

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAITRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE  
CONCENTRATION GESTION DE L'INNOVATION  
M. Sc. A

PAR  
Cédric COQUELLE

IMPACT DE RENOMMER DES ÉLÉMENTS  
SUR LA MODIFICATION D'UN MODÈLE CAO

MONTREAL, LE 22 DÉCEMBRE 2015



Cédric Coquelle, 2015



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.



**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Philippe Véron, codirecteur de mémoire  
Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes à Arts et Métiers ParisTech

Mme Sylvie Doré, présidente du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Michaud, membre du jury  
Professeur en École nationale d'aérotechnique

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 DÉCEMBRE 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier M. Louis Rivest, directeur de recherche, qui m'a accompagné et appuyé avec qualité tout au long de ma recherche. J'espère que le travail fourni est à la hauteur de ses attentes.

Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail. M. Philippe Véron, professeur aux Arts et Métiers Paris Tech (ENSAM, FR) et codirecteur de mémoire, de m'avoir fait profiter de son expérience sur le sujet pour orienter mes analyses. Je remercie aussi M. Michel Michaud, professeur à l'École Nationale d'Aérotechnique (ENA, CA), de m'avoir permis de réaliser mes expériences dans son établissement ainsi que pour son expertise en conception assistée par ordinateur. Et merci aussi à Mme Sylvie Gervais, maître d'enseignement à l'ETS, pour ses conseils quant au traitement des données et à leur analyse statistique.

Je remercie l'ETS et les Hautes Études d'Ingénieur (HEI, FR). Leur programme de double cursus m'a permis de venir étudier à Montréal la gestion de l'innovation, parfaire mes connaissances en développement de nouveaux produits et réaliser cette recherche. Merci aux administrations des deux établissements et tout particulièrement à M. Tanguy Bantas (ETS) et Mme Anne Lacour (HEI), responsables des relations internationales, pour leur suivi tout au long de ce cursus d'étude.

Enfin, je souhaite apporter une mention toute particulière à ma famille. Malgré la distance, mes parents ont toujours su être présents pour moi. Leur soutien a été essentiel au bon déroulement de mes projets et est indissociable de leur réussite. Merci aussi à mon frère de m'avoir aidé à être, en quelque sorte, présent dans les moments familiaux importants de ces deux dernières années. Je tiens donc à leur dédier ce mémoire de recherche afin de souligner leur contribution.



# **IMPACT DE RENOMMER DES ÉLÉMENTS SUR LA MODIFICATION D'UN MODÈLE CAO**

Cédric COQUELLE

## **RÉSUMÉ**

Cette recherche s'inscrit dans la lignée des études sur l'efficacité de la réalisation de changements techniques et plus précisément sur la modification de modèles CAO. Néanmoins, contrairement à d'autres travaux, nous tentons de mesurer l'impact de renommer des éléments d'un modèle CAO dans sa modification. En effet, il s'agit d'un aspect souvent mis en avant dans la formation à la CAO pour apporter de l'information explicite relative à l'intention de conception, mais qui, dans la pratique, n'avait jamais été mis en évidence. À l'aide d'une expérience comparant les travaux de modifications de deux groupes d'étudiants, l'un travaillant avec un modèle renommé, l'autre avec un modèle non renommé, nous mettons en évidence qu'il existe des différences de pratiques entre eux. La présence dans l'arbre d'éléments renommés a de l'influence sur les temps de compréhension et d'exécution de la modification. Dans notre cas, le travail du groupe « renommé » a obtenu de meilleures performances de travail et notamment dans la compréhension de l'intention de conception. C'est un point essentiel dans l'efficacité de la réalisation de changements. Toutefois dans l'état actuel de nos évaluations, ces résultats de performances restent non significatifs. D'un autre côté, l'étude met en évidence des pratiques, allant au-delà de la dénomination, qui ont permis une bonne compréhension de l'intention de conception et donc d'être performant dans le travail de modification.

**Mots-clés :** modification de modèle CAO, dénomination, modélisation par caractéristiques, intention de conception, enseignement CAO



# IMPACT OF FEATURES NAMING ON A CAD MODEL MODIFICATION

Cédric COQUELLE

## ABSTRACT

This research follows previous studies in engineering change efficiency, and more precisely on CAD model modification. Specifically, we study the impact of features renamed into the modification of a part. This aspect has often been introduced in CAD education as a means to bring explicit information to a design intent, but there has been no experimental investigation to assess this point. Our experiments with two groups of students, one working with a renamed model and the other with a model that is not renamed, reveal some specific differences. Working with features renamed into the specification tree influences the understanding of and the operation times of a change. The group with a renamed model obtained better performances, specifically in the understanding of the design intent, an essential aspect of change efficiency. However, in the current state of our study, this performance result is not yet significant. On the other hand, the research highlights some practices which allow an improved understanding of the design intent and that convey good results in performing change tasks.

**Keywords:** CAD model modification, naming, feature-based design, design intent, CAD education





## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	7
1.1 La CAO : Modélisation paramétrique et par « features » .....	7
1.1.1 Modélisation paramétrique .....	7
1.1.2 Introduction des « features » .....	9
1.1.3 Conception par « features » .....	12
1.1.4 Définition du terme « élément » et distinctions des éléments .....	14
1.2 Renommer des éléments dans un travail de modification .....	17
1.2.1 Dénomination des éléments et communication de l'intention de conception .....	18
1.2.2 La place du travail de modifications dans le développement de produit ..	20
1.3 La création et la modification de modèles CAO .....	24
1.3.1 L'expertise de modélisation CAO .....	25
1.3.2 Facteurs influant sur la création et la modification de modèles CAO .....	27
1.3.3 L'amélioration de la communication de l'intention de conception .....	29
1.4 Synthèse de la revue de littérature .....	32
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE :	
ORGANISATION DE L'EXPÉRIENCE .....	35
2.1 Les aspects éthiques de la recherche .....	35
2.2 L'expérience .....	36
2.2.1 Présentation de l'expérience .....	36
2.2.2 Échantillonnage et environnement de l'expérience .....	36
2.3 Présentation du matériel de l'expérience .....	38
2.3.1 Présentation du modèle CAO et de sa construction .....	38
2.3.2 Organisation de l'arbre de construction et dénomination des éléments ...	52
2.3.3 Présentation des modifications et des repérages attendus .....	60
2.4 Synthèse de l'organisation de l'expérience .....	66
CHAPITRE 3 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE : TRAITEMENT DES DONNÉES .....	71
3.1 Processus de capture et d'extraction des données .....	71
3.1.1 Capture vidéo .....	71
3.1.2 Extraction des données .....	72
3.1.3 Introduction et méthodologie d'extraction des commandes .....	78
3.2 Processus de traitement des données .....	84
3.2.1 Compilation des données .....	84
3.2.2 Décisions statistiques .....	86
3.2.3 Plan d'analyse .....	91

CHAPITRE 4 RÉSULTATS .....	101
4.1 Les études préliminaires .....	101
4.1.1 Filtrage des données.....	101
4.1.2 Étude des données de temps de chaque groupe issue de l'ETS et l'ENA .....	109
4.2 Les analyses statistiques .....	113
4.2.1 Analyse des données de temps entre les deux groupes.....	113
4.2.1.1 Comparaison des temps de chaque activité entre GNR et GR. ....	113
4.2.1.2 Étude de corrélation entre les temps de travail et les temps hors et dans l'arbre pour GR et GNR .....	117
4.2.1.3 Comparaison du temps de compréhension hors de l'arbre entre GNR et GR.....	126
4.2.2 Analyse de la répartition du travail .....	128
4.2.2.1 Analyse de la répartition des temps hors et dans l'arbre pour GR et GNR .....	128
4.2.2.2 Comparaison de la répartition des temps dans l'arbre au 1 <sup>er</sup> niveau entre GR et GNR .....	132
4.2.3 Analyses de l'utilisation de commandes et des ouvertures de panneaux .....	135
4.2.4 Analyse de l'influence de l'utilisation de commandes et des ouvertures de panneaux sur les temps de travail .....	139
4.2.5 Bilan des analyses statistiques .....	140
4.3 Étude qualitative .....	143
4.4 Synthèse des résultats .....	161
CONCLUSION.....	163
ANNEXE I QUESTIONNAIRE.....	169
ANNEXE II EXERCICE DE MODIFICATION .....	171
ANNEXE III COMPILATION DES DONNÉES DE TEMPS .....	179
ANNEXE IV UTILISATION DE COMMANDES (PHASE DE COMPRÉHENSION)....	181
ANNEXE V UTILISATION DE COMMANDES (PHASE D'ACTION) .....	183
ANNEXE VI TEST F ENTRE LES DONNÉES DE TEMPS DE L'ENA ET L'ETS (GNR) .....	185
ANNEXE VII TEST F DES DONNÉES DE TEMPS ENTRE GNR ET GR.....	187
ANNEXE VIII GRAPHIQUES DE L'ANALYSE DU TEMPS DE TRAVAIL DE GNR ET GR .....	189
ANNEXE IX RÉPARTITION EN % DU TEMPS HORS ET DANS L'ARBRE POUR CHAQUE ACTIVITÉ DE GR ET GNR .....	191

ANNEXE X RÉPARTITION EN % DU TEMPS DANS L'ARBRE AU 1 <sup>ER</sup> ET 2 <sup>ÈME</sup> NIVEAU POUR LE TRAVAIL TOTAL ET LA COMPRÉHENSION.	193
ANNEXE XI ANALYSE DES OUVERTURES DE PANNEAUX AU 1 <sup>ER</sup> et 2 <sup>ÈME</sup> NIVEAU DE L'ARBRE (GR ET GNR) .....	195
ANNEXE XII DONNÉES DE L'ÉTUDE DE CORRÉLATION SUR LES COMMANDES ET OUVERTURES DE PANNEAUX.....	197
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	199



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1- Facteurs d'influence des résultats .....	67
Tableau 3.1 Tableur d'extraction des données .....	77
Tableau 3.2 Compilation des données de temps (sec) par modification.....	85
Tableau 3.3 Plan d'analyse statistique.....	94
Tableau 3.4 Exemple d'observation .....	98
Tableau 4.1 Temps de travail et taux de réussite .....	103
Tableau 4.2 Statistiques résumées pour le taux de réussite de GNR et GR.....	105
Tableau 4.3 corrélation des rangs de Spearman entre le temps de travail et le taux de réussite.....	109
Tableau 4.4 Statistiques résumées des temps de l'ENA et l'ETS (GR et GNR) .....	110
Tableau 4.5 Test W et Test T de comparaison des temps entre l'ENA et l'ETS.....	112
Tableau 4.6 Statistiques résumées de GNR et GR pour les données de temps de chaque activité.....	114
Tableau 4.7 Tests de comparaison des données de temps de chaque activité entre GR et GNR .....	115
Tableau 4.8 Corrélations des rangs de Spearman entre les données de temps d'activité de GR .....	116
Tableau 4.9 Tableau de corrélation des variables de temps de GNR .....	118
Tableau 4.10 Tableau de corrélations des variables de temps de GR.....	119
Tableau 4.11 Statistiques résumées pour le temps de travail hors de l'arbre de GNR et GR .....	126
Tableau 4.12 Tests F et t de comparaison des moyennes entre GR et GNR pour les données le temps de travail hors de l'arbre de GNR et GR .....	126
Tableau 4.13 Statistiques résumées du pourcentage de temps des activités hors et dans l'arbre (GR et GNR) .....	129

Tableau 4.14 Test t entre les % de temps hors et dans l'arbre pour chaque activité de GR .....	130
Tableau 4.15 Test t entre les % de temps hors et dans l'arbre pour chaque activité de GNR .....	130
Tableau 4.16 Statistiques résumées du pourcentage de temps au 1 <sup>er</sup> niveau de l'arbre (GNR et GR) .....	133
Tableau 4.17 Tests F et t de comparaison des moyennes entre GR et GNR pour le % de temps au 1 <sup>er</sup> niveau de l'arbre .....	134
Tableau 4.18 Compilation du nombre de commandes et ouvertures de panneaux de chaque groupe pour chaque activité et test W de comparaison des médianes ....	136
Tableau 4.19 Test W de comparaison de l'ouverture de panneaux et de l'utilisation de commandes dans chaque situation de GR.....	137
Tableau 4.20 Tests W de comparaison de l'ouverture de panneaux et de l'utilisation de commandes dans chaque situation de GNR.....	138
Tableau 4.21 Tableau de corrélation des commandes avec les performances de temps (GR) .....	139
Tableau 4.22 Tableau de corrélation des commandes avec les performances de temps (GNR) .....	140
Tableau 4.23 Utilisations des commandes dans et hors de l'arbre (GR et GNR) .....	155
Tableau-A 4.24 Ouvertures de panneaux au 1er et 2nd niveau de l'arbre de GR et GNR et test W pour chaque activité .....	195
Tableau-A 4.25 Test W entre les ouvertures de panneau au 1er et 2nd niveau de l'arbre pour GR.....	196
Tableau-A 4.26 Test W entre les ouvertures de panneau au 1er et 2nd niveau .....	196

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Approche de Feature-Based Design .....	13
Figure 1.2 Objets de la représentation tridimensionnelle .....	15
Figure 1.3 – Présentation d'un élément .....	17
Figure 1.4 Modèle générique de processus de modification.....	22
Figure 1.5 Modèle annoté selon la norme ISO16792 .....	30
Figure 1.6 Exemple d'Annotation 3D .....	31
Figure 2.1 Vue de la pièce intercostale.....	38
Figure 2.2 Vue de face avec dimensions .....	39
Figure 2.3 Vue de face avec coupes.....	39
Figure 2.4 Plans des coupes de la pièce.....	40
Figure 2.5 Définition des parties de la pièce.....	41
Figure 2.6 - Pièce dans son contexte.....	42
Figure 2.7 Environnement de la pièce .....	43
Figure 2.8 Modélisation de l'IML .....	44
Figure 2.9 Modélisation de l'enveloppe et des poches.....	46
Figure 2.10 Modélisation de la poche gauche .....	47
Figure 2.11 Modélisation des découpes de murs et plancher .....	47
Figure 2.12 Esquisses découpe "stringer" et trou oblong gauche .....	48
Figure 2.13 Modélisation du "machined-step" gauche .....	49
Figure 2.14 Modélisation de l' "inner machined-step" droit .....	50
Figure 2.15 Modélisation de l'élément "Enlever.Controle-Epaisseur-Mur-Ouvert-Poche-Droite" .....	51

Figure 2.16 Modélisation du trou, des chanfreins et congés de la pièce .....	52
Figure 2.17 Arbre de construction du modèle renommé et du modèle non renommé.....	54
Figure 2.18 Comparaison de produits .....	65
Figure 3.1 Panneau Parents et enfants de « Extrusion.2 » .....	74
Figure 3.2 Afficher/Cacher .....	79
Figure 3.3 Afficher les objets cachés/affichés .....	79
Figure 3.4 Désactivation de Poche.Trou-Oblong-1 .....	80
Figure 3.5 Définition de l'objet de travail "Enlever.Poche-Gauche" .....	81
Figure 3.6 - Support d'esquisse de "Esquisse.1" .....	82
Figure 3.7- Distribution normale .....	88
Figure 3.8 - Exemple de Graphique de densité en relatif à un histogramme.....	90
Figure 3.9 - Exemple de boîte à moustache.....	91
Figure 4.1 Test F : Comparaison des écarts-types pour taux de réussite.....	106
Figure 4.2 Test t : Comparaison des moyennes pour le taux de réussite .....	107
Figure 4.3 Test W : Comparaison des médianes des temps de l'ENA et l'ETS de GR .....	111
Figure 4.4 Relations entre les variables expliqués et les variables explicatives.....	121
Figure 4.5 Boîtes à moustaches du pourcentage de temps de travail dans l'arbre de GNR et GR .....	131
Figure 4.6 Boîtes à moustaches du pourcentage de temps de compréhension dans l'arbre de GNR et GR.....	132
Figure 4.7 «Plan.Fond-de-Poche» et «Décalage.Plancher-Incliné» .....	146
Figure 4.8 Esquisse Poche Gauche .....	147
Figure 4.9 Décalage de l'Extrusion Poche Gauche .....	148
Figure 4.10 Décalage du «Plan.Fond-De-Poche».....	149
Figure 4.11 Esquisse Inner-machined-Step Gauche et «Plan.Machined-Step-Gauche» .....	149



Figure 4.12 Connexions avec «Plan.Machined-Step-Plane-Centrale» .....	151
Figure 4.13 Création de surface épaisse pour modification 1b) .....	153
Figure 4.14 Diagnostic de la mise à jour .....	154
Figure 4.15 Histogramme des temps de travail et nombres de reprises.....	157
Figure 4.16 Connexions avec «Plan.Stringer».....	160
Figure 4.17 Connexions avec «Plan.32».....	160



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

B-Rep	Boundary Representation
DMU	Digital Mock-Up
ECM	Engineering Change Management
CAD	Computer-Aided Design
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CSG	Constructive Solid Geometry
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FBD	Feature-Based Design
GNR	Groupe « Non Renommé »
GR	Groupe « Renommé »
P	Probabilité



## INTRODUCTION

Dans un marché global très compétitif, les compagnies sont amenées à proposer des produits de plus en plus sophistiqués en un temps réduit. Le développement de nouveaux produits est de ce fait devenu une activité essentielle des sociétés où, à des fins de réduction de coûts et de risques, la conception de nouveaux produits en ingénierie passent souvent, voir la plupart du temps, par l'adaptation de conceptions de produits existantes (Cross, 1989). Par conséquent, les changements techniques sont devenus un sujet extrêmement important dans l'industrie.

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) a su montrer son rôle central dans le processus de création de produit physique et dans la réduction de son cycle de développement. Liker et *al.* (1992) cite la capacité de modifier des concepts comme l'une des promesses originelles de la CAO. En effet, la faculté d'appliquer rapidement des changements grâce aux systèmes CAO ouvre de nombreuses possibilités de personnalisation (Da Silveira et *al.*, 2001). Toutefois ces bénéfices sont valables si les utilisateurs de ces capacités savent produire des modèles CAO faciles à comprendre et modifier. Il apparaît qu'un modèle CAO n'est pas qu'une simple représentation 3D du produit physique. Il stocke aussi le savoir-faire de la stratégie utilisée pour le construire (Alducin-Quintero et *al.*, 2011). Par conséquent, l'aptitude à capturer, partager et transférer cette connaissance est un élément clé dans l'amélioration du développement de nouveaux produits.

Les systèmes CAO actuels sont devenus relativement faciles à utiliser et permettent de réaliser des pièces complexes grâce à des capacités de modélisation paramétrique associées à des outils parfois qualifiés de « Feature-based Design» (FBD). Ces objets, nommés d'ailleurs « features », apportent à la signification géométrique de la signification de l'ingénierie, souvent associée aux paramètres de fabrication (McMahon & Brown, 1998). Ils améliorent de ce fait la communication entre les acteurs du processus de développement de produit. D'un autre côté, la sophistication de ces systèmes à travers l'augmentation de la variété d'outils place le choix des « features » et l'organisation d'un modèle au cœur des

stratégies de modélisation. Chaque modèle CAO exprime une intention de conception découlant des décisions de modélisation effectuées par son concepteur. Ces décisions ont un impact direct dans l'aptitude d'un modèle à être modifié (Rynne et al., 2003 ; Toogood, 2004). Il s'agit donc d'être capable de capturer l'intention de conception afin d'effectuer des changements facilement, tout en préservant les fonctions du modèle (Regli et al., 2000 ; Karsenty, 1996).

Néanmoins, Salehi et McMahon (2009) fournissent des preuves, issues de l'industrie, montrant l'existence de difficultés à comprendre et modifier un modèle, de surcroît lorsque sa conception est étrangère à la personne devant la retravailler. Ils mettent en avant le manque d'informations explicites par rapport à l'intention de conception du modèle créée. Dans la pratique, il arrive par conséquent que les modèles soient entièrement reconçus. C'est une situation paradoxale lorsqu'on connaît les capacités avancées de la CAO, que Mandorli et Otto (2013) mettent en évidence dans leur présentation des déficiences de connaissance à des fins d'amélioration de l'éducation de la CAO. En effet, dans ce contexte d'accroissement de la technologie, l'enseignement de la CAO a un rôle pivot à jouer dans la formation des étudiants afin qu'ils puissent répondre aux défis de la profession.

Malheureusement, pendant longtemps, la littérature académique sur la conception (ex. : Pahl and Beitz, 1996; Otto and Wood, 2001; Ulrich et Eppinger, 2008) a mis l'emphasis sur les processus de conception (Wright et al., 2000) et ce n'est que depuis peu de temps qu'on voit apparaître des notions d'édition de modèles dans les ouvrages pédagogiques de la CAO (ex : Tickoo, 2014). Une pratique souvent mise en avant pour apporter de l'information significative à un modèle CAO est de renommer ses principaux éléments constitutifs (Toogood, 2004 ; Planchard, 2005 ; Cozzens 2006, Taraud, 2008). Il s'agit de transformer le nom des features utilisés pour modéliser la pièce afin d'illustrer la fonction qu'ils définissent (Taraud, 2008). Toutefois, les rares expériences sur l'altération de modèles (Diwakaran et Johnson, 2011 ; 2012) ou sur l'expertise en CAO (Chester, 2007 ; Rynne et Gaughran, 2008 ; 2010) mettent en évidence l'importance de la compréhension de l'intention de conception, mais sans indiquer la dénomination parmi les facteurs qui expliquent les bonnes

performances du travail de modification, ou définissent les pratiques d'experts en CAO. Ce paramètre n'a d'ailleurs jamais fait l'objet d'analyses quantitatives dans ces études. Il semblerait que la dénomination des éléments d'un modèle CAO soit une préconisation avancée dans l'éducation de la CAO dont l'impact dans le travail de modification n'a pas encore été analysé, ni démontré.

Le sujet de recherche porte sur l'impact de renommer des éléments dans un travail de modification d'un modèle CAO. Il s'agit de répondre à la question :

La dénomination d'éléments d'un modèle CAO améliore-t-elle le travail de modification ?

Souvent, la personne qui modifie le modèle n'est pas celle qui l'a créé. On souhaite donc examiner l'impact de renommer des éléments dans le but de transmettre l'intention de conception d'une personne à une autre. Pour cela, nous menons des analyses quantitatives afin d'apporter des conclusions statistiquement significatives à ce sujet. Notre étude est réalisée dans le milieu éducatif. Il s'agit de plonger deux groupes d'étudiants dans un travail de modification d'un modèle CAO semblable à ce qui se fait dans l'industrie de l'aéronautique, afin d'observer si cette pratique améliore le travail effectué. Les deux groupes sont constitués d'étudiants de même niveau de formation en CAO et doivent réaliser les mêmes modifications. L'unique différence entre ces groupes se trouve dans le fait de travailler avec un modèle renommé pour l'un des groupes et un modèle non renommé pour l'autre groupe.

Notre étude abordera deux sujets en particulier :

- Le temps de modification;
- Les pratiques du travail de modification.

L'analyse de l'impact de renommer des éléments sur le temps de modification s'inscrit dans les considérations de réduction du temps du développement de produit. Pour cela, on dissocie le travail de modification en deux phases :

- Phase de compréhension : c'est la phase où la personne manipulant le modèle CAO parcourt ses éléments constitutifs afin de comprendre leurs relations et repérer quels éléments doivent être modifiés. Il s'agit d'évaluer l'impact de renommer des éléments sur les performances de la compréhension de la construction du modèle CAO.
- Phase d'action : cette phase englobe la concrétisation des travaux de modification. Il s'agit d'observer si ces actions de changement ont abouti à la modification attendue. On évalue dans cette phase si la dénomination a eu des répercussions sur l'exécution des modifications.

La comparaison des pratiques de travail entre les deux groupes vise à mettre en évidence l'impact de renommer des éléments d'un modèle CAO dans le travail de modification, notamment sur deux aspects :

- Le travail dans et hors de l'arbre de construction : Étant donné que la dénomination s'effectue dans l'arbre de construction, il s'agit pour nous d'étudier les activités de chaque groupe dans et hors de l'arbre afin d'évaluer s'il y a des différences entre eux.
- L'utilisation de commandes dédiées au repérage d'éléments : Les systèmes CAO mettent à disposition une série d'outils permettant de repérer des éléments ainsi que les connexions entre eux. Leurs fonctions se rapprochent du rôle attribué par la littérature à la dénomination. Il s'agit donc d'évaluer s'il y a des différences dans leur utilisation entre les deux groupes et si ces dernières ont joué un rôle dans les performances du travail de modification.

Ce mémoire est constitué de cinq principaux chapitres. Dans un premier temps, une revue de la littérature est effectuée pour mettre en évidence les grands thèmes de la recherche; à savoir : les capacités des systèmes CAO actuels, la dénomination dans les ouvrages de CAO et des



études scientifiques menées dans les travaux de création et modification de modèle CAO. Deuxièmement, nous présentons l'expérience mise en place et les précautions prises pour maximiser l'homogénéité au sein de nos deux populations de participants. Ensuite, il s'agit de présenter la méthodologie d'extraction, compilation et analyse des données. Étant donné que nos données sont issues de l'enregistrement vidéo du travail réalisé par chaque participant, nous sommes en capacité d'extraire des données faisant l'objet d'analyses statistiques ainsi que des observations appuyant une étude qualitative. Ces deux analyses sont présentées dans le quatrième chapitre. Enfin la dernière partie expose les conclusions tirées de nos résultats.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 1.1 La CAO : Modélisation paramétrique et par « features »

Les fonctionnalités de la CAO ont un impact direct sur les capacités de l'utilisateur à modéliser. Rynne *et al.* (2010, p.162) expliquent dans son évolution de la CAO que la plupart des systèmes actuels de CAO 3D sont basés sur ce que l'on nomme le « history-based modeling ». L'organisation du modèle 3D de la pièce est articulée autour d'un historique de construction. Le modèle est matérialisé par une séquence de fonctions qui aboutissent à la description géométrique et topologique de la pièce. L'organisation des fonctions ainsi que les formes obtenues sont dépendantes de l'approche choisie par le concepteur. Pour une même pièce, plusieurs propositions de structure de la représentation peuvent être avancées (Taraud *et al.*, 2008, p.68).

Dans la littérature, les aspects de « history-based modeling » se retrouvent sous le « parametric modeling » et « feature-based modeling ». La modélisation paramétrique (traduction libre) réfère à des entités paramétrées définissant un modèle. L'introduction des « feature » dans les modèles CAO a montré son efficacité dans la conception de produit (Datar *et al.*, 1997). En effet, les « features » fournissent une meilleure manière de gérer la conception même si la description CAO traditionnelle, qui caractérise un objet en termes de surfaces et volumes paramétrés, reste une grande partie du processus de modélisation. On a donc choisi d'expliquer ce qu'est la modélisation paramétrique et par « feature » afin de comprendre les éléments constitutifs d'un modèle CAO.

##### 1.1.1 Modélisation paramétrique

Selon Kamrani *et al.* (2013, p.54), un objet de CAO est représenté par «boundary representation (B-Rep), and constructive solid geometry (CSG) ». La modélisation

géométrie en CAO se définit comme un ensemble de méthodes utilisé pour définir la forme et d'autres caractéristiques géométriques d'un objet. Les principales fonctions des systèmes de modélisation géométrique (Kamrani *et al.*, 2013, p.55) sont :

- la modélisation interactive d'un nouvel objet solide;
- la modification et manipulation du solide en utilisant des opérateurs géométriques tels que la rotation, la translation et les opérations booléennes;
- l'analyse des propriétés de l'objet solide;
- la visualisation efficace et facile des objets.

En utilisant les outils de modélisation géométriques, un concepteur peut fournir un modèle complet et non ambigu de sorte que les services de fabrications peuvent développer un processus précis d'usinage et réaliser une inspection du produit final.

Pour entrer dans le détail des méthodes de représentation, le B-Rep est un système dans lequel l'objet est défini par ses limites. La technique consiste à lister l'ensemble des faces, sommets et arrêtes du modèle (Amirouche, 2004, p.185). Le solide est limité par un ensemble de faces enfermant un volume permettant ainsi à l'objet d'être complètement défini.

Cette méthode de représentation appartient aux techniques de la modélisation de solide, où il s'agit d'établir les frontières fermées de l'objet tridimensionnel. Les modèles solides ne se limitent pas à fournir les dimensions et la forme de l'objet. Ils intègrent d'autres propriétés, telle que la densité par exemple. Les propriétés du matériau dont est constitué un objet, servent de données d'entrées pour l'analyse par éléments finis (Amirouche, 2004, p. 177).

Une seconde représentation de solide est la « Constructive Solid Geometry (CSG) ». La CSG est une méthode de modélisation qui définit des solides complexes à l'aide d'une composition de solides primitifs tel que des cubes, cylindres, sphères, tores, prismes triangulaires ou encore des cônes (Kamrani *et al.*, 2013, p. 67). Il s'agit de structure en arbre binaire dont les nœuds représentent des opérations booléennes : intersections, différences ou unions de deux solides. Les outils CAO actuels offrent des fonctions de construction d'un

arbre qui peut être vu comme une présentation « moderne » de l'arbre CSG, où les primitives sont considérées comme des « features ».

### 1.1.2 Introduction des « features »

Les « features » ont été introduits dans les outils de conception pour aider à connecter ce dernier avec la fabrication et donner des moyens aux ingénieurs de faire le lien entre la CAO et la FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) (Shahin, 2008, p.639). Shah *et al.* (1995, p.93) expliquent que la modélisation géométrique n'est, toutefois, pas si attractive. Elle possède des déficiences qui limitent son utilité dans tout le cycle de vie d'un produit mécanique. Shah *et al.* (1995, p. 93) exposent les lacunes suivantes :

- des données microscopiques : Les modèles géométriques sont faits de données microscopiques (faces, sommets et courbes pour les B-Rep et solides primitifs pour les CSG). Hors les prises de décisions et processus de réflexion dans les tâches d'ingénierie requièrent aussi des entités macroscopiques. Les modèles paramétriques mèneraient donc à de l'« underspecification »
- le manque d'intention de conception : les modèles géométriques ne font pas la distinction entre la géométrie présente pour satisfaire des contraintes d'interface, ni pour satisfaire des exigences de fonctionnalité ou encore pour la faisabilité de fabrication. Ce manque d'information montre l'échec des modèles géométriques à capturer les intentions de conception.
- un seul niveau de structure : un modèle paramétrique enregistre les dimensions des entités dans un seul niveau d'abstraction. Sa conception est déterminée en termes de coordonnées, orientations, localisation géométriques, etc. Dans ce contexte, la modélisation géométrique serait plus appropriée à la documentation d'une représentation finale qu'à sa conception. On parle ici d'« overspecification » dans le sens où l'utilisation de la modélisation géométrique, durant l'élaboration du design, nécessite une modélisation complète du produit ; cela même si nous ne nous intéressons qu'à certains de ses aspects géométriques.

- Une construction fastidieuse : les méthodes de construction géométriques ne sont pas alignées avec la vision du concepteur. Les processus de création via des entités de faibles niveaux (microscopiques) les rendent inefficaces et ne supportent pas le désir de réutiliser des solutions existantes. De ce fait, les tâches semblent souvent répétitives.

La modélisation par « features » tend à combler ces déficiences en proposant des éléments de haut-niveau de modélisation que l'on nomme justement « features ». Du point de vue de la fabrication, les « features » représentent les formes et attributs techniques associés aux outils et opérations de fabrication. Du côté de la conception, ils regroupent la géométrie et topologie des entités qui ont besoin d'être référencés ensemble (Saha, 1991, p. 331). De manière élargie, les « features » représentent la signification de l'ingénierie pour la géométrie d'une pièce, un assemblage ou tout autre activité de fabrication (Kamrani *et al.*, 2013, p. 55). Cette définition a été choisi pour le projet de recherche, parmi les nombreuses autres existantes (Shahin, 2008, p. 640), du fait qu'elle met évidence les « features » comme des blocs de constructions pour supporter la réflexion/interprétation relative au produit à modéliser. Chaque « feature » est un élément identifiable ayant une représentation explicite.

« The *shape* of a feature may be expressed in terms of dimension parameters and enumeration of geometric and topological entities and relations, or in terms of construction steps needed to produce the geometry corresponding to the feature. The *engineering significance* may involve formalizing the function the feature serves, or how it can be produced, or what actions must be taken when performing engineering analysis or evaluation, or how the feature “behaves” in various situations. (Shah *et al.*, 1995, p. 97)

De cette manière, la variété de « features » est quasiment illimitée et leur choix dépend du type et de l'application de la pièce que le modèle supporte. C'est pourquoi, dans un domaine d'application donné, les concepteurs peuvent choisir une gamme particulière de « features » pour capter et définir une géométrie. Il existe différents types de « features » permettant de transmettre différentes sortes d'informations. Parmi eux, on retrouve les « features » de forme, les « features » fonctionnels, les « features » d'assemblage, les « features » d'analyse, les « features » de tolérancement, les « features » de matériau, etc. (Shahin, 2008, p.641 ;

Shah et al., 1995, p.98). Shah et al., (1988) définissent certains critères en évoquant « a feature [as] mappable to a generic shape, [as] a physical constituent of a part, and [having] engineering significance and predictable properties ». Dans ce cas, les propriétés représentent les caractéristiques des « features » constituant un objet. En réalité, on retrouve des propriétés qui peuvent être utilisées à plusieurs niveaux de caractérisation d'un « feature » ou d'une collection de « features » permettant de définir l'ensemble d'une pièce ou d'un assemblage.

Assembly attributes (properties) may include (but not limited to) such information as *mating surfaces*, *fits/clearances*, *depth of insertion*, or *relative orientation vectors*. Part attributes may include *material specifications*, *part number*, or *administrative data*. Feature attributes may be *position*, *orientation*, *dimensions*, *shape*, or *size tolerances*. Feature-feature relation attributes may have information about *relative positioning*, *geometric constraints*, or *compatibility*. Entity attributes for the individual entities making up a feature could include *surface finish* or *form tolerance*. Entity-entity relation examples are *adjacency* and *relative orientation* (parallel/perpendicular). (Shah et al., 1995, p. 98)

Le concept de « feature » permet de palier aux problèmes de la modélisation géométrique du début de partie (Shah et al., 1995, p.117) :

- les données microscopiques : Les « features » ont l'avantage de fournir des entités de niveau élevé. Chaque « feature » possède des propriétés qui le caractérisent à un niveau macroscopique.
- le manque d'intention de conception : Les « features » sont des entités orientées vers l'application. Ils fournissent donc un meilleur enregistrement de l'intention de conception. Toutefois ils requièrent toujours des concepts/pratiques de modélisation derrière leur utilisation.
- un seul niveau de structure : La modélisation par « features » résulte d'une structure à plusieurs niveaux où l'on peut faire la distinction entre les « gross features », formant l'enveloppe globale de la pièce, et les « detail features » affinant les formes ainsi que les détails de géométrie.
- Une construction fastidieuse : Les « features » améliorent l'interactivité de l'utilisateur pour manipuler des conceptions géométriques. Les modèles avec « features » peuvent être définis au niveau macroscopique et font même la distinction

entre les contraintes intrinsèques, incluses dans la définition du « feature », et extrinsèques.

