte de fréquence

Contrainte de déplacement

Contrainte de tension

Contrainte de force de fixation

OptiEx

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Configuration de l'optimisation

➤ Définition des contraintes de forme

Sur le FGD on peut rajouter des contraintes de forme pour obtenir des géométries qui peuvent satisfaire les contraintes liées à la forme de la pièce initiale ou à la fabrication de cette dernière.

Les contraintes d'optimisation qu'on peut définir sur le FGD sont :

- Contrôle d'épaisseur : Pour imposer une épaisseur maximale ou minimale
- Contrainte de commande de forme : Pour imposer une contrainte liée à la géométrie de la pièce (symétrie, symétrie cyclique, débordement)

Contraintes de forme



Contrôle d'épaisseur



Contrainte de commande Forme

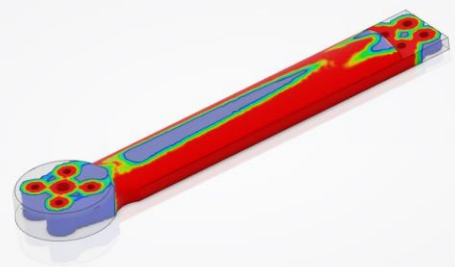


Calcul de forme optimisée

Résumé

Les étapes précédentes consistaient à définir tous les paramètres permettant de déterminer le comportement de la pièce dans la réalité ainsi que les préférences par rapport à la fabrication de cette dernière.

Pour obtenir la nouvelle forme le logiciel effectue des opérations booléennes pour enlever la matière sur les parties où les efforts ne transitent pas, et génère une forme appelée modèle de calcul.



Cookbook

Etapes du Fonctionnal Design Generative

Calcul de la forme optimisée



• Définition de la forme de concept



• Génération de la forme



• Calcul de la forme



- ✓ Configuration de l'espace de conception
- Configuration du maillage
- ✓ Configuration de l'analyse
- ✓ Validation de la configuration
- ✓ Cibles
- ✓ Contraintes
- ✓ Commandes Forme
- Forme de concept
- 🔄 **Calculer la forme**
- 🧠 **Forme de concept**
- Validation d'une conception

22




Cookbook

Calcul de la forme optimisée

➤ **Lancement du calcul**

Afin de lancer le calcul de forme il est bon de s'assurer que tous les paramètres sont bien définis au risque d'avoir des erreurs durant le calcul .

Pour cette raison une validation du modèle initial est essentielle à l'aide l'outil validation de la configuration .

Quand tout est en vert sur l'assistant d'exploration, ceci indique que tous les paramètres nécessaires ont été définis et qu'on peut lancer le calcul .

Lancement du calcul

Définition forme de concept



Forme de concept

Espace de conception

Volume résiduel : 44.1%

Masse : 0.022kg

Echelle de la forme

80.7

☒ Mettre à jour en déplaçant le curseur

Plus d'options

➤ **Définition de la forme de concept**

Après que logiciel ait terminé de calculer la forme, on analyse cette dernière pour pouvoir choisir une échelle iso qui nous permet de déterminer la quantité de matière qu'on veut garder en fonction de ce qu'on a obtenu à partir du calcul .

Afin d'obtenir une forme qu'on peut reconstruire ,on ne doit pas conserver une forme qui contient des parties non connectées .

En augmentant le pourcentage de l'échelle on peut apercevoir en simultané sur le visuel le changement de forme .



23






Cookbook

Calcul de la forme optimisée

➤ Generation de la forme

Une fois l'échelle ISO définie, on nomme le solide et on génère la forme optimisée. Cette forme résulte des opérations booléennes effectuées par le logiciel pour enlever du volume.

On peut remarquer que les surfaces enlevées par le logiciel durant le calcul sont regroupées dans un set géométrique nommé « Splitting surfaces ».



Forme générée



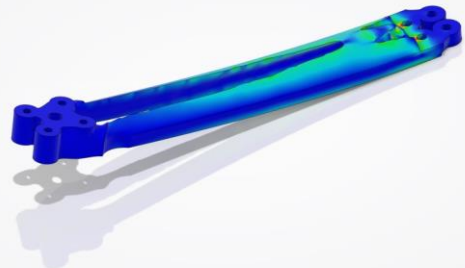
Cookbook

Validation du modèle

Résumé

Après avoir généré la forme finale, on procède à la pré validation du concept qui consiste à relancer une simulation numérique de la forme optimisée typologiquement.

À partir des visuels on analyse les différentes contraintes de Von mises ainsi que la déformation, on doit s'assurer que la nouvelle forme satisfait les critères établis précédemment en termes de déformation plastique.



Cookbook

Etapas du Fonctionnal Design Generative

Validation du modèle

- Validation de la configuration
- Configuration de l'analyse
- Affichage des résultats
- Gérer la validation de la forme
- Maillage

27

- ✓ Configuration de l'espace de conception
- Configuration du maillage
- ✓ Configuration de l'analyse
- ✓ Validation de la configuration
- ✓ Cibles
- ✓ Contraintes
- ✓ Commandes Forme
- Forme de concept
- Validation d'une conception

Gérer la validation de forme

Shape Valid...

- ✓ Configuration du contexte de validation
- Configuration du maillage
- ✓ Configuration de l'analyse
- ✓ Validation

Edition

Valider

Afficher les résultats

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Cookbook

Validation du modèle

➤ **Simulation du modèle de calcul**

- Pour simuler le modèle de calcul on clique sur gérer la validation la forme
- On peut modifier les paramètres de la simulation (type de maillage, taille)

➤ **Visualisation des résultats**

- On clique sur visualisation des résultats
- On choisit le cas de charge dont on veut visualiser la simulation
- On choisit le plot qu'on veut visualiser

Simulation de la forme générée

28

UNIVERSITÉ DE LORRAINE



Cookbook

Etude de fabrication

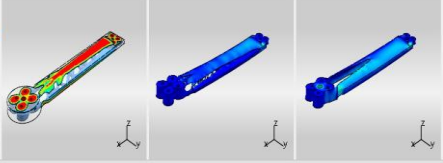
Résumé



Le FGD offre la possibilité de créer des variantes du modèle d'optimisation issu du calcul qui inclut différents scénarios et résultats ainsi que la forme .

Le but ensuite est de choisir le modèle optimal parmi ceux obtenus .

Après avoir validé le premier modèle d'optimisation, on crée différents modèles en utilisant l'outil étude de fabrication, en dupliquant le premier modèle obtenu et en changeant à chaque fois les paramètres de l'optimisation, pour obtenir de nouvelles formes et les valider avec la simulation numérique .



Options avancées		PLA	PLA	PLA
Entrées				
Matériau		PLA	PLA	PLA
Type de maillage		Linéaire	Linéaire	Linéaire
Taille du maillage		1,491mm	1,491mm	1,491mm
Cible		Rigidité maximale 30%	Rigidité maximale 50%	Rigidité maximale 50%
Afficher une contrainte		Non	Non	Non
Limites imposées de contrainte				
T1 Contrainte de force de fixation		Non	Non	Non
T2 Contrainte de fabrication		Non	Non	Non
R1 Contrainte d'épaisseur		Min: Non / Max: Non	Min: Non / Max: Non	Min: Non / Max: Non
C1 Contrainte de symétrie		1	1	1
C2 Contrainte de symétrie cyclique		Non	Non	Non
C3 Contrainte de chevauchement		Non	Non	Non
F1 Contrainte de fréquence		NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI) d'optimisation				
Etat de la tâche		Terminé et convergé	Terminé et convergé	Terminé et convergé
Nombre d'itérations		39	30	30
Etat des contraintes		5 contraintes présentes sur 5	1 contraintes présentes sur 1	5 contraintes présentes sur 5
Durée de la tâche		16:57	10:49	14:40
Masse d'optimisation		29,984%	49,945%	49,981%
Mesure de rendement		16,574	34,021	11,47
Fréquence		NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI)				
Score		70,9656	61,1111	10,0686
Masse		0,028g	0,027g	0,025g
Contrainte de Von Mises		2,058e+007N/m²	1,891e+007N/m²	2,378e+007N/m²
Contrainte principale minimum		1,24e+007N/m²	1,141e+007N/m²	1,287e+007N/m²
Contrainte principale maximum		3,333e+007N/m²	3,086e+007N/m²	3,817e+007N/m²
Déplacement		3,304mm	2,917mm	3,738mm
Force de réaction		10,548N	9,488N	13,562N
Energie de tension élastique		0,011J	0,009J	0,020J
Volume de l'élément		1,609e-005m³	2,101e-005m³	1,984e-005m³