### 1.1.3 Conception par « features »

Il existe plusieurs techniques de création de modèles par « feature » que l'on regroupe en deux (Kamrani et al., 2013, p. 70) ou trois catégories (Shahin, 2008, p. 641 / Shah et al., 1995, p. 123) : le « feature recognition » composé de « interactive feature recognition » et de « automatic feature recognition », et le « design by feature » nommé aussi « Feature-Based Design (FBD) ». En voici la définition par Shah et al. (1995, p. 123) :

- Interactive feature recognition : Un modèle géométrique est créé dans un premier temps et ensuite les « features » sont créés en sélectionnant des entités nécessitant d'être spécifiées.
- Automatic feature recognition : Un modèle géométrique est créé dans un premier temps et ensuite un programme informatique traite le modèle en y trouvant automatiquement les « features ».
- Design by feature : La pièce géométrique est créée directement à l'aide de « features ».

Nous ne nous intéressons qu'au FBD pour les besoins de la recherche. En effet, notre modèle d'étude est créé directement à l'aide d'un utilitaire de « features ». L'approche de conception par « features » nécessite une banque de « features » génériques où les spécificités dimensionnelles et de position peuvent être définies ; de même que d'autres propriétés, contraintes et relations. La littérature évoque deux approches de FBD : la modélisation destructive avec « features » et la synthèse de « features » (Shahin, 2008, p. 644 / Shah *et al.*, 1995, p. 132).

La première, que McMahon et al. (1995, p. 28) nomme «Destructive Modeling» représente les opérations de fabrication où chaque « feature » vient soustraire une partie du solide brut. C'est comme si l'utilisateur venait usiner la pièce sur ordinateur. Cette méthode a l'avantage de



prévoir le processus d'usinage et de vérifier la mise en œuvre des opérations de fabrication. L'inconvénient est qu'il ne s'agit pas de la manière la plus naturelle de concevoir. Le concepteur doit déjà avoir en tête le résultat final avant de procéder et se doit de penser en termes de fabrication, là où pour lui les « features » du produit sont communément fonctionnels. La seconde approche, dite de modélisation synthétique par « features », diffère du fait qu'elle ne part pas d'un solide brut. Le concepteur assemble une série d'objet comme une collection de « features » soit par addition ou soustraction de ces derniers du modèle. La figure 1.1 présente les deux approches.

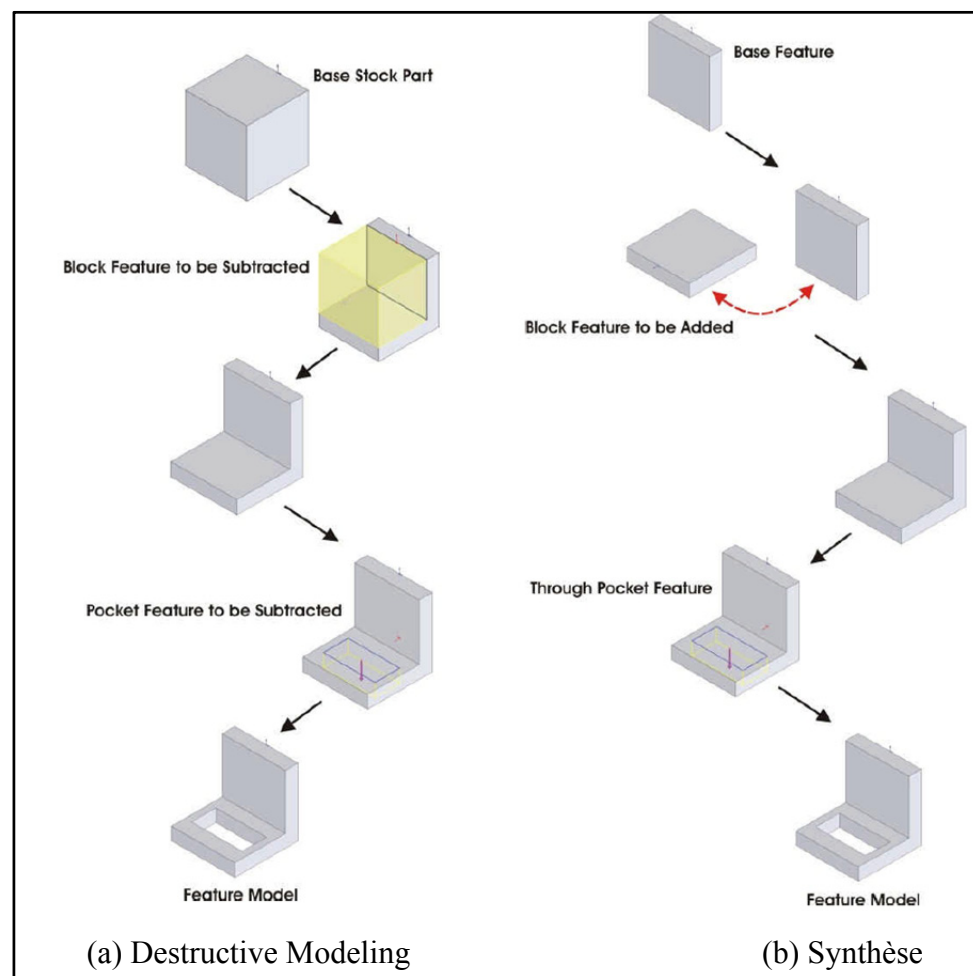


Figure 1.1 Approche de Feature-Based Design  
Tirée de Shahin (2008, p. 645)

Les méthodes de conception actuelles varient considérablement en fonction de l'industrie. Shah et al. (1995, p. 157) distinguent toutefois deux principaux types de conception : les conceptions innovantes, où il s'agit de concevoir un nouveau produit, et les conceptions routinières, où des variations d'une conception existante sont créées. Dans notre projet de recherche, l'approche de modélisation est destructive s'inscrivant dans une conception routinière. Une modélisation destructive est choisie car la nature de la pièce et les contraintes imposées par les outils employés dans la démarche expérimentale permettent de proposer une plus grande variété de modifications. Et une conception routinière car notre recherche s'oriente sur l'analyse de la lecture des « features » du modèle et non les capacités à créer de nouveaux « features ».

Jusqu'à maintenant, nous n'avons pas traduit le terme de « feature », car il s'agissait de présenter de manière générique la conception assistée par ordinateur. Toutefois dans le cadre de notre recherche, nous faisons la distinction entre les outils CATIA V5<sup>®</sup>, les éléments du modèle et les éléments d'une pièce qui se rejoignent sous le même terme de « feature ».

#### **1.1.4 Définition du terme « élément » et distinctions des éléments**

Les modes de génération des surfaces et des volumes ont permis de formaliser, sous forme d'arbres de construction et d'assemblage, les choix et les démarches des concepteurs. Taraud *et al.* (2008, p. 4) présentent la notion d'objet pour la création d'un produit virtuel. Un objet est construit à partir d'une multitude d'autres objets. Chaque objet constitutif est associé à des propriétés et des méthodes de construction et d'évolution. Le modèle étant structuré, sous la forme d'une séquence d'objets, leur hiérarchisation fait apparaître une autre notion : celle de parenté (*Voir* Figure 1.2). Un objet est dit parent dès l'instant où il participe à la définition d'un autre objet et de fait lorsque sa disparition entraîne la suppression des objets enfants.

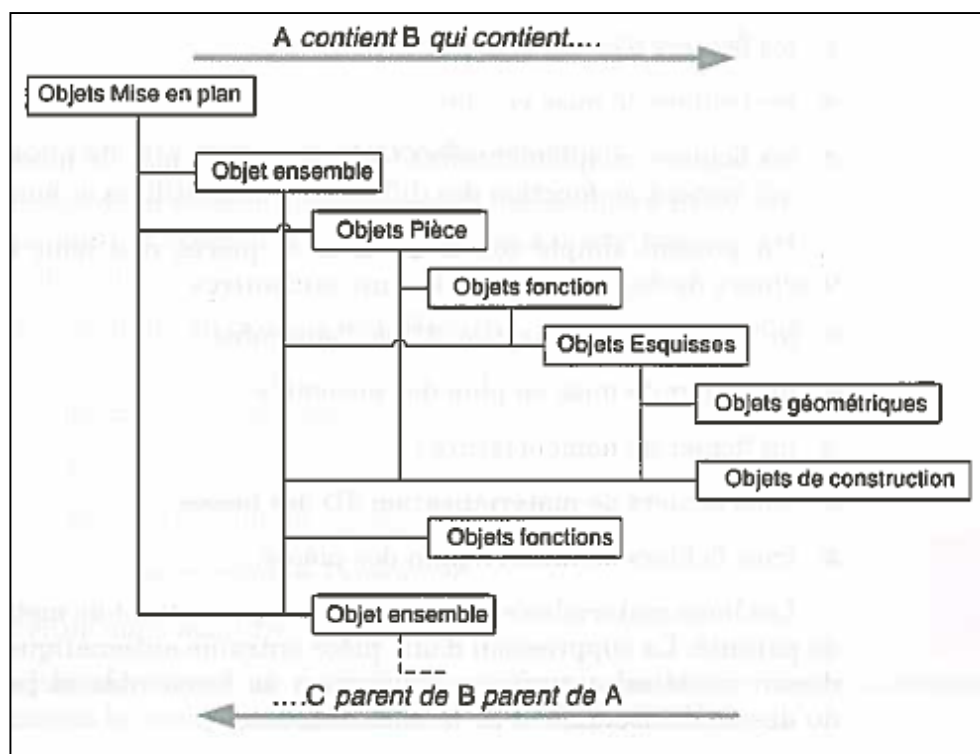


Figure 1.2 Objets de la représentation tridimensionnelle  
Tirée de Taraud *et al.* (2008, p. 5)

Taraud *et al.* (2008, p. 68) expliquent que l'arbre de construction représente la séquence de construction de manière linéaire et prend aussi en compte la notion de parenté entre les diverses fonctions de représentation qui, associées entre elles, aboutissent à la description de la pièce. Une fonction est dite parente d'une autre fonction si un des objets qui la constitue est utilisé comme référence pour la création d'une autre fonction.

Dans le cadre de cette recherche, nous privilégions le terme « élément » à celui d'« objet » ou « fonction ». La définition d'un élément est d'être un objet ayant son unité et que l'on peut ajouter à un ensemble pour le compléter (LAROUSSE, 2015). En suivant la réflexion de Taraud *et al.*, le modèle CAO est l'objet final de l'ensemble des objets qui le constituent. Nous ne désirons pas créer de confusion entre les termes « modèle CAO » ou « pièce » et « objet ». Privilégier le terme « élément », indique que nous nous concentrons sur les objets constitutifs d'un modèle CAO qui définissent les parties de la pièce. Le mot « fonction » réfère, quant à lui, au rôle des outils que le système CAO propose pour modéliser une pièce.

Il traduit donc du moyen utilisé pour définir une partie de la pièce. C'est dans son rapport avec le rôle de l'outil que le terme «fonction» a tendance à centrer l'esprit du lecteur sur l'utilisation des capacités du système CAO. Le terme «élément» est donc plus approprié puisqu'il ne prend pas en considération le rôle mais bien uniquement l'appartenance.

Dans ce document, le terme «élément» traduit uniquement de l'appartenance d'outils CAO dans le modèle à l'étude. Pour parler des éléments du système CAO, on continuera de parler d'outils ou commande CATIA V5<sup>®</sup> et au sujet des éléments de la pièce, il s'agit de discuter des parties de la pièce. Un élément est donc visible dans l'arbre de construction et le B-rep et traduit de l'appartenance d'un outil CATIA V5<sup>®</sup> dans le modèle pour définir une partie de la pièce (Voir figure1.3).

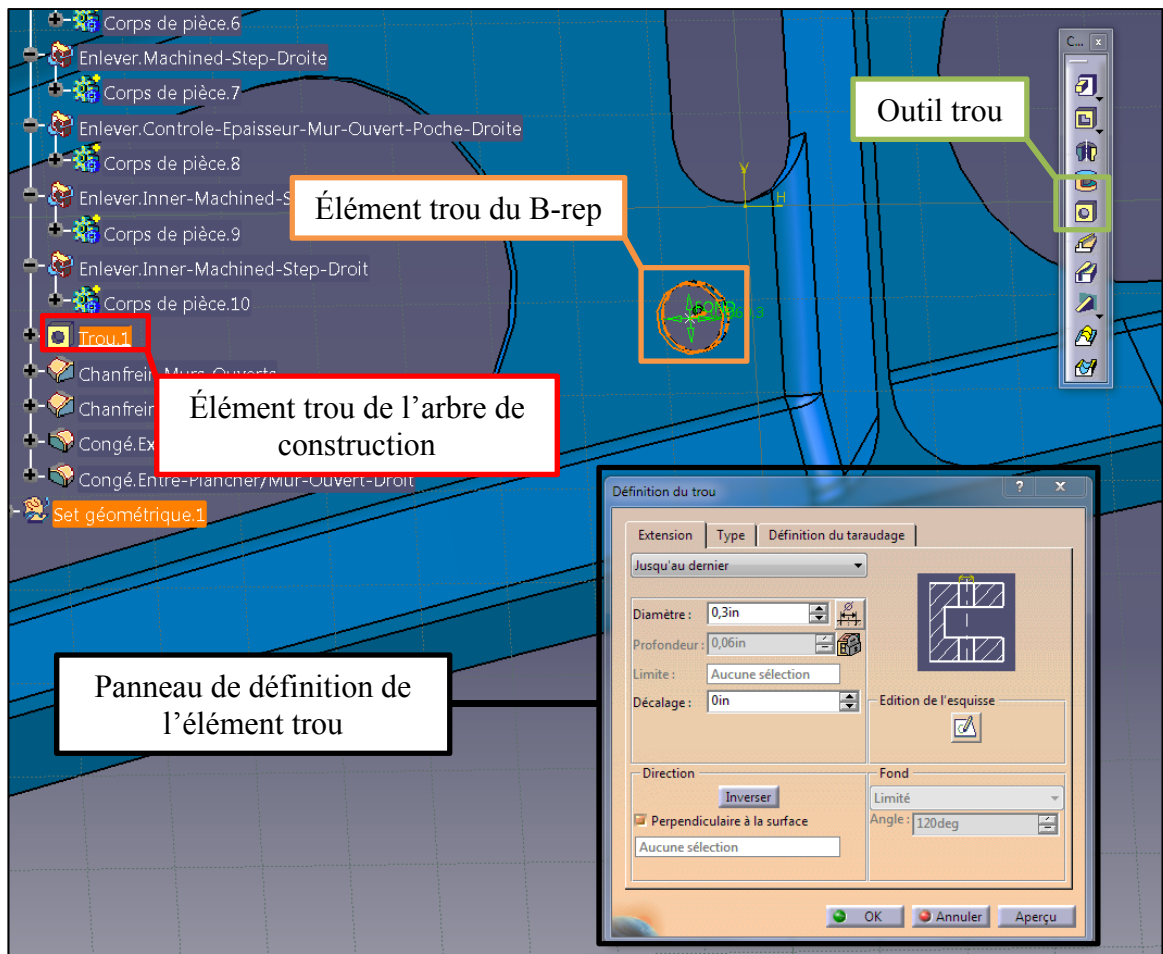


Figure 1.3 – Présentation d'un élément

## 1.2 Renommer des éléments dans un travail de modification

Avec la variété d'outils dédiés à la modélisation paramétrique et par « features », les systèmes CAO sont tels qu'il est possible d'utiliser plusieurs méthodologies pour concevoir une pièce. Les éléments qui composent un modèle CAO dépendent largement des choix de la personne qui le crée. Ce sont ces choix, ou tout au moins la façon dont ils sont compris par un autre intervenant, qui va conditionner l'efficacité d'un travail de modification, et donc l'efficacité du développement de produit. La dénomination des éléments est souvent présentée comme un outil de communication des choix de conception. Cette partie de la revue de la littérature porte sur le fait de renommer des éléments d'un modèle CAO et la

communication des choix de conception, mais aussi le rôle de la modification dans le développement de produit.

### **1.2.1 Dénomination des éléments et communication de l'intention de conception**

Dans la littérature, Cozzens (2006, p. 2.43) explique que la capacité de renommer les éléments dans l'arbre de spécification permet d'apporter des informations significatives mais, pour autant, il ne définit pas ce qu'est une information significative. Il indique que c'est une action utile plus la conception devient complexe, en précisant qu'il n'est pas nécessaire de renommer tous les éléments d'un modèle. Toogood (2004, p. 1.24) ajoute à ce propos que les éléments d'un modèle sont initialement nommés avec le nom de l'outil du système CAO qui a été utilisé. C'est donc « a very good idea » de renommer les éléments clés d'un modèle. Encore une fois, le terme d'« élément clé » n'est pas défini. Cozzens (2006, p. 2.43) indique qu'il s'agit d'utiliser son propre jugement pour définir quel élément renommer et comment le renommer. Planchard (2005, p. 1.30) indique qu'il faut utiliser une dénomination qui décrit l'élément, mais n'apporte pas d'indications sur la façon de décrire un élément.

Si l'on se base sur les exemples utilisés par ces différents auteurs, on remarque qu'il existe différentes manières de décrire un élément en le renommant. L'exemple de dénomination de Planchard (2005, p. 1.30) apporte à l'élément du modèle une information liée à l'assemblage de la pièce. Celui de Toogood (2004, p. 1.22) donne des indications de position de l'élément sur le B-Rep et pour Cozzens (2006, p. 2.43), il s'agit de décrire la forme de l'élément dans le modèle CAO. On remarque ici que renommer un élément dans un modèle apporte à la signification originelle du système CAO des précisions sur son intégration dans le modèle, ou alors informe sur sa fonctionnalité dans la pièce.

Pour Taraud (2008, p. 75), renommer les éléments doit faciliter la prise en compte des intentions de conception pour garantir un meilleur maintien du modèle. L'intention de conception décrit comment un modèle est créé et comment il se comporte lorsqu'il est modifié (Rynne, 2010, p. 163). Il ne s'agit pas uniquement de la forme et des dimensions des

éléments, mais aussi de leurs relations, des méthodes de séquençement et de dimensionnement ainsi que de l'organisation globale du modèle. Selon Taraud (2008, p76), renommer s'intègre dans l'intention de conception étant donné qu'il s'agit d'illustrer « au mieux la fonction technique locale ou globale assurée ».

La compréhension de l'intention de conception est essentielle pour faciliter le travail de modification (Regli *et al.*, 2000, p. 229 / Karsenty, 1996, p. 152). Néanmoins selon une étude menée par Salehi et McMahon (2009, p. 140), sur 153 concepteurs de l'industrie automobile, 85% déclarent qu'il y a un manque de méthodologie sur la manière d'identifier, classer et déterminer les paramètres requis ainsi que leur relations lors des phases initiales. 71% indiquent ne pas avoir d'approches précises dans leur travail de conception et 29% avouent que beaucoup de pièces produites sont mal structurées. Dans cette même étude, 76% des sondés indiquent avoir des difficultés à trouver le bon élément ainsi que ses relations dans de modèles et assemblages complexes CAO. Ce pourcentage monte à 81% lorsqu'il s'agit de pièce dite « étrangère » (celles modélisées par d'autres concepteurs ou fournisseurs) où il leur est demandé de modifier la géométrie ou certains paramètres. 86% sont d'accord pour dire qu'au vue de ce type de modèles et assemblages, il serait très utile voir préférable s'ils avaient plus d'informations en ce qui concerne la construction et la structure de ces objets. Un des problèmes mis en évidence dans cette étude est justement le fait d'avoir un arbre de construction avec des éléments non renommés. Camba *et al.* (2014, p. 63) indiquent qu'une communication explicite de l'intention de conception apporte une grande valeur dans la réutilisation de modèles 3D complexes dans lesquels beaucoup de temps de conception a été investi. Pena-Mora et al. (1993, p. 214) résument l'importance de l'intention de conception et les avantages d'une représentation explicite :

- Les changements au sein de projets complexes requièrent que certaines décisions de conception soient modifiées durant le processus de développement. Quand les raisons définies à l'origine sont perdues, il est nécessaire de les recréer ce qui a un impact négatif sur le coût et le délai de développement. La capacité de stocker, raffiner et récupérer ces informations peut améliorer significativement la productivité.

- Lorsque l'information de l'intention de conception est représentée de manière explicite et facilement accessible lors des changements, la qualité globale du produit est améliorée.
- La représentation explicite de l'intention de conception mène à une meilleure utilisation des ressources et connaissances.
- Une communication efficace de l'intention de conception est essentielle dans l'intégration de solutions et le transfert des connaissances de la conception.

Toutefois, aucune de ces études ne mesure si le fait de renommer des éléments dans un modèle permet une communication explicite de l'intention de conception. Il existe de nombreuses études qui analysent les comportements de création et de modification de modèles CAO, mais avant de rentrer dans le détail de ces dernières, il s'agit de présenter en quoi le travail de modification est un point essentiel dans le processus de développement de produit.

### **1.2.2 La place du travail de modifications dans le développement de produit**

Dans le cadre de notre recherche, le terme de « modification » s'utilise indifféremment pour un changement technique («Engineering Change») ou une correction. De manière générale, un changement technique est une altération de pièces, dessins ou logiciels qui a déjà été validée durant le processus de conception et/ou cycle de vie du produit et la correction concerne l'altération de données non libérées. Si l'on se reporte aux travaux de Maurino (1994, p.149), « les modèles et dossiers en cours d'acquisition ne sont pas concernés par le processus de modification, mais par le processus de correction ». Dans notre cas, nous ne faisons pas la distinction entre les termes de « correction » et de « modification » car notre recherche ne s'effectue pas au niveau des processus mais à celui des actions de changement sur un modèle CAO qui peuvent avoir lieu soit dans le cadre d'un processus de modification et un processus de correction.



Pour comprendre la place du travail des modifications dans le développement de produit, on notera tout de même que l'« Engineering Change Management (ECM) » (traduction libre : gestion des changements techniques), d'une entreprise est une partie intégrante de son système de qualité. Elle est spécifique à chaque entreprise et reflète l'organisation mise en place pour mesurer au mieux l'impact d'une modification sur un produit, sur les processus de production et d'utilisation, ainsi que sur la maîtrise des mises à jour, la validation et la diffusion des informations concernées (Maurino, 1994, p. 147). Il s'agit d'une activité essentielle dans la conception de produit où les échanges de données peuvent s'appuyer sur une standardisation sous la norme ISO 10303 (STEP), ainsi que sur une clarification des procédures d'interactions et de flux de travail entre les parties prenantes. Le contrôle des modifications est aussi une activité normalisée intégrée à la gestion des configurations (ISO 10007) permettant de répondre aux exigences de l'ISO 9001 (Système de management de la qualité) relatives à l'identification et la traçabilité. Il n'y a pas de méthodologie particulière préconisée, mais on peut se baser sur le travail de Jarrat et al. (2011, p. 107) proposant un processus générique de gestion des modifications (*Voir* Figure 1.4).

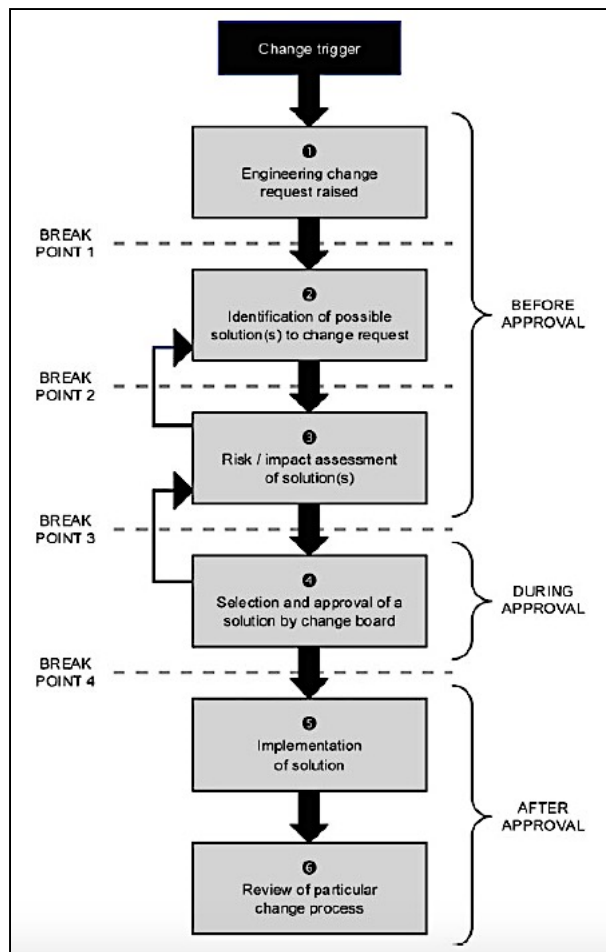


Figure 1.4 Modèle générique  
de processus de modification  
Tirée de Jarrat *et al.* (2011, p. 107)

La modification de modèles CAO joue un rôle important au sein de ce processus. L'identification des solutions passe généralement par différents concepts afin de sélectionner celui qui répond le mieux aux exigences de la requête de changement technique. Ces différentes alternatives de conception passent par des modifications de modèles CAO.

Il faut aussi considérer que toute évolution d'un produit entraîne des modifications ou des remplacements de composants. Ces opérations doivent limiter les retouches structurelles sur les éléments liés à ces composants. Pour cela, on s'attend à manipuler des modèles robustes.

La robustesse illustre la capacité de la maquette numérique à accepter des modifications locales sans générer d'instabilité dans le modèle du produit. Plus simplement, elle caractérise la capacité qu'aura la maquette à s'adapter aux modifications et aux évolutions sans contraindre son concepteur à retravailler en profondeur la maquette d'origine, ce qui permet de garantir et même d'augmenter considérablement la réactivité et la productivité de l'entreprise. (Taraud, 2008, p. 8)

Une des importantes contributions des systèmes CAO dans l'accélération du processus de développement de produit est justement la capacité à réutiliser et altérer des modèles existants de manière efficace. Selon une étude d'Aberdeen Group (2006, p. 14), des économies de coûts et de temps significatives sont réalisées lorsque les compagnies réutilisent des éléments de conception. On constate à travers cette étude que les sociétés les plus performantes ont investi des ressources et déployé des méthodes et technologies afin de capitaliser sur la réutilisation des modèles. Toutefois, pour garantir l'efficacité de réutiliser un modèle CAO, il est nécessaire que les concepteurs connaissent comment et pourquoi ce dernier a été créé d'une manière spécifique. Ils ont besoin de connaître son intention de conception.

Si cette préoccupation est si importante c'est parce que le développement de produit s'inscrit dans un environnement d'ingénierie concourante dans le but de baisser les coûts du produit, améliorer sa qualité et réduire le «time to market». De Graaf (1996, p. 25) élargit la définition de l'ingénierie concourante en introduisant l'ingénierie collaborative afin d'intégrer les considérations d'échanges d'informations.

Collaborative Engineering is a systematic approach to control life-cycle cost, product quality and time to market during Product Development, by concurrently developing products and their related processes with response to customer expectations, where decision making ensures input and evaluation by all life-cycle disciplines, including suppliers, and information technology is applied to support information exchange where necessary. (De Graaf, 1996, p. 25)

Dans ce contexte, il arrive que les modifications ne soient pas réalisées par le créateur du modèle CAO et par conséquent la communication des données est essentielle pour qu'un modèle soit réutilisé et modifié. A ce titre, Contero et al., (2002, p. 40) présentent dans leur étude l'impact de la qualité des données d'un produit dans le cadre de l'ingénierie collaborative et propose trois niveaux de qualités de la CAO, dont le troisième, « the semantic/pragmatic level », considère la capacité d'un modèle à être réutilisé et modifié. Selon lui, réaliser des changements ou réutiliser un modèle en particulier peut être facile, difficile ou impossible dépendamment de la sémantique associée lors de sa création. Dans son cas, il évoque une approche de modélisation prenant en considération les diverses parties prenantes du processus de développement de produit afin de disposer d'une stratégie commune de modélisation. Il met aussi l'accent sur la structure du modèle CAO, d'autant plus s'il s'agit d'un modèle comprenant de nombreux éléments. Il suggère un regroupement des éléments interdépendants, mais admet que la disposition sous forme d'arbre de construction ne facilite pas une vision d'ensemble des dépendances au sein du modèle.

De nombreuses études s'intéressent à l'intention de conception dans la création et la modification de modèles. Le prochain chapitre fait la revue de ces études en analysant leur intérêt pour la dénomination des éléments.

### **1.3 La création et la modification de modèles CAO**

L'intention de conception est un sujet qui revient souvent dans l'efficacité du développement de produit et notamment dans les activités de modification de modèles CAO. On a pu voir que renommer des éléments est évoqué comme un moyen d'illustrer leur fonction au sein du modèle et donc de contribuer à la communication de l'intention de conception. Ce chapitre présente des études expérimentales réalisées sur l'intention de conception dans la création et la modification de modèles CAO.

### 1.3.1 L'expertise de modélisation CAO

Chester (2007, p. 23) différencie deux catégories de connaissances autour de la CAO. La «command knowledge» fait référence aux connaissances des commandes et des procédures d'utilisation de ces outils au sein du système CAO, et la «strategic knowledge» qui fait référence aux différentes méthodes pour accomplir une tâche spécifique et le processus grâce auquel l'une est choisie. Il assimile cette dernière à l'intention de conception où il est question d'incorporer un maximum de flexibilité dans le modèle et de minimiser les échecs de conception. Pour Chester, l'expertise en CAO passe par les connaissances stratégiques incluant des capacités de planifier, vérifier et de réviser un modèle afin de modéliser des pièces « easy to change ». Dans son travail, il soutient que le développement de l'expertise en CAO passe par une formation sur les connaissances stratégiques intégrée aux connaissances des commandes. Il s'agit, dans son étude, de comparer deux populations d'étudiants en CAO de niveau débutant sur des tâches de modélisation; l'une ayant reçu une formation sur les procédures de commandes, l'autre, une formation supplémentaire en stratégie et en visualisation spatiale. La formation supplémentaire du second groupe comprend le développement du processus cognitif de prédiction, planification, vérification et révision dans le but d'améliorer l'image mentale d'un modèle. Cela passe par des descriptions verbales explicites et une exposition répétée à des différenciations perceptibles et significatives de pièces. La description verbale explicite provient d'une étude dans le milieu médical de Norman et al. (2000, p. 112) où il s'agit de fournir des commentaires verbaux des consultations d'un patient afin d'arriver à un diagnostic. Chester transmet la description verbale d'éléments d'un modèle qui ont été réalisées par des experts afin de faire la distinction entre eux. L'étude montre que les étudiants ayant reçu la formation supplémentaire utilisent plus de stratégies d'experts même si les temps de travail sont similaires chez les deux groupes. Il met ainsi en évidence qu'il est possible de former des étudiants novices à des stratégies d'expert. Toutefois, les travaux de recherches ne montrent pas si ces stratégies, permettant selon Chester de faciliter les modifications, amènent vraiment des différences de performances à ce sujet. On retient de cette étude que la formation de l'expertise CAO passe

par une description des éléments du modèle afin que le modèle soit facile à modifier même si ce dernier point n'est pas vérifié.

Une autre étude de Rynne *et al.* (2010) reprend les travaux de Chester afin de définir les variables qui contribuent au développement de l'expertise en modélisation CAO. La connaissance stratégique est encore une fois considérée comme le facteur qui différencie un expert d'un novice. Il est à l'origine du « design thinking » qui permet d'apporter l'intention de conception à un modèle. Il indique (Rynne *et al.*, 2010, p. 165) : « making designs changes and reusing existing designs can only be easily achieved if strategic 3D CAD knowledge practices were used in the original designs ». Dans cette étude, il s'agit d'évaluer les compétences d'étudiants en fin de cursus de CAO, ayant été formés à la capture de l'intention de conception. Pour cela, il leur demande de modéliser une pièce complexe avec les fonctions et features qu'ils jugent les plus convenables. Il pose des critères de travail, basées sur diverses recherches (Jankowski, 2002 ; Hartman, 2005 ; Rynne, 2008 ; Lombard, 2009), qui permettent de réaliser un modèle CAO robuste. Parmi ces critères, on mentionne l'application d' « Intelligent feature terminations », qui réfère à l'utilisation de l'élément du système CAO qui décrit la fonction désirée sur la pièce. Il n'est donc pas question de décrire les éléments, mais d'identifier les plus adéquats. Le résultat de cette étude met en évidence l'incapacité des étudiants à intégrer le processus cognitif leur permettant de réaliser la pièce. Cette étude apporte à celle de Chester le fait qu'il ne suffit pas de transmettre aux novices le savoir des experts. Il évoque une autre composante importante qui différencie les experts des novices. C'est la capacité à décomposer de manière cognitive un modèle afin de savoir par quel élément de base démarrer un modèle et comment ajouter au mieux les éléments subséquents.

Ces deux études présentent la transmission des capacités des experts comme le moyen d'intégrer une intention de conception qui offrent une robustesse efficace au modèle et qui faciliterait ainsi le travail de modification. La dénomination n'est pas évoquée comme un critère de robustesse chez Rynne *et al.* et Chester préconise une description verbale des éléments aux étudiants. Cette dernière n'est pas non plus présentée comme un critère de

robustesse, mais plutôt utilisée comme outil de pédagogie pour expliquer la démarche des experts. Malheureusement ces deux études se concentrent uniquement sur la création de modèles avec la juste intention de conception dont les critères reposent sur l'observation de coutumes d'experts en CAO. Aucune ne mesure réellement l'impact de ces critères sur un travail de modification. Le prochain chapitre présente les travaux de Johnson et Diwakaran qui se sont intéressés justement aux facteurs qui influent sur la création et la modification de modèles CAO.