Cookbook

Définition de l'espace de conception



➤ **Création des variantes**

- Pour dupliquer un modèle en clique sur l'icone de l'outil d'étude de fabrication
- Ensuite on donne un nom au fichier

➤ **Modification des variantes**

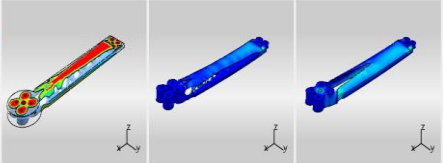
- Pour modifier une variante on choisit cette dernière et clique sur l'icone 2
- On retrouve alors l'assistant d'exploration ou l'on peut modifier les paramètres
- Une fois les paramètres modifiées, on relance la simulation numérique

➤ **Sélection du modèle optimal**

- Pour le choix du modèle optimal, FGD calcule un score afin d'indiquer le meilleur compromis



Outil étude de fabrication



Options avancées		PLA	PLA	PLA
Entrées				
Matériau		PLA	PLA	PLA
Type de maillage		Linéaire	Linéaire	Linéaire
Taille du maillage		1,491mm	1,491mm	1,491mm
Cible		Rigidité maximale 30%	Rigidité maximale 50%	Rigidité maximale 50%
Afficher une contrainte		Non	Non	Non
Limites imposées de contrainte				
T1 Contrainte de force de fixation		Non	Non	Non
T2 Contrainte de fabrication		Non	Non	Non
R1 Contrainte d'épaisseur		Min: Non / Max: Non	Min: Non / Max: Non	Min: Non / Max: Non
C1 Contrainte de symétrie		1	1	1
C2 Contrainte de symétrie cyclique		Non	Non	Non
C3 Contrainte de chevauchement		Non	Non	Non
F1 Contrainte de fréquence		NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI) d'optimisation				
Etat de la tâche		Terminé et convergé	Terminé et convergé	Terminé et convergé
Nombre d'itérations		39	30	30
Etat des contraintes		5 contraintes présentes sur 5	1 contraintes présentes sur 1	5 contraintes présentes sur 5
Durée de la tâche		16:57	10:49	14:40
Masse d'optimisation		29,984%	49,945%	49,981%
Mesure de rendement		16,574	34,021	11,47
Fréquence		NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI)				
Score		70,9656	61,1111	10,0686
Masse		0,028g	0,027g	0,025g
Contrainte de Von Mises		2,058e+007N/m²	1,891e+007N/m²	2,378e+007N/m²
Contrainte principale minimum		1,24e+007N/m²	1,141e+007N/m²	1,287e+007N/m²
Contrainte principale maximum		3,333e+007N/m²	3,086e+007N/m²	3,817e+007N/m²
Déplacement		3,304mm	2,917mm	3,738mm
Force de réaction		10,548N	9,488N	13,562N
Energie de tension élastique		0,011J	0,009J	0,020J
Volume de l'élément		1,609e-005m³	2,101e-005m³	1,984e-005m³



Cookbook



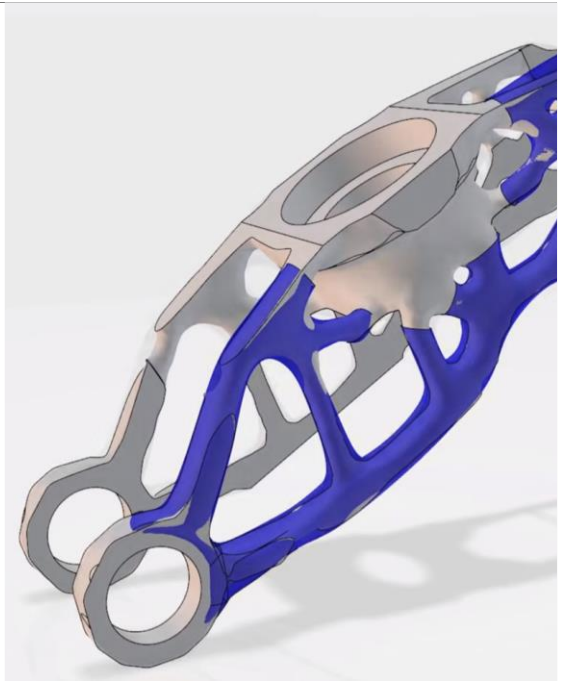
Reconstruction des surfaces

Résumé

Une fois que le solide du modèle est généré, on procède à la reconstruction de surfaces, car après qu'on ait effectué le calcul de forme, on obtient un solide avec des surfaces qui ne sont pas régulières (facettisées).

Le lissage de la pièce après le calcul est important pour pouvoir obtenir un bon état de surface et rendre la pièce exploitable.

Pour cela on retrouve plusieurs outils sur le FGD qui sont dédiés à la reconstruction de surfaces.



Cookbook

33

Reconstruction de surfaces

➤ Création des subdivisions

- Les subdivisions sont des patches qu'on dessine sur les surfaces irrégulières qu'on veut lisser pour qu'elle soit fabricable.
- Cette palette d'outils est proposée sur le FGD pour créer et modifier les subdivisions.
- Les points de contrôle permettent d'aligner les subdivisions et les modifier.

➤ Projection d'esquisse

- Pour récupérer un profil, on utilise les deux fonctions projection et isolation. Ensuite on récupère l'esquisse qui pourra être par la suite extrudée.
- NB: pour éviter d'avoir à reconstruire certaines parties de la pièce, on récupère les profils, ceci nous permet de gagner du temps en reconstruction.

• Outils de reconstruction



➤ Modification des subdivisions

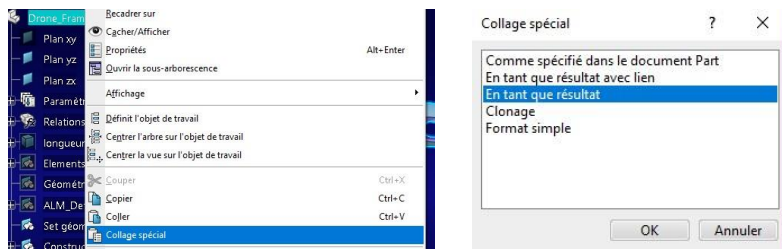
- On peut modifier une subdivision pour changer sa forme en utilisant cette palette d'outils qui permet d'agir sur les points de contrôle.
- On crée une symétrie d'une subdivisions à l'aide de l'outil Symétrie.
- On peut extruder une subdivision à l'aide de l'outil Extrusion.



Exportation du fichier .stl

➤ Exportation

- Pour terminer, on doit extraire le solide mort de la pièce reconstruite afin que ce dernier soit utilisable en impression 3D.
- On copie le corps de reconstruction en tant que résultat de cette manière, on peut l'exporter en STL.



ANNEXES 7 : Exercices Module d'optimisation topologique



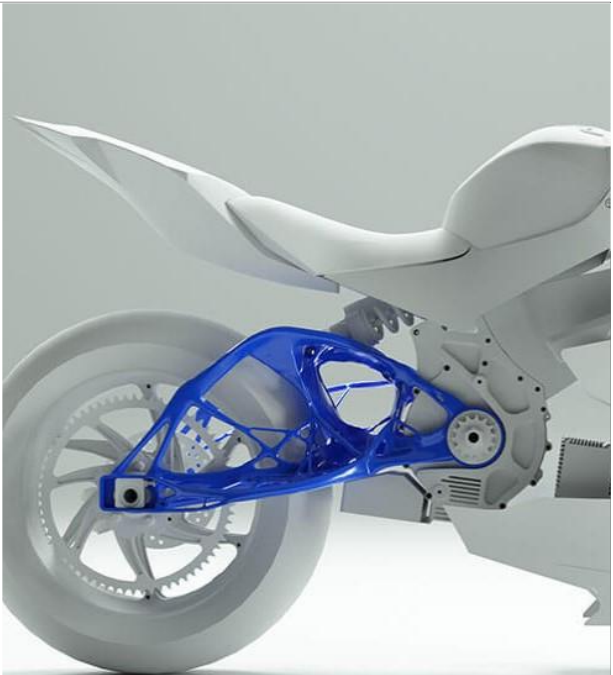
Exercice d'application

Optimisation Topologique



3DEXPERIENCE®







Exercice d'application

Generative design : Chaise

Réalisation d'un chaise a 3 ou 4 pieds par design generatif.