### **1.3.2 Facteurs influant sur la création et la modification de modèles CAO**

Les travaux de Johnson et Diwakaran partent aussi du principe qu'il faut intégrer l'intention de conception adéquat à un modèle pour qu'il soit facile à modifier. Ils citent les travaux d'Anderl et Mendgen (1995) pour évoquer que les éléments sont liés à l'intention de conception puisqu'ils fournissent les connaissances à propos du produit. Ils indiquent : « Features are controlled by parameters and constraints. When properly implemented, these allow for a model to be easily altered. » Johnson et Diwakaran évoquent aussi les travaux de Rynne *et al.* et de Chester pour faire le constat qu'il n'y a pas d'étude quantitative significative sur la manière dont un expert modélise une pièce et les facteurs qui affectent sa capacité à être modifiée. C'est la raison pour laquelle ils entreprennent des études, au sein d'une population d'étudiants (2011) et de professionnels (2012), pour documenter les procédures et facteurs qui facilitent la compréhension et l'altération d'un modèle. L'étude auprès des étudiants a pour objectif d'évaluer leur performance vis à vis de leur formation et de ce qu'ils pensent être les facteurs associés à la compréhension et l'altération d'un modèle CAO. Quant à l'étude dans le milieu professionnel, elle vise à analyser les facteurs et procédures utilisés et qui pourraient être assimilés à des pratiques d'experts. Le but de ces deux études est de définir une approche générique pouvant servir de base à la connaissance stratégique de modélisation CAO. Dans ces deux études, les auteurs réalisent la même expérience. Cette dernière se divise en deux phases dans lesquelles deux populations ont des missions différentes. Pour la première phase, les participants d'un groupe doivent créer un modèle le plus rapidement possible, alors que les participants du second groupe doivent créer

le même modèle de manière à ce qu'il soit facile à modifier. Dans la deuxième phase, il s'agit de modifier les modèles de chaque groupe appartenant au premier tiers du classement en termes de rapidité d'exécution. Les modèles du premier groupe sont remis au second groupe et réciproquement. Après leurs travaux, il leur est demandé d'évaluer trois aspects : l'intuitivité de l'ordonnancement des éléments dans le modèle, l'intuitivité de l'organisation des éléments et la qualité générale du modèle.

Les résultats des deux études sont très similaires. On constate que les éléments complexes (dont l'esquisse a une forme complexe) ont permis de meilleurs temps de création et de modification. Pourtant, selon les participants, l'utilisation d'éléments simples est considérée comme un facteur de bonne intention de conception, de la même manière qu'un bon séquençement des éléments ainsi que l'utilisation de géométries de référence sur lesquelles reposer les éléments de construction. Ces points sont considérés à l'origine d'une intention de conception de qualité définie par une notation des participants quant à leur perception du modèle. Chez les étudiants, une intention de conception jugée de bonne qualité est positivement corrélée à la préservation des éléments de la conception initiale et négativement corrélée au temps de modification. Chez les professionnels, ces points ont apporté une meilleure perception du modèle durant sa modification. De plus la préservation d'éléments existant (à contrario de suppressions et créations d'éléments) est elle aussi positivement corrélée à une bonne perception du modèle.

On retient des travaux de Johnson et Diwakaran que les aspects qui font la bonne qualité d'un modèle ne sont pas forcément ceux qui ont permis d'obtenir les meilleurs temps de création et de modification. Il n'en reste pas moins que ces aspects sont à l'origine de la perception d'une bonne intention de conception et que cette dernière apporte de bonnes performances d'altération du modèle. Les étudiants indiquent un facteur supplémentaire à ceux des professionnels qui, selon eux, serait un facteur bénéfique à l'altération du modèle originel. Il s'agit justement de la dénomination des éléments. Toutefois aucune donnée objective ne montre une corrélation entre le fait de renommer des éléments et les performances du travail de modification. De plus, comme indiqué dans ce chapitre, ainsi que dans le précédent, ce



n'est pas un facteur évoqué dans le travail des experts. Il est donc possible de se demander si les étudiants ne pensent pas ainsi uniquement parce que c'est un aspect de bonnes pratiques présenté dans la formation à la CAO. On peut considérer que les travaux de Johnson et Diwakaran analysent un trop grand nombre de facteurs pour mettre en évidence le rôle réel de la dénomination des éléments. Cela d'autant plus que leur étude tend à mettre en évidence les facteurs qui permettent de construire une intention de conception adéquate et non pas ceux qui permettent une bonne communication de cette dernière, comme est présenté le fait de renommer les éléments. Le prochain chapitre s'intéresse justement aux travaux d'Alducin-Quintero et Contero sur l'amélioration de la communication de l'intention de conception.

### **1.3.3 L'amélioration de la communication de l'intention de conception**

Alducin-Quintero et Contero (2011 ; 2012), aidés d'autres collaborateurs, dont Johnson, s'intéressent au développement de nouveaux produits et notamment aux capacités à modifier et réutiliser des modèles CAO. Leur défi est d'augmenter la productivité des utilisateurs CAO en améliorant la communication de l'intention de conception. Pour cela, ils proposent l'utilisation d'annotations relatives aux stratégies de modélisation CAO et aux décisions prises durant la construction du modèle. Le contenu des modèles CAO annotés fournit les informations suivantes :

- La localisation : Ce type de commentaires permet l'identification de l'ensemble d'éléments du modèle qui définissent la géométrie d'une partie de la pièce (indiquant le premier et dernier élément du modèle définissant une partie spécifique de la pièce).
- L'intention de conception : Ce type de commentaires permet la compréhension de l'intention de conception de l'auteur du modèle (ex. : ce profil a été utilisé pour créer le corps principal de la connexion).
- Les procédures de modification : Ce type de commentaires fournit des recommandations pour réaliser les modifications, et indique les procédures qui doivent être évitées (ex. : « recommandation, ne pas utiliser l'élément de symétrie »).

Pour mettre en évidence la performance de cette méthodologie, les auteurs réalisent une expérience de modification de modèles (un modèle simple, un moyen et un autre complexe) par des étudiants. Ces derniers sont repartis en deux groupes de travail. Un groupe réalise des modifications sur des modèles ayant des annotations, l'autre réalise les mêmes modifications sur les mêmes modèles, mais sans annotations. L'expérience est réalisée à deux reprises. La première fois (2011), les annotations sont dans l'arbre de construction. Il s'agit d'une étude préliminaire en vue d'introduire la seconde (2012) où des améliorations sont apportées. Dans cette deuxième expérience, les notes sont créées en utilisant les annotations 3D et placées près des sections géométriques qu'elles décrivent. Les outils CAO permettant de réaliser ce type d'annotations sont à l'origine destinés à spécifier la pièce via, par exemples des tolérances géométriques. La figure 1.5 illustre l'utilisation habituelle de ces outils et la figure 1.6 montre l'utilisation faite par les auteurs.

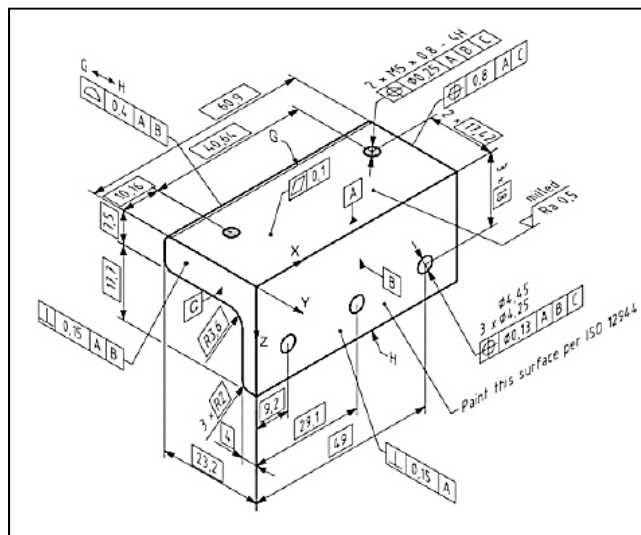


Figure 1.5 Modèle annoté  
selon la norme ISO16792  
Tirée de Camba et al. (2014, p. 62)

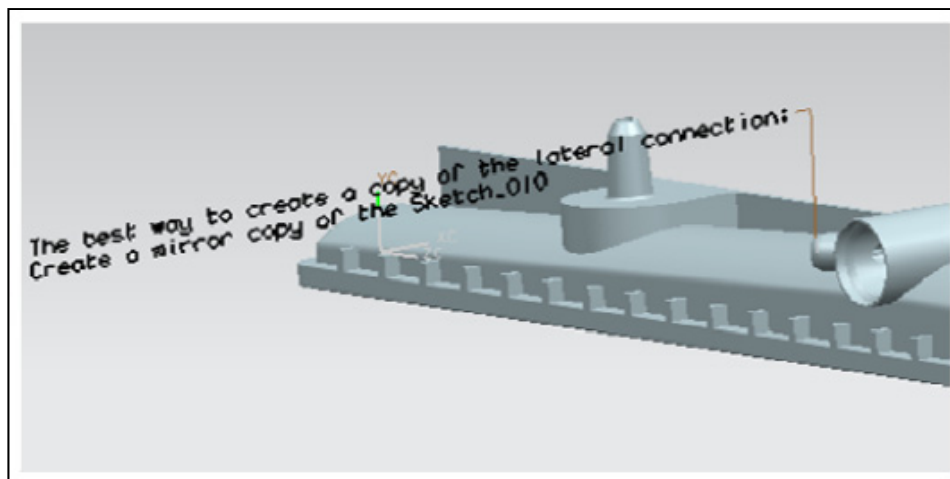


Figure 1.6 Exemple d'Annotation 3D  
Tirée d'Alducin-Quintero & Conter (2012, p. 4)

Afin de mesurer l'efficacité de leur méthode, les auteurs posent l'hypothèse que la performance est reliée au temps que les utilisateurs CAO mettent pour réaliser un changement sur le modèle CAO afin d'accomplir une modification technique.

Les résultats de l'étude préliminaire montrent qu'il est possible de réduire de 10 à 20% le temps nécessaire à réaliser des modifications techniques sur des modèles comportant des annotations. Cette étude met aussi en évidence que le nombre d'opérations utilisées pour effectuer des modifications ne variait pas de manière significative entre les deux groupes. Les stratégies utilisées étaient quasi similaires. Selon les auteurs, les annotations, incluses dans le modèle, indiquaient des informations de bases pour comprendre la manière dont la géométrie a été réalisée.

Pour la seconde expérience, Alducin-Quintero et Contero décident d'intégrer justement aux annotations des indications quant aux manières de modifier les éléments géométriques auxquels elles sont liées. Les résultats montrent aussi de meilleures performances dans l'utilisation de modèles annotés. Les auteurs pensaient constater des différences d'impact de l'annotation pour un modèle simple et un modèle complexe, mais les valeurs sont quasi équivalentes. « Size effect is 0.53 for a simple geometry / simple change combinaison and a value of 0.62 for complexe geometry / complex change ». Ces travaux mettent aussi en

évidence que l'impact de l'annotation sur la productivité dépend de plusieurs facteurs. Certains sont liés au modèle CAO tels que la complexité de la géométrie à modifier, la complexité de la modification à effectuer et la qualité de l'information fournie par les annotations. D'autres sont liés aux compétences des participants tels que leurs connaissances en conception de produit et leur expérience avec les systèmes CAO.

L'annotation et le fait de renommer des éléments sont deux choses bien distinctes. La dénomination n'est pas évoquée dans ces travaux, mais Contero en fait la dissociation dans son étude menée avec Camba, Johnson et Company (2014) sur la réalisation d'un outil informatique d'annotations étendues.

Proper feature naming conventions were not considered in the model used for this study. [...] features show default names with sequential number indicating the order of creation. Although proper naming practices can add a certain level of expressive value to the model, its relevance in this study is limited. Due to the nature of the design intent information used in our annotations (e.g. “Ensure a minimum angle of 20 degrees” or “Thickness increased after FEA results”, etc.), the use of representative feature names is not practical as they cannot efficiently communicate the message. (Camba et al., 2014, p. 69)

Comme l'indiquent les auteurs, la nature des informations de l'intention de conception n'est pas la même. L'annotation, rattachée à une partie du modèle, va décrire les éléments de l'arbre de construction qui la composent ainsi qu'apporter des indications sur sa modification. La dénomination est, quant à elle, rattachée à un élément de l'arbre de construction et tend à illustrer sa fonction dans ce dernier ou dans la pièce.

#### **1.4 Synthèse de la revue de littérature**

Les systèmes CAO actuels sont dotés de capacités de modélisation paramétrique et par «features» afin de fournir aux concepteurs des outils leur permettant de réaliser des pièces quelle que soit leur complexité. Les «features» portent une signification d'ingénierie pour la géométrie d'une pièce, d'un assemblage ou toute autre activité de fabrication. La variété de « features » est quasi illimitée et leur choix dépend de l'application que le modèle supporte.

Ces choix représentent l'intention de conception du modèle qui va décrire comment le modèle a été créé et impacter la façon dont il se comporte lorsqu'il est modifié. L'intention de conception influence donc la robustesse du modèle, c'est à dire sa capacité à accepter des modifications locales sans générer d'instabilité dans la globalité de sa construction.

La modification de modèles CAO comporte des enjeux important dans le développement de produit. Elle s'intègre dans un souci de gain de temps en conception et donc d'une réduction du cycle développement de produit. Par ailleurs, il est commun de passer à travers divers concepts demandant une certaine flexibilité des modèles CAO. Un autre aspect intéressant est la réutilisation du modèle CAO pour notamment le développement de nouveaux produits. Pour se faire, il est donc important d'être capable de transmettre et comprendre l'intention de conception. Une des propositions récurrentes dans les manuels et guides de la CAO est de renommer les éléments du modèle CAO. On a vu que les éléments des systèmes CAO offrent des informations à travers leur propriétés et paramètres. Mais lorsqu'on l'intègre au sein d'un modèle, il est conseillé d'illustrer la fonction locale ou globale assurée à l'aide de la dénomination. Toutefois, tous ces recueils apportent cette indication sans réellement détailler les processus et l'influence qu'elle a dans le travail de modification. Le choix des éléments à renommer, ainsi que la méthodologie de dénomination sont les aspects qui ne sont pas abordés par la littérature.

Lorsqu'on analyse les aspects qui définissent l'expertise de modélisation CAO (Chester, 2007 ; Rynne et al., 2010) , ce sont les connaissances stratégiques qui sont mise en avant. A travers ces compétences, il est question de choisir le bon élément du système CAO pour décrire au mieux la fonction désirée de la pièce et non pas renommer l'élément pour définir sa fonction dans la pièce. Il s'agit donc de faire les bons choix en termes d'intention de conception et non pas de décrire le choix effectué. D'autres analyses (Johnson & Diwakaran, 2011 ; 2012) montrent qu'une intention de conception est considérée comme adéquate pour réaliser un modèle de qualité, c'est-à-dire robuste, si on utilise des éléments simples, qu'il y a un bon séquençement de ces derniers et que le modèle dispose d'éléments géométriques de références sur lesquels reposent les éléments de construction. Dans ces études menées auprès

d'étudiants et d'experts, seuls les étudiants indiquent que le fait de renommer les éléments serait un facteur bénéfique à l'altération de modèles, mais aucune donnée objective ne valide cette perception. Il est possible de se reposer sur les travaux d'Alducin-Quintero et Contero (2011 ; 2012) pour voir qu'effectivement l'amélioration de la communication de l'intention de conception apporte de meilleures performances dans le travail de modification. Toutefois, ces recherches reposent sur l'efficacité d'outils d'annotations et non pas sur la dénomination des éléments. Ce sont deux aspects présentés comme différents par les auteurs puisqu'ils ne fournissent pas le même type d'information. Par conséquent, on peut se demander si les étudiants n'ont pas tendance à voir le fait de renommer des éléments comme un facteur bénéfique au travail de modification parce que l'enseignement de la CAO le présente comme un aspect important de l'expression de l'intention de conception. Ce n'est en tout cas pas un aspect mis en avant par les experts. D'autres études montrent que l'amélioration de la communication de l'intention de conception est bénéfique au travail de modification. C'est aussi un intérêt des concepteurs de disposer de plus d'information sur la construction et la structure des éléments si l'on se reporte à l'étude de Salehi et McMahon (2009). Toutefois la dénomination des éléments apporte-t-elle une bénéfice à cela ? C'est la question que nous nous sommes posé dans notre recherche. Notre étude sur l'impact de renommer des éléments dans le travail de modification d'un modèle CAO tend à apporter des réponses au sujet de la dénomination entre ce qui est indiqué dans l'enseignement de la CAO, l'idée que s'en font les usagers de CAO se font et la réalité du travail de modification de pièce CAO.

Pour cela, nous mettons en place une expérience où il est question de comparer deux groupes d'étudiants dans le travail de modification d'un modèle CAO : l'un travaillant avec un modèle dont des éléments sont renommés, l'autre avec un modèle dont les éléments ne sont pas renommés. Pour ce faire, il y a un travail préalable de préparation de l'expérience, mais aussi d'organisation du traitement de données. Ces aspects sont détaillés dans les chapitres 2 et 3.

## **CHAPITRE 2**

### **MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE : ORGANISATION DE L'EXPÉRIENCE**

Cette partie présente l'expérience mise en place afin d'évaluer l'impact de renommer des éléments dans la modification d'un modèle CAO. Les explications permettent de décrire la population d'étudiants sélectionnée. Ensuite, il s'agit d'introduire le modèle CAO à modifier, le travail de dénomination qui a été réalisé, ainsi que les modifications à effectuer dans le but de préciser les précautions prises et les aspects évalués dans cette étude. Le chapitre qui suivra, présentera la démarche expérimentale.

#### **2.1 Les aspects éthiques de la recherche**

Le projet de recherche est soumis à des règles éthiques encadrant la participation des étudiants.

La participation des étudiants se fait sur la base du volontariat. Afin de motiver et stimuler leur participation, nous expliquons que l'expérience les plonge dans une situation de développement de produit tel qu'il en existe dans l'industrie. C'est l'opportunité pour eux de tester leurs compétences en termes de modification de pièce aéronautique. Par ailleurs, une compensation financière est prévue pour les remercier de leur implication. Pour ne pas fausser l'expérience, nous nous gardons de révéler les raisons exactes de la mise en place de l'exercice de modification. Nous craignons qu'indiquer aux participants que l'exercice concerne la comparaison de deux populations, travaillant sur deux modèles différenciés par la dénomination des éléments, puissent modifier leur démarche de modification. Nous leur expliquons uniquement qu'il s'agit d'analyser les façons de modifier un modèle CAO dans le but d'évaluer comment est comprise la conception établie. Il est précisé que leur participation est anonyme. Nous ne récoltons aucune information personnelle. Seule la navigation visible à l'écran d'ordinateur est enregistrée. Chaque vidéo et modèle d'un participant ont un numéro associé dans l'unique but d'identifier à quelle population chacun appartient.

Tous les aspects de l'expérience, c'est-à-dire le matériel de l'expérience (fichier CAO et documents transmis aux étudiants), la méthodologie de recrutement des participants, d'enregistrement et conservation des données, de même que les données récoltées elles-mêmes, ont été soumis et acceptés par le comité d'éthique à la recherche de l'ETS.

## **2.2 L'expérience**

### **2.2.1 Présentation de l'expérience**

L'expérience s'articule autour d'un exercice de modification du modèle CAO d'un composant aéronautique sous CATIA V5<sup>®</sup>. L'idée est de proposer deux variantes du même modèle de pièce structurelle d'un avion. Ces variantes partagent la même construction et la même organisation des éléments. La seule différence entre ces modèles réside dans la dénomination des éléments de l'arbre de construction. Pour l'un, les éléments sont renommés tandis que pour l'autre, nous gardons la dénomination définie par le logiciel de modélisation. Un participant à l'expérience travailler sur l'une ou l'autre des variantes du modèle. Le choix du modèle est aléatoire. Nous regroupons toutefois les participants afin de constituer deux groupes dont les populations sont identiques. Étant donné que le travail demandé sur chaque variante est le même, les groupes se distinguent uniquement sur le fait d'avoir travaillé un modèle renommé ou non renommé. De cette manière, nous pouvons effectuer une analyse pour comparer l'impact de renommer des éléments d'un modèle CAO dans le travail de modification.

### **2.2.2 Échantillonnage et environnement de l'expérience**

L'expérience est proposée à des étudiants de l'École de technologie supérieure (ETS) et de l'École nationale d'aérotechnique (ENA) dans le but de recruter un nombre suffisant de participants. Il faut toutefois que les étudiants possèdent un niveau que l'on qualifie de novice avancé, capable de comprendre la construction du modèle proposé et réaliser les modifications demandées. On considère qu'un étudiant possède un niveau de novice avancé



s'il a reçu une formation adéquate et nécessaire pour manipuler des modèles du même type que celui proposé, c'est à dire des modèles CAO de pièces métalliques de structure aéronautique. A l'ETS, l'expérience a été proposée aux étudiants ayant suivi le cours : Conception assistée par ordinateur de composants aéronautique. Ces étudiants ont été amenés à modéliser, au cours de leur formation sous CATIA V5<sup>®</sup>, plusieurs pièces similaires à celle proposée dans l'exercice. On considère qu'ils ont un niveau novice avancé pour l'exercice car le modèle leur est familier et puisqu'ils connaissent les outils nécessaires à sa réalisation. A l'ENA, l'exercice a été proposé à des étudiants de 3<sup>ème</sup> année. Ces étudiants ont été amenés à modéliser divers composants aéronautiques dont des pièces structurelles à travers leur trois années de formation. Par conséquent, leurs années de formation en CAO aéronautique permettent de définir leur niveau de novice avancé dans le cadre de l'expérience. De cette manière, nous avons pu proposer l'expérience à 30 étudiants de l'ETS et à 40 de l'ENA. Sur ce panel de participants potentiels, 9 étudiants de l'ETS (5 pour le groupe renommé, 4 pour le groupe non renommé) et 10 étudiants (5 pour chacun des groupes) de l'ENA ont été volontaires pour participer à l'expérience. Une analyse statistique préalable dans chaque groupe (renommé et non renommé) est effectuée pour comparer les données récupérées de chaque école. Ainsi, nous pourrions déterminer si les étudiants de l'ETS et l'ENA peuvent être traités comme une même population dans chaque groupe. Le choix du volontariat a été retenu pour des considérations éthiques et aussi dans un souci d'engagement des étudiants. Des études en milieux pédagogique (Diwakaran et Johnson,, 2011) et professionnel (Diwakaran et Johnson, 2012) montrent que la motivation joue un rôle dans la manière dont les concepteurs produisent et modifient un modèle CAO. C'est la raison pour laquelle nous proposons l'expérience à des participants volontaires désireux de se prêter au jeu de l'expérience.

Le choix d'intégrer l'expérience dans un domaine spécifique, tel que l'aéronautique, est motivé par le fait que les "features" peuvent avoir différentes significations à travers leurs utilisations dépendamment du type de produit et de ses applications en ingénierie (Hartman, 2005, p. 8). De cette manière, nous pouvons renommer les éléments du modèle à l'aide d'un langage connu par les étudiants. Il s'agit d'un prérequis pour mener à bien ce test. De plus,

un questionnaire de vocabulaire est proposé préalablement à l'exercice de modification afin de s'assurer que les étudiants maîtrisent le langage utilisé dans l'expérience. Des détails sur le questionnaire et le langage de l'expérience sont présentés à la section 2.3.2. Enfin, le fait de travailler avec des étudiants qu'on peut qualifier de novices avancés, nous permet de pratiquer des modifications de pièces complexes où la lecture de la construction est incontournable, mais compréhensible par l'ensemble des participants. C'est une situation idéale pour mettre en évidence l'impact de renommer des éléments dans le travail de modification d'un modèle CAO.

## 2.3 Présentation du matériel de l'expérience

### 2.3.1 Présentation du modèle CAO et de sa construction

Le modèle de l'étude se rapproche d'une pièce structurelle du plafond du cockpit (*Voir* Figures 2.1, 2.2, 2.3, 2.4). La pièce est réalisée sous CATIA V5® conformément à la méthodologie de conception de pièces usinées en aéronautique qui est enseignée à l'ETS et dont elle est issue.

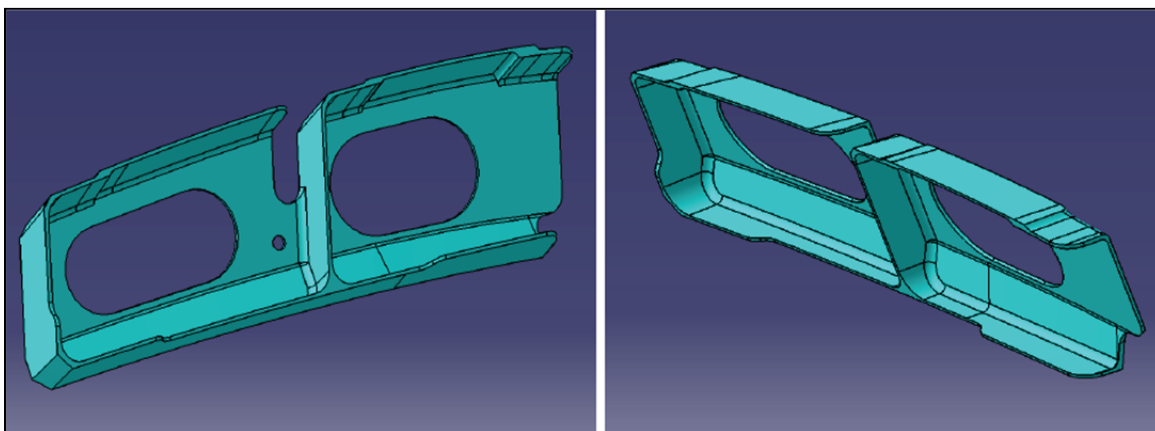


Figure 2.1 Vue de la pièce intercostale



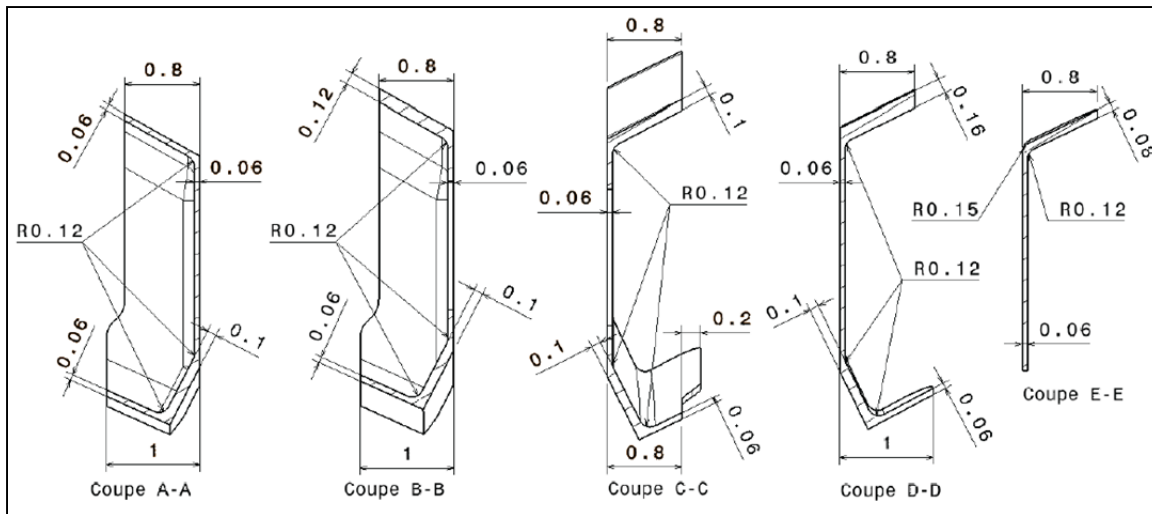


Figure 2.4 Plans des coupes de la pièce

Cette pièce a été sélectionnée du fait qu'elle relève du domaine de l'aéronautique et peut être considérée de complexe. La pièce intercostale répond à des contraintes de formes particulières, de résistance mécanique, d'encombrements spécifiques et de design (Taraud, 2008, p. 82). La démarche de construction pour notre modèle repose sur un squelette fonctionnel constitué d'esquisses, de points et géométries de construction, et surfaces décrivant les interfaces avec les composants voisins. Ces éléments sont situés dans le set géométrique et, dans notre cas, sont « sans historique », c'est-à-dire sans liens à d'autres pièces dans le but de faciliter la manipulation du modèle sans avoir à gérer les liens vers son assemblage.

Le modèle adopté correspond à la phase de conception détaillée. Cette dernière, comme le nom l'indique, établit une description précise de la pièce utile au travail de fabrication. Un modèle détaillé repose sur les éléments requis pour définir complètement la pièce. Nous nous sommes inscrits à cette phase de la conception, car elle permet de proposer une plus grande diversité de modifications et leur réalisation demande une lecture en profondeur de la construction.

Afin de saisir sa construction, il faut introduire des éléments de vocabulaire désignant ses parties (*Voir Figure 2.5*) :

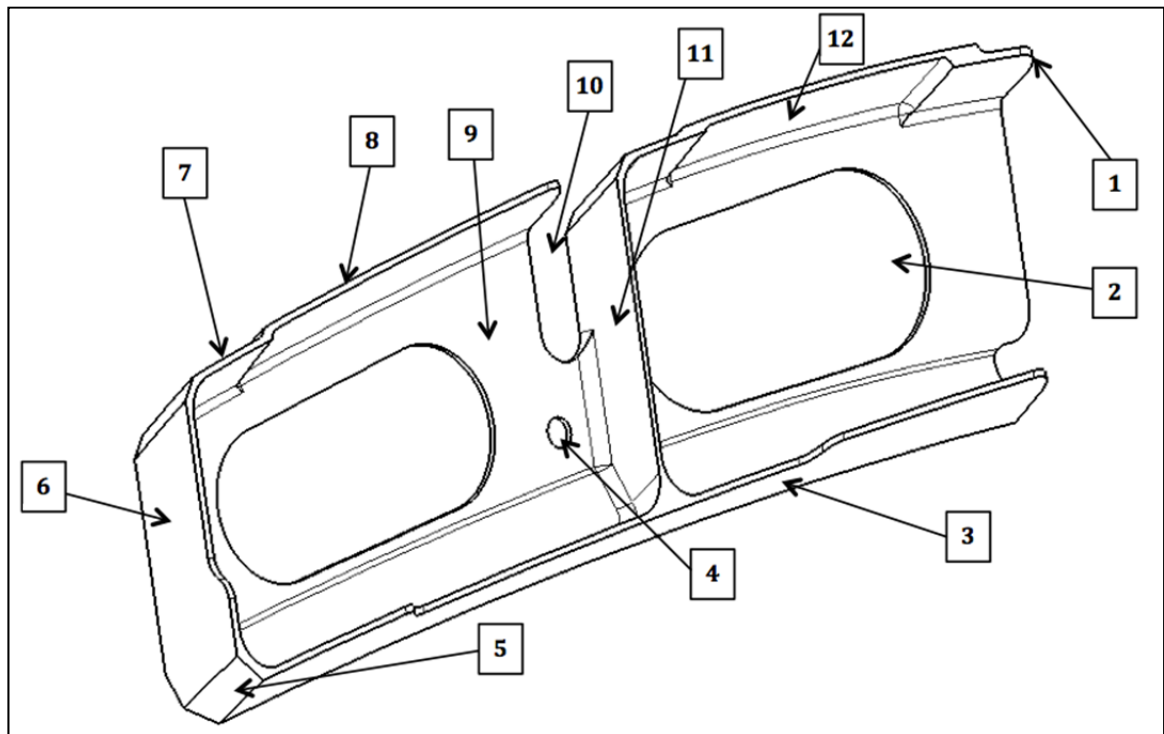


Figure 2.5 Définition des parties de la pièce

- 1 – Congé d'arête;
- 2 – Trou oblong;
- 3 – Mur fermé;
- 4 – Trou : Ouverture circulaire;
- 5 – Chanfrein;
- 6 – Mur vertical;
- 7 – Machined step : Suppression de matière au niveau d'un mur pour permettre l'assemblage;
- 8 – Mur ouvert;
- 9 – Poche : Espace à l'intérieur de la pièce délimité par des murs;
- 10 – Découpe Stringer : Espace de logement du « stringer ». Un « stringer » (Une lisse) est une pièce structurelle longitudinale de l'avion qui rigidifie le revêtement et supporte les charges en compression. Ce sont les pièces en long sur figure 2.6 qui présente l'intégration de

la pièce dans son contexte;

11 – Mur Intérieur / Raidisseur : Mur à l'intérieur de la pièce, un raidisseur se définit comme un élément renforçant un support;

12 – Inner Machined step : « Machined-step » situé à l'intérieur de la pièce et pour en réduire la masse.

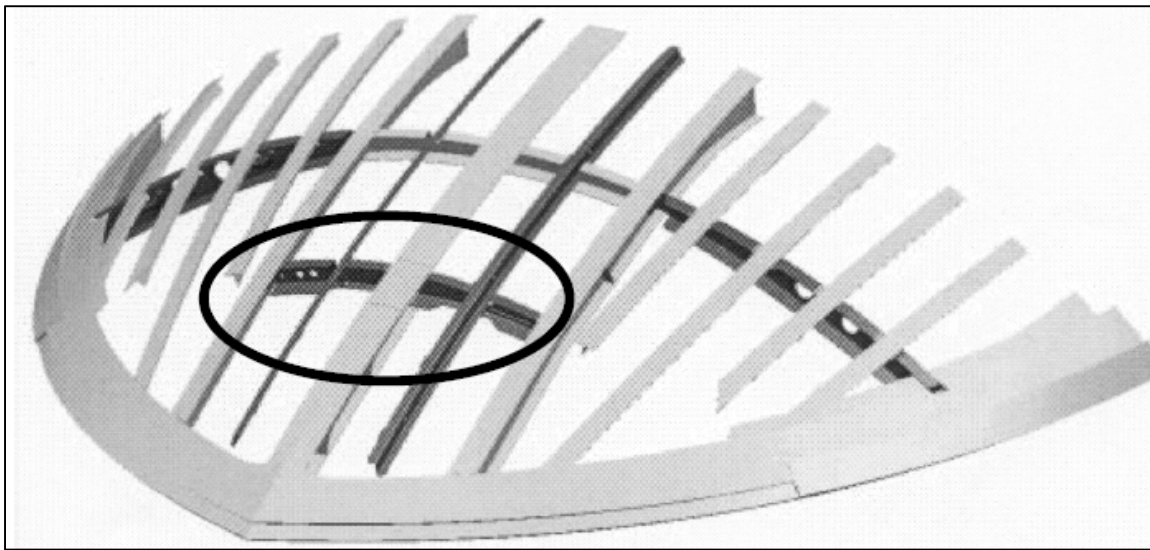


Figure 2.6 - Pièce dans son contexte

La construction du modèle ainsi que le choix des modifications à réaliser ont été effectuée de manière à ce que l'essentiel de l'expérience soit un travail de lecture du modèle et de repérage des éléments à modifier. Nous minimisons ainsi l'impact de la capacité de conception des participants dans le but de se concentrer sur l'observation des façons dont ils naviguent dans le modèle, arrivent à faire les liens entre les éléments et identifient l'élément à modifier. En plaçant la lecture du modèle au centre des activités de l'exercice, nous augmentons les possibilités de voir des différences entre les deux groupes et d'ainsi mesurer l'impact de renommer un modèle CAO.