UNIVERSITÉ DE LORRAINE

UFR MATHÉMATIQUES INFORMATIQUE MÉCANIQUE ET AUTOMATIQUE

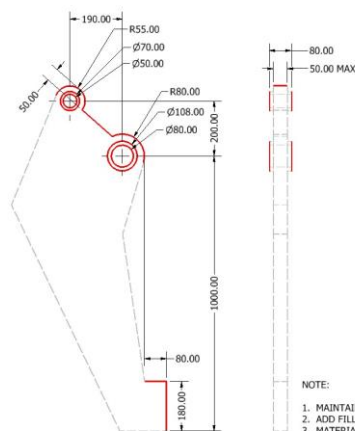
Generative design : Cadre Vélo



Réalisation d'un cadre de vélo par design génératif

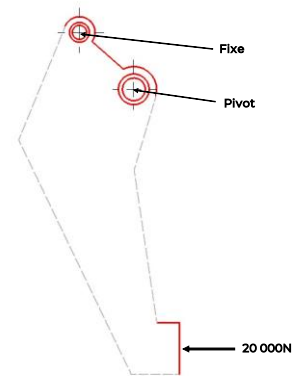
© Université de Lorraine

Optimisation Topologique : Pince robot



NOTE:

1. MAINTAIN GEOMETRY IN RED USING RELEVANT DIMENSIONS
2. ADD FILLETS AND ROUNDS (NOT DISPLAYED) AS NEEDED
3. MATERIAL: STEEL - ASTM A36



© Université de Lorraine

ANNEXES 8 : Questionnaire de satisfaction

Questionnaire de satisfaction TINA 2

Afin d'améliorer notre formation, nous aimerions connaître vos remarques vis à vis de cette dernière. Vos remarques seront traitées de sorte à garantir l'anonymat et les résultats seront uniquement utilisés dans un but d'amélioration continue de la formation que nous proposons.

Merci de bien vouloir renseigner vos remarques/observations tout au long de cet enseignement.

*Obligatoire

1. 1. L'ambiance générale de cet enseignement était propice au travail *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

2. 1. L'ambiance générale de cet enseignement était propice au travail *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

3. Pourquoi ?

4. 2. Le matériel mis à ma disposition m'a permis d'accomplir tout ce que l'on m'a demandé *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

5. Pourquoi ?

6. 3. Je disposais des connaissances préalables nécessaires pour aborder cet enseignement *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

7. Pourquoi ?

8. 4. La cadence à laquelle se déroulait cet enseignement était trop intense *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

9. Pourquoi ?

10. 5. Cet enseignement était trop court *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

11. Remarques

12. 6. Les objectifs de cet enseignement étaient clairs *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

13. Pourquoi ?

14. 7. Les supports utilisés étaient clairs *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

15. Pourquoi ?

16. 8. Les explications données par l'enseignant étaient satisfaisantes. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

17. Pourquoi ?

18. 9. L'enseignant faisait ressortir les savoirs essentiels. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

19. 10. L'enseignant a su montrer de réelles qualités pédagogiques (disponibilité, écoute, qualité d'échanges etc.) *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

20. Pourquoi ?

21. 11. Le déroulement de l'enseignement était dynamique et stimulant. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
- ☐ D'accord
- ☐ Pas d'avis
- ☐ Pas d'accord
- ☐ Pas du tout d'accord

22. Pourquoi ?

23. 12. J'ai l'impression d'avoir atteint les objectifs de cet enseignement. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
- ☐ D'accord
- ☐ Pas d'avis
- ☐ Pas d'accord
- ☐ Pas du tout d'accord

24. Pourquoi ?

25. 13. A l'issue de ce TP je suis satisfait du résultat de mon travail. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

26. Pourquoi ?

27. 14. Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

28. Pourquoi ?

29. Pourquoi ?

30. 2. Le matériel mis à ma disposition m'a permis d'accomplir tout ce que l'on m'a demandé *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

31. Pourquoi ?

32. 3. Je disposais des connaissances préalables nécessaires pour aborder cet enseignement *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

33. Pourquoi ?

34. 4. La cadence à laquelle se déroulait cet enseignement était trop intense *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

35. Pourquoi ?

36. 5. Cet enseignement était trop court *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

37. Remarques

38. 6. Les objectifs de cet enseignement étaient clairs *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
- ☐ D'accord
- ☐ Pas d'avis
- ☐ Pas d'accord
- ☐ Pas du tout d'accord

39. Pourquoi ?

40. 7. Les supports utilisés étaient clairs *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
- ☐ D'accord
- ☐ Pas d'avis
- ☐ Pas d'accord
- ☐ Pas du tout d'accord

41. Pourquoi ?

42. 8. Les explications données par l'enseignant étaient satisfaisantes. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

43. Pourquoi ?

44. 9. L'enseignant faisait ressortir les savoirs essentiels. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

45. 10. L'enseignant a su montrer de réelles qualités pédagogiques (disponibilité, écoute, qualité d'échanges etc.) *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

46. Pourquoi ?

47. 11. Le déroulement de l'enseignement était dynamique et stimulant. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
- ☐ D'accord
- ☐ Pas d'avis
- ☐ Pas d'accord
- ☐ Pas du tout d'accord

48. Pourquoi ?

49. 12. J'ai l'impression d'avoir atteint les objectifs de cet enseignement. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
- ☐ D'accord
- ☐ Pas d'avis
- ☐ Pas d'accord
- ☐ Pas du tout d'accord

50. Pourquoi ?

51. 13. A l'issue de ce TP je suis satisfait du résultat de mon travail. *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

52. Pourquoi ?

53. 14. Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP *

Une seule réponse possible.

- ☐ Tout à fait d'accord
☐ D'accord
☐ Pas d'avis
☐ Pas d'accord
☐ Pas du tout d'accord

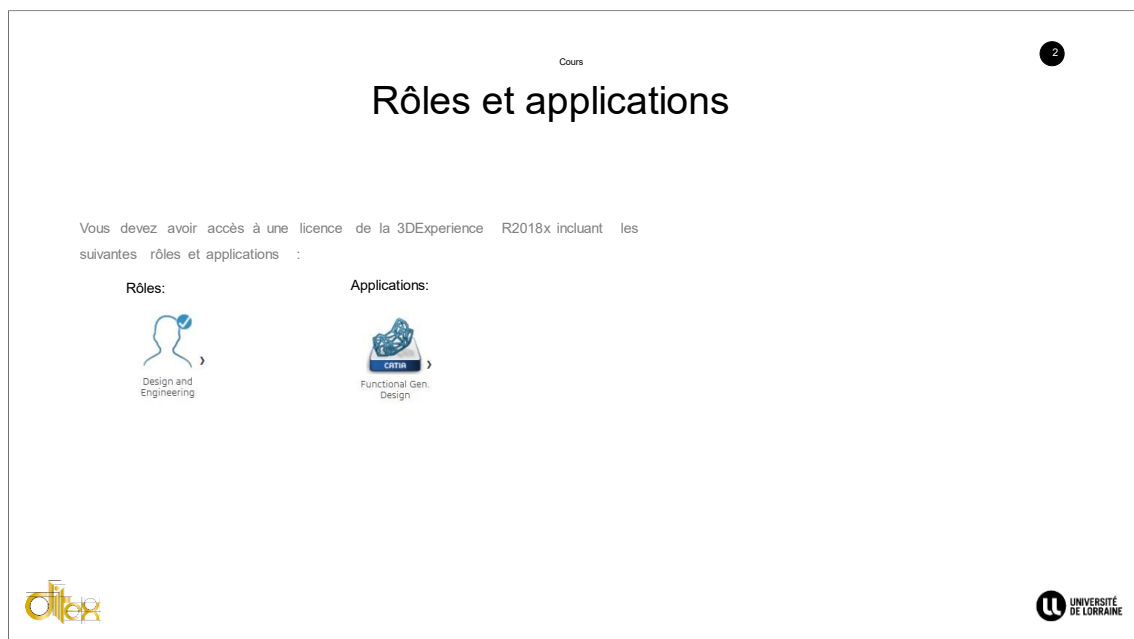
54. Pourquoi ?

ANNEXES 9 : Support pédagogique de l'optimisation topologique après amélioration

1



2





Cours

Introduction

Ce document a pour but de vous apprendre réaliser une optimisation topologique à l'aide de la plateforme 3DEXperience.



➤ **Objectifs**

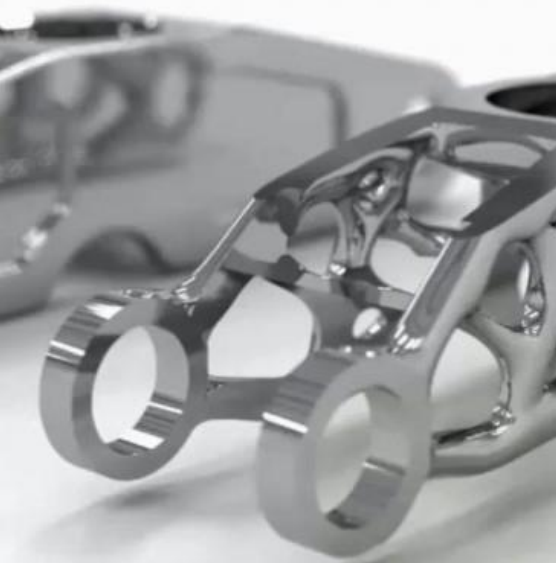
- Découvrir l'application Functional Generative Design
- Définir les différents paramètres pour lancer un calcul d'optimisation
- Générer des formes optimisées
- Créer des variantes et choisir le modèle optimal
- Valider et reconstruire le modèle final

➤ **Prérequis**

Notions basique en CAO (Part Design, Image and shape) et en analyse des structures

➤ **Formation recommandée**

- Companion Functional Generative Design
- Companion Part design
- Companion Sketcher





Cours

Introduction

Optimisation Topologique



La fabrication additive est aujourd'hui le meilleur procédé de fabrication permettant de réaliser des pièces avec des géométries très complexes, contrairement aux techniques d'usinage classiques, le poids total de ces pièces peut être optimisé en utilisant une méthode numérique qu'on appelle « optimisation topologique ».

On retrouve l'utilisation de l'optimisation topologique de plus en plus dans la conception des pièces industrielles pour optimiser leur design en fonction des contraintes fonctionnelles (Tenue mécanique, allègement ..), cette méthodologie permet des gains de temps considérables notamment en diminuant les itérations de calcul.



**Volume
fonctionnel utilisé**

**Résultat après
optimisation topologique**

**Résultat après
reconception**



Cours

Principe

Optimisation Topologique



Le concept de l'optimisation topologique consiste d'abord à créer un modèle 3d ou en utilisant une pièce déjà existante sur laquelle on va appliquer les différentes forces et charges qu'elle peut supporter . Ensuite le logiciel se charge de faire le calcul est généralement conditionné par quatre familles de données d'entrée (l'espace de conception, les surfaces de contact, les différents cas de charge, les contraintes géométriques) .

Le logiciel va alors répartir la matière de la manière la plus optimale possible en enlevant les parties qui ne sont pas utiles (matière non soumise aux efforts transitant) .

Une fois le modèle de calcul obtenu, l'étape suivante consiste à effectuer la reconstruction de la pièce de sorte à obtenir la géométrie idéale, car le modèle de calcul présente généralement une géométrie complexe avec de nombreuses zones creuses imbriquées, en reconstruisant la pièce on obtient une forme adéquate et fabricable .





Cours

Principe

Optimisation Topologique ou Design Génératif ?



Il existe deux types " d'optimisation topologique " :

L'optimisation topologique à proprement parler, ou l'on va optimiser une pièce existante par exemple dans le but d'augmenter la raideur de cette dernière ou réduire la masse .

Le design génératif, quant à lui consiste à proposer un espace de conception délimitant la pièce avec des surfaces fonctionnelles . C'est le logiciel qui propose des conceptions correspondantes aux contraintes et conditions limites définies par l'utilisateur .

Optimisation Topologique



Design Génératif





Cours

Functional Generative Design

Optimisation Topologique

Le Functional Generative Design (FGD) est une application de la 3DEXPERIENCE destinée à l'optimisation, l'analyse et la reconstruction de surfaces, l'atelier permet d'optimiser la topologie d'une pièce en respectant des contraintes et des objectifs préalablement définis comme la réduction de la masse ou la maximisation de la raideur.

L'application permet de :

- Définir les spécifications fonctionnelles d'une pièce (zones fonctionnelles, charges ...)
- Générer et explorer les différentes solutions
- Valider un design pour la fabrication additive







Cours

Functional Generative Design

Step by step

The complete process of generative designing involves the main stages. These stages can be further classified into sub-categories:

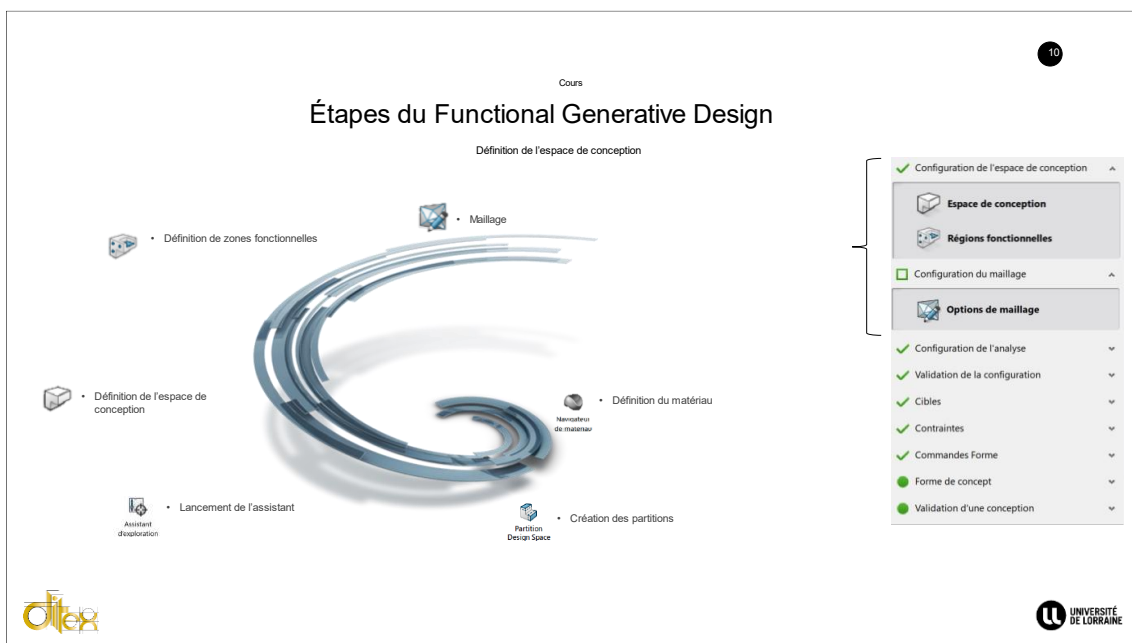
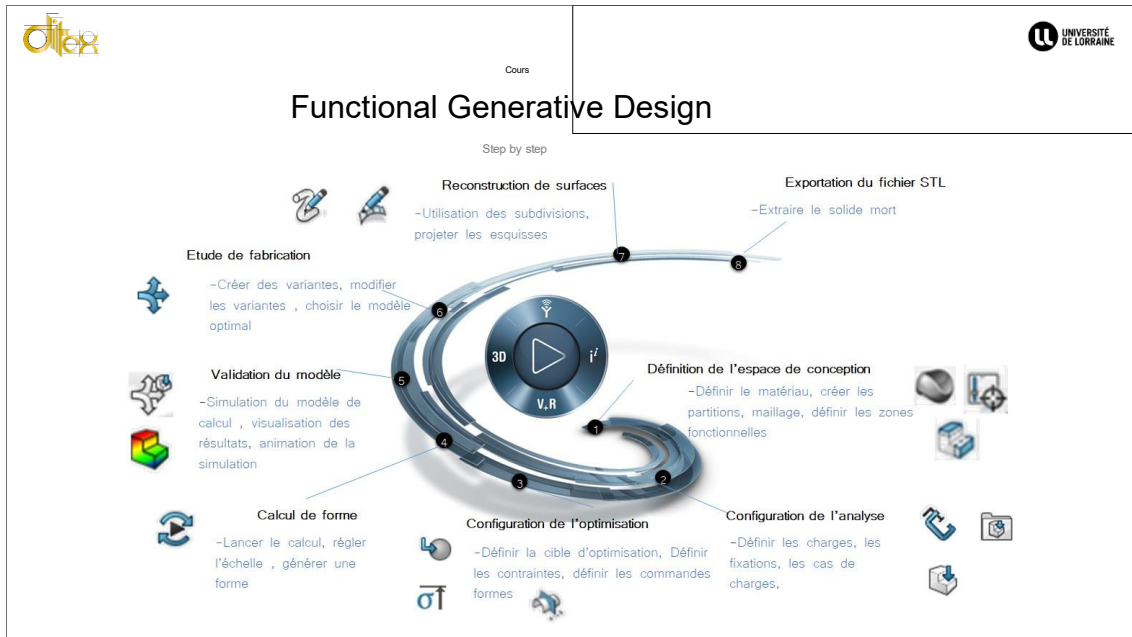
1. Defining functional specifications