L'explication relative à la construction du modèle, présentée ci-après, fournit les informations nécessaires à la compréhension des modifications demandées aux participants ainsi que des processus de modification attendus. La construction du modèle est issue d'une



modèle permettant d'obtenir le rendu final sont construits à partir de ses éléments géométriques.

On commence par définir les autres éléments géométriques nécessaires à la modélisation de la pièce. Il s'agit de plans et surfaces réalisés par décalage d'autres plans et surfaces. Seule l'IML est une surface réglée modélisée par rapport à l'OML représenté en marron sur la figure 2.7. L'OML (Outer Mold Line) représente l'enveloppe maitresse de l'avion. Elle est définie à l'aide des études d'aérodynamisme de l'avion. L'IML (Inner Mold Line) est une surface réglée, c'est à dire une surface où en chaque point passe une droite appartenant entièrement à cette dernière. De cette manière, la surface pourra être usinée avec un nombre minimal de déplacements d'outils de coupe pour des considérations de coûts de fabrication. Dans la modélisation, il s'agit de créer deux courbes d'intersection entre l'OML et le pavé. Ces courbes sont en violette sur la figure 2.8. Ensuite on réalise deux courbes parallèles en décalage de l'épaisseur de la tôle de revêtement. La surface réglée est définie à partir de ces deux courbes et l'axe X du repère du modèle (*Voir Figure 2.8*). L'axe X représente la droite de contrôle de l'IML.

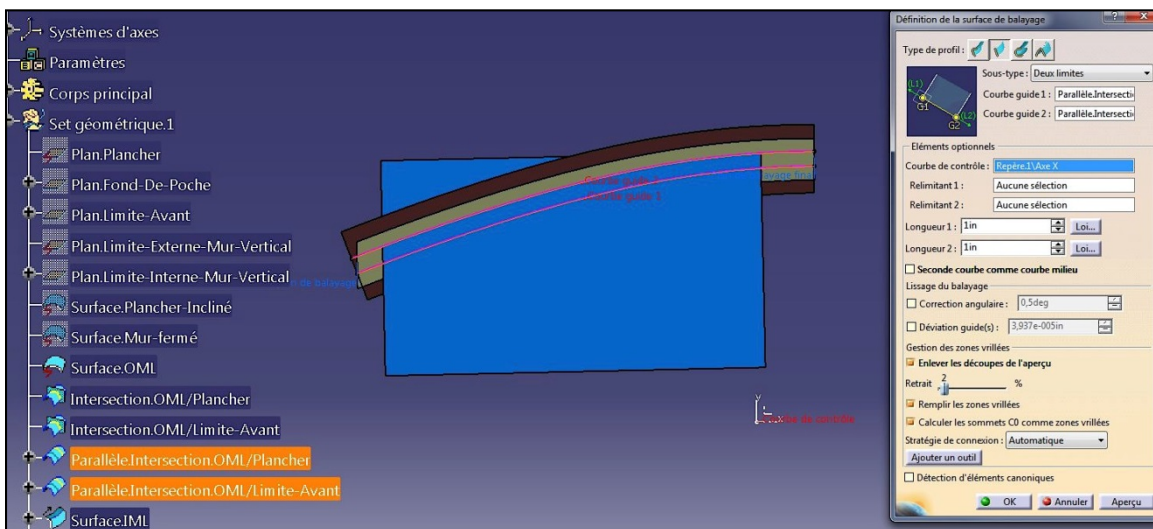


Figure 2.8 Modélisation de l'IML



La suite de la modélisation consiste en des suppressions de matière du pavé initial à l'aide d'éléments coupe, poche, trou ou d'opérations booléennes. L'outil coupe sépare un élément solide à l'aide d'une surface ou d'un plan sélectionné et conserve la portion choisie du solide. L'outil poche permet d'enlever de la matière à un élément solide à partir d'une face définie et dont la profondeur peut aussi être définie. La forme de la matière enlevée est définie à l'aide d'une esquisse. L'outil trou permet de réaliser un trou en intégrant les spécifications nécessaires à sa fabrication. Dans notre cas, il s'agit d'un perçage simple traversant la pièce. Enfin les outils d'opérations booléennes, comme le nom l'indique, permettent d'effectuer des opérations booléennes entre deux corps. Il peut s'agir d'opération d'ajout, de retrait ou d'intersection.

Les premiers enlèvements de matière consistent à définir l'enveloppe de la pièce ainsi que ses poches. Pour cela, on utilise les éléments géométriques représentant le contexte, ainsi que d'autres surfaces et plans définis à partir de ces éléments (*Voir Figure 2.9*).

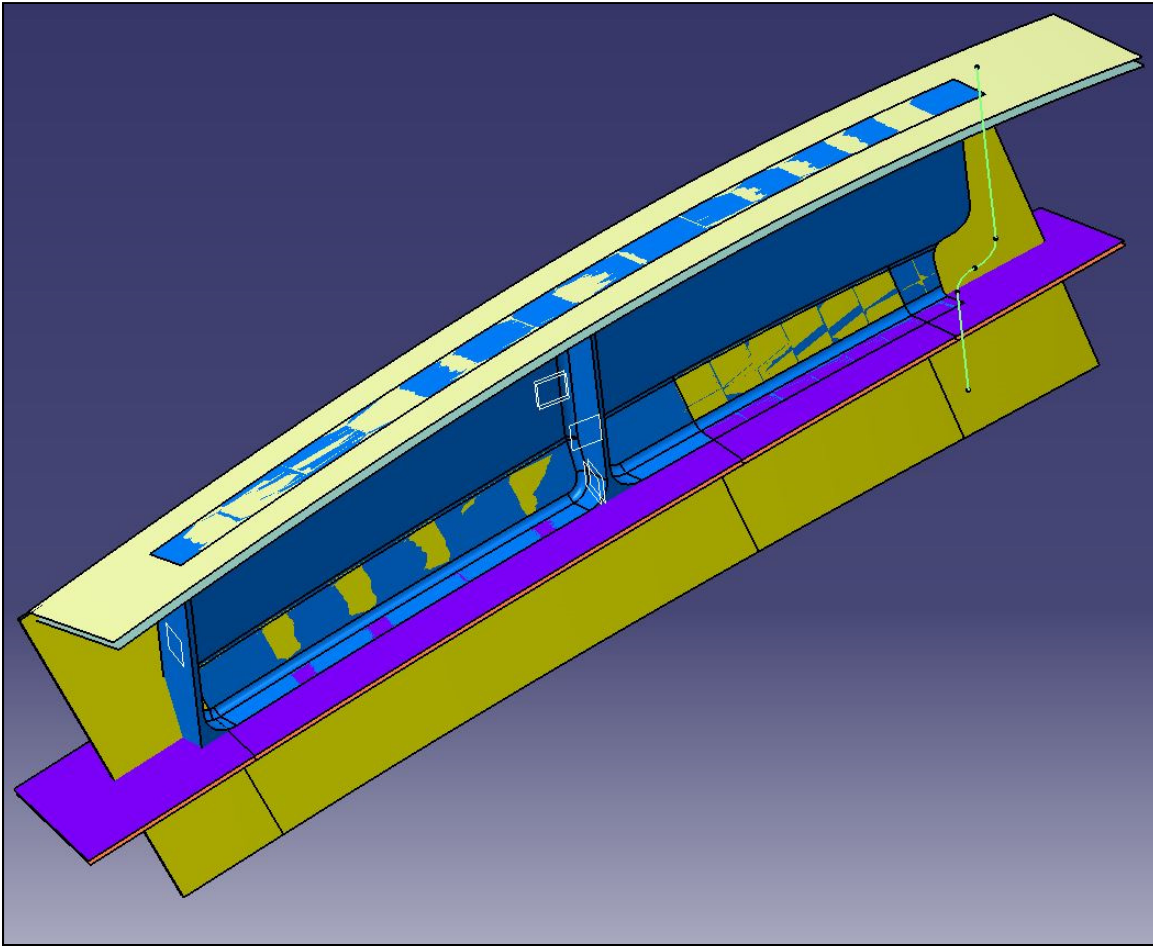


Figure 2.9 Modélisation de l'enveloppe et des poches

En ce qui concerne les poches, nous avons créé des corps à l'aide d'une extrusion, que l'on a soustraits au corps principal par opérations booléennes. La forme de chaque corps a été réalisée grâce à des découpes basées sur des plans et surfaces (*Voir* Figure 2.10).

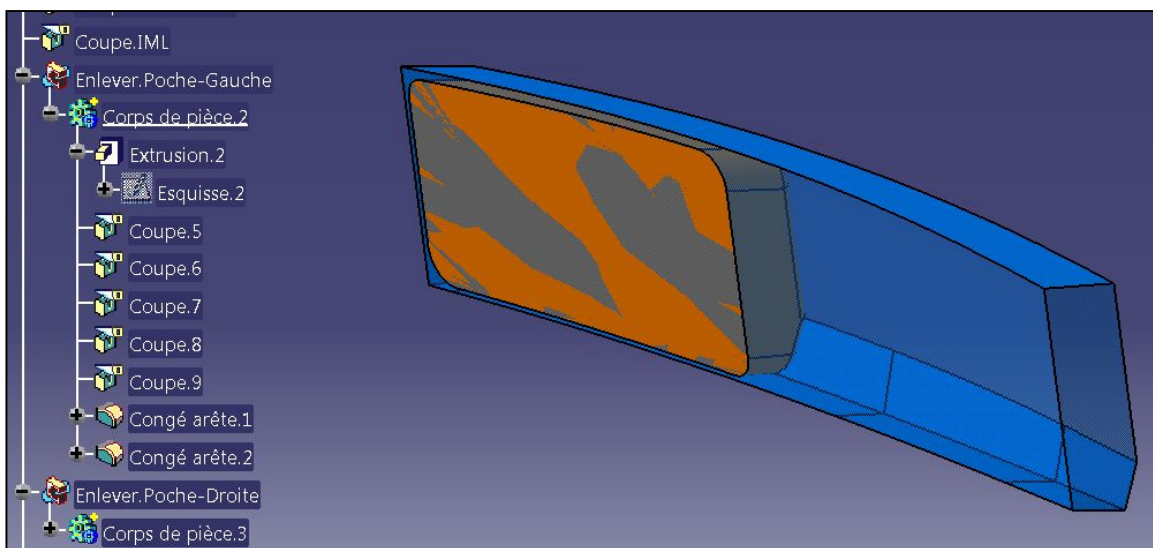


Figure 2.10 Modélisation de la poche gauche

Dans un second temps, il s'agit de contrôler la hauteur finale des murs en supprimant de la matière. L'outil poche et une opération booléenne de retrait permettent d'obtenir la forme désirée. Ensuite, nous nous sommes penchés sur la découpe « stringer » et le trou oblong de chaque poche. Le résultat de ces travaux de modélisation est présenté figure 2.11.

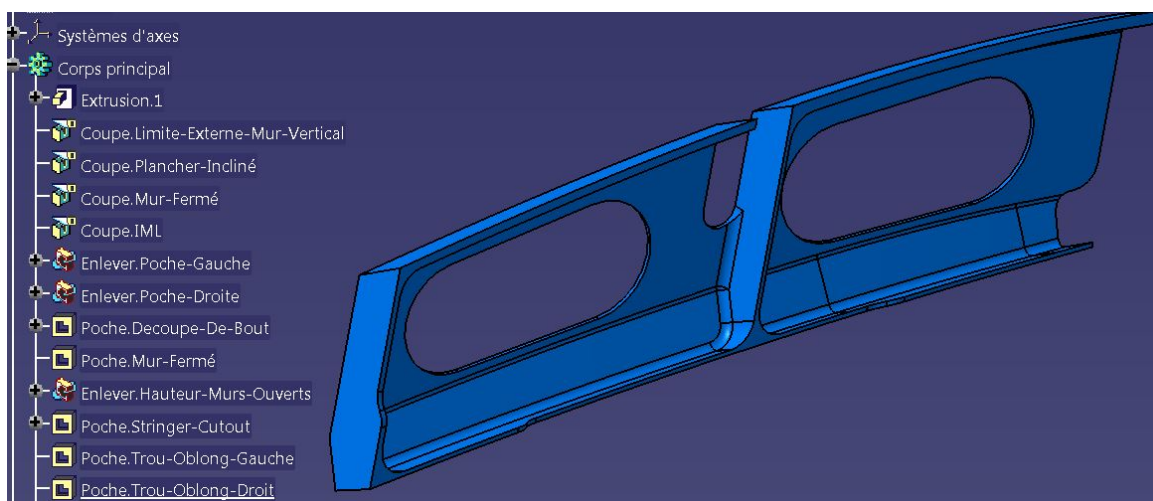


Figure 2.11 Modélisation des découpes de murs et plancher

La découpe « stringer » est issue d'une esquisse dont les dimensions et la morphologie dépendent de deux paramètres : le plan central de la lisse qui traverse la pièce et un point

d'intersection entre le plan de la lisse et le mur ouvert de la pièce côté plancher. Le plan positionne la découpe et le point permet de définir la profondeur de la découpe nécessaire à l'intersection de la lisse et de la pièce (*Voir* Figure 2.12). Pour les trous oblongs, ils proviennent d'esquisses positionnées par rapport aux murs verticaux et l'arrête faisant l'intersection entre le plancher et le plancher incliné (*Voir* Figure 2.12). Leur construction a été réalisée pour faciliter le travail de modification demandé dont nous donnerons plus de détails dans le chapitre 2.3.3.

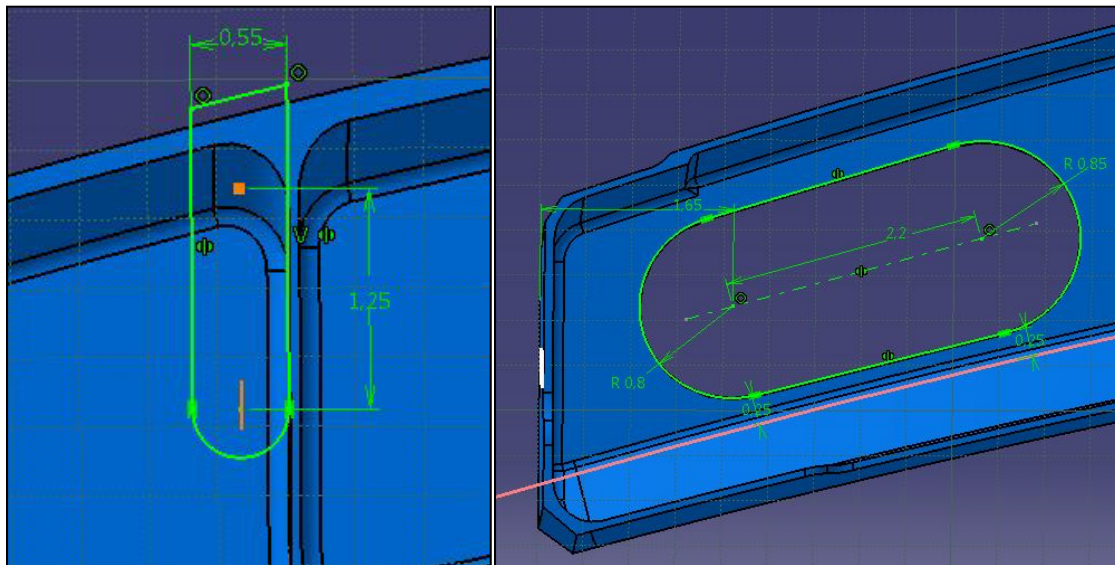


Figure 2.12 Esquisses découpe "stringer" et trou oblong gauche

L'étape suivante consiste à modéliser les « machined-steps » et « Inner Machined-steps ». Les « machined-steps » sont réalisés par soustraction de surface épaisse à l'aide d'une opération booléenne. Une surface épaisse représente un solide issu d'une surface. Le solide est formé par création d'épaisseur de part et d'autre de la surface en suivant une direction perpendiculaire en tout point à cette dernière. On les modélise à l'aide de l'IML et de coupes réalisées avec les plans de « machined-step » prévus à cet effet. Les plans de coupe délimitent la position des « machined-steps » dans la pièce. Enfin, on réalise un congé d'arrêt à cette position. La figure 2.13 présente la modélisation du « machined-step » gauche.

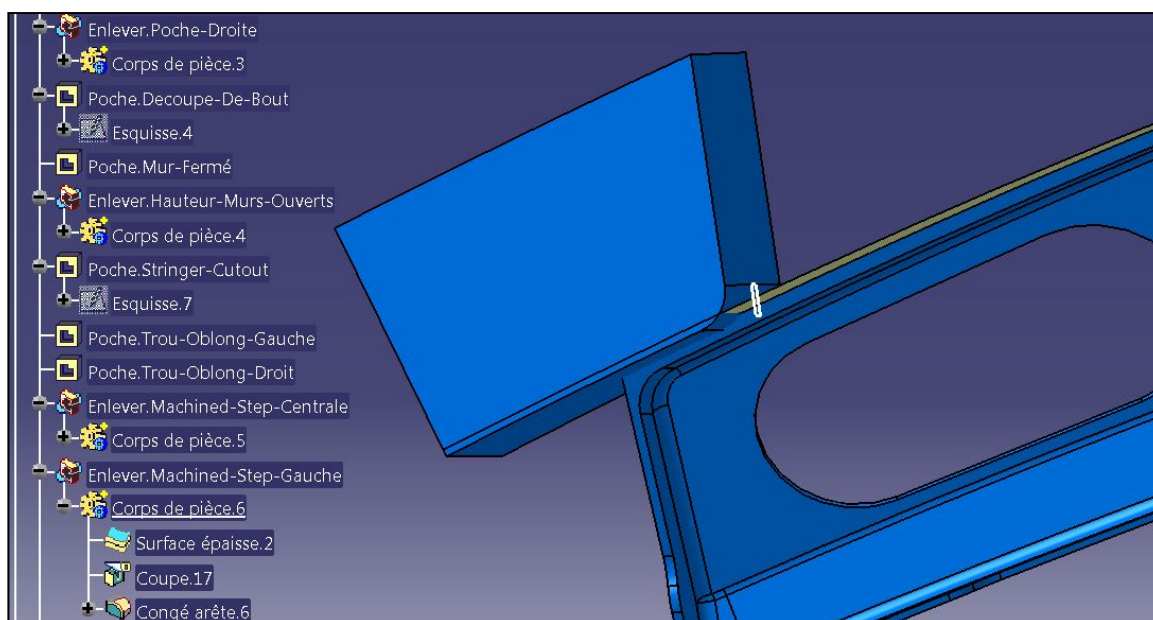


Figure 2.13 Modélisation du "machined-step" gauche

Les « inner machined-steps » sont, quant à eux, modélisés à l'aide d'une esquisse extrudée, de coupes et congés sur la partie supérieure des corps que l'on soustrait au modèle via des opérations booléennes. La coupe supérieure est issue d'une surface décalée de celle de l'IML et les plans de coupes verticaux sont des plans décalés des « machined-steps ». Enfin, de la même manière que les « machined-steps », on réalise un congé d'arête aux endroits du mur où l'étagement se crée. La figure 2.14 présente la modélisation de l'« inner machined-step » droit de la pièce.

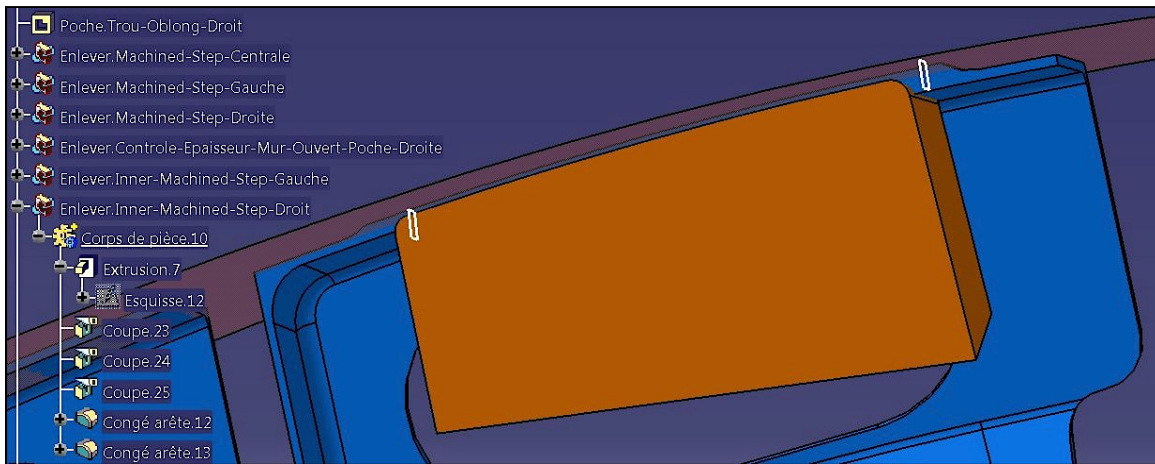


Figure 2.14 Modélisation de l' "inner machined-step" droit

Par ailleurs, entre la modélisation des « machined-step » et des « inner machined-step », nous avons réalisé une réduction d'épaisseur du mur ouvert à la gauche de la poche droite (*Voir* Figure 2.15). En effet, en se reportant à la figure 2.4 des plans de coupe de la pièce, on observe des différences d'épaisseurs sur les murs ouverts. Cela est dû à des nécessités différentes en termes de résistance décidées lors de la conception de la pièce. Cette réduction d'épaisseur est réalisée à l'aide d'une opération booléenne de retrait. Nous avons opté pour un corps fait à partir d'une extrusion tout comme avaient été réalisées les deux poches du modèle. Le réglage de l'épaisseur se fait donc à l'aide d'une coupe dont la surface est une surface décalée de l'IML.



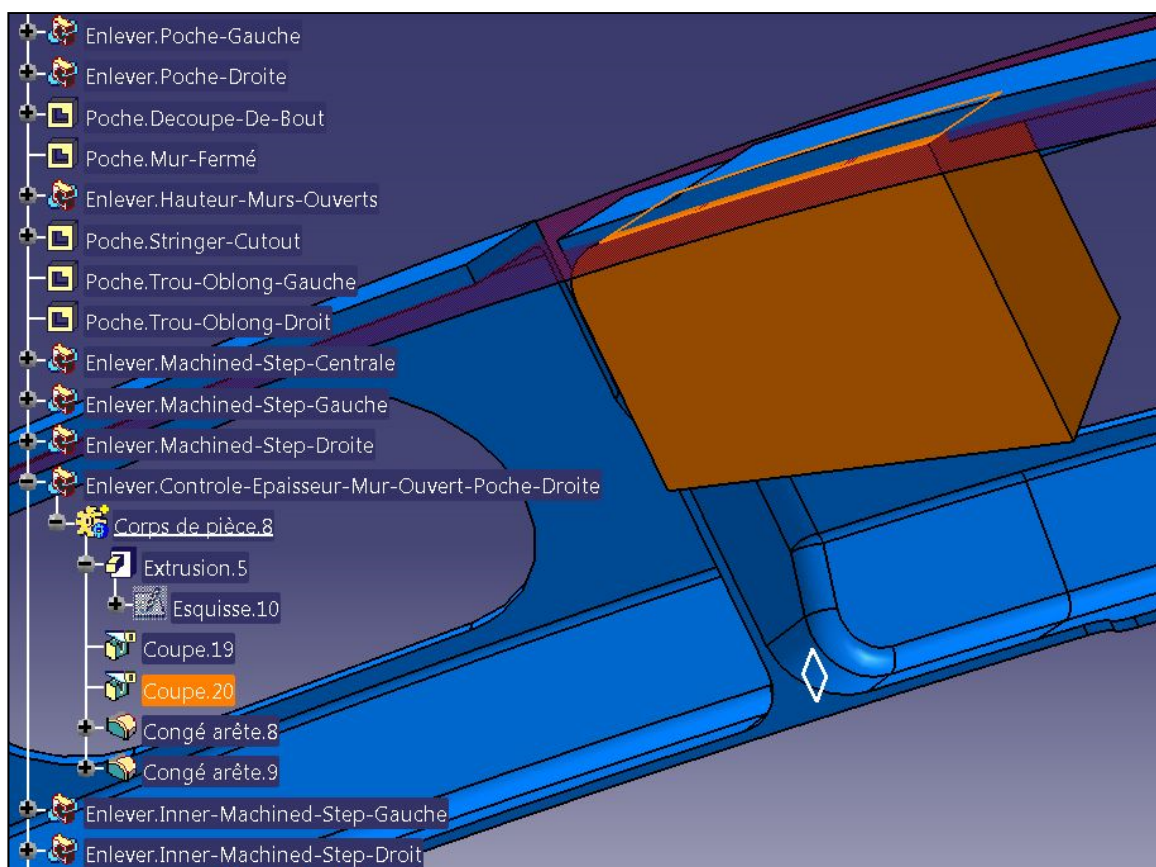


Figure 2.15 Modélisation de l'élément  
"Enlever.Controle-Epaisseur-Mur-Ouvert-Poche-Droite"

Enfin la dernière étape est de modéliser le trou à l'aide de l'outil trou du logiciel et d'ajouter les chanfreins et congés sur les coins et arêtes choisies. Ces chanfreins et congés sont représentés en orange sur la figure 2.16.

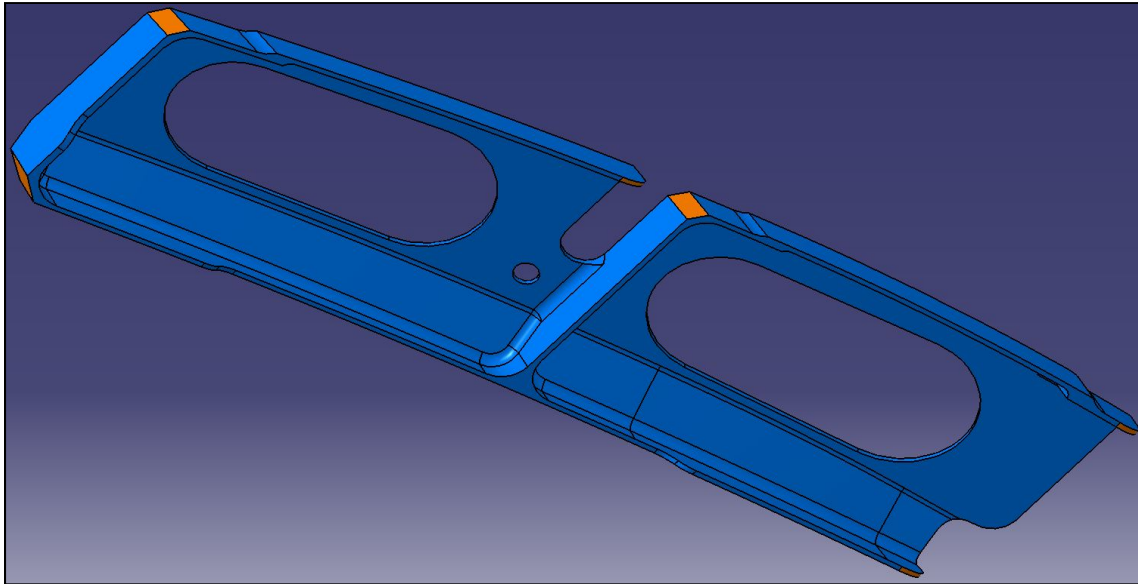


Figure 2.16 Modélisation du trou, des chanfreins et congés de la pièce

La prochaine section présente l'organisation de l'arbre de construction, la dénomination utilisée pour l'expérience, ainsi que le questionnaire mis en place pour préparer les étudiants à naviguer dans le modèle et le cahier des charges présentant les tâches de modification.

### 2.3.2 Organisation de l'arbre de construction et dénomination des éléments

Il se peut que la séquence présentée ne corresponde pas tout à fait à la pratique industrielle. Il est d'ailleurs évident qu'il n'existe pas qu'une seule possibilité d'organisation des éléments. Néanmoins, cet aspect n'a pas d'incidence sur les résultats de notre expérience car qu'un étudiant travaille avec un modèle renommé ou non, l'organisation de l'arbre de construction est la même. Il ne s'agit donc pas d'un facteur de discordance entre les deux groupes à l'étude. L'organisation de l'arbre se divise globalement en deux parties : le corps principal et le set géométrique.

Le set géométrique contient tous les éléments géométriques (éléments filaires, plans, surfaces) nécessaires à la construction du modèle. Nous y avons aussi intégré des esquisses dont la modélisation a été définie avant le démarrage du travail de modélisation du corps principal. En effet, comme il a été expliqué lors de la présentation de la construction, le



travail de modélisation commence par le positionnement de tous les éléments géométriques en provenance du contexte. Le corps principal intègre tous les éléments de création ou d'enlèvement de matière type extrusion, coupe, poche, opération booléenne, trou, chanfrein et congé d'arête.

L'organisation du corps principal suit la construction telle qu'elle a été expliquée plus haut. Quant au set géométrique, les éléments ont été réorganisés pour qu'ils soient agencés de manière à suivre l'organisation du corps principal. Il s'agit de présenter les éléments dans la séquence où ils sont employés. Il s'agit d'offrir une lecture fluide de l'arbre de construction où le modèle puisse être parcouru de la même manière que ce soit dans le corps principal et le set géométrique. La figure 2.17 met en vis à vis l'arbre de construction du modèle renommé et celui du modèle non renommé et présente au passage leur organisation.

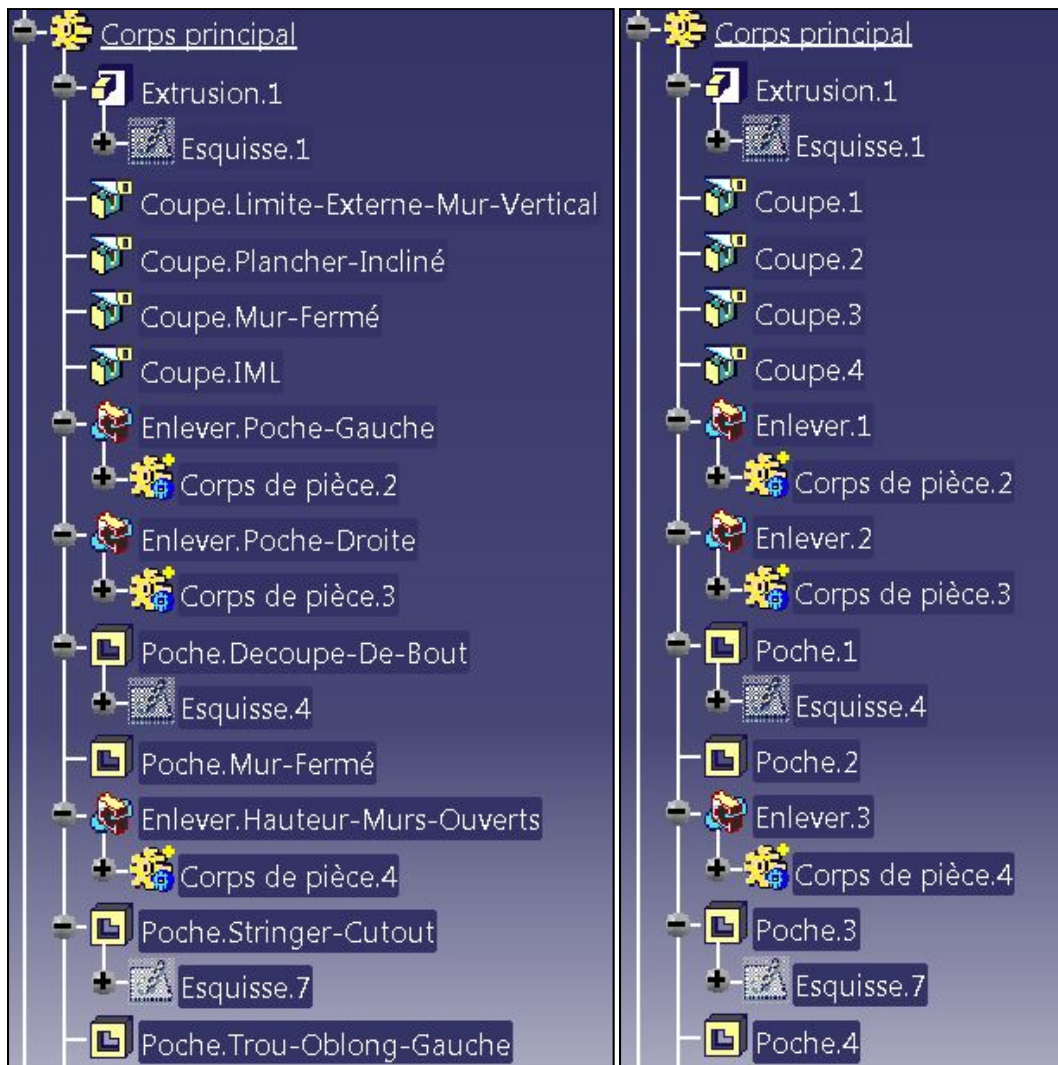


Figure 2.17 Arbre de construction du modèle renommé  
et du modèle non renommé (Corps Principal)



Figure 2.17 Arbre de construction du modèle renommé et du modèle non renommé (Corps principal suite)

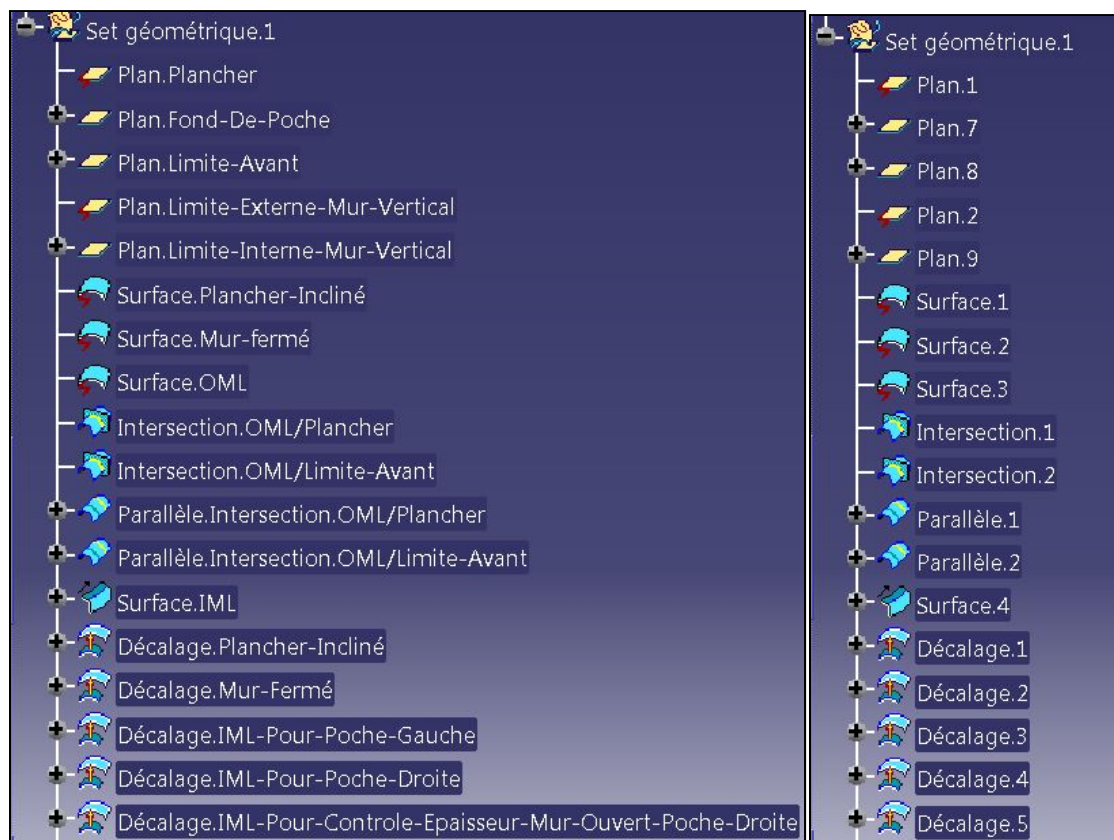


Figure 2.17 Arbre de construction du modèle renommé et du modèle non renommé (Set Géométrique)



Figure 2.17 Arbre de construction du modèle renommé et du modèle non renommé (Set Géométrique suite)

Pour le modèle non renommé, nous avons préservé la dénomination du logiciel CATIA V5<sup>®</sup>. La réorganisation du set géométrique peut s'observer par le fait que la numérotation des éléments ne suit pas un ordre d'apparition croissant. En effet, CATIA V5<sup>®</sup> numérote chaque type d'élément en fonction de son ordre de création. Par exemple, si on prend le plan « stringer » (Plan.3), il s'agit du 3<sup>ème</sup> plan créé, mais l'organisation du set géométrique montre que ce n'est pas le 3<sup>ème</sup> plan utilisé pour modéliser le corps principal. En visualisant cette différence, on constate qu'il y a eu un temps de modélisation représentant le contexte de

création de la pièce et un deuxième temps de réorganisation des éléments dans le but de transmettre l'intention de conception du modèle. Pour la configuration du modèle non renommé, il se peut que ce type de réorganisation ne soit pas effectué dans un cadre industriel et que l'on conserve un set géométrique «as created» (Michaud, 2012, p. 273). Toutefois, pour les besoins de l'expérience, nous avons pris soin que la dénomination soit l'unique différence dans les deux intentions de conception à l'étude.