- a. Defining geometrical inputs
 - i. Creating a Design Space
 - ii. Managing the Design space
 - 1. Applying Material
 - 2. Partitioning the Design Space
 - 3. Setting up the Design Space
- b. Setting up Analysis Model
 - i. Defining Loads and Load Cases
 - ii. Defining Boundary Conditions
 - iii. Defining Connections
- c. Setting up Optimization Model

2. Creating conceptual shapes and performing trade-off study

- a. Computing shapes
 - i. Selecting a shape after computation
 - ii. Generating the shape
- b. Validating the selected shape
 - i. Simulating the shape
 - ii. Visualizing the simulation results
- c. Managing variants and performing trade-off study







Cours

Définition de l'espace de conception



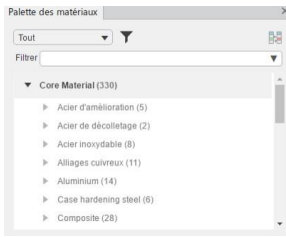
➤

Définition du matériau

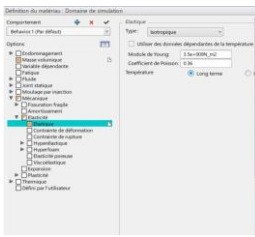
- Appliquer un matériau en utilisant la base de données de la 3dexperience
- Créer un nouveau matériau

“ On retrouve deux types de matériaux :
Core materials qui sont des matériaux avec des propriétés physiques
Cover materials qui ont des propriétés uniquement visuelles. ”

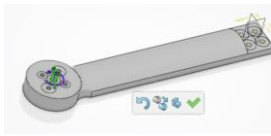
Palette des matériaux



Création d'un matériau



Application d'un matériau







Cours

Définition de l'espace de conception

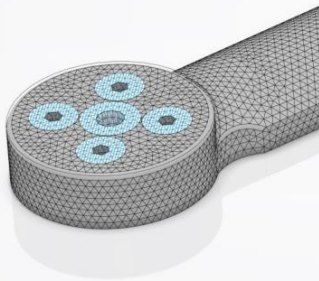


Résumé

Cette première partie montre comment appliquer le matériau à la pièce et comment créer les partitions afin de configurer l'espace de conception .

Une fois cette étape achevée , les zones fonctionnelles peuvent être identifiées .

- Les zones fonctionnelles représentées les zones figées qui à la fin du processus d'optimisation ne seront pas modifiées .
- Le FGD propose différents matériaux qu'on peut appliquer à la pièce ou créer un nouveau matériau et l'appliquer .
- Cette étape permet à l'utilisateur de paramétrer les partitions pour ensuite les identifier en tant que zones fonctionnelles .







Cours

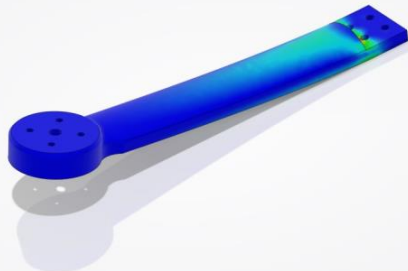
Configuration de l'analyse

Résumé

Cette étape constitue la base à fournir au logiciel pour le calcul, la solution sera dimensionnée et structurée en fonction de ces données (Cas de, charges, forces, contraintes ...).

- Il requis de définir les charges, les fixation et au moins un cas de charges autrement la configuration ne sera pas complète .
- Le FGD offre également la possibilité de définir les connections du solide ainsi que les conditions aux limites ces paramètres sont optionnels et non obligatoires .







Cours

Configuration de l'analyse

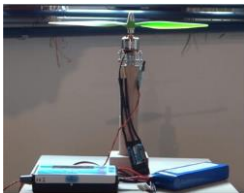
Données

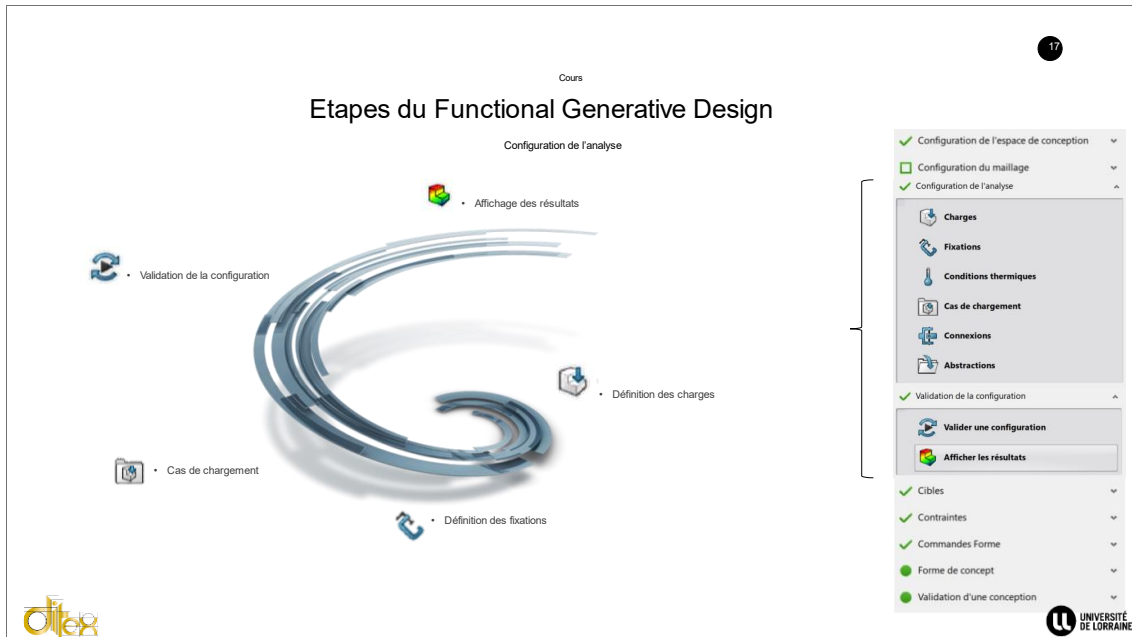
Nous allons travailler sur un bras du drone encastré à l'aide de deux appui plans et de quatre vis. Les efforts appliqués sur le bras par le biais du moteur on été déterminés à l'aide d'un banc d'essai.

Il a été défini que l'effort induit par l'hélice et le moteur au niveau des quatre perçages étaient les suivants:

- Couple distant selon l'axe Z de **0,22Nm**
- Une force selon l'axe Z de **7,25N**

16

Cours

Configuration de l'analyse

➤ **Application des charges**

- Les charges sont les résistances mécanique externes qui sont appliqués à la structure, ils peuvent être sous forme de force, pression, moment ou accélération.

Les charges

	Pression
	Force
	Force distante
	Translation appliquée
	Chargement de type palier
	Couple distant

➤ **Création des fixations**

- Cette phase consiste à déterminer comment la pièce est fixée dans les conditions réels

Les fixations

	Encastrement
	Déplacement fixe
	Rotule
	Charnière

Logos:

Configuration de l'analyse

➤ Application des charges

- Dans cette étape, on définit les combinaisons de charges appliquées à la pièce que l'on veut optimiser avec les différents scénarios de comportement.
- Pour ne pas devoir modifier les différentes charges, on peut régler le facteur de la charge appliqué, on peut aussi inverser la direction en entrant un chiffre négatif.

Les cas de charges

Eléments	Type	Cas de charg...	Cas de charg...	Cas de charg...	Cas de charg...
Contraintes					
Encastrement.1	Encastrement	☒	☒	☒	☒
Chargements					
Force.1	Force	☒ 1	☐ 1	☒ 1	☒ -1
Couple distant.1	Couple distant	☐ 1	☒ 1	☒ 1	☒ -1
Conditions thermiques					



Configuration de l'optimisation

Résumé

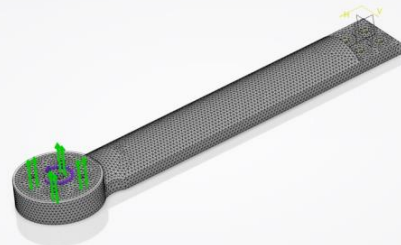
Cette section permet de définir la cible d'optimisation :

- ↑ Fréquence
- ↓ Masse
- ↑ Raideur

Elle permet aussi de définir des contraintes et commandes de formes :

- Symétrie
- Déplacement
- Fréquence

Une fois définis tout ces paramètres auront une influence majeure sur la forme obtenue après le calcul.



Cours

Etapas du Functional Generative Design

Configuration de l'optimisation

1. Définition des contraintes de forme

2. Définition des cibles d'optimisation

3. Définition des contraintes d'optimisation

Configuration de l'optimisation

- Configuration de l'espace de conception
- Configuration du maillage
- Configuration de l'analyse
- Validation de la configuration
- Cibles
- Cible d'optimisation**
- Contraintes
 - Contrainte de fréquence
 - Contrainte de déplacement
 - Contrainte de tension
 - Contrainte de force de fixation
- Commandes Forme
 - Contrôle d'épaisseur
 - Contrainte de commande Forme
- Forme de concept
- Validation d'une conception

olteX

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Cours

Configuration de l'optimisation

➤ **Définition de la cible**

La cible d'optimisation constitue l'objectif de l'optimisation selon un critère définis.

Les critères de la cible d'optimisation qu'on retrouve sur le FGD sont :

- Maximiser la raideur : Afin de garder la rigidité de la pièce tout en diminuant la masse
- Maximiser la fréquence : Maximiser la fréquence la plus basse du corps
- Minimiser la masse : Minimiser la masse globale de la pièce

Cibles

Cible d'optimisation

Maximiser la raideur

% de masse cible de l'espace de conception

50

OK Annuler

➤ **Définition des contraintes d'optimisation**

Les contraintes d'optimisation restreignent le FGD de donner une forme incorrecte, sans cela l'optimisation n'est pas réalisable.

Les contraintes d'optimisation qu'on peut définir sur le FGD sont :

- Contrainte de fréquence : Définit la fréquence maximale et minimale autorisée pour la forme calculée
- Contrainte de déplacement : pour spécifier le déplacement maximale autorisée pour la forme calculée
- Contrainte de stress : pour spécifier la contrainte de stress maximale autorisée
- Contrainte de serrage : pour spécifier la force maximale de serrage d'un boulon virtuel

Contraintes

Contrainte de fréquence

Contrainte de déplacement

Contrainte de tension

Contrainte de force de fixation

olteX

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Configuration de l'optimisation

➤ Définition des contraintes de forme

Sur le FGD on peut rajouter des contraintes de forme pour obtenir des géométries qui peuvent satisfaire les contraintes liées à la forme de la pièce initiale ou à la fabrication de cette dernière.

Les contraintes d'optimisation qu'on peut définir sur le FGD sont :

- Contrôle d'épaisseur : Pour imposer une épaisseur maximale ou minimale
- Contrainte de commande de forme : Pour imposer une contrainte liée à la géométrie de la pièce (symétrie, symétrie cyclique, débordement)

Contraintes de forme



Contrôle d'épaisseur



Contrainte de commande Forme

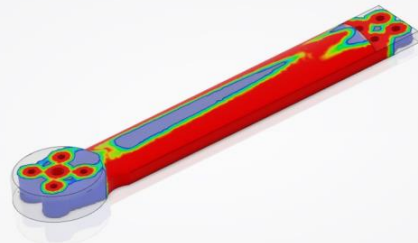


Calcul de forme optimisée

Résumé

Les étapes précédentes consistaient à définir tous les paramètres permettant de déterminer le comportement de la pièce dans la réalité ainsi que les préférences par rapport à la fabrication de cette dernière.

Pour obtenir la nouvelle forme le logiciel effectue des opérations booléennes pour enlever la matière sur les parties où les efforts ne transitent pas, et génère une forme appelée modèle de calcul.



Cours

Etapas du Functional Generative Design

Calcul de la forme optimisée

- Définition de la forme de concept
- Génération de la forme
- Calcul de la forme

- ✓ Configuration de l'espace de conception
- Configuration du maillage
- ✓ Configuration de l'analyse
- ✓ Validation de la configuration
- ✓ Cibles
- ✓ Contraintes
- ✓ Commandes Forme
- Forme de concept
- Calculer la forme
- Forme de concept
- Validation d'une conception

dilex

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Cours

Calcul de la forme optimisée

② Lancement du calcul

Afin de lancer le calcul de forme il est bon de s'assurer que tous les paramètres sont bien définis au risque d'avoir des erreurs durant le calcul.

Pour cette raison une validation du modèle initial est essentielle à l'aide l'outil validation de la configuration.

Quand tout est en vert sur l'assistant d'exploration, ceci indique que tous les paramètres nécessaires ont été définis et qu'on peut lancer le calcul.

Lancement du calcul

② Définition de la forme de concept

Après que logiciel ait terminé de calculer la forme, on analyse cette dernière pour pouvoir choisir une échelle iso qui nous permet de déterminer la quantité de matière qu'on veut garder en fonction de ce qu'on a obtenu à partir du calcul.

Afin d'obtenir une forme qu'on peut reconstruire, on ne doit pas conserver une forme qui contient des parties non connectées.

En augmentant le pourcentage de l'échelle on peut apercevoir en simultanément sur le visuel le changement de forme.

Définition forme de concept

Forme de concept

Espace de conception

Volume résiduel : 44.1%

Masse : 0.023kg

Echelle de la forme

80.7

☒ Mettre à jour en déplaçant le curseur

Plus d'options

dilex

UNIVERSITÉ DE LORRAINE



Cours

Calcul de la forme optimisée

➤ Génération de la forme

Une fois l'échelle ISO définis, on nomme le solide et on génère la forme optimisée .
 Cette forme résulte des opérations booléennes effectués par le logiciel pour enlever du volume .

On peut remarquer que les surfaces enlevées par le logiciel durant le calcul sont regroupé dans un set géométrique nommé « Splitting surfaces ».