Le fait de renommer les éléments de l'arbre fait partie de l'intention de conception du modèle. Dans notre cas, nous avons renommé les éléments du 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre de construction. Il s'agit du niveau que CATIA V5<sup>®</sup> ouvre lorsque l'on clique sur Affichage/Arbre/Ouvrir le premier niveau. Il intègre tous les éléments visibles sur la figure 2.16. La dénomination a été réalisée à ce niveau car il s'agit du niveau où il est possible de donner un sens en référence aux parties de la pièce ou au domaine de l'aéronautique à chaque outil CATIA V5<sup>®</sup> utilisé. C'est aussi le niveau où il y a le plus d'éléments. On considère que dès lors que l'on a repéré un bloc d'éléments au 1<sup>er</sup> niveau, comme pour une opération booléenne par exemple, naviguer en son sein est plus facile vu le faible nombre d'élément à parcourir. De ce fait, renommer des éléments à des niveaux inférieurs peut être considéré comme une perte de temps lors de la modélisation. Notre dénomination des éléments conserve la nomination de l'outil CATIA V5<sup>®</sup>. L'intérêt est de préserver l'information de l'outil utilisé pour chaque élément de la pièce modélisée. Seul le numéro d'apparition de l'élément dans la construction est changé par la signification de son utilisation dans le modèle. L'objectif est ainsi de transmettre l'intention de conception sans perdre les informations du logiciel. On pourra évaluer, dans l'étude, si le fait de renommer les éléments dans l'arbre offre une plus-value ou non dans le travail de modification.

La dénomination des éléments peut faire référence à une partie de la pièce, tels que « Coupe.Mur-Fermé », « Poche.Trou-Oblong-Gauche », « Chanfrein.Murs-Ouverts », au domaine spécifié de l'aéronautique, tels que « Poche.Stringer-Cutout », « Surface.OML », etc., et intégrer des explications de conception tel que « Enlever.Controle-Epaisseur-Mur-Ouvert-Poche-Droite », « Centre-Stringer (Intersection.Plan.Stringer/Plancher/IML) », etc.

Les choix de dénomination sont propres au concepteur du modèle. Néanmoins, le fait de les associer à un domaine d'activité spécifique renforce les possibilités d'être compris par les personnes de ce domaine devant travailler le modèle. C'est la raison pour laquelle, nous avons travaillé uniquement avec des étudiants familiers avec la conception de pièces aéronautiques. De plus, pour s'assurer qu'ils soient en phase avec l'appellation de chaque partie de la pièce, nous leur avons proposé un questionnaire sur le langage utilisé dans le modèle renommé et le cahier des charges présentant les tâches de modification.

Le questionnaire (*Voir ANNEXE I*) a pour objectif de faire intégrer les différents termes utilisés lors de l'expérience aux participants. Ce dernier est fourni par papier au début de l'exercice, c'est à dire avant de prendre en main le modèle sur l'ordinateur et de prendre connaissances des tâches de modifications à réaliser. Les étudiants ont une dizaine de minutes pour répondre aux différentes questions et ensuite une correction collective est effectuée avec participations des étudiants.

Le premier exercice du questionnaire est de faire correspondre les termes désignant les différentes parties de la pièce avec les numéros indiqués sur le schéma. Cet exercice permet aux étudiants de prendre connaissance des différents noms utilisés dans l'expérience. Le second exercice consiste à faire la distinction entre un « corner rad » et un « filet rad ». Cet exercice est nécessaire pour réaliser une tâche de modification. La dernière question permet de faire la distinction entre l'OML et l'IML. Lors de la correction, on en profite pour expliquer l'environnement de l'avion dans lequel s'insère la pièce et on donne les détails présentés dans la section 2.3.1 sur les liens entre l'OML et l'IML. De cette manière, les étudiants situent le contexte de conception dans lequel la pièce est réalisée. D'autres informations et explications supplémentaires sur les sujets présentés dans le questionnaire sont fournies à la demande des étudiants. Durant cet exercice, il ne s'agit en aucun cas, d'évaluer la connaissance des participants. Si la présentation se fait sous forme de questionnaire plutôt que sous une forme classique, c'est dans le but de s'assurer que les participants s'intéressent au langage de l'exercice qu'ils s'approprient le sujet. Il s'agit d'une approche d'apprentissage par essai-erreur. A la fin de cette partie de l'expérience, un



exemplaire du corrigé du questionnaire est remis à chaque participant afin de s'assurer qu'ils aient toutes les informations nécessaires pour effectuer le travail demandé.

Ainsi, pour réaliser une expérience nous permettant de répondre aux questions de recherche, il a fallu mettre en place les aspects suivants :

- Faire participer uniquement des étudiants volontaires ayant une formation en conception aéronautique;
- Utiliser un questionnaire pour présenter le langage de l'exercice;
- La construction du modèle doit prendre en compte que le travail de modification est essentiellement un travail de repérage d'éléments.

Il s'agit de trois requis nécessaires pour homogénéiser notre population de participants et obtenir des données exploitables dans la comparaison du travail de modification effectué, respectivement, sur des modèles renommés et non renommés. La section suivante présente les travaux de modification demandés ainsi que les éléments que l'on s'attend à voir modifiés.

### **2.3.3 Présentation des modifications et des repérages attendus**

Comme expliqué dans la section précédente, le travail de modification se veut principalement être un travail de repérage des éléments dont il faut modifier les paramètres. De ce fait, les tâches de modification sont définies dans le but de faire naviguer les participants à travers la plupart des éléments constituant le modèle. Bien qu'il appartienne à chaque participant de naviguer comme il le désire dans le modèle, le travail est construit de telle manière que chaque modification demande l'exploration de nouveaux éléments pour compléter cette dernière. Par ailleurs, que ce soit dans la construction du modèle ou dans la définition des modifications, nous avons limité les activités de conception afin que le niveau de compétence de chaque participant ne vienne affecter les données récoltées.



L'annexe II présente l'exercice de modification à effectuer lors de l'expérience. Il est transmis aux étudiants sous format PDF en même temps de le modèle CAO. La première partie fournit les instructions de mise en place de l'enregistrement vidéo utile à la capture de données. Ensuite, le document présente la pièce : sa description incluant l'environnement auquel elle appartient et ses dimensions. La suite du document concerne les tâches de modification à effectuer. Les modifications tendent à respecter une logique de révision de pièce qu'on peut rencontrer en industrie. Toutefois, le document renseigne uniquement les modifications à réaliser et pas les raisons pour lesquelles les modifications sont réalisées, étant donné que nous nous plaçons dans un cadre fictif. Le détail de chaque tâche comprend un dessin indiquant en rouge les modifications à réaliser et un commentaire présentant l'instruction de modification. Chaque instruction présente la modification en indiquant les paramètres de l'état initial et ceux attendus après le changement. On ajoute aussi quelques indications pour certaines instructions afin d'aider au travail demandé. Il s'agit de favoriser au maximum la compréhension du travail demandé en fournissant les informations nécessaires et suffisantes. Les dessins donnent un visuel du lieu et des paramètres de la modification à effectuer. De plus, les commentaires utilisent le vocabulaire expliqué via le questionnaire fourni en début d'expérience. Toutefois, aucun dessin de l'état final n'est fourni. C'est sur ce point que nous positionnons les étudiants dans une situation similaire à celles de l'industrie. En effet, dans un travail de modification en industrie, les ingénieurs n'ont pas de visuel sur le travail fini. C'est à eux d'estimer si le travail réalisé correspond aux attentes. Il s'agit, pour cette recherche, de s'approcher au mieux des réalités du travail de modification en industrie et, en même temps, de concentrer les efforts de l'analyse sur l'impact de renommer les éléments d'un modèle CAO, en limitant tous les paramètres qui peuvent créer des disparités parmi les populations à l'étude.

Pour expliquer le travail de modification, nous présentons les différentes tâches à effectuer ainsi que les éléments que nous considérons devant être modifiés. Il ne s'agit pas de prétendre qu'il existe une seule et unique méthode pour réaliser un changement avec succès. Les éléments présentés sont ceux dont la modification permet de préserver la robustesse du modèle CAO. Dans la logique d'un travail orienté vers le repérage d'éléments, on s'attend à

ce que les étudiants se dirigent vers ces éléments présentés ci-après. C'est d'ailleurs sur les processus qui amènent à ces éléments que l'on souhaite récolter des données permettant de répondre aux questions de recherche. Par ailleurs, les pratiques de modification observées feront l'objet d'une étude qualitative afin de constater ce qui a été fait par les étudiants.

La première instruction concerne des modifications d'épaisseurs de murs et du plancher. L'élément à modifier pour l'augmentation de l'épaisseur du plancher est le «Plan.Fond-De-Poche» sur le modèle renommé et le «Plan.7» sur le modèle non renommé. Il s'agit d'augmenter le décalage de ce plan. Pour l'augmentation de l'épaisseur du mur fermé, l'élément à modifier est le «Décalage.Mur-Fermé» sur le modèle renommé et le «Décalage.2» sur le modèle non renommé. Il s'agit d'augmenter la distance de cette surface par rapport à sa référence. Pour l'augmentation de l'épaisseur du mur ouvert entre les machined-steps extérieur et intérieur de la coupe C-C, l'élément à modifier est le «Décalage.IML-Pour-Contrôle-Epaisseur-Mur-Ouvert-Poche-Droite» sur le modèle renommé et le «Décalage.5» sur le modèle non renommé. Il s'agit de modifier la distance de la surface par rapport à sa référence. Pour l'augmentation de l'épaisseur du mur intérieur, l'élément à modifier est le «Plan.Mur-Intérieur-Limite-2» sur le modèle renommé et le «Plan.11» sur le modèle non renommé. Il s'agit de modifier le décalage du plan.

La seconde instruction concerne l'agrandissement de l'écart entre le machined-step gauche et l'inner machined-step gauche. Pour cela, on s'attend que les participants modifient le décalage du plan «Plan.Inner-Machined-Step-Plane-Gauche» sur le modèle renommé et celui du plan «Plan.12» sur le modèle non renommé. La troisième instruction de modification concerne le déplacement de la découpe stringer. Cette instruction implique le déplacement de plusieurs éléments. Le parti pris a été de décomposer les étapes de modification afin de faciliter la compréhension des instructions de modification. La première étape concerne le déplacement du mur intérieur. L'élément à déplacer est le plan «Plan.Mur-Intérieur-Limite-1» sur le modèle renommé et le plan «Plan.10» sur le modèle non renommé. Pour l'étape 2, il s'agit de déplacer le machined step extérieur central. Le plan «Machined-Step-Plane-Centrale» sur le modèle renommé et le plan «Plan.10» étant isolés, il s'agit de les remplacer

par un nouveau plan en préservant les ramifications qui leur appartiennent avec d'autres éléments. La manière la plus efficace pour cela est d'utiliser l'outil «Remplacer». L'explication concernant cet outil se trouve à la section 2.1.3. La troisième étape concerne le déplacement de la découpe stringer. De la même manière que pour le déplacement du machined-step extérieur central, il s'agit de remplacer le plan «Plan.Stringer» sur le modèle renommé et le plan «Plan.3» sur le modèle non renommé par un nouveau plan. Enfin la quatrième étape concerne la résolution de l'incohérence d'apparition de matière que les opérations précédentes ont créée au niveau de l'inner machined-step gauche. Pour cela, il s'agit d'agrandir «Esquisse.11» du sous-élément «Extrusion.6» dans l'élément «Enlever.Inner-Machined-Step-Gauche» du modèle renommé et dans l'élément «Enlever.8» du modèle non renommé.

Jusque-là, les modifications concernent des changements de surfaces et plans tous présents dans le set géométrique mais à des endroits différents du B-rep. Hors, comme expliqué dans la présentation de la méthode de construction du modèle, tous ces plans et surfaces déterminent la modélisation d'éléments du corps principal. Par conséquent, pour repérer un élément du set-géométrique à modifier, on s'attend à ce que les participants explorent les relations entre les éléments. C'est-à-dire qu'ils s'appuient soit sur l'arbre de construction, soit sur le B-Rep pour repérer quelles sont les éléments qui ont permis de construire chaque partie du modèle et, qu'à travers l'analyse des relations entre les éléments, ils déterminent l'élément dont les paramètres doivent être modifiés. Il s'agit d'observer si le fait de renommer les éléments modifie les utilisations de l'arbre de construction et du B-Rep dans le processus de repérage ainsi que dans l'analyse des relations entre les éléments. Pour favoriser ce travail des participants, on décide de fournir le modèle CAO en démarrage d'exercice avec l'intégralité du set géométrique caché. C'est-à-dire que le B-Rep présente la pièce sans les éléments géométriques. Ils sont présents dans l'arbre de construction mais indiqué non visible sur le B-Rep. Plus de détails sur la commande «Afficher/Cacher» des éléments sont présentés à la section 3.1.3.

Les instructions suivantes concernent des modifications d'éléments du corps principal. Pour la quatrième instruction, il s'agit donc de modifier le diamètre du «Trou.1» sur les modèles renommés et non renommés. Pour cette modification, les participants ont le choix de passer par l'arbre de construction ou le B-Rep. A priori, les deux méthodes sont équivalentes et amènent au même résultat quel que soit le modèle sur lequel les étudiants travaillent. Toutefois, il s'agit, encore une fois de constater si le fait de renommer des éléments change la manière d'aborder un modèle. En d'autres termes, est ce qu'un étudiant travaillant sur un modèle renommé va avoir tendance à s'orienter plus naturellement vers l'arbre de construction par rapport à un étudiant travaillant sur un modèle non renommé ?

La cinquième instruction de modification concerne le changement de rayon des congés des inner machined-steps. Pour cela, il faut s'orienter vers le sous élément «Congé arête.10» de l'élément «Enlever.Inner-Machined-Step-Gauche» sur le modèle renommé et de l'élément «Enlever.8» sur le modèle non renommé, ainsi que le sous élément «Congé arête.12» de l'élément «Enlever.Inner-Machined-Step-Droit» sur le modèle renommé et de l'élément «Enlever.9» sur le modèle non renommé.

La dernière instruction concerne l'allongement du trou oblong gauche. Pour cela, il suffit de changer la distance entre les centres des deux demi-cercles. Cette opération peut se faire à travers l'élément du corps principal «Poche.Trou-Oblong-Gauche» sur le modèle renommé et «Poche.4» sur le modèle non renommé, ou bien via l'élément du set géométrique «Esquisse.Poche.Trou-Oblong-Gauche» sur le modèle renommé et «Esquisse.8» sur le modèle non renommé.

Les trois dernières instructions concernent des modifications où le travail peut être effectué dans l'arbre de construction ou le B-Rep sans entreprendre un grand travail de recherche des éléments. On souhaite évaluer par là si les participants travaillant sur un modèle renommé orientent une plus grande part de leur travail dans l'arbre de construction par rapport aux participants travaillant sur un modèle non renommé pour un processus d'action ne demandant pas un travail de compréhension important.

Le travail de modification est enregistré par capture vidéo. Il s'agit du support qui permet d'observer les pratiques de modification de chaque participant et d'extraire les informations nécessaires à nos analyses. Le chapitre suivant apporte plus de détails à ce sujet. Il faut savoir que pour mettre un terme à la capture vidéo, chaque modèle doit être vérifié par l'organisateur de l'expérience dès que le participant estime avoir complété l'intégralité des modifications. Pour cela, on utilise l'outil de comparaison de produits sur CATIA V5<sup>®</sup> permettant de visualiser les différences entre le B-Rep modifié d'un participant et le B-Rep de contrôle. Ce dernier représente le B-Rep final attendu. En effet, on considère que le travail de modification est complété dès lors que le B-Rep final correspond à la pièce modifiée espérée. La figure 2.18 met en évidence la visualisation des différences entre les deux B-Rep. Les parties jaunes représentent les parties communes au B-Rep à vérifier et celui de contrôle. En rouge, il s'agit des zones du B-Rep du participant que l'on ne retrouve pas sur le B-Rep de contrôle. En vert, il s'agit des zones du B-Rep de contrôle que n'existent pas sur le B-Rep.

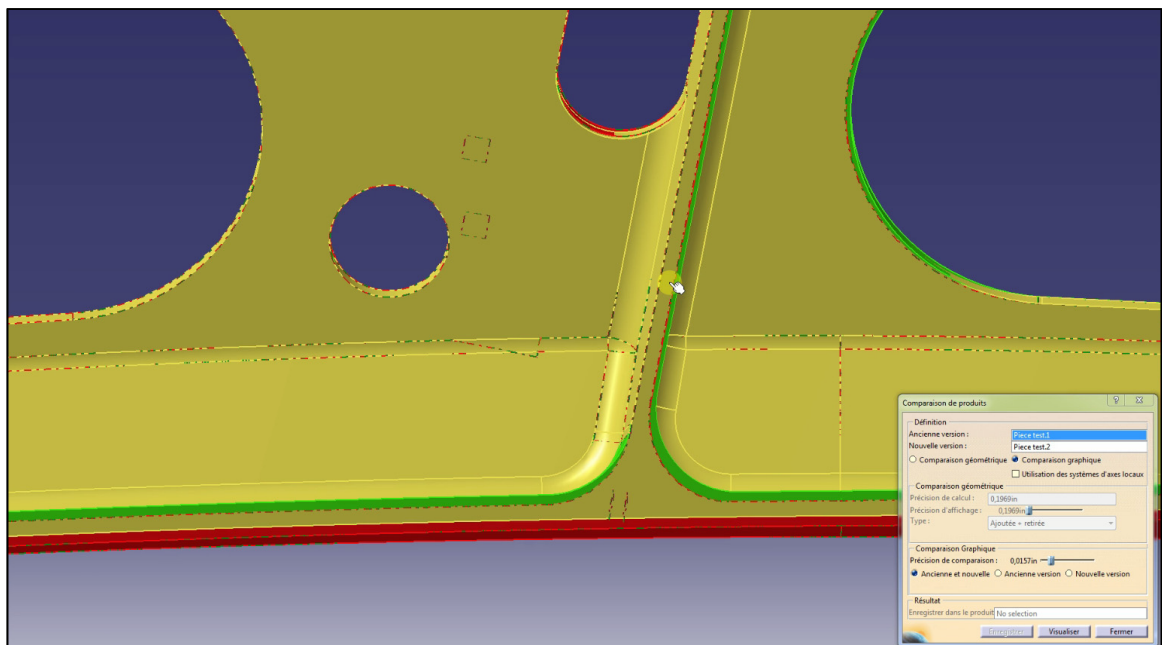


Figure 2.18 Comparaison de produits

On estime le travail de modification complété lorsqu'il n'y a plus de différences entre le modèle du participant et le modèle de contrôle.

## **2.4 Synthèse de l'organisation de l'expérience**

Afin d'obtenir des résultats sur l'impact de renommer des éléments dans la modification d'un modèle CAO, nous procédons à la comparaison du travail de modification entre une population de participants s'affairant sur un modèle renommé, et une autre population de participants s'affairant sur un modèle non renommé. L'organisation de l'expérience et les choix effectués aux sujets des participants, du modèle et de sa construction, des instructions de modification et du langage utilisé sont à prendre en compte pour atteindre cet objectif. En effet, il existe certains facteurs pouvant influencer les résultats (*Voir* Tableau 2.1). Pour réduire l'influence de ces facteurs, il s'agit donc d'établir un cadre à l'expérience minimisant leurs variations afin que le facteur principal d'influence des résultats soit la dénomination des éléments.

Tableau 2.1- Facteurs d'influence des résultats

Les Facteurs	Leur influence
<b>Le domaine d'activité</b>	Il définit les pratiques de modélisation, le choix des éléments et le langage utilisé.
<b>Le niveau de compétence des participants</b>	Il définit la capacité d'un participant à explorer un modèle CAO ainsi qu'à mener des actions de modification.
<b>Le nombre de participants par groupe</b>	Il définit la taille des populations à l'étude. Plus il y a de participants, plus il y a de chance d'obtenir des distributions normales et aussi de réduire les seuils de signification des résultats.
<b>Les choix de pièce et d'intention de conception du modèle</b>	Ils influencent le niveau de complexité du modèle mais aussi déterminent sa modélisation et l'organisation de l'arbre de construction qui jouent un rôle sur la robustesse du modèle.
<b>Les choix de modifications à réaliser</b>	Ils influencent le travail d'exploration du modèle nécessaire pour déterminer quels éléments sont à transformer ou remplacer, ainsi que les actions de modification en elles-mêmes.
<b>Les choix de dénomination</b>	Ils définissent l'information que l'on souhaite apporter au modèle. Cette dernière doit être pertinente pour le travail de modification à effectuer et compréhensible par les participants.

C'est la raison pour laquelle, nous avons mis en place certains prérequis à la mise en place de l'expérience. Les prérequis suivants permettent de limiter les disparités au sein et entre les

populations à l'étude. De cette manière, la seule différence notable entre eux est le fait de travailler sur un modèle renommé ou non renommé.

- Intégration de l'expérience dans un domaine d'activité spécifique : Il s'agit de disposer d'un langage précis avec lequel communiquer. En effet, chaque domaine possède son propre langage et ses propres définitions. Si nous renommons les éléments d'une pièce, il est important que les termes utilisés soient compréhensibles par les personnes qui interagissent avec la pièce. C'est le seul et unique contexte dans lequel le fait de renommer des éléments pourrait maximiser l'impact dans le travail de modification.

Dans notre étude, nous avons choisi le domaine de l'aéronautique car nous disposons d'un bassin significatif d'étudiants en conception aéronautique. Par conséquent, c'est un domaine dans lequel il nous est possible de constituer des groupes de participants capables de comprendre le langage utilisé. Le choix de la pièce à modifier et des termes utilisés pour renommer les éléments se sont donc portés vers ce domaine aussi.

- Participation volontaire d'étudiants qualifiés de novices avancés : L'expérience est proposée uniquement à des étudiants capables de comprendre le langage aéronautique employé et pour qui la conception de la pièce utilisée est familière. De cette manière, il est possible de demander aux participants de réaliser des modifications sur un modèle dit complexe où le travail de recherche des éléments est essentiel et où le repérage de ces derniers dans l'arbre pourrait avoir un impact. Faire participer uniquement des étudiants volontaires s'intègre dans les conditions éthiques de l'expérience. Il apporte aussi l'assurance que les étudiants soient motivés à se prêter à l'exercice.
- Choix d'une conception détaillée à visée robuste et dont le travail de modification passe par une lecture des relations entre les éléments afin d'identifier ceux à modifier : la conception détaillée d'un modèle dit complexe permet de varier les paramètres de la pièce à changer. La construction de notre modèle tend à être la plus robuste possible. Ainsi, les participants n'ont pas à re-modéliser en profondeur la pièce. Nous désirons limiter l'influence des compétences de modélisation des



participants dans le travail demandé. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous orientons le travail de modification vers un travail d'examen des relations entre les éléments pour déterminer lequel doit être transformé. La raison essentielle est d'amener le participant à effectuer un effort de compréhension du modèle pour réussir l'exercice. Cette construction offre ainsi la capacité d'évaluer l'impact de renommer les éléments d'un modèle CAO dans le travail de modification.

- Réorganisation des éléments du set géométrique : Si les étudiants sont amenés à lire le modèle pour réaliser les modifications, il faut rendre celui-ci lisible. Nous avons donc réorganisé les éléments du set géométrique pour que la lecture suive l'ordonnancement des éléments du corps principal.
- Réalisation d'un questionnaire pour transmettre le langage de l'expérience : Même si nous sélectionnons une population capable de comprendre le langage de l'expérience, il est important de s'assurer que les participants connaissent tous les termes utilisés. C'est l'objectif du questionnaire. Il s'agit de laisser les étudiants s'autoévaluer à ce sujet. C'est un format stimulant pour l'apprentissage du langage dans la continuité du cadre global de l'expérience.

Ainsi, les résultats obtenues permettent de réaliser des conclusions sur l'impact de renommer des éléments dans le cadre de l'expérience mise en place. Le prochain chapitre porte sur la seconde partie de la méthodologie de recherche au sujet de la démarche d'extraction et d'analyses des données.



## **CHAPITRE 3**

### **DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE : TRAITEMENT DES DONNÉES**

Dans cette partie, nous présentons la manière dont les données à l'étude sont récoltées, compilées et analysées. Comme présenté dans l'introduction, l'analyse que nous souhaitons faire porte sur les temps de modification, et notamment de compréhension du modèle et d'exécution des modifications. Nous souhaitons également analyser les pratiques de modification de chacun des groupes de participants, que ce soit dans et hors de l'arbre, ou dans l'utilisation de commandes dédiées au repérage d'éléments. Notre plan d'analyse se base donc sur une étude statistique afin de tirer des conclusions significatives et sur une étude qualitative basée sur la compilation d'observations dans le but d'apporter des constats pertinents. Nous présentons dans ce chapitre, les processus de capture et d'extraction des données ainsi que de traitement qui se conclut par le plan d'analyse mis en place.

#### **3.1 Processus de capture et d'extraction des données**

##### **3.1.1 Capture vidéo**

Pour enregistrer le travail de modification de chaque participant, nous avons réalisé des captures vidéo de l'écran d'ordinateur. Pour cela, nous avons utilisé l'outil Screenpresso<sup>®</sup>. Il a été choisi car il possède un mode portable permettant de lancer automatiquement l'outil de capture vidéo. Cette fonctionnalité a permis de faciliter les préparatifs de l'expérience puisqu'il n'y a pas eu besoin de l'intervention des services informatiques pour mettre en place de nouveaux logiciels.

Le logiciel enregistre l'intégralité des faits à l'écran. Pour observer l'impact de renommer des éléments d'un modèle, nous ne nous intéressons qu'à l'interaction des étudiants avec le modèle CAO. Filmer physiquement l'utilisateur ne nous apporte aucune information pertinente et entrerait en conflit avec l'éthique de la recherche au sujet de l'anonymat des

participants. Le travail de modification a été construit de manière à ce que toutes les activités se fassent sur l'ordinateur. Le cahier des charges a été remis sous format PDF uniquement. De cette manière, nous pouvons observer et dissocier les moments où l'étudiant lit les instructions de ceux où il travaille dans le système CAO. Ainsi, il sera possible de supprimer tous les moments où les participants ne manipulent pas le modèle CAO dans le cadre d'une modification. En effet, seuls les instants où le participant travaille sur le modèle nous intéressent. Nous supprimons de l'analyse de données tous les instants autres que ceux où le fait de renommer des éléments du modèle CAO peut avoir des répercussions dans la modification. Les détails des données récoltées sont présentés au chapitre suivant.

Dans l'enregistrement des données, chaque étudiant a un numéro assigné. Nous donnons un numéro pair aux étudiants travaillant avec un modèle non renommé et un numéro impair aux étudiants travaillant avec un modèle renommé. Il est demandé à chaque étudiant de copier le modèle initial et de renommer le modèle copié en y indiquant le numéro attribué. Le fait de copier le modèle permet aussi aux participants ayant effectué trop d'erreurs dans l'exercice de reprendre le travail au départ au besoin. Le travail terminé et vérifié par l'organisateur de l'expérience, l'étudiant arrête l'enregistrement vidéo. Pour chaque participant, le modèle modifié et l'enregistrement vidéo sont stockés dans un dossier comportant le numéro du participant. Ces deux fichiers constituent les données brutes utiles à l'étude. C'est-à-dire que les données utilisées lors des analyses seront extraites de ces fichiers. La vidéo est le support des interactions où on extraira les données nécessaires à nos analyses. Le modèle CAO permet de s'intéresser aux détails des modifications effectuées afin d'aider à la compréhension du visionnement de la vidéo.

### **3.1.2 Extraction des données**

Pour l'extraction des données, on décompose l'enregistrement vidéo en modifications successives. Chaque modification est analysée de la même manière. On considère qu'une modification est séquencée par des phases de compréhension et des phases d'action rythmées par des reprises potentielles jusqu'au succès de la modification. Pour chaque phase, on

recupère le temps passé dans l'arbre de construction et hors de l'arbre de construction qui, à deux, définissent le temps total de la phase. Pour affiner nos mesures, nous supprimons les temps « autre » afin de ne garder que les moments effectifs d'activités de modification sur CATIA V5<sup>®</sup>. A noter aussi qu'en ce qui concerne le temps dans l'arbre, on distingue le temps passé au premier niveau (où il y a eu un travail de dénomination), le temps passé à des niveaux inférieurs et le temps passé dans le panneau Parents et enfants. Au sujet des commandes, nous avons répertorié celles que les participants ont utilisées, ainsi que leur fréquence d'utilisation, dans l'arbre et hors de l'arbre. Nous nous sommes intéressés uniquement aux commandes axées sur le repérage d'éléments et les relations entre eux.

Pour mieux comprendre le travail d'extraction des données, les termes employés dans la description sont définis ci-dessous :

- **La phase d'action** d'une modification débute lorsque le participant clique sur un élément dans le but de le modifier ou encore lorsqu'il crée un nouvel élément. Toutes les manipulations qui s'en suivent pour vérifier ou comprendre son action et ses conséquences s'inscrivent dans cette phase. Une action se termine par le passage à une autre modification en retournant au cahier des charges, lorsque le participant annule l'action effectuée, ou encore lorsque l'étudiant reprend un travail d'exploration à travers le modèle pour comprendre comment réaliser la modification.
- **La phase de compréhension** d'une modification représente tous les moments où le participant cherche à comprendre la construction, à identifier le lieu de la modification ou à déterminer l'élément qu'il juge devoir modifier. Cette phase se termine lorsque le participant débute une phase d'action ou passe à une phase de compréhension pour une autre modification. Cette dernière s'identifie par un changement de zone de recherche ou l'étude d'une autre modification sur le cahier des charges.
- **Le niveau 1 de l'arbre** correspond aux éléments de premier niveau de l'arbre de construction. C'est à ce niveau que l'action de renommer a été effectuée. Il comprend

aussi tous les éléments du set géométrique et leur paramètre du fait que ces derniers ont aussi été renommés. Il s'agit du niveau que CATIA V5® ouvre lorsque l'on clique sur Affichage/Arbre/Ouvrir le premier niveau.

- **Les niveaux inférieurs de l'arbre** correspondent aux éléments de 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur. Il s'agit des éléments où il n'y a pas eu de dénomination. On trouve à ces niveaux les corps principaux des éléments booléens, les esquisses du corps principal et tous les niveaux qui en découlent.
- **Le panneau Parents et enfants** montre les liens de parenté d'un élément sélectionné. En effet, sur CATIA V5®, un modèle est composé d'éléments qui sont, d'une manière ou d'un autre, liés les uns aux autres. A l'ouverture du panneau Parents et enfants d'un élément, on observe les éléments parents de ce dernier, c'est à dire les éléments dont sa construction dépend, ainsi que ses éléments enfants, c'est à dire les éléments dont la construction dépend de cet élément. On peut le définir comme un arbre de construction n'indiquant que les éléments liés à l'élément sélectionné (*Voir Figure 3.1*). C'est la raison pour laquelle le temps passé dans ce panneau est considéré comme du temps dans l'arbre.

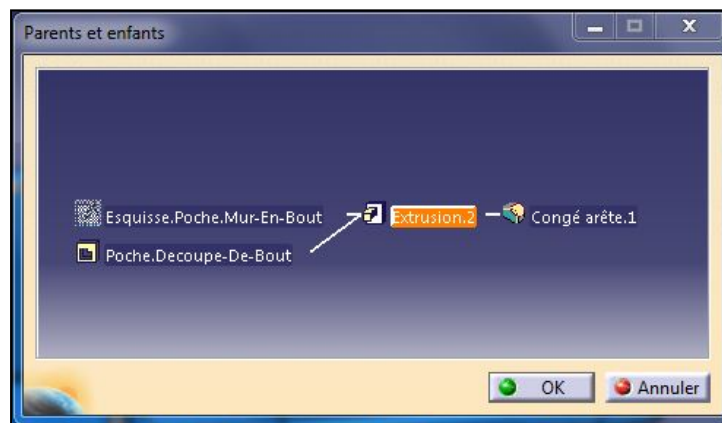


Figure 3.1 Panneau Parents et enfants  
de « Extrusion.2 »

- **Le temps passé dans l'arbre** correspond aux moments où le participant navigue dans l'arbre de construction. C'est la somme du temps passé au niveau 1, celui passé aux niveaux inférieurs de l'arbre et celui passé dans les panneaux Parents/Enfants.
- **Le temps passé hors de l'arbre** correspond à tous les autres moments que l'on définit comme les moments où le participant manipule et travaille avec le B-Rep ainsi que les moments passés dans des panneaux CATIA V5® : panneaux de définition d'éléments, panneau de dialogue des mises à jour, etc. Les moments passés dans les esquisses et à interagir avec des éléments du set géométrique directement sur le B-rep sont aussi inclus dans le temps passé hors d'arbre.
- **Les temps « autre »** comprennent les temps passés à lire les instructions dans le cahier des charges, les temps d'inactivité sur l'écran ou encore les temps à modifier des paramètres du logiciel, tels que l'unité de mesure ou le passage d'un environnement à un autre.
- **Le temps total d'une phase** correspond à la somme du temps passé dans et hors de l'arbre dans le cadre d'une séquence vidéo de compréhension ou d'action délimitée, auquel on soustrait tous les temps « autre » de cette séquence.
- **Une reprise** définit un changement de travail (phase de compréhension ou phase d'action) suite à l'échec de cette dernière : soit le participant abandonne une phase d'action pour réaliser un travail d'exploration du modèle concernant la même ou une autre modification, soit il abandonne un travail d'exploration concernant une modification pour réaliser un travail d'exploration concernant une autre modification, soit le travail n'a pas abouti au repérage du bon élément ou à la réalisation de la modification attendue.

- **Le temps total d'une modification ou temps de travail d'une modification** correspond à la somme des temps totaux de toutes les phases de compréhension et d'action qui lui correspondent.

Nous avons opté pour une approche binaire d'extraction des données : phase de compréhension /phase d'action et travail dans l'arbre/travail hors de l'arbre pour chaque phase. Il s'agit de diviser le travail en ensembles strictement indépendants où les distinctions se basent directement sur des observations et non pas sur une interprétation de ces dernières. Les limites des phases de compréhension et d'action sont observables par des manœuvres identifiables. De même, les moments passés dans l'arbre et hors de l'arbre sont identifiables en suivant les déplacements du curseur à l'écran, les défilements de l'arbre de construction, la manipulation du B-Rep ou l'ouverture de panneaux CATIA V5®. Le choix d'une approche binaire est aussi dû au nombre de participants. Au vu de la petite taille de nos groupes, il est nécessaire de regrouper les informations dans des ensembles afin d'avoir un nombre suffisant de données pour réaliser une analyse statistique apportant des réponses au sujet de l'étude. Ainsi, le regroupement des informations cible les aspects où la dénomination a un impact potentiel, soit où les différences entre le modèle renommé et celui non renommé sont présentes ainsi que les phases de travail pertinentes à analyser dans les tâches de modification.

L'extraction des données s'effectue à l'aide d'un tableur Excel (*Voir* Tableau 3.1). De cette manière, on séquence l'enregistrement vidéo d'un participant en phases consécutives. Il s'agit d'inscrire pour chaque séquence vidéo : sur quelle modification le participant travaille, s'il s'agit d'une phase de compréhension ou d'action, la seconde de démarrage et de fin de la séquence vidéo, le temps « autre », le temps passé dans l'arbre (au 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieurs et dans le panneau Parents et enfants), le nombre de fois qu'une commande a été utilisée dans l'arbre et hors de l'arbre. A ce stade de l'étude, nous ne savons pas encore s'il est possible de traiter les commandes séparément pour l'analyse statistique ou si nous devons faire un regroupement des commandes utilisées. Toutefois le fait de répertorier les



commandes utilisées lors du travail de modification va nous permettre de tirer des conclusions sur l'observation de la fréquence de leur utilisation par les participants.

Tableau 3.1 Tableur d'extraction des données

PARTICIPANT N°	X		
MODELE	RENOMME		
MODIFICATION		1A	1A
PHASE		COMPREHENSION	ACTION
Temps de début (Min)			
Temps de fin (Min)			
Temps «autre» (Sec)			
Temps dans l'arbre	1er Niveau (Sec)		
	2ème Niveau ou inf. (Sec)		
	Parents/enfants (Sec)		
Commandes dans l'arbre	Afficher/cacher		
	Activer/Désactiver		
	Centrer sur		
	Définition de l'objet de travail		
	Parent/enfant		
	Propriété		
	Modifier le support d'esquisse		
	Clique sur un élément du Coprs 1er niveau		
	Clique sur un élément du Coprs 2ème niveau ou inf.		
	Clique sur un élément du Set Géométrique		
Commandes sur le B-rep ou Panneau	Afficher/cacher		
	Activer/Désactiver		
	Centrer sur le graphe		
	Définition de l'objet de travail		
	Parent/enfant		
	Propriété		
	Clique sur un élément du Coprs 1er niveau		
	Clique sur un élément du Coprs 2ème niveau ou inf.		
	Clique sur un élément du Set Géométrique		
Succès ?		OUI	NON
Commentaire			

Le tableur se compose de plusieurs feuillets. Chaque feuillet représente les données d'un participant. L'extraction de données démarre par l'inscription du numéro du participant et si le modèle à modifier a été « renommé » ou « non renommé ». Ensuite, il s'agit de séquencer le travail effectué en fonction des observations. Pour chaque séquence, on inscrit la modification en cours, s'il s'agit d'une phase de compréhension ou d'action, et le temps de la

vidéo où la séquence a démarré. Ensuite commence le travail d'extraction de données. On incrémente le temps passé dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau, 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur et dans le panneau Parents et enfants. On prend soin d'incrémenter aussi le nombre de fois où une commande a été utilisée. Enfin, il s'agit d'incrémenter tous les temps « autres » et aussi d'indiquer des commentaires sur les pratiques observées dans le but d'en tirer des observations qualitatives. Une séquence se conclut en indiquant si c'est un succès ou non. On considère qu'une phase de compréhension est réussie lorsque le participant a repéré l'élément que l'on avait identifié devant être modifié ou si la phase d'action qui s'en suit a permis d'obtenir le résultat final attendu. De ce fait, une phase d'action est réussie uniquement si le résultat final correspond aux attentes de l'instruction du cahier des charges. Au terme d'une séquence, on inscrit le temps de la vidéo où elle se termine. La différence du temps de démarrage et du temps de fin, à laquelle on soustrait le temps « autre » et la durée dans l'arbre, permet d'obtenir le temps de la phase sur le modèle hors de l'arbre. De cette manière, nous capturons des données tout au long de la lecture des enregistrements vidéo et ainsi avons une vision du nombre de reprises en suivant le nombre de phases ne s'étant pas terminées par un succès.

### **3.1.3 Introduction et méthodologie d'extraction des commandes**

Certaines commandes CATIA V5® à l'étude permettent d'aider à la navigation dans le modèle, de faire le lien entre les éléments de construction du modèle et donc d'en comprendre la construction. Ils présentent la même utilité que celle accordée à la dénomination. De ce fait, nous avons décidé d'intégrer ces commandes, dites de repérage, à notre étude, pour savoir s'il y a des différences d'utilisation de ce type de commandes, entre un groupe travaillant sur un modèle renommé et celui qui travaille un modèle non renommé. Il s'agit d'observer aussi si les commandes ou la dénomination influent l'un sur l'autre.

Ce chapitre présente la définition des commandes (Tickoo, 2014 ; Cozzens, 2006), dans le but de comparer cette dernière avec les pratiques observées dans notre étude lors de la présentation des résultats. Dans l'extraction des données, nous nous sommes intéressés au

nombre d'utilisations des commandes et non pas au nombre d'éléments qu'ils impliquaient. Ainsi, lorsqu'un participant utilise une de ces commandes sur un ou plusieurs éléments, nous n'incrémentons que d'une unité par utilisation dans le tableur. Puisque certaines commandes présentées n'impliquent qu'un élément par utilisation, il s'agit ainsi de traiter toutes les commandes observées de la même manière. Cette homogénéisation de l'extraction des commandes permettra ensuite de les comparer à travers une analyse statistique. Ainsi, nous désirons tirer des conclusions sur les manières et fréquences d'utilisation des commandes de repérage.

- **Afficher/Cacher** : Cette commande est utilisée pour cacher des éléments dans l'espace « non visible » via le B-Rep ou l'arbre de construction. Il s'agit d'un espace différent de celui de travail, dit « visible » : les éléments cachés y sont stockés. Il existe un outil pour passer d'un espace à l'autre appelé « Afficher les objets cachés/affichés ». L'intérêt de l'outil « Afficher/Cacher » est de préserver dans l'espace « visible » uniquement les éléments du modèle qui nous intéressent à un instant donné. Pour l'extraction des données, du fait que c'est le nombre d'utilisations qui est incrémenté, et non pas le nombre d'éléments affichés/cachés, les commandes « Afficher/Cacher » (*Voir* Figure 3.2) et « Afficher les objets cachés/affichés » (*Voir* Figure 3.3) ont été comptés au même endroit. En effet, toutes deux répondent à la même action d'afficher ou de cacher des éléments.




Figure 3.2 Afficher/Cacher



Figure 3.3 Afficher les objets cachés/affichés

- **Activer/Désactiver** : Lorsqu'un élément est désactivé dans le modèle, il n'a plus d'influence dans le calcul du B-rep. Cela permet de désactiver un élément que l'on ne souhaite pas voir interagir dans une manipulation du modèle sans pour autant le

supprimer. L'élément n'est pas pris en compte dans le calcul du B-Rep à la différence d'un élément caché où seule sa visualisation disparaît mais pas son influence. Lorsque l'on désactive un élément, il est possible de choisir de désactiver ses enfants et agrégations. Les enfants sont tous les éléments dont la construction dépend de l'élément parent et les agrégations représentent les esquisses qui ont permis la construction de l'élément. On identifie par le symbole , dans l'arbre de construction, un élément désactivé. La figure 3.4 montre l'élément « Poche.Trou-Oblong.1 » désactivé sans la désactivation de son esquisse (l'esquisse est affichée pour la démonstration). Cette commande s'utilise dans l'arbre et le B-Rep en réalisant un clic droit sur l'élément désiré dans l'onglet Objet « Nom de l'élément »/Désactiver ou Activer. La manière de désactiver et activer un élément est la même.

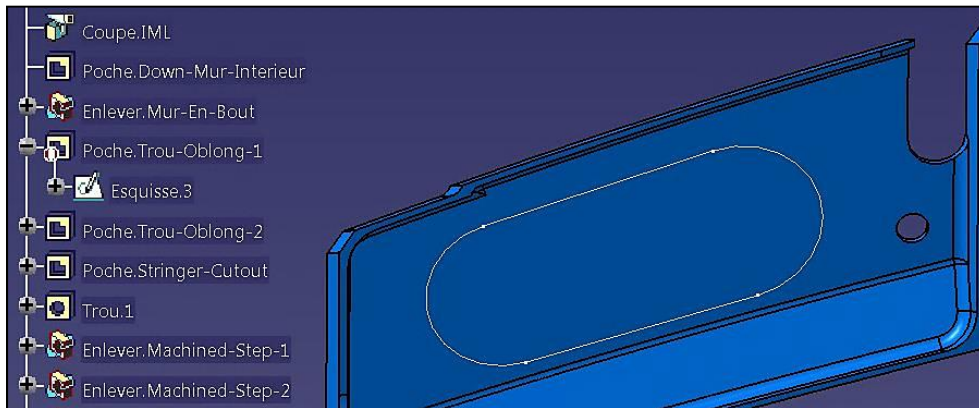


Figure 3.4 Désactivation de Poche.Trou-Oblong-1

- **Centrer sur/Centrer sur le graphe :** « Centrer sur » permet de centrer l'affichage du B-Rep sur un élément de l'arbre et « Centrer sur le graphe » permet de centrer l'affichage d'un élément de l'arbre sur le B-Rep. Cet outil permet de repérer rapidement un élément dans l'arbre ou le B-Rep. La commande est disponible dans le menu contextuel sur l'arbre et le B-Rep. L'élément que l'on désire repérer sur l'arbre ou le B-Rep apparaît en orange sur le modèle.

- Définition de l'objet de travail :** Il s'agit d'un processus permettant d'afficher le B-Rep correspondant à une étape intermédiaire de la modélisation. De cette manière, les éléments qui ne sont pas inclus dans l'objet de travail spécifié, ne sont pas pris en compte dans le calcul du B-Rep à afficher. Dans le manuel de Tickoo (p.7-10, 2014), il est indiqué que cette commande permet de positionner un nouvel élément juste après l'objet de travail. De plus, pour modifier un élément dans un modèle complexe, Tickoo recommande de définir l'objet de travail à son niveau afin d'effectuer la modification. Cet outil est disponible dans le menu contextuel sur l'arbre et sur le B-Rep. La figure 3.5 montre l'état de la modélisation au niveau de l'élément « Enlever.Poche-Gauche ». On remarque que les éléments qui suivent ne sont pas pris en compte dans le calcul du B-Rep à afficher.

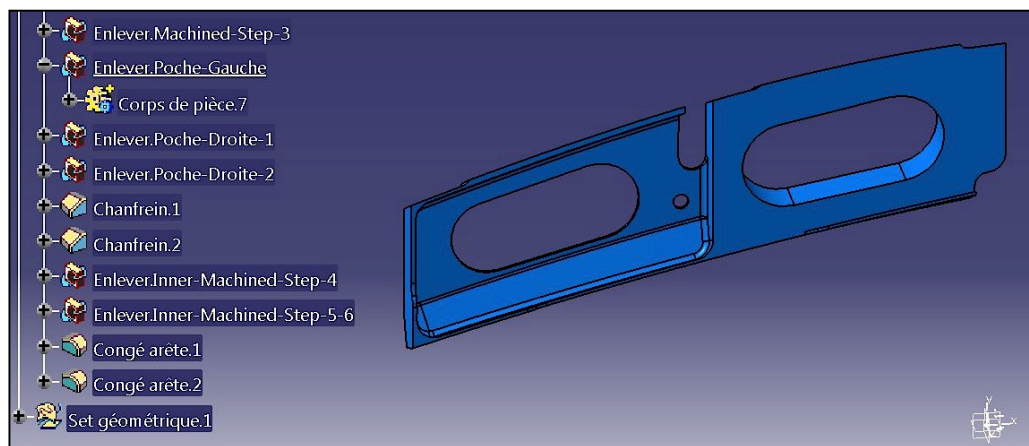


Figure 3.5 Définition de l'objet de travail "Enlever.Poche-Gauche"

- Modifier le support d'esquisse :** Cette commande est accessible dans le menu contextuel associé à une esquisse depuis l'arbre ou le B-Rep. Elle permet d'accéder au support d'esquisse et de le modifier (*Voir* Figure 3.6). La modification peut spécifier un nouveau plan de support de l'esquisse, l'origine ou encore l'orientation de l'esquisse sur son plan de support. Nous l'intégrons au groupe de commandes de repérage car elle est utile au repérage du plan de référence des esquisses.

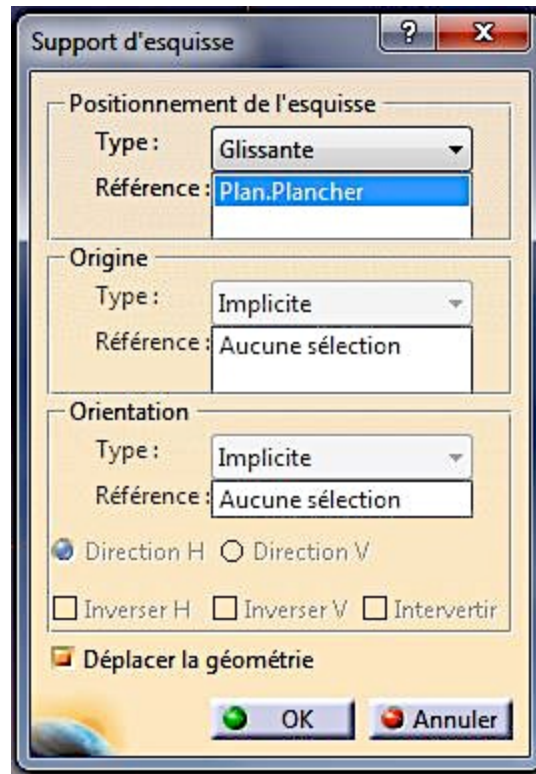


Figure 3.6 - Support d'esquisse de "Esquisse.1"

- **Parents et enfants :** Cette commande a déjà été définie lors de la section précédente. Elle permet d'identifier les liens de dépendance d'un élément en particulier et d'ainsi prévoir l'étendue des répercussions d'une modification de ce dernier. Dans le travail d'extraction de données, on isole ces mesures car il s'agit d'une représentation sous forme d'arbre différente de l'arbre de construction.
- **Propriété :** Cette commande permet d'activer ou désactiver l'élément sélectionné, de modifier son nom ainsi que ses propriétés graphiques. Nous intégrons cet outil dans les commandes de repérage pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle intègre les mêmes fonctions que l'outil « Activer/Désactiver ». Ensuite, il s'agit d'observer si des participants renomment des objets au cours du travail de modification pour mieux se repérer dans l'arbre. Enfin, modifier les propriétés graphiques (comme la couleur) d'un élément permet de l'afficher distinctement du reste du modèle. Ces trois

fonctionnalités peuvent jouer un rôle dans le travail de modification. C'est la raison pour laquelle on désire observer leur manière et fréquence d'utilisation.

- **Ouverture du panneau de définition d'un élément :** Double-cliquer sur un élément entraîne l'ouverture de son panneau de définition. Cela peut se faire en double-cliquant sur l'élément dans l'arbre ou sur le B-Rep. Le panneau de définition informe les paramètres de construction et permet de les modifier. Bien que ces panneaux diffèrent selon le type d'élément sélectionné, nous n'avons pas fait de différence entre eux pour l'extraction des données. Chaque ouverture de panneau est enregistrée de la même manière. Il s'agit d'évaluer leur fréquence d'utilisation par rapport aux autres commandes dans l'évaluation des pratiques de modification.

Au sujet des ouvertures de panneau de définition, nous avons fait la distinction entre les éléments de 1<sup>er</sup> niveau du corps principal, 2<sup>nd</sup> niveau ou inférieur et du set géométrique pour comparer les utilisations entre les groupes et évaluer si on constate des différences avec le fait de renommer les éléments de 1<sup>er</sup> niveau (set géométrique et corps principal). A ce stade de l'étude, on décide de faire la dissociation entre le corps principal et le set géométrique afin d'observer s'il y a des différences de pratiques. Nous avons fait la distinction de niveaux de l'arbre uniquement pour l'ouverture des panneaux de définition et non pas pour les commandes du fait que les premières observations ont montré que les commandes sont moins utilisées que l'ouverture des panneaux de définition. Ce choix a été fait afin de réaliser une analyse statistique concluante avec de petits échantillons de participants. De ce fait, avec cette méthodologie d'extraction de données, nous pourrions mettre en évidence l'écart entre l'utilisation des commandes et celle des panneaux de définition et observer s'il y a des différences dans les ouvertures de panneaux de définition entre les deux groupes étudiés.

## **3.2 Processus de traitement des données**

### **3.2.1 Compilation des données**

L'expérience est effectuée par 19 étudiants, 9 de l'ÉTS<sup>1</sup> et 10 de l'ÉNA<sup>2</sup> repartis de la manière suivante : 10 participants travaillant sur un modèle renommé (5 de l'ÉTS et 5 de l'ÉNA), 9 participants travaillant sur un modèle non renommé (4 de l'ÉTS et 5 de l'ÉNA). Comme indiqué plus haut, les participants du groupe « renommé » (GR) portent un numéro impair et les participants du groupe « non renommé » (GNR) portent un numéro pair. Les travaux des participants sont enregistrés sous format vidéo afin d'être traités puis analysés.

Nous n'avons toutefois pas pu tenir compte des travaux des participants 13 et 19. Il y a eu un problème de conversion de la vidéo du participant 13 qui a causé la perte de ses données. Quant au participant 19, il a été décidé de ne pas prendre en compte ses résultats puisqu'après près de 3h30 de travail, l'étudiant n'avait réussi que 50% du travail là où les autres étudiants ont mis entre 35min et 3h pour effectuer la totalité des modifications. De plus, à ce stade, le participant ne voyait pas de solutions pour continuer. Nous avons donc estimé que ses données étaient trop éloignées du reste de la population analysée pour les prendre en compte. De ce fait, l'échantillon de GR est de 8 étudiants et de 9 étudiants pour GNR.

Les données de temps de tous les participants ont été compilées par modification sous un tableau tel que présenté dans le tableau 3.2.

---

<sup>1</sup> ÉTS : École de technologie supérieure, Montréal, QC

<sup>2</sup> ÉNA : École nationale d'aérotechnique, Saint-Hubert, QC



Tableau 3.2 Compilation des données de temps (sec) par modification

	Modification Phase	5											
		Compréhension						Action					
		Temps Total de modification	Temps B-rep	Temps dans l'arbre	Temps 1er niveau	Temps 2ème niveau ou -	Temps dans Parent/enfant	Temps Total de modification	Temps B-rep	Temps dans l'arbre	Temps 1er niveau	Temps 2ème niveau ou -	Temps dans Parent/enfant
R E N O M M É	Participant 1	3	2	1	0	1	0	42	31	11	4	7	0
	Participant 3	43	43	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0
	Participant 5	3	2	1	0	1	0	15	11	4	0	4	0
	Participant 7	13	6	7	5	2	0	45	39	6	0	6	0
	Participant 9	46	9	37	35	2	0	141	109	32	2	30	0
	Participant 11	2	2	0	0	0	0	13	13	0	0	0	0
	Participant 15	3	2	1	1	0	0	19	18	1	1	0	0
N O N R E N O M M É	Participant 17	59	26	33	33	0	0	181	168	13	5	8	0
	Participant 2	2	2	0	0	0	0	101	101	0	0	0	0
	Participant 4	56	56	0	0	0	0	25	25	0	0	0	0
	Participant 6	4	3	1	0	1	0	34	30	4	0	4	0
	Participant 8	11	7	4	3	1	0	28	26	2	0	2	0
	Participant 10	30	18	12	10	2	0	21	15	6	0	6	0
	Participant 12	14	14	0	0	0	0	25	25	0	0	0	0
	Participant 14	5	4	1	0	1	0	25	21	4	0	4	0
	Participant 16	14	10	4	2	2	0	32	28	4	1	3	0
	Participant 18	37	8	29	25	4	0	18	10	8	2	6	0

Toutefois au visionnement des vidéos, il apparaît que les participants n'ont pas effectué les modifications dans le même ordre. Nous n'avons rien imposé à ce sujet afin d'avoir une mesure réelle des performances globales de chaque groupe. De plus, pour certaines modifications, certains participants ont dû reprendre leur travail mais pas tous. Ces aspects créent des disparités au sein des modifications empêchant d'effectuer des analyses par modification. Nous avons donc compilé les temps de la totalité des modifications afin d'avoir une vision globale du travail de compréhension, d'action, mais aussi de l'ensemble du travail de modification. Ces compilations sont présentées en annexe (Voir ANNEXE III).

En ce qui concerne la compilation des commandes, nous avons aussi opté pour une compilation sur la totalité des modifications. Pour les mêmes raisons que pour la compilation des données de temps, il n'est pas possible de réaliser des analyses par modification. De plus, les premières observations montrent une faible utilisation des commandes comparée à l'ouverture de panneau. On remarque que certaines commandes ne sont utilisées qu'une ou deux fois et ce par un faible nombre de participants au sein d'échantillons déjà de petites tailles. Les annexes IV et V montrent la compilation des commandes pour la totalité des phases de compréhension et d'action. Les échantillons dans l'état actuel ne permettent pas d'effectuer une analyse statistique mais vont permettre d'appuyer l'interprétation des

observations de l'utilisation des commandes. Des regroupements seront donc nécessaires afin d'obtenir des résultats exploitables. En effet, les analyses statistiques ont pour objectif de tirer des décisions statistiques au sujet de nos questions de recherche.

### **3.2.2 Décisions statistiques**

Les décisions statistiques sont des décisions prises sur une population, sur la base de l'information provenant d'un échantillon (Spiegel, 2002, p. 56). Pour cela, il est très utile de faire des hypothèses sur la population en question, appelées hypothèses statistiques. Dans le cadre de notre recherche, nous formulons une hypothèse statistique pour déterminer si une caractéristique ou un résultat espéré est susceptible d'être vrai. Pour ce faire, on formule l'hypothèse nulle qu'il n'y a pas de différence entre les caractéristiques étudiées de chaque groupe (toute différence observée est de ce fait due aux fluctuations d'échantillonnage de la même population). L'hypothèse nulle exprime l'absence de différence pour la caractéristique en question.

Si on suppose qu'une hypothèse particulière est vraie, mais que les résultats sont différents des espérances sous cette hypothèse, on peut conclure que les différences observées sont significatives et être enclins à rejeter l'hypothèse ou du moins à l'écarter sur la base des résultats disponibles. Les procédures qui permettent de déterminer si les données de l'échantillon diffèrent de façon significative des résultats attendus, et aident ainsi à décider de la validité ou non d'une hypothèse, sont appelées tests d'hypothèses.

La réalisation de ce type de tests passe, dans un premier temps, par l'énonciation de l'hypothèse nulle et l'hypothèse alternative. Cette dernière exprime toute hypothèse qui diffère d'une hypothèse donnée. Il y a trois hypothèses alternatives possibles menant à des conclusions différentes lorsque l'hypothèse nulle doit être rejetée (Sanders & Allard, 1992, p.318). Si on considère  $\beta_1$  et  $\beta_2$ , une même caractéristique de deux échantillons différents, l'hypothèse nulle  $H_0$  est  $\beta_1 = \beta_2$ .

Et les hypothèses alternatives possibles peuvent être :

- $H_1 : \beta_1 \neq \beta_2$  alternative bilatérale;
- $H_1 : \beta_1 > \beta_2$  alternative unilatérale à droite;
- $H_1 : \beta_1 < \beta_2$  alternative unilatérale à gauche.

On effectue un test bilatéral lorsque la nature du problème indique que le rejet de l'hypothèse nulle ne doit pas déboucher sur d'autres inférences concernant la différence entre  $\beta_1$  et  $\beta_2$ . Lorsque la nature du problème montre clairement que  $H_0$  doit être rejetée seulement si  $\beta_1$  est significativement supérieure à  $\beta_2$ , on doit alors effectuer un test unilatéral à droite. Par contre, on a recours au test unilatéral à gauche lorsqu'il semble plausible que  $\beta_1$  soit inférieur à  $\beta_2$ . Nous décrivons les tests d'hypothèses utilisés, ainsi que les hypothèses retenues, au fur et à mesure de la présentation des résultats.

La deuxième étape est la définition du seuil de signification. Cette étape consiste à spécifier le niveau de risque désiré de rejeter l'hypothèse nulle lorsque celle-ci est vraie. Le risque de rejeter à tort est appelé le seuil de signification (Sanders & Allard, 1992, p. 271) et est symbolisé par la lettre grecque  $\alpha$  (alpha). Plus les conséquences résultant d'un rejet à tort de l'hypothèse nulle sont jugées graves, plus  $\alpha$  est petit. Dans la pratique, on retrouve habituellement un seuil de signification de 0,05 ou 0,01 (Spiegel, 2002, p. 59). Les seuils de signification utilisés dans les études présentées à la section 1.3 offrent quelques repères. Johnson & Diwakaran (2011, 2012) utilisent un seuil de signification de 0,1 pour des études impliquant entre 15 et 33 personnes; Chester (2007) utilise un seuil de 0,05 pour des échantillons d'une taille variant de 3 à 7 et enfin Camba *et al.* (2014) prennent un seuil de 0,01 pour des données de 30 personnes. Dans notre cas, nous travaillons avec des échantillons d'une taille de 8 à 9. Il s'agit d'échantillons de petite taille car inférieurs à 30 (Spiegel, 2002, p. 65). C'est un aspect qu'il faut prendre en considération lors du choix du seuil de signification.

La difficulté avec cette taille d'échantillon, c'est qu'il n'est pas possible de considérer une approximation normale et d'autant moins que la taille décroît. La distribution normale revêt

une importance fondamentale puisqu'un grand nombre de méthodes statistiques reposent sur cette loi. Dans la littérature, on retrouve également les termes « distribution gaussienne » ou « distribution de Laplace-Gauss » ou simplement « loi normale » (Baillargeon, 2001, p. 196).

Une distribution normale (*Voir* Figure 3.7) est complètement définie par deux paramètres : la moyenne identifié ici  $\mu$  et la variance identifié par  $\sigma^2$ . On obtient une courbe différente (mais ayant la même forme en cloche) pour chaque valeur de  $\mu$  et de  $\sigma^2$ . L'écart-type de la distribution est notée  $\sigma : \sqrt{\sigma^2}$ .  $\mu$  caractérise le centre de la distribution alors que  $\sigma$  caractérise l'étalement des valeurs de la caractéristique étudié autour de  $\mu$  (Baillargeon, 2001, p. 197).

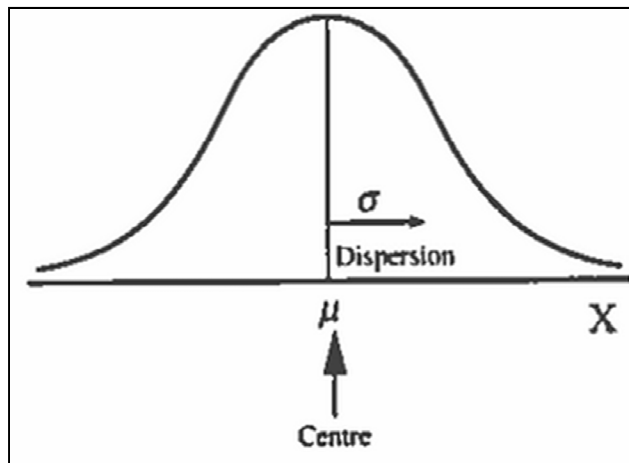


Figure 3.7- Distribution normale  
Tiré de Baillargeon (2001, p. 1997)

Pour voir si la distribution des échantillons suit une loi normale, on s'intéresse aux coefficients d'asymétrie standardisé et d'aplatissement standardisé. Ces facteurs décrivent les décalages de la distribution à l'étude par rapport à la loi normale. Une distribution est symétrique si les valeurs de la variable statistique sont également dispersées de part et d'autre d'une valeur centrale. Par ailleurs, une distribution est plus ou moins aplatie selon que les fréquences des valeurs voisines des valeurs centrales diffèrent peu ou beaucoup les unes par rapport aux autres (Baillargeon, 2001, p. 111). Si les coefficients d'asymétrie standardisée et d'aplatissement standardisé sont en dehors de la plage -2 à +2, il y a un écart significatif à la

normalité. Dépendamment si un échantillon est normal ou non, ce ne sont pas les mêmes tests d'hypothèses qui s'appliquent.

Selon que la distribution suit une loi normale ou non, certains tests d'hypothèse ne peuvent pas être pris en compte. En effet, dans le cas d'échantillons de petite taille, l'impact de valeurs extrêmes (nommées aberrantes dans certains ouvrages) dans les données peut être important sur les calculs de  $\mu$  et  $\sigma$ . Il s'agit de valeurs qui s'écartent de façon marquée de l'ensemble des données. « Une donnée peut-être appelée valeur aberrante si elle s'écarte d'une distance d'au moins  $1,5 \times (Q_3 - Q_1)$  au-dessus du troisième quartile ou en dessous du premier quartile » (Baillargeon, 2001, p. 108). Il apparaît que  $\mu$  et  $\sigma$  sont très sensibles à ces valeurs d'autant plus que l'échantillon est petit. Si ce type de valeur se nomme parfois aberrante, c'est parce qu'il convient de les considérer ainsi lorsque l'échantillon est de grande taille. Or, lorsque l'on travaille avec des échantillons de petite taille, il n'est pas possible de supprimer des données de crainte de perdre en représentativité de la population étudiée. C'est la raison pour laquelle, on parle de valeurs extrêmes. S'il est suspecté que les données puissent contenir ce type de valeurs, un test non paramétrique peut être mis en œuvre. Ces tests ne supposent pas que les données sont issues de lois normales et sont moins sensibles à la présence de points extrêmes. On observe l'utilisation de ce type de tests dans les travaux de Chester (2007) où, justement, les échantillons sont de petites tailles.

C'est donc dans cette lignée que nous avons décidé de nous inscrire pour réaliser nos analyses statistiques. Un seuil de signification de 0,05 a été choisi du fait qu'il s'intègre au seuil habituel des pratiques statistiques et correspond à un niveau de signification utilisé dans un même cadre de recherche. Par ailleurs, les résultats présenteront des tests non paramétriques ou d'autres tests dédiés à de petits échantillons de données dans les cas où les caractéristiques suivent une distribution normale. Des analyses seront accompagnées d'un graphique des densités et de boîtes à moustaches afin d'apporter une représentation de la distribution des données étudiées lorsque cela sera jugé pertinent. La courbe de densité est une méthode non paramétrique d'estimation de la densité de probabilité d'une variable aléatoire (Karamoko & Ida, 2015). Elle est relative à l'histogramme et permet de représenter

l'ensemble des données. En effet, la densité offre une possibilité d'estimer la distribution sur des données. En d'autres termes, elle estime la fréquence sur ces données pour constituer une représentation en forme de ligne lisse de cette distribution estimée sur les données. La figure 3.8 présente le graphique de densité du temps de travail de GR relative à son histogramme.