Forme générée



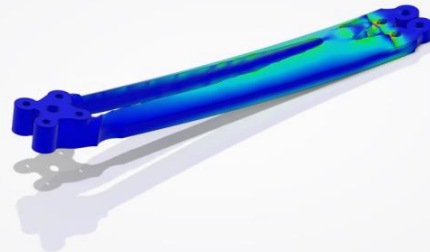
Cours

Validation du modèle

Résumé

Après avoir généré la forme finale, on procède à la pré validation du concept qui consiste à relancer une simulation numérique de la forme optimisée typologiquement .

À partir des visuels on analyse les différentes contraintes de Von mises ainsi que la déformation, on doit s'assurer que la nouvelle forme satisfait les critères établis précédemment en termes de déformation plastique .



Cours

Etapes du Functional Generative Design

Validation du modèle

Validation de la configuration

Affichage des résultats

Gérer la validation de la forme

Configuration de l'analyse

Maillage

dtex

Configuration de l'espace de conception

Configuration du maillage

Configuration de l'analyse

Validation de la configuration

Cibles

Contraintes

Commandes Forme

Forme de concept

Validation d'une conception

Gérer la validation de forme

Shape Valid...

Configuration du contexte de validation

Configuration du maillage

Configuration de l'analyse

Validation

Edition

Valider

Afficher les résultats

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Cours

Validation du modèle

➤ **Simulation du modèle de calcul**

- Pour simuler le modèle de calcul on clique sur gérer la validation la forme
- On peut modifier les paramètres de la simulation (type de maillage, taille)

➤ **Visualisation des résultats**

- On clique sur visualisation des résultats
- On choisit le cas de charge dont on veut visualiser la simulation
- On choisit le plot qu'on veut visualiser

Simulation de la forme généré

dtex

UNIVERSITÉ DE LORRAINE





Cours

Etude de fabrication

Résumé

Le FGD offre la possibilité de créer des variantes du modèle d'optimisation issu du calcul qui inclut différents scénarios et résultats ainsi que la forme .

Le but ensuite est de choisir le modèle optimal parmi ceux obtenus .

Après avoir validé le premier modèle d'optimisation, on crée différents modèles en utilisant l'outil étude de fabrication, en dupliquant le premier modèle obtenu et en changeant à chaque fois les paramètres de l'optimisation, pour obtenir de nouvelles formes et les valider avec la simulation numérique .



Options avancées			
Entrées			
	PLA	PLA	PLA
Type de maillage	Linéaire	Linéaire	Linéaire
Taille du maillage	1,481mm	1,481mm	1,481mm
Cible	Rigidité maximale 50%	Rigidité maximale 50%	Rigidité maximale 50%
Afficher une contrainte	Non	Non	Non
Limites imposées de contraintes	Oui	Non	Oui
T1 Contrainte de force de fixation	Non	Non	Non
F Contrainte de fabrication	Non	Non	Non
R Contrainte d'épaisseur	Min Non / Max Non	Min Non / Max Non	Min Non / Max Non
S Contrainte de symétrie	1	1	1
Contrôle de symétrie cyclique	Non	Non	Non
Contrainte de chevauchement	Non	Non	Non
Fv Contrainte de fréquence	NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI) d'optimisation			
Etat de la tâche	Terminé et convergé	Terminé et convergé	Terminé et convergé
Nombre d'itérations	30	30	30
Etat des contraintes	5 contraintes présentes sur 5	1 contraintes présentes sur 1	5 contraintes présentes sur 5
Durée de la tâche	16:57	10:49	14:40
Masse d'optimisation	29,964%	49,945%	49,981%
Masse de radieur	16,574	34,021	11,47
Fréquence	NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI)			
Score	70,9654	61,1111	10,0666
Masse	0,03kg	0,027kg	0,025kg
Contrainte de Von Mises	$2,058e+007N/m^2$	$1,891e+007N/m^2$	$2,376e+007N/m^2$
Contrainte principale minimum	$1,24e+007N/m^2$	$1,141e+007N/m^2$	$1,287e+007N/m^2$
Contrainte principale maximum	$3,333e+007N/m^2$	$3,066e+007N/m^2$	$3,801e+007N/m^2$
Déplacement	3,804mm	2,917mm	3,738mm
Force de réaction	10,544N	9,488N	13,568N
Energie de tension élastique	0,011J	0,009J	0,025J
Volume de l'élément	$1,402e-005m^3$	$2,101e-005m^3$	$1,964e-005m^3$





Cours

Définition de l'espace de conception

➤

Création des variantes

- Pour dupliquer un modèle en clique sur l'icône de l'outil d'étude de fabrication
- Ensuite on donne un nom au fichier

➤

Modification des variantes

- Pour modifier une variante on choisit cette dernière et clique sur l'icône 2
- On retrouve alors l'assistant d'exploration ou l'on peut modifier les paramètres
- Une fois les paramètres modifiées, on relance la simulation numérique

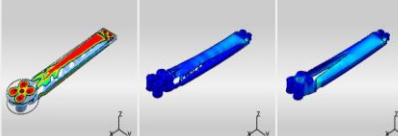
➤

Sélection du modèle optimal

- Pour le choix du modèle optimal, FGD calcule un score afin d'indiquer le meilleur compromis



• Outil étude de fabrication



Options avancées			
Entrées			
	PLA	PLA	PLA
Type de maillage	Linéaire	Linéaire	Linéaire
Taille du maillage	1,481mm	1,481mm	1,481mm
Cible	Rigidité maximale 50%	Rigidité maximale 50%	Rigidité maximale 50%
Afficher une contrainte	Non	Non	Non
Limites imposées de contraintes	Oui	Non	Oui
T1 Contrainte de force de fixation	Non	Non	Non
F Contrainte de fabrication	Non	Non	Non
R Contrainte d'épaisseur	Min Non / Max Non	Min Non / Max Non	Min Non / Max Non
S Contrainte de symétrie	1	1	1
Contrôle de symétrie cyclique	Non	Non	Non
Contrainte de chevauchement	Non	Non	Non
Fv Contrainte de fréquence	NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI) d'optimisation			
Etat de la tâche	Terminé et convergé	Terminé et convergé	Terminé et convergé
Nombre d'itérations	30	30	30
Etat des contraintes	5 contraintes présentes sur 5	1 contraintes présentes sur 1	5 contraintes présentes sur 5
Durée de la tâche	16:57	10:49	14:40
Masse d'optimisation	29,964%	49,945%	49,981%
Masse de radieur	16,574	34,021	11,47
Fréquence	NA	NA	NA
Indicateurs de performance clés (KPI)			
Score	70,9654	61,1111	10,0666
Masse	0,03kg	0,027kg	0,025kg
Contrainte de Von Mises	$2,058e+007N/m^2$	$1,891e+007N/m^2$	$2,376e+007N/m^2$
Contrainte principale minimum	$1,24e+007N/m^2$	$1,141e+007N/m^2$	$1,287e+007N/m^2$
Contrainte principale maximum	$3,333e+007N/m^2$	$3,066e+007N/m^2$	$3,801e+007N/m^2$
Déplacement	3,804mm	2,917mm	3,738mm
Force de réaction	10,544N	9,488N	13,568N
Energie de tension élastique	0,011J	0,009J	0,025J
Volume de l'élément	$1,402e-005m^3$	$2,101e-005m^3$	$1,964e-005m^3$



Cours

Reconstruction des surfaces

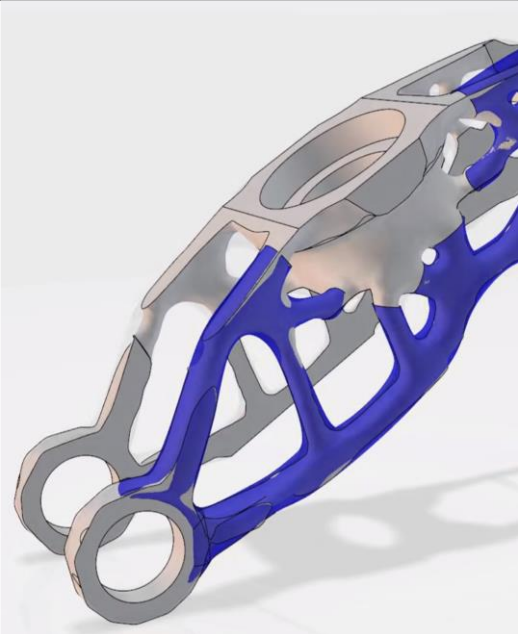
Résumé

Une fois que le solide du modèle est généré, on procède à la reconstruction de surfaces, car après qu'on ait effectué le calcul de forme, on obtient un solide avec des surfaces qui ne sont pas régulières (facettisées)

Le lissage de la pièce après le calcul est important pour pouvoir obtenir un bon état de surface et rendre la pièce exploitable .