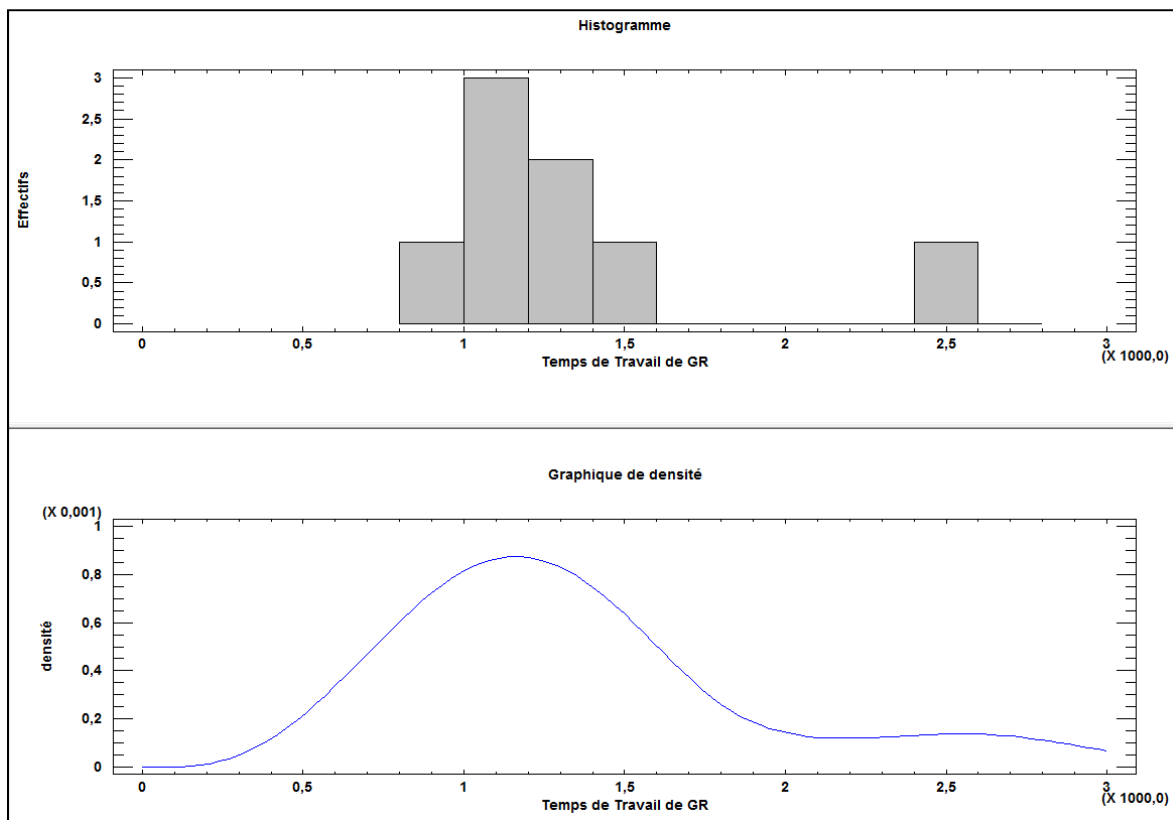


Figure 3.8 - Exemple de Graphique de densité en relatif à un histogramme

Quant à la boîte à moustache, appelée aussi diagramme en boîte, elle est employée pour illustrer sur le même graphique la concentration et l'éparpillement des données (Baillargeon, 2001, p. 108). Elle permet de présenter sur le même graphique construit à l'échelle les quartiles, la position de la médiane et l'étendue de la série de données ainsi que la valeur minimale et la valeur maximale. Elle met aussi en évidence les valeurs extrêmes et on peut y ajouter la moyenne telle que cela a été fait sur la figure 3.9 avec le point rouge.

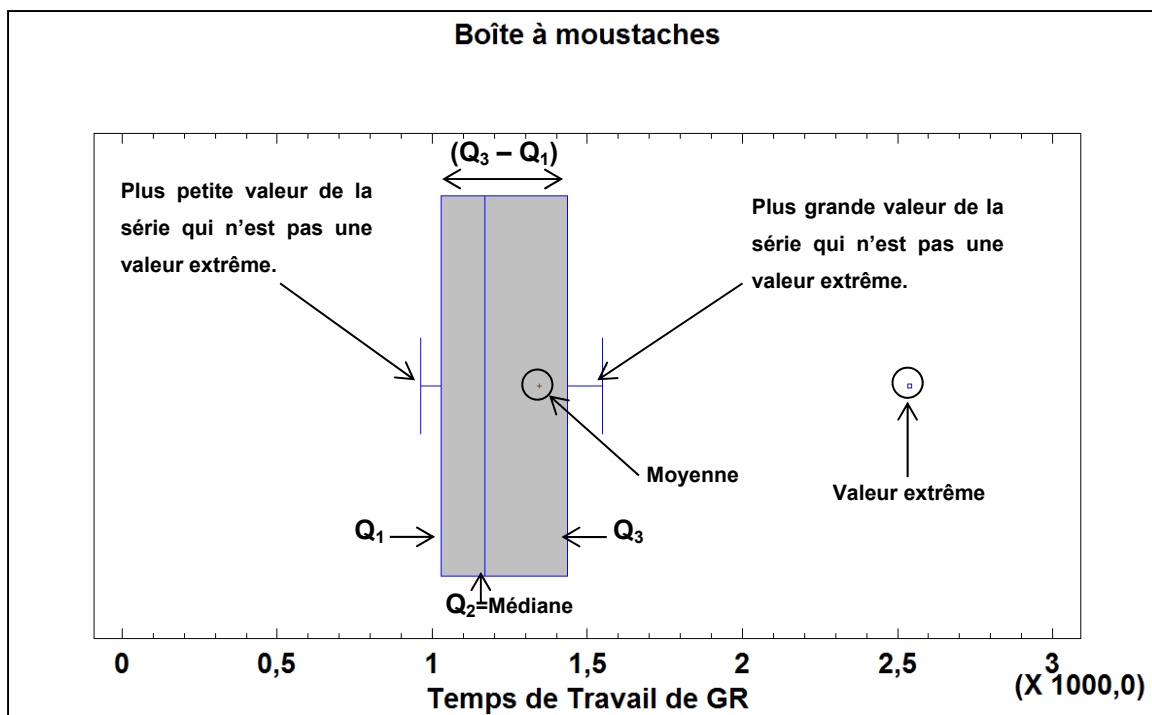


Figure 3.9 - Exemple de boîte à moustache

L'intégralité de nos tests et représentation sera issue du logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup>. Ce logiciel permet de réaliser directement tous les calculs statistiques nécessaires à notre étude en fournissant simplement les échantillons de données à comparer.

Le chapitre suivant présente les analyses réalisées qui nous vont permettre de tirer des conclusions.

### 3.2.3 Plan d'analyse

Cette recherche comporte une analyse statistique des données récoltées et une étude qualitative reposant sur les observations des enregistrements vidéo. Il s'agit d'observer l'impact de renommer des éléments sur les performances et les pratiques du travail de modification. Nous souhaitons évaluer s'il y a des différences entre le groupe « renommé » et le groupe « non renommé » aussi bien dans le travail d'ensemble de modification que dans ses sous-ensembles : les phases de compréhensions et les phases d'actions. Par ailleurs, il

s'agit aussi d'observer s'il y a des différences de pratiques dans la manière dont les participants de chaque groupe interagissent dans l'arbre et hors de l'arbre et s'il y a des différences de pratiques dans les niveaux de l'arbre où le travail de dénomination a été effectué.

Le travail d'extraction des données se fait par phases successives de travail de modification. Néanmoins, l'observation de ces séquences montre de fortes disparités entre les participants dans leur ordonnancement. L'expérience n'impose pas aux participants de suivre strictement l'ordre des instructions de modification car nous ne voulons pas que ces derniers soient contraints dans leur façon de travail et ainsi impacter leur performance de travail. Hors, même si chaque modification concerne des zones différentes de la pièce, le travail de compréhension demande une exploration globale à travers le modèle. Par conséquent, le travail effectué pour une modification va nécessairement avoir de l'influence sur le travail de modification effectué par la suite. C'est la raison pour laquelle notre analyse concerne uniquement le travail de modification dans sa globalité, c'est-à-dire la compilation de toutes les phases de compréhension ainsi que d'action. Néanmoins, l'étude qualitative pourra revenir sur des points spécifiques de certaines modifications.

L'analyse statistique comprend trois parties. Le tableau 3.3 présente les trois parties ainsi qu'un prérequis à notre recherche. Il s'agit, d'abord, de s'assurer que les données de temps des participants de l'ETS et l'ENA pour chaque groupe peuvent être étudiées au sein d'une même population.

La première analyse concerne les temps de travail requis pour effectuer les modifications, qui définissent la performance des participants. Il s'agit de comparer, entre les deux groupes, les temps de compréhension, d'action, ainsi que de travail au complet requis pour effectuer les modifications. Nous désirons aussi repérer s'il y a des différences dans l'influence du travail effectué dans et hors de l'arbre sur les temps de compréhension, d'action, ainsi qu'au complet chez les deux groupes. Il s'agit de voir si le fait de renommer des éléments influence les différences de performances de travail.



En ce qui concerne la seconde partie, elle est axée sur les pratiques de travail pour effectuer les modifications. Nous voulons savoir si la répartition en pourcentage du travail dans et hors de l'arbre diffère entre les deux groupes. De la même manière, nous analysons la part des temps de travail dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs chez les deux groupes.

Quant à la troisième partie, il s'agit d'évaluer si l'utilisation des commandes et les ouvertures de panneaux diffèrent entre les deux groupes. On observe le nombre de commandes et panneaux employés dans le travail de modification et à chacune de ses phases. Il s'agit aussi d'analyser les différences d'utilisation des commandes et panneaux dans l'arbre et hors de l'arbre, ainsi que la différence d'ouverture de panneaux dans l'arbre entre le 1<sup>er</sup> niveau et les niveaux inférieurs pour chaque groupe. Après réflexion, même si dans l'extraction des données, nous avons fait la distinction de niveaux d'ouverture de panneau sur le B-Rep (1<sup>er</sup> niveau ou niveaux inférieur), nous n'avons pas examiné cet aspect car il n'apporte aucune réponse à notre sujet de recherche. L'extraction de ces données se fait en fonction du panneau qui s'ouvre lorsque le participant clique sur le B-Rep. Hors, qu'il s'agisse d'un élément de premier niveau ou de niveaux inférieurs, cliquer sur le B-Rep n'apporte pas de réponse sur l'impact de la dénomination du fait que cet aspect n'entre pas en jeu. Enfin, on évalue l'influence des commandes et des ouvertures de panneaux de chaque groupe sur les temps de travail pour observer leur impact sur les performances des participants.

Tableau 3.3 Plan d'analyse statistique

Étude	Objectif
<b>Prérequis :</b> Comparaison du temps de modification et de ses sous-ensembles : temps de compréhension et temps d'action entre les étudiants de l'ETS et ENA dans les deux groupes.	S'assurer de la possibilité de compiler les travaux de l'ETS et de l'ENA au sein d'une même population pour chaque groupe à l'étude.
<b>1<sup>ère</sup> Partie : Analyse des temps de travail entre les deux groupes</b>	
1 : Comparaison des temps de travail de modification entre le groupe R et le groupe NR.	Le fait de renommer des éléments a-t-il joué sur les performances du travail de modification.
2 : Comparaison des temps de compréhension et d'action entre les groupes R et NR.	Le fait de renommer des éléments a-t-il joué sur les performances des phases de compréhension et d'action.
3a : Étude de corrélation des temps dans et hors de l'arbre avec le temps de modification chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a-t-il des différences dans l'influence du travail dans et hors de l'arbre sur le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
3b : Étude de corrélation des temps dans et hors de l'arbre avec le temps de compréhension chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a-t-il des différences dans l'influence du travail dans et hors de l'arbre sur les phases de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.
3c : Étude de corrélation des temps dans et hors de l'arbre avec le temps d'action chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a-t-il des différences dans l'influence du travail dans et hors de l'arbre sur les phases d'action lorsqu'on renomme des éléments.

Tableau 3.3 Plan d'analyse statistique (2<sup>ème</sup> Partie)

Étude	Objectif
<b>2<sup>ème</sup> Partie : Analyse de la répartition du travail et comparaison entre les deux groupes</b>	
1a : Analyse de la part des temps de travail dans et hors de l'arbre chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a t-il des différences de répartition entre le travail dans et hors de l'arbre pour le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
1b : Analyse de la part des temps de travail dans et hors de l'arbre pendant les phases de compréhension chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a t-il des différences de répartition entre le travail dans et hors de l'arbre pendant les phases de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.
1c : Analyse de la part des temps de travail dans et hors de l'arbre pendant les phases d'action chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a t-il des différences de répartition entre le travail dans et hors de l'arbre pendant les phases d'action lorsqu'on renomme des éléments.
2a : Analyse de la part des temps de travail dans l'arbre au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs dans le travail de modification chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a t-il des différences de répartition entre le travail au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre dans le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
2b : Analyse de la part des temps de travail dans l'arbre au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs pendant les phases de compréhension chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a t-il des différences de répartition entre le travail au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre pendant les phases de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.
2c : Analyse de la part des temps de travail dans l'arbre au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs pendant les phases d'action chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y a t-il des différences de répartition entre le travail au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre pendant les phases d'action lorsqu'on renomme des éléments.

Tableau 3.3 Plan d'analyse statistique (3<sup>ème</sup> Partie)

Étude	Objectif
<b>3<sup>ème</sup> Partie : Analyse de l'utilisation des commandes CATIA V5<sup>®</sup> et des ouvertures de panneaux de définition</b>	
1a : Comparaison du nombre de commandes et panneaux employés dans le travail de modification entre les deux groupes	Établir s'il y a des différences quant au nombre de commandes et panneaux employés dans le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
1b : Comparaison du nombre de commandes et panneaux employés pendant les phases de compréhensions entre les deux groupes.	Établir s'il y a des différences quant au nombre de commandes et panneaux employés pendant les phases de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.
1c : Comparaison du nombre de commandes et panneaux employés pendant les phases d'action entre les deux groupes.	Établir s'il y a des différences quant au nombre de commandes et panneaux employés pendant les phases d'action lorsqu'on renomme des éléments.
2a : Comparaison du nombre de commandes et panneaux employés dans et hors de l'arbre dans le travail de modification chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Établir s'il y a des différences de répartitions d'utilisation de commandes et panneaux dans et hors de l'arbre dans le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
2b : Comparaison du nombre de commandes et panneaux employés dans et hors de l'arbre pendant les phases de compréhension chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Établir s'il y a des différences de répartitions d'utilisation de commandes et panneaux dans et hors de l'arbre pendant les phases de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.
2c : Comparaison du nombre commandes et panneaux employés dans et hors de l'arbre pendant les phases d'action chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Établir s'il y a des différences de répartitions d'utilisation de commandes et panneaux pendant les phases d'action entre dans et hors de l'arbre lorsqu'on renomme des éléments.
3a : Analyse des ouvertures de panneaux au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre dans le travail de modification chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Établir s'il y a des différences de répartitions d'ouverture de panneaux au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre dans le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
3b : Analyse des ouvertures de panneaux au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre pendant les phases de compréhension chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Établir s'il y a des différences de répartitions d'ouverture de panneaux au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre pendant les phases de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.

Tableau 3.3 Plan d'analyse statistique (3<sup>ème</sup> Partie suite)

Étude	Objectif
<b>3<sup>ème</sup> Partie : Analyse de l'utilisation des commandes CATIA V5<sup>®</sup> et des ouvertures de panneaux de définition</b>	
3c : Analyse des ouvertures de panneaux au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre pendant les phases d'action chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Établir s'il y a des différences de répartitions d'ouverture de panneaux au 1 <sup>er</sup> niveau et aux niveaux inférieurs de l'arbre pendant les phases d'action lorsqu'on renomme des éléments.
4a : Étude de corrélation du nombre de commandes et panneaux employés avec les temps de travail de modification chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y'a t-il des différences dans l'influence des commandes et panneaux sur le travail de modification lorsqu'on renomme des éléments.
4b : Étude de corrélation du nombre de commandes et panneaux employés avec les temps de compréhension chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y'a t-il des différences dans l'influence des commandes et panneaux sur la phase de compréhension lorsqu'on renomme des éléments.
4c : Étude de corrélation du nombre de commandes et panneaux employés avec les temps d'action chez les deux groupes et comparaison des résultats.	Y'a t-il des différences dans l'influence des commandes et panneaux sur la phase d'action lorsqu'on renomme des éléments.

L'analyse qualitative repose sur les commentaires réalisés lors de l'extraction des données dans le tableur Excel. Il s'agit d'observations qui ne reposent pas sur des données chiffrables et qui ne peuvent donc pas s'intégrer à l'analyse statistique. Ils peuvent indiquer le processus de travail des participants et ce qui a mené à la réussite ou l'échec des phases de compréhension ou d'action (*Voir* Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Exemple d’observation

PARTICIPANT N° MODELE	II NON RENOMME	IA		1A		1A		1B	
		ACTION	COMPREHENSION	ACTION	COMPREHENSION	ACTION	COMPREHENSION	ACTION	COMPREHENSION
Commentaire	Temps de début (Min)		12:09	15:15	22:33	23:05	28:47	28:47	30:18
	Temps de fin (Min)		15:15	22:33	23:05	28:47	30:18	30:18	30:18
	Temps «autres» (Sec)								
	Temps dans l'arbre								
	1er Niveau (Sec)								
	2eme Niveau ou inf. (Sec)								
	Parents enfants (Sec)								
	Commandes dans l'arbre								
	Afficher/Cacher								
	Centrer sur								
Succès ?	Definition de l'objet de travail								
	Parent/enfant								
	Priorité								
	Modifier le support d'esquisse								
	Clique sur un élément du Corps 1er niveau								
	Clique sur un élément du Corps 2eme niveau ou inf.								
	Clique sur un élément du Set Géométrique								
	Commandes sur le B-rep ou Panneau								
	Afficher/Cacher								
	Activer/Désactiver								
Commentaire	Centrer sur le granle								
	Definition de l'objet de travail								
	Parent/enfant								
	Priorité								
	Clique sur un élément du Corps 1er niveau								
	Clique sur un élément du Corps 2eme niveau ou inf.								
	Clique sur un élément du Set Géométrique								
	Succès ?	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
	Erreur d'unicité d'outil de mesure : mesure absolue au lieu de relative								
	Tentative de décalage via l'extrusion de la poche droite								
Commentaire	Annulation du décalage car réalisé à la mauvaise limite de l'extrusion								
	Erreur d'unicité d'outil de mesure : mesure absolue au lieu de relative								
	Tentative de décalage via l'extrusion de la poche droite								
	Annulation du décalage car réalisé à la mauvaise limite de l'extrusion								
	Erreur d'unicité d'outil de mesure : mesure absolue au lieu de relative								
	Tentative de décalage via l'extrusion de la poche droite								
	Annulation du décalage car réalisé à la mauvaise limite de l'extrusion								
	Erreur d'unicité d'outil de mesure : mesure absolue au lieu de relative								
	Tentative de décalage via l'extrusion de la poche droite								
	Annulation du décalage car réalisé à la mauvaise limite de l'extrusion								

C’est dans le regroupement d’observation chez plusieurs participants que nous apportons des constats pertinents pour répondre aux questions du sujet de recherche. Nous reprendrons aussi des éléments de la littérature afin d’évaluer si les observations de cette étude recoupent ou contredisent des points évoqués par d’autres recherches.







## **CHAPITRE 4**

### **RÉSULTATS**

Dans ce chapitre, les outils statistiques utilisés et les raisonnements adoptés sont introduits au fur et à mesure de la présentation des résultats de chaque analyse. La première partie aborde les études préliminaires nécessaires à l'évaluation des données qui, quant à elle, fait l'objet de la deuxième partie. La troisième section présente nos observations des pratiques des participants à l'expérience. Nous rappelons que l'intégralité des valeurs de statistiques représentées dans ce chapitre est issue du logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI®.

#### **4.1 Les études préliminaires**

##### **4.1.1 Filtrage des données**

Suite au visionnement des enregistrements, nous avons dû sélectionner les données à prendre en compte pour les travaux d'analyse statistique. Le chapitre précédent présentait les raisons qui nous ont amenés à écarter les données des participants 13 et 19 ainsi qu'à réaliser l'étude statistique des données de temps et de commandes sur la globalité des modifications.

Par ailleurs, à travers les vidéos, on constate une disparité entre les étudiants au sujet de la modification 3 : Déplacement de la découpe du stringer. Malgré l'attention portée à détailler les étapes du travail, la modification a posé des difficultés. Seuls 6 participants ont réussi les 4 instructions de modification permettant de déplacer la découpe (P1 – P4 – P6 – P8 – P9 – P11). Aussi pour la grande majorité des étudiants, ces tâches ont occupé une grande partie de leur temps et se sont conclues par un échec pour 3 des 4 instructions de modification. La résolution de l'incohérence de matière (modification 3d) a été réussie par la quasi-totalité des participants. On a donc choisi de prendre uniquement en compte les données relatives à cette modification et de ne pas considérer celles du reste de l'instruction dans l'analyse statistique, afin de gagner en homogénéité des échantillons. Lorsqu'on observe les tentatives de

modification des participants, on reconnaît des faiblesses de robustesses dans la conception de cette partie de la pièce. En effet, la construction du machined-step central aurait, sans doute, dû dépendre des paramètres de construction de la découpe stringer plutôt qu'être modélisé comme les deux autres machined-step, c'est à dire à partir d'un plan sans historique de la pièce. Par ailleurs, c'est l'instruction en elle-même qui pourrait être remise en question. En effet si l'on devait positionner notre pièce dans un assemblage considéré robuste, la procédure de modification devrait être le déplacement de la lisse déplaçant automatique la découpe sur la pièce d'étude et tous les éléments de la pièce connexes à la découpe. Il n'empêche que, quelle que soit la qualité d'expression de notre intention de conception, les étudiants ont échoué dans sa compréhension ce qui nous mène à ne pas prendre en compte les modifications relatives à ces parties de la pièce. De ce fait, l'analyse statistique repose sur les modifications 1a), 1b), 1c), 1d), 2), 3d) 4), 5) et 6) du document.

Le tableau 4.1 indique les temps de travail totaux suite à la suppression des modifications non retenues et des temps « autres ». Ce temps de travail, dit retenu, concerne les séquences dans lesquelles nous analysons les données de temps passé dans et hors de l'arbre, ainsi que les commandes utilisées.

Tableau 4.1 Temps de travail et taux de réussite

			Durée Vidéo (sec)	Temps sans les modifications 3a, 3b, 3c (sec)	Temps de travail retenu (sec)	Taux de réussite (%)
R E N O M M É	Participant 1	ETS	2820	1486	1110	100
	Participant 3	ETS	7702	1714	1321	100
	Participant 5	ETS	4567	1340	1011	89
	Participant 7	ETS	7845	1505	964	100
	Participant 9	ETS	4724	1499	1227	100
	MOYENNE (ETS)		5532	1509	1127	97,78
	ECART-TYPE (ETS)		2179	133	148	4,97
	Participant 11	ENA	6997	1873	1550	78
	Participant 13	ENA	N/A	N/A	N/A	N/A
	Participant 15	ENA	2961	1380	1043	100
	Participant 17	ENA	6880	3245	2540	89
	Participant 19	ENA	11917	N/A	N/A	N/A
	MOYENNE (ENA)		7189	2166	1711	88,89
	ECART-TYPE (ENA)		3668	966	761	11,11
	MOYENNE $\mu$ (ETS + ENA)		6268	1755	1346	94,44
N O N  R E N O M M É	ECART-TYPE $\sigma$ (ETS+ ENA)		2861	627	519	8,40
	COEF DE VARIATION ( $\sigma/\mu$ )		0,46	0,36	0,39	0,09
	Participant 2	ETS	10634	3810	3000	100
	Participant 4	ETS	3636	2180	1711	100
	Participant 6	ETS	2127	1035	790	100
	Participant 8	ETS	3178	1908	1646	100
	MOYENNE (ETS)		4894	2233	1787	100,00
	ECART-TYPE (ETS)		3879	1159	911	0,00
	Participant 10	ENA	6610	1842	1578	89
	Participant 12	ENA	4358	1246	797	100
	Participant 14	ENA	7142	2113	1684	78
	Participant 16	ENA	6844	2467	2005	89
	Participant 18	ENA	7934	2352	2058	100
	MOYENNE (ENA)		6578	2004	1624	91,11
	ECART-TYPE (ENA)		1338	487	506	9,30
	MOYENNE $\mu$ (ETS + ENA)		5829	2106	1697	95,06
	ECART-TYPE $\sigma$ (ETS+ ENA)		2706	798	668	8,07
	COEF DE VARIATION ( $\sigma/\mu$ )		0,46	0,38	0,39	0,08

Le filtrage de séquences analysées a permis de réduire la disparité au sein des deux groupes. Le coefficient de variation des deux groupes passe de 46% pour la durée vidéo à 39% pour le temps de travail retenu. Plus le coefficient de variation est faible, plus la distribution est homogène, indiquant que la moyenne est représentative de l'ensemble des données de la caractéristique. Dans notre cas le coefficient reste élevé malgré le filtrage des données. Cela nous incite donc à étudier plus en détail la distribution de chaque groupe. C'est pourquoi, bien qu'il apparaisse que le temps moyen de GR soit inférieur au temps moyen de GNR (1346s vs 1697s), nous ne pouvons pas tirer de conclusion, à ce stade, de l'impact de renommer sur la performance du travail de modification.

Le tableau 4.1 indique aussi le taux de réussite au sujet des modifications retenues pour l'analyse statistique. Les participants de chaque groupe ont un taux de réussite variant entre 78% et 100%, c'est-à-dire qu'ils ont tous réussis au moins 7 modifications sur les 9 à réaliser. Toutefois, les participants ont tous travaillé l'intégralité des instructions de modification et ont réalisé des activités de compréhension et d'exécution. En effet, la comparaison du modèle des participants avec un modèle modifié de correction a permis de s'assurer que chaque participant étudie l'intégralité des tâches de modification afin de réussir un maximum de modification. Au vue de la taille de notre échantillon, nous ne pouvons pas filtrer les données des participants n'ayant pas réussi à 100% le travail de modification. Par conséquence, on prend le partie de dissocier les temps de travail de la réussite à travers notre analyse. Comme pour Camba et al. (2014), dans notre cas, la performance est reliée au temps que les utilisateurs CAO mettent pour réaliser un changement sur le modèle CAO. Nous reviendrons sur les causes d'échec de certaines modifications lors de notre étude qualitative.

Pour nous conforter sur notre choix de dissocier les temps de travail de la réussite, il est nécessaire d'évaluer s'il y a des différences entre les deux groupes GR et GNR au sujet du taux de réussite et voir si ce dernier a influencé les temps de travail de l'ensemble des participants. Nous réalisons donc une analyse statistique comparant les taux de réussite de deux échantillons. Le tableau 4.2 résume les statistiques de l'étude.

Tableau 4.2 Statistiques résumées  
pour le taux de réussite de GNR et GR

	<i>Groupe=GNR</i>	<i>Groupe=GR</i>
Effectif	9	8
Moyenne (%)	95,1	94,5
Médiane (%)	100,0	100,0
Ecart-type	7,99131	8,31522
Coef. de variation	0,084	0,088
Minimum (%)	78,0	78,0
Maximum (%)	100,0	100,0
Étendue (%)	22,0	22,0
Asymétrie std.	-1,8	-1,5
Aplatissement std.	0,9	0,5

Les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement (entre -2 et 2) nous permettent de considérer la distribution des deux échantillons normale.

Les distributions étant normales, nous pouvons effectuer les tests d'hypothèses suivants :

- Test F : Ce test compare les variances de deux échantillons. Il indique si le taux de probabilité de l'hypothèse nulle portant sur la différence entre deux variances est significatif pour être rejeté. Il calcule également des intervalles ou limites de confiance pour chaque écart-type ou pour le rapport des variances. Ce test permet d'analyser si on peut considérer l'égalité des variantes ou non pour le Test t.
- Test t : Ce test compare les moyennes de deux échantillons. Il indique si le taux de probabilité de l'hypothèse nulle portant sur la différence entre deux moyennes est significatif pour être rejeté. Il calcule également des intervalles ou limites de confiance pour chaque moyenne et pour la différence entre les moyennes.

Pour ces premières études, nous présentons les résultats tels que le logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup> les expose afin de comprendre la démarche d'analyse

statistique. Par la suite nous présenterons uniquement les valeurs qui nous permettent de tirer nos conclusions.

	<i>Groupe=GNR</i>	<i>Groupe=GR</i>
<u>Écart-type</u>	7,99131	8,31522
<u>Variance</u>	63,8611	69,1429

Rapport des variances = 0,923611

- Intervalles de confiance à 95,0%  
Écart-type de Groupe 1 = GNR: [5,39779; 15,3095]  
Écart-type de Groupe 2 = GR: [5,49781; 16,9237]  
 Rapport des variances: [0,188517; 4,18263]
- Hypothèse nulle:  $\sigma_1 = \sigma_2$   
 (1) Hypothèse Alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$   
 $F = 0,923611$     Probabilité = 0,903196  
 Ne pas rejeter l'hypothèse nulle pour  $\alpha = 0,05$ .

Figure 4.1 Test F : Comparaison des écarts-types  
pour taux de réussite  
Tirée de STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>©</sup>

Un test F réalise la comparaison des variances des deux échantillons (*Voir* Figure 4.1). La variance indique la dispersion d'un échantillon autour de sa moyenne. C'est cette valeur que détermine l'écart-type puisque cette dernière est la racine carré de la variance. Le tableau expose les données d'écarts-types et de variances pour chaque groupe et le calcul le rapport des variances suit en dessous du tableau. Le test F calcule également des intervalles ou limites de confiance pour chaque écart-type ou pour le rapport des variances. Cet intervalle de confiance est directement lié au seuil de signification choisi. Étant donné que, pour l'étude, nous avons choisi un seuil de signification de 0,05% de risque d'un rejet à tort de l'hypothèse nulle, les intervalles de confiance pour les calculs de chaque valeur sera de 95%. Le volet sur l'intervalle de confiance à 95% indique les plages de valeurs dans lesquelles chaque écart-type ainsi que le rapport des variances se situent. Dans ce test, on s'intéresse particulièrement à l'intervalle du rapport des variances. L'hypothèse nulle est construite pour déterminer si la valeur du rapport des variances est égale à 1,0 contre l'hypothèse alternative

que la valeur du rapport n'est pas égale à 1,0. Le logiciel présente cette hypothèse par une égalité de variances (symbolisé par  $\sigma_1$  pour GNR et  $\sigma_2$  pour GR) de chaque groupe (« $\sigma_1 = \sigma_2$ ») contre l'hypothèse alternative d'une différence des variances (« $\sigma_1 \neq \sigma_2$ ») entre les groupes. Le volet sur l'hypothèse nulle présente la valeur «F», symbole du rapport des variances ( $F=0,923611$ ) ainsi que la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle. Dans la comparaison des variances pour les taux de réussite de chaque groupe, l'intervalle de confiance pour le rapport des variances est particulièrement intéressant. Il s'étend de 0,188517 à 4,18263. Comme cet intervalle contient la valeur 1, il n'y a pas de différence significative entre les écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0%. De plus, comme la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05 ( $P = 0,903196$ ), on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle. Ce test nous permet donc de supposer l'égalité des variances des deux échantillons pour le test t de comparaison des moyennes pour le taux de réussite (*Voir Figure 4.2*).

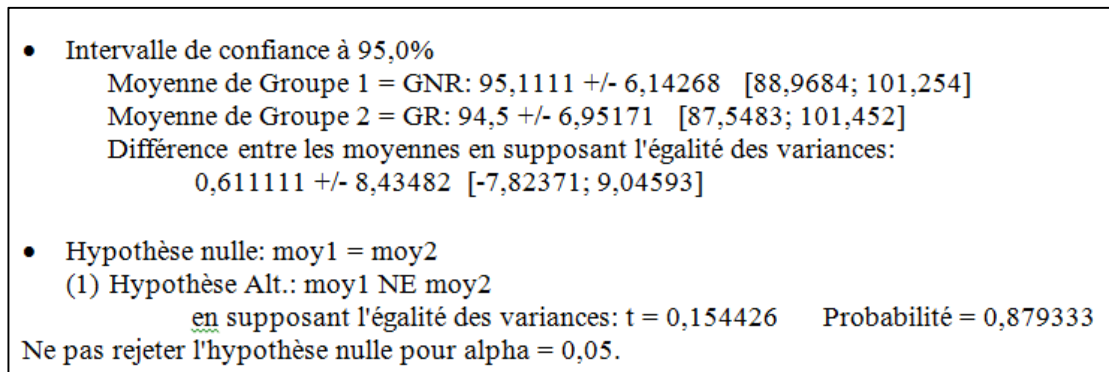


Figure 4.2 Test t : Comparaison des moyennes pour le taux de réussite  
Tirée de STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup>

Sur le figure 4.2, le logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup> présente, dans un premier temps, l'intervalle de confiance des moyennes de chaque groupe ainsi de la différence entre les moyennes en supposant l'égalité des variances pour cette analyse. La représentation des valeurs est double : soit une valeur nominale suivie de l'intervalle autour de cette valeur ou soit par la plage de valeur considérée. Le second volet expose les hypothèses du test de la même manière que pour un test F hormis qu'ici «moy1» désigne la moyenne des taux de

réussite de GNR et «moy2» désigne la moyenne des taux de réussite de GR. Le volet sur les hypothèses indique que la valeur «t» suit une loi de Student<sup>3</sup> et la probabilité de rejeter de l'hypothèse nulle. Dans la comparaison des moyennes des taux de réussites de chaque groupe, le test a été construit pour déterminer si la différence entre les moyennes est égale à 0,0 par rapport à l'hypothèse alternative que la différence n'est pas égale à 0,0. Comme la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05 ( $P=0,879333$ ), on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle. De plus, l'intervalle de confiance pour la différence entre les moyennes s'étend de -7,82371 à 9,04593. Comme l'intervalle contient la valeur 0, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les moyennes des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0%.

Par conséquent, on ne peut rejeter l'hypothèse qu'il n'y a pas de différence entre les deux groupes au sujet du taux de réussite. Ainsi le fait de renommer les éléments n'a pas eu d'effets significatifs sur le taux de réussite des participants. De cette manière, rien ne nous empêche de considérer les taux de réussite des deux groupes au sein d'un même échantillon et d'évaluer leur corrélation avec les temps de travail de l'ensemble des participants afin de constater si les taux de réussite sont liés au temps de travail.

Pour cela, nous réalisons une corrélation des rangs de Spearman. Il s'agit d'une méthode non paramétrique servant à mesurer la corrélation entre deux variables. Les coefficients de Spearman sont calculés à partir des rangs des données plutôt qu'à partir des données elles-mêmes. Ils sont ainsi moins sensibles aux points extrêmes.

---

<sup>3</sup> La loi de Student ressemble à la loi normale. Elle a la forme d'une cloche symétrique par rapport à la moyenne, mais est généralement un peu plus aplatie que la loi normale. (Simard, 2002, p.179)



Tableau 4.3 corrélation des rangs de Spearman  
entre le temps de travail et le taux de réussite

	Taux de réussite
Temps de Travail	-0,2649
	0,2894

Le tableau 4.3 donne les coefficients de corrélation des rangs de Spearman entre les variables. Ces coefficients de corrélation varient entre -1 et +1 et mesurent la force de l'association entre les variables. Le second nombre du tableau est la valeur de la probabilité (P) qui teste la signification statistique des corrélations estimées. Des valeurs des probabilités au-dessous de 0,05 indiquent des coefficients de corrélation significativement différents de 0 au niveau de confiance de 95,0%. Dans notre situation, il n'y a pas de corrélation significative entre le temps de travail et le taux de réussite ( $P=0,2894$ ). On peut donc dissocier le taux de réussite de l'étude des performances de temps de travail dans notre comparaison des deux groupes de participants.