Pour cela on retrouve plusieurs outils sur le FGD qui sont dédiés à la reconstruction de surfaces ..





Cours

Reconstruction de surfaces

34

➤ **Création des subdivisions**

- Les subdivisions sont des patches qu'on dessine sur les surfaces irrégulières qu'on veut lisser pour qu'elle soit fabricable .
- Cette palette d'outils est proposée sur le FGD pour créer et modifier les subdivisions
- Les points de contrôle permettent d'aligner les subdivisions et les modifier

➤ **Projection d'esquisse**

- Pour récupérer un profil, on utilise les deux fonctions projection et isolation . Ensuite on récupère l'esquisse qui pourra être par la suite extrudée
- NB : pour éviter d'avoir à reconstruire certaines parties de la pièce, on récupère les profils, ceci nous permet de gagner du temps en reconstruction .

• Outils de reconstruction




➤ **Modification des subdivisions**

- On peut modifier une subdivision pour changer sa forme en utilisant cette palette d'outils qui permet d'agir sur les points de contrôle .
- On crée une symétrie d'une subdivisions à l'aide de l'outil Symétrie
- On peut extruder une subdivision à l'aide de l'outil Extrusion

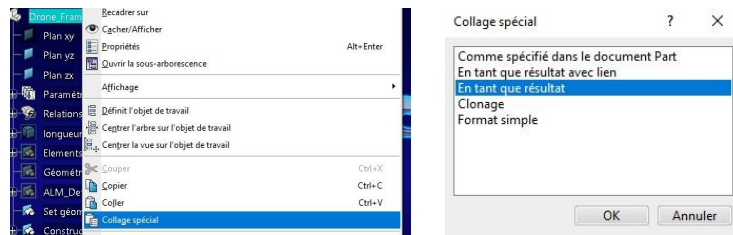





Exportation du fichier .stl

➤ Exportation

- Pour terminer, on doit extraire le solide mort de la pièce reconstruite afin que ce dernier soit utilisable en impression 3D.
- On copie le corps de reconstruction en tant que résultat de cette manière, on peut l'exporter en STL.



ANNEXES 10 : Bible de codification du questionnaire

Intitulé	Codage	Description
Groupe	A ; B ; C ; D	Répartition des étudiants en fonction de la session de formation à laquelle ils ont participé
Version	Avant ; Après	Répartition des étudiants en fonction des versions du support de cours avec laquelle ils ont travaillé
Cond 1	0 à 4	Question : L'ambiance générale de cet enseignement était propice au travail
Cond 2	0 à 4	Question : Le matériel mis à ma disposition m'a permis d'accomplir tout ce que l'on m'a demandé
Cond 3	0 à 4	Question : Je disposais des connaissances préalables nécessaires pour aborder cet enseignement
Cond 4	0 à 4	Question : La cadence à laquelle se déroulait l'enseignement était trop intense
Cond 5	0 à 4	Question : Cet enseignement était trop court
Cont 1	0 à 4	Question : Les objectifs de cet enseignement étaient clairs
Cont 2	0 à 4	Question : Les supports utilisés étaient clairs
Cont 3	0 à 4	Question : J'ai l'impression d'avoir atteint les objectifs de cet enseignement
Cont 4	0 à 4	Question : A l'issue de ce TP je suis satisfait du résultat de mon travail.
Peda 1	0 à 4	Question : Les explications données par l'enseignant étaient satisfaisantes
Peda 2	0 à 4	Question : L'enseignant faisait ressortir les savoirs essentiels
Peda 3	0 à 4	Question : L'enseignant a su montrer de réelles qualités pédagogiques (disponibilité, écoute, qualité d'échanges etc.)
Peda 4	0 à 4	Question : Le déroulement de l'enseignement était dynamique et stimulant
Cont5	0 à 4	Question : Je serai capable d'appliquer ce que j'ai appris durant ce TP

ANNEXES 11 : Résultats obtenus au questionnaire de satisfaction

Groupe	cond1	cond2	cond3	cond4	cond5	cont1	cont2	cont3	cont4	cont5	peda1	peda2	peda3	peda4
A	3	3	2	1	0	1	2	1	3	2	3	4	2	4
A	3	3	4	3	0	3	3	3	3	3	4	4	4	3
A	3	3	0	2	0	2	2	1	1	0	3	1	3	1
A	4	4	4	3	0	4	4	4	4	3	3	3	4	3
A	3	4	1	1	1	2	2	0	1	1	3	3	3	3
A	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
A	4	4	4	3	4	1	4	3	3	3	4	4	4	4
A	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
A	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4
A	4	4	4	2	2	3	4	4	3	3	3	4	3	4
A	3	3	2	1	2	3	2	2	2	2	3	2	2	3
B	4	4	3	3	3	4	4	3	3	3	4	3	4	4
B	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2	3	1
B	4	4	4	3	3	3	3	2	3	3	4	3	3	3
B	4	3	3	1	3	3	3	2	3	2	3	4	4	3
B	4	4	3	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
B	3	3	4	1	1	4	4	3	2	3	3	3	4	3
B	3	1	2	4	3	4	1	2	2	1	3	1	2	2
B	4	0	0	3	3	3	1	2	2	3	4	3	3	3
C	4	4	4	3	2	4	3	4	4	1	3	3	4	3
C	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3
C	4	4	3	3	3	4	3	3	3	3	4	3	4	4
C	2	3	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0
C	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4
C	4	4	3	4	2	4	4	4	4	3	4	4	4	3
C	3	4	0	1	0	3	4	3	4	3	4	4	4	4
C	3	4	3	1	1	3	3	0	0	0	2	3	2	3
C	4	4	4	1	2	3	4	2	3	2	4	4	4	4
C	4	3	3	3	4	4	3	2	3	2	4	4	4	4
C	3	4	4	2	0	3	2	1	2	2	3	2	2	3
D	3	3	3	4	1	4	4	4	3	4	4	4	4	4
D	3	4	3	1	0	4	4	4	4	3	4	4	4	4
D	4	4	4	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D	4	4	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	4	2
D	3	3	3	3	1	4	4	4	3	3	4	4	4	4
D	4	4	3	3	0	3	2	2	2	1	4	3	4	3
D	4	4	4	3	1	4	3	2	4	3	4	4	4	3
D	4	4	2	1	3	3	4	3	3	3	4	4	4	4
D	4	3	2	4	4	3	2	1	3	1	4	2	3	3
D	4	4	2	0	0	4	3	3	3	3	4	4	4	3
D	4	4	2	1	1	3	3	3	3	3	4	4	4	3
D	3	3	4	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D	3	4	4	0	0	3	3	3	3	4	4	4	4	4
D	3	4	3	3	1	3	4	2	3	1	4	4	4	4
D	4	4	3	0	3	4	4	1	1	4	1	3	4	3
E	4	4	4	3	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4
E	4	4	4	4	3	3	3	2	3	3	3	4	3	3
E	4	4	3	1	2	3	3	3	4	3	4	4	4	3
E	4	4	4	3	1	4	4	2	3	3	4	3	4	3
E	4	4	0	4	1	3	3	2	3	3	4	3	4	3
E	4	4	4	3	2	4	3	3	4	3	4	4	4	4
E	3	4	1	3	3	3	3	3	2	3	4	3	4	3
E	4	4	0	3	0	3	3	3	2	3	4	4	3	2
E	3	4	3	3	0	3	3	2	2	2	3	3	4	3
E	3	4	2	3	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
E	4	4	4	3	1	3	4	2	3	3	3	3	3	3
E	4	3	3	0	1	4	2	3	3	3	4	4	4	4
E	4	3	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
E	2	2	2	1	3	3	3	2	2	3	3	3	2	3