Un autre point à vérifier avant de présenter les résultats de notre étude est la possibilité de considérer indissociablement les données de temps issues de chaque école (ETS et ENA) au sein des groupes GR et GNR.

#### **4.1.2 Étude des données de temps de chaque groupe issue de l'ETS et l'ENA**

L'analyse des données de temps de l'ETS et l'ENA porte sur la totalité des activités de compréhension, d'action et de travail au complet. Il s'agit de voir si nous pouvons traiter les données de l'ETS et l'ENA de manière indissociable au sein de chaque groupe pour chacune des activités (compréhension, action, travail au complet).

Le tableau 4.4 présente les valeurs statistiques de l'ENA et l'ETS utiles à notre analyse.

Tableau 4.4 Statistiques résumées des temps de l'ENA et l'ETS  
(GR et GNR)

			ENA	ETS
GR	Temps de Compréhension	Médiane (sec)	623	655
		Asymétrie std.	1,22	0,08
		Aplatissement std.		-0,07
	Temps d'Action	Médiane (sec)	936	477,00
		Asymétrie std.	-0,34	0,01
		Aplatissement std.		-1,20
	Temps de Travail	Médiane (sec)	1550	1110
		Asymétrie std.	0,64	0,29
		Aplatissement std.		-0,81
GNR	Temps de Compréhension	Moyenne (sec)	909,2	1124,5
		Écart-type	379,634	682,95
		Asymétrie std.	0,03	0,62
		Aplatissement std.	-1,10	0,65
	Temps d'Action	Moyenne (sec)	715,2	662,25
		Écart-type	227,277	247,85
		Asymétrie std.	-1,29	0,26
		Aplatissement std.	1,01	-0,72
	Temps de Travail	Moyenne (sec)	1624,4	1786,75
		Écart-type	505,757	911,233
		Asymétrie std.	-1,26	0,57
		Aplatissement std.	0,93	0,71

Pour les étudiants de l'ENA de GR, le logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup> ne peut calculer la valeur d'aplatissement à cause de la taille de l'échantillon. Nous devons donc procédé à un test non paramétrique. Il s'agit du test W de Mann-Whitney de comparaison des médianes. C'est la raison pour laquelle nous avons informé les médianes pour ce groupe. Pour GNR, les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement sont entre -2 et 2. Nous pouvons donc

effectuer de nouveau des tests F et t. C'est la raison pour laquelle nous avons informé les moyennes et écarts-types pour GNR.

Dans un premier temps nous réalisons le test W de comparaison des médianes de temps des étudiants de l'ENA et l'ETS au sein de GR. Il s'agit d'effectuer un test W de Mann-Whitney qui compare les médianes des deux échantillons. C'est un test non paramétrique mis en place pour comparer les médianes plutôt que les moyennes. Ce test est calculé en combinant les deux échantillons, en triant les données de la plus petite à la plus grande, et en comparant les rangs moyens des deux échantillons dans les données combinées.

La figure 4.3 présente les résultats du logiciel STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup> au sujet de de la comparaison des médianes des temps de travail entre l'ENA et l'ETS dans le groupe GR.

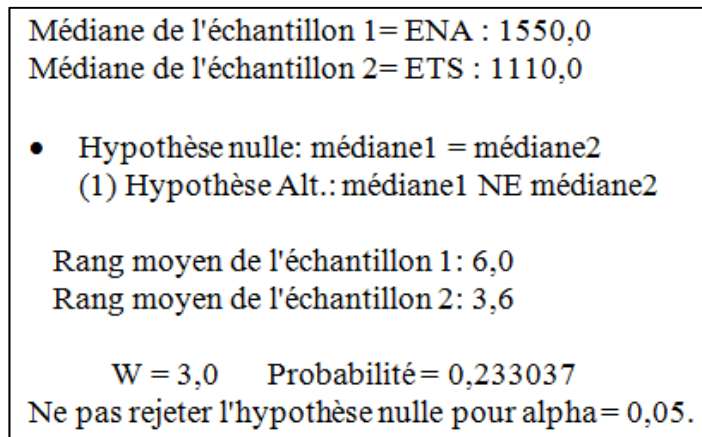


Figure 4.3 Test W : Comparaison des médianes  
des temps de l'ENA et l'ETS de GR  
Tirée de STATGRAPHICS Centurion XVI<sup>®</sup>

Le test W de Mann-Whitney indique les médianes à comparer et expose ensuite les hypothèses. Il s'agit des mêmes types d'hypothèses que les précédents tests F et t hormis qu'ici on parle de «médiane1» pour la médiane du temps de travail des étudiants de l'ENA et de «médiane2» pour la médiane du temps de travail des étudiants de l'ETS. Ensuite le

logiciel indique les rangs moyens à comparer. Enfin le test W indique la statistique W se rapprochant d'une loi normale et la probabilité de rejeter l'hypothèse. Dans notre cas la valeur de la probabilité est supérieur à 0,05 ( $P=0,233037$ ). L'hypothèse nulle ne peut donc pas être rejetée.

Les tests W de GR entre les temps des étudiants de l'ENA et l'ETS ainsi que les tests t de GNR entre les temps des étudiants de l'ENA et l'ETS sont compilés dans le tableau 4.5. Les tests F permettant de supposer l'égalité des écarts-types dans les tests t de GNR se situent en annexe VI.

Tableau 4.5 Test W et Test T de comparaison des temps  
entre l'ENA et l'ETS

GR	Temps de Compréhension	W =	6,0
		Probabilité =	0,765591
	Temps d'Action	W =	3,0
		Probabilité =	0,233037
	Temps de Travail	W =	3,0
		Probabilité =	0,233037
GNR	Temps de Compréhension	t =	-0,604115
		Probabilité =	0,564825
		Différence entre les moyennes =	[-1058,03 ; 627,429]
	Temps d'Action	t =	0,334019
		Probabilité =	0,748149
		Différence entre les moyennes =	[-321,9 ; 427,8]
	Temps de Travail	t =	-0,341572
		Probabilité =	0,742698
		Différence entre les moyennes =	[-1286,26 ; 961,565]

Le tableau 4.5 montre qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle dans aucunes des situations car la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05. Les tests ont été construits pour

déterminer si la différence entre les moyennes pour GNR ou médianes pour GR est égale à 0,0 par rapport à l'hypothèse alternative que la différence n'est pas égale à 0,0. Par ailleurs, pour GNR, comme les intervalles de différence entre les moyennes contiennent la valeur 0, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les moyennes des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0%. Rien n'empêche donc de compiler les données de l'ETS et l'ENA du fait qu'aucune analyse ne nous permet de rejeter de manière significative l'hypothèse que les données de deux écoles soient d'une même population.

## **4.2 Les analyses statistiques**

### **4.2.1 Analyse des données de temps entre les deux groupes**

Cette section comprend la comparaison des temps entre les groupes GNR et GR ainsi que les études de corrélations des données de temps de chaque activité (travail au complet, phases de compréhension et phases d'actions) ainsi que leur décomposition en temps hors et dans l'arbre (1<sup>er</sup> niveau et 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur).

#### **4.2.1.1 Comparaison des temps de chaque activité entre GNR et GR**

La première chose que l'on cherche à savoir est si le fait de renommer contribue à améliorer les performances. Pour se faire, il s'agit de comparer les temps de travail, de compréhension et d'action des groupes GR et GNR.

Tableau 4.6 Statistiques résumées de GNR et GR  
pour les données de temps de chaque activité

		GNR	GR
Temps de Travail	Médiane (sec)	1684,0	1168,5
	Asymétrie std.	0,54	2,48
	Aplatissement std.	0,69	2,84
Temps de Compréhension	Moyenne (sec)	1004,89	724,63
	Ecart-type	509,752	282,47
	Asymétrie std.	1,05	0,83
	Aplatissement std.	0,61	0,23
Temps d'Action	Moyenne (sec)	691,67	621,13
	Ecart-type	222,805	342,594
	Asymétrie std.	-0,61	1,56
	Aplatissement std.	-0,66	0,77

Le tableau 4.6 indique que la distribution des données de temps de travail de GR est la seule qui ne suit pas une loi normale étant donné que les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement ne sont pas entre -2 et 2. Nous devons donc faire appel au test non paramétrique W de Mann-Whitney pour comparer nos échantillons de temps de travail de GNR et GR. Pour les données de temps de compréhension et d'action, nous pouvons considérer la distribution de chaque échantillon comme normale et ainsi réaliser des tests F et t. Les tests F permettant de supposer l'égalité des écarts-types dans les tests t se situent en annexe VII.

Tableau 4.7 Tests de comparaison des données de temps de chaque activité entre GR et GNR

Temps de Travail	W =	22,0
	Probabilité =	0,0969651
Temps de Compréhension	t =	1,37555
	Probabilité =	0,0945787
	Différence entre les moyennes =	[-76,9165]
Temps d'Action	t =	0,509306
	Probabilité =	0,308974
	Différence entre les moyennes =	[-172,266]

Pour le test W du tableau 4.7, nous avons choisis que l'hypothèse nulle soit rejetée seulement si la médiane de GNR est significativement supérieur à la médiane de GR. Cela s'inscrit dans notre problématique où l'on tend à évaluer si renommer des éléments du modèle CAO apporte des bénéfices dans le temps de travail. Par conséquent on s'attend à rejeter l'hypothèse nulle si les temps de GNR sont supérieurs à celle de GR. Hors, bien qu'on y soit proche, la valeur de la probabilité est supérieure ou égale à 0,05 ( $P=0,0969651$ ). La médiane du temps de travail de GNR n'est donc pas significativement plus grande que la médiane du temps de travail de GR au niveau de confiance de 95,0%. Nous avons mis en annexe (*Voir ANNEXE VIII*), le graphique des densités et la boîte à moustache de cette analyse afin d'observer que l'absence de différence significative est due aux valeurs extrêmes de chaque groupe. Par conséquence, au regard de la distribution des deux échantillons et du fait que le test effectués approchent du seuil de signification sans l'atteindre, on peut dire que GR montre de meilleurs performances de temps de travail mais de manière non significative. Les valeurs extrêmes de chaque groupe empêchent de tirer un résultat significatif à ce sujet.

Pour les tests t du tableau 4.7, nous avons choisis que l'hypothèse nulle soit rejetée seulement si la moyenne de GNR est significativement supérieure à la moyenne GR. De la même manière que pour les temps de travail, cela s'inscrit dans notre problématique où l'on tend à évaluer si renommer des éléments du modèle CAO apporte des bénéfices dans le temps de

compréhension et d'action. Le tableau 4.7 montre qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle dans chacune des situations car les valeurs de la probabilité ne sont pas inférieures à 0,05. Toutefois au sujet des temps de compréhension, on approche du seuil de signification ( $P=0,0945787$ ). Par conséquent, GR tend avoir de meilleurs temps de compréhension sans que pour autant cela soit significatif.

Même si nous n'atteignons pas le seuil de signification que nous nous sommes fixé, il apparaît que le groupe ayant travaillé avec un modèle CAO renommé réalise de meilleurs temps de compréhension et de travail. En étudiant les corrélations des rangs de Spearman pour ce groupe (*Voir* Tableau 4.8), on observe un coefficient de corrélation élevé entre les temps de compréhension et le temps de travail (0,7381) quasiment significatif ( $P=0,0508$ ).

Tableau 4.8 Corrélations des rangs de Spearman  
entre les données de temps d'activité de GR

	Temps de Travail	Temps de compréhension	Temps d'action
Temps de Travail		0,7381	0,3095
		0,0508	0,4128
Temps de compréhension			-0,1667
			0,6592
Temps d'action			

Pour savoir si ces performances sont dues au fait d'avoir renommé, il faut étudier la corrélation des temps de chacune des activités (travail, compréhension, action) avec les temps passés dans et hors de l'arbre et observer si l'on constate des différences entre les deux groupes. Il s'agit d'évaluer les niveaux de corrélation des temps passés hors et dans l'arbre pour chaque temps d'activité et interpréter les différences entre GR et GNR vis-à-vis des conclusions que nous avons, à ce stade, sur les performances.



#### **4.2.1.2 Étude de corrélation entre les temps de travail et les temps hors et dans l'arbre pour GR et GNR**

Nous avons compilé les résultats des études de corrélation des rangs de Spearman pour les données de temps de chaque activité ainsi que leur décomposition en temps hors et dans l'arbre (1<sup>er</sup> niveau et 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur). L'identification de corrélation significative entre deux variables indique une dépendance entre eux, c'est à dire qu'il y a une relation entre eux. Le tableau 4.9 recoupe toutes les études de corrélation deux à deux, des variables de GNR et le tableau 4.10 celles de GR. Dans chaque case des deux tableaux, la première valeur correspond au coefficient de corrélation entre les deux variables à l'étude et la seconde correspond à la probabilité de signification de la corrélation. On considère qu'il y a une relation de corrélation intéressante entre deux variables lorsque la probabilité n'excède pas une probabilité de 12%. Il nous a semblé possible de présenter des conclusions pertinentes à ce niveau de signification. Le bilan des analyses statistiques nous en apprendra un peu plus sur les raisons qui nous ont amené à prendre ce niveau de signification pour les études de corrélation à plusieurs variables. Sur les tableaux 4.9 et 4.10, les corrélations dont la probabilité est significative ou proche du seuil de signification des 5% sont présentées en couleur. Les probabilités en dessous du seuil de signification de 5% sont indiquées en rouge dans les tableaux, ceux en dessous de 10% en orange et ceux en dessous de 12% en vert. La différence de couleur permet de nuancer chaque énonciation de corrélation dans nos résultats.

Tableau 4.9 Tableau de corrélation des variables de temps de GNR

	Temps de Travail	Temps de Travail hors de l'aire	Temps de Travail dans l'aire	Temps de Travail au 1er niveau de l'aire	Temps de Travail au 2ème niveau ou - de l'aire	Temps de Compréhension hors de l'aire	Temps de Compréhension dans l'aire	Temps de Compréhension au 1er niveau de l'aire	Temps de Compréhension au 2ème niveau ou - de l'aire	Temps d'Action hors de l'aire	Temps d'Action dans l'aire	Temps d'Action au 1er niveau de l'aire	Temps d'Action au 2ème niveau ou - de l'aire
Temps de Travail		0,8833	0,2833	0,2833	0,5167	0,9333	0,4833	0,4667	0,7167	0,6167	0,7333	-0,2	0,1177
Temps de Travail hors de l'aire	0,8833		0,4229	0,4229	0,1439	0,0083	0,0083	0,1869	0,9427	0,0811	0,4381	0,5716	0,7393
Temps de Travail dans l'aire	0,2833	0,4229		0,1167	0,4333	0,85	0,2333	0,2333	0,5333	0,8833	-0,2167	-0,3333	-0,0252
Temps de Travail au 1er niveau de l'aire	0,4229	0,1167	0,1167		0,2203	0,0162	0,5093	0,5093	0,1314	0,0381	0,0125	0,54	0,9431
Temps de Travail au 2ème niveau ou - de l'aire	0,5167	0,4333	0,2833	1	0,8833	0,2667	0,9	0,7667	0,75	0,5333	0,25	0,7333	0,8908
Temps de Compréhension hors de l'aire	0,2833	0,1167	0,4229	0	0,0125	0,4507	0,0109	0,0301	0,0339	0,4795	0,0381	0,0427	0,0118
Temps de Compréhension dans l'aire	0,4229	0,1167	0,1167	1	0,8833	0,2667	0,9	0,7667	0,75	0,5333	0,25	0,7333	0,8908
Temps de Compréhension au 1er niveau de l'aire	0,5167	0,4333	0,2833	0,8833		0,5333	0,8167	0,6333	0,9167	0,7	0,5	0,6167	0,8572
Temps de Compréhension au 2ème niveau ou - de l'aire	0,1439	0,2203	0,0125	0,0125		0,1314	0,0209	0,0732	0,0095	0,4477	0,1573	0,0811	0,0153
Temps de Compréhension	0,9333	0,85	0,2667	0,2667	0,5333		1	0,4833	0,4833	0,4833	0,4333	-0,1667	0,1765
Temps de Compréhension hors de l'aire	0,0083	0,0162	0,4507	0,4507	0,1314	0	0	0,1716	0,0533	0,1716	0,0732	0,6373	0,6177
Temps de Compréhension dans l'aire	0,9333	0,85	0,2667	0,2667	0,5333	1		0,4833	0,4833	0,4833	0,4333	-0,1667	0,1765
Temps de Compréhension au 1er niveau de l'aire	0,4667	0,2333	0,7667	0,7667	0,6333	0,0732	0,0732	0,1716	0,099	0,3667	0,35	0,3667	0,6555
Temps de Compréhension au 2ème niveau ou - de l'aire	0,1869	0,5093	0,0301	0,0301	0,0732	0,1716	0,0072	0,7667	0,099	0,2997	0,3222	0,3222	0,637
Temps d'Action	0,7167	0,3333	0,75	0,75	0,9167	0,6833	0,6833	0,5833		0,6167	0,5	0,3167	0,2
Temps d'Action hors de l'aire	0,0427	0,1314	0,0339	0,0339	0,0095	0,0533	0,0301	0,099	0,0811	0,1573	0,3704	0,5716	0,0542
Temps d'Action dans l'aire	0,6167	0,7333	0,5333	0,5333	0,7	0,4833	0,4667	0,3667	0,6167	0,8833	0,3667	0,25	0,3866
Temps d'Action au 1er niveau de l'aire	0,0811	0,4381	0,1314	0,1314	0,0477	0,1716	0,1869	0,2997	0,0811	0,0125	0,2997	0,4795	0,2742
Temps d'Action au 2ème niveau ou - de l'aire	0,7333	0,8833	0,25	0,25	0,5	0,6333	0,35	0,35	0,5	0,8833	-0,0167	0,1261	0,7214
Temps d'Action	0,0381	0,0125	0,4795	0,4795	0,1573	0,0732	0,3222	0,3222	0,1573	0,0125	0,9624	0,6373	0,7214
Temps d'Action hors de l'aire	-0,2	-0,2167	0,7333	0,7333	0,6167	-0,1667	0,5167	0,3667	0,3167	0,3667	-0,0167	0,95	0,8404
Temps d'Action dans l'aire	0,5716	0,54	0,0381	0,0381	0,0811	0,6373	0,1439	0,2997	0,3704	0,2997	0,9624	0,0072	0,0175
Temps d'Action au 1er niveau de l'aire	-0,2833	-0,3333	0,7167	0,7167	0,4833	-0,2833	0,4667	0,35	0,2	0,25	-0,1667	0,95	0,7395
Temps d'Action au 2ème niveau ou - de l'aire	0,4229	0,3458	0,0427	0,0427	0,1716	0,4229	0,1869	0,3222	0,5716	0,4795	0,6373	0,0072	0,0365
Temps d'Action	0,1177	-0,0252	0,8908	0,8908	0,8572	0,1765	0,765	0,6555	0,6807	0,3866	0,1261	0,8404	0,7395
Temps d'Action hors de l'aire	0,7393	0,9431	0,0118	0,0118	0,0153	0,6177	0,6177	0,0637	0,0542	0,2742	0,7214	0,0175	0,0365

Tableau 4.10 Tableau de corrélations des variables de temps de GR

	Temps de Travail	Temps de Travail hors de l'arbre	Temps de Travail dans l'arbre	Temps de Travail au 1er niveau de l'arbre	Temps de Compréhension hors de l'arbre	Temps de Compréhension dans l'arbre	Temps de Compréhension au 1er niveau de l'arbre	Temps de Compréhension au 2ème niveau ou - de l'arbre	Temps d'Action hors de l'arbre	Temps d'Action dans l'arbre	Temps d'Action au 1er niveau de l'arbre	Temps d'Action au 2ème niveau ou - de l'arbre
Temps de Travail		<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	0,4048	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	-0,0952	<b>0,7381</b> <b>0,5952</b>	0,4286	0,5238	0,3095	0,3571	0,491	0,5714
Temps de Travail hors de l'arbre		<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	0,2842	<b>0,1153</b> <b>0,5952</b>	0,8011	<b>0,4388</b> <b>0,5952</b>	0,2568	0,1658	0,4128	0,3447	0,1939	0,1306
			-0,1667	0,0714	-0,3333	0,5	-0,3095	-0,381	<b>0,619</b> <b>0,1015</b>	<b>0,7381</b> <b>0,5952</b>	0,1796	0,5
			0,6592	0,8501	0,3778	0,6592	0,4128	0,2387	<b>0,1015</b> <b>0,3778</b>	<b>0,5952</b> <b>0,1859</b>	0,6346	0,1859
Temps de Travail dans l'arbre			-0,1667	<b>0,881</b> <b>0,0198</b>	0,4048	0,5	<b>0,9524</b> <b>0,0117</b>	0,3333	0,4048	<b>0,7665</b> <b>0,426</b>	0,5238	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>
			0,2842	0,6592	0,8011	0,2842	0,1859	0,2842	0,3778	0,6143	0,1658	<b>0,1153</b>
Temps de Travail au 1er niveau de l'arbre			0,0714	<b>0,881</b> <b>0,0198</b>	0,0714	0,881	0,0714	-0,0238	0,381	<b>0,9222</b> <b>0,0147</b>	<b>0,7857</b> <b>0,0376</b>	0,381
			0,8501	<b>0,0198</b> <b>0,5952</b>	0,9498	0,1474	0,8011	0,9498	0,2077	<b>0,3135</b> <b>0,0376</b>	<b>0,0376</b> <b>0,3135</b>	0,3135
Temps de Travail au 2ème niveau ou - de l'arbre			-0,3333	-0,0238	-0,0238	0,1905	0,0952	-0,0238	-0,1905	-0,1437	-0,3333	0,5238
			0,3778	0,2842	0,9498	0,6143	0,8011	0,2568	0,6143	0,5287	0,3778	0,1658
Temps de Compréhension			0,1667	0,5	0,5476	0,1905	<b>0,6905</b> <b>0,0677</b>	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	-0,1667	-0,1429	0,2515	0,1905
			0,6592	0,1859	0,1474	0,6143	<b>0,0677</b> <b>0,5952</b>	<b>0,1153</b> <b>0,5952</b>	0,6592	0,7055	0,5058	0,6143
Temps de Compréhension hors de l'arbre			0,5	0,0476	0,0952	<b>0,6905</b> <b>0,0677</b>	0,1429	0,119	-0,119	-0,0238	-0,1317	-0,4762
			0,1859	0,8997	0,8011	<b>0,0677</b> <b>0,5952</b>	0,1429	0,7528	0,7528	0,9498	0,7274	0,8011
Temps de Compréhension dans l'arbre			-0,3095	<b>0,9524</b> <b>0,0117</b>	<b>0,8095</b> <b>0,0322</b>	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	<b>0,881</b> <b>0,0198</b>	0,0714	<b>0,6347</b> <b>0,0931</b>	0,3333	<b>0,619</b> <b>0,1015</b>
			0,4128	<b>0,0117</b> <b>0,5952</b>	<b>0,0322</b> <b>0,1153</b>	<b>0,1153</b> <b>0,5952</b>	0,7055	<b>0,0198</b> <b>0,5952</b>	0,8501	<b>0,0931</b> <b>0,3778</b>	0,3778	<b>0,1015</b>
Temps de Compréhension au 1er niveau de l'arbre			-0,2381	<b>0,8095</b> <b>0,0322</b>	-0,0238	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	0,119	<b>0,881</b> <b>0,0198</b>	0,0714	<b>0,7306</b> <b>0,0533</b>	0,4762	0,4524
			0,5238	<b>0,881</b> <b>0,0198</b>	<b>0,881</b> <b>0,0198</b>	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	0,7528	<b>0,0198</b> <b>0,5952</b>	0,8501	<b>0,0533</b> <b>0,2077</b>	0,2077	0,3313
Temps de Compréhension au 2ème niveau ou - de l'arbre			-0,3333	-0,0238	-0,0238	0,1905	0,0952	-0,0238	-0,1905	-0,1437	-0,3333	0,5238
			0,3778	0,2842	0,9498	0,6143	0,8011	0,2568	0,6143	0,5287	0,3778	0,1658
Temps d'Action			0,3333	0,4762	-0,1905	-0,1667	-0,119	0,0714	-0,1905	<b>0,7662</b> <b>0,0098</b>	<b>0,8333</b> <b>0,0275</b>	-0,119
			0,3778	0,2077	0,6143	0,6592	0,7528	0,8501	0,6143	<b>0,0098</b> <b>0,0616</b>	<b>0,0275</b> <b>0,0616</b>	0,7528
Temps d'Action hors de l'arbre			0,1905	0,381	-0,2381	-0,1429	-0,0238	-0,0714	-0,0476	<b>0,9762</b> <b>0,0098</b>	<b>0,8095</b> <b>0,0322</b>	-0,2381
			0,6143	0,3135	0,3135	0,7055	0,9498	0,8501	0,8997	<b>0,0098</b> <b>0,1061</b>	<b>0,0322</b> <b>0,1061</b>	0,5287
Temps d'Action dans l'arbre			0,1796	<b>0,9222</b> <b>0,0147</b>	-0,1437	0,2515	-0,1317	<b>0,6347</b> <b>0,0931</b>	<b>0,7666</b> <b>0,6616</b>	<b>0,6108</b> <b>0,1061</b>	<b>0,8623</b> <b>0,0225</b>	0,3473
			0,6346	<b>0,0426</b> <b>0,0147</b>	0,7038	0,5058	0,7274	<b>0,0931</b> <b>0,6333</b>	<b>0,6616</b> <b>0,8333</b>	<b>0,1061</b> <b>0,8095</b>	<b>0,0225</b> <b>0,8623</b>	0,3581
Temps d'Action au 1er niveau de l'arbre			0,5	0,5238	-0,3333	0,1905	0,0952	0,3333	0,4762	<b>0,8333</b> <b>0,0275</b>	<b>0,8095</b> <b>0,0322</b>	-0,119
			0,1859	0,1658	0,3778	0,6143	0,8011	0,3778	0,2077	<b>0,0322</b> <b>0,0275</b>	<b>0,0322</b> <b>0,0275</b>	0,7528
Temps d'Action au 2ème niveau ou - de l'arbre			-0,5952	<b>0,5952</b> <b>0,1153</b>	0,381	0,1905	-0,4762	0,4524	-0,119	-0,2381	-0,119	
			0,6143	<b>0,1153</b> <b>0,5952</b>	0,3135	0,6143	0,2077	<b>0,1015</b> <b>0,3133</b>	0,7528	0,3581	0,7528	

La compilation des données implique l'existence de relations mathématiques entre les variables suivantes :

- Temps de Travail = Temps de Compréhension + Temps d'Action;
- Temps d'une activité (Travail, Compréhension ou Action) = Temps de l'activité dans l'arbre + Temps de l'activité hors de l'arbre;
- Temps de l'activité dans l'arbre = Temps de l'activité dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau + Temps de l'activité dans l'arbre au 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur.

Ces relations mathématiques mettent en évidence le fait que les variables étant définies par la somme d'autres variables sont des variables expliquées par ces dernières. La figure 4.4 présente les relations d'explications entre chaque variable. On notera que si une variable A est expliquée par une variable B, elle-même expliquée par une variable C, alors la variable A est expliquée par la variable C.

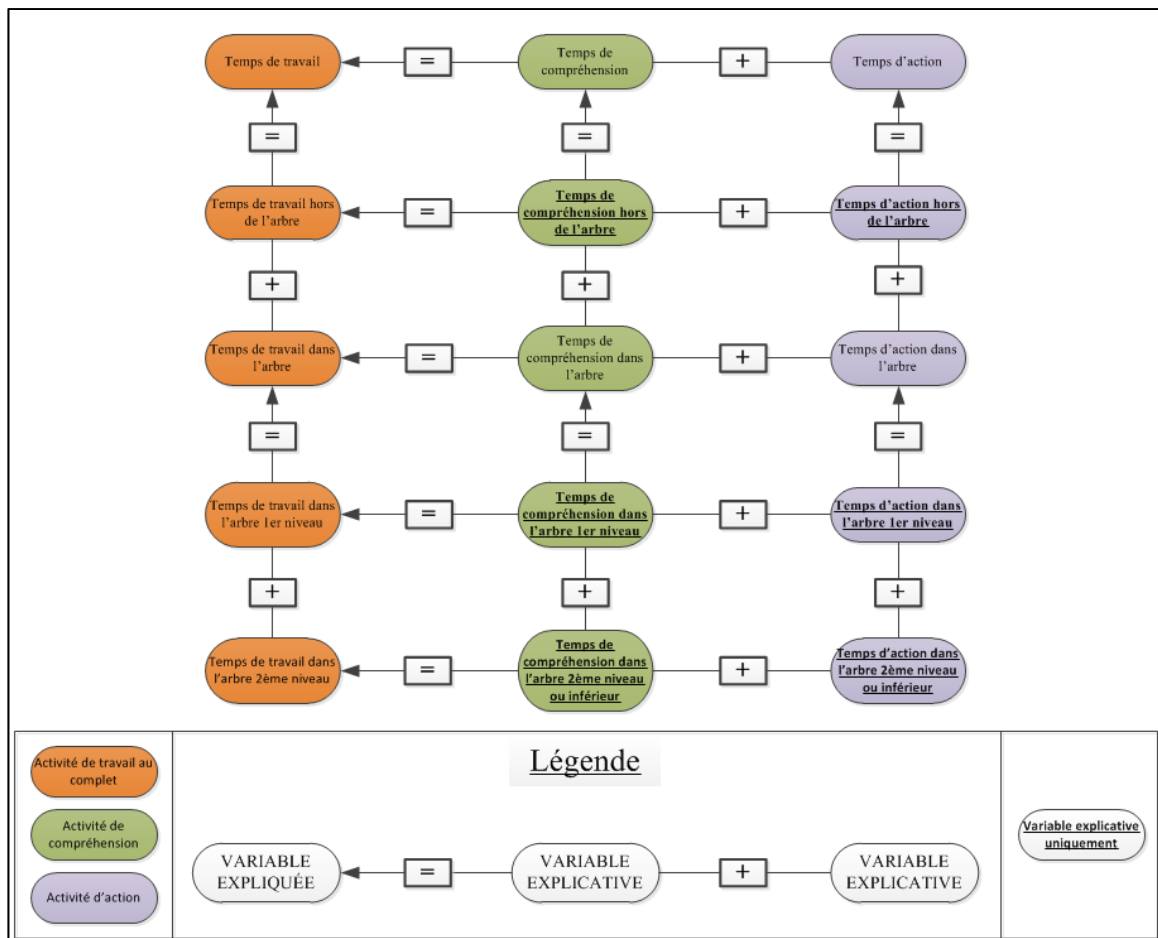


Figure 4.4 Relations entre les variables expliquées et les variables explicatives

Les études réalisées dans les tableaux 4.9 et 4.10 ne remettent pas en question l'existence de corrélation entre ces variables. Il s'agit d'analyses de corrélations simples comprenant plusieurs variables. Nous observons si les variations de deux variables d'un même groupe se produisent, de manière significative ou non, dans le même sens (coefficient de corrélation positif) ou dans le sens contraire (coefficient de corrélation négatif). De cette manière, nous désirons évaluer si les variations d'une variable expliquée est plus sensibles aux variations de certaines de ces variables explicatives que d'autres. Pour cela il s'agit d'établir, dans chaque groupe, les corrélations simples significatives des variables expliquées avec les variables explicatives. La comparaison des corrélations simples significatives entre les deux groupes pourra nous renseigner sur les différences de pratiques entre les étudiants ayant travaillé un modèle CAO renommé et les étudiants ayant travaillé un modèle non renommé.

Il est possible que nous observions des relations de corrélations simples significatives n'impliquant pas des relations de variables expliqués/explicatives. Certaines d'entre elles ne sont pas exploitables mais dans certains contextes il peut être intéressant de les relever. On remarque notamment certaines interdépendances entre plusieurs variables pouvant fournir des indications intéressantes quant aux pratiques d'un groupe ou de l'autre. L'interdépendance se définit par une dépendance mutuelle. Par exemple si A est lié à B et à C et que B et C sont aussi liés entre eux, nous avons une interdépendance entre A, B et C.

Notre étude de corrélation, chez GNR et GR, porte dans un premier temps sur l'identification des corrélations simples significatives des temps de chaque activité avec les temps passés hors et dans l'arbre, ainsi qu'avec les temps aux 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> niveaux ou inférieurs de l'arbre. Le but est d'observer s'il existe des différences entre les groupes sur la sensibilité des variations de variables expliquées avec les variations de variables explicatives. Par ailleurs il s'agit d'étudier les relations d'interdépendance pertinentes pour notre sujet de recherche. Les comparaisons entre GNR et GR permettront d'identifier le rôle de la dénomination d'éléments sur les temps de chaque activité. Pour rentrer dans le détail de l'analyse des résultats, nous suggérons au lecteur de s'appuyer sur le tableau 4.9 pour la présentation de résultat de corrélation des variables de GNR et sur le tableau 4.10 pour la présentation de résultat de corrélation des variables de GR.

Pour GNR, on observe que le temps de travail de GNR est corrélé au temps de compréhension ( $P=0,0083$ ) et d'action ( $P=0,0811$ ). De même, chaque temps d'activité est corrélé avec son temps hors de l'arbre (Temps de travail :  $P=0,125$ ; Temps de compréhension :  $P=0$ ; Temps d'action :  $P=0,0125$ ). Le temps de travail de GNR est aussi corrélé au temps de compréhension hors de l'arbre ( $P=0,0083$ ) et d'action hors de l'arbre ( $P=0,0381$ ). Ainsi on constate très clairement que les temps de travail de toutes les activités chez GNR sont plus sensibles aux temps passés hors de l'arbre. Il apparaît aussi que le temps de travail hors de l'arbre de GNR est corrélé au temps de compréhension hors de l'arbre ( $P=0,0162$ ) et le temps d'action hors de l'arbre ( $P=0,0125$ ). On remarque d'ailleurs que les temps de compréhension et d'action hors de l'arbre sont liés ( $P=0,0732$ ). Il y a donc ici une interdépendance des temps

de chaque activité hors de l'arbre. En ce qui concerne le temps de travail dans l'arbre, il est corrélé au temps de compréhension dans l'arbre ( $P=0,0109$ ) et d'action dans l'arbre ( $P=0,0381$ ) mais ces trois variables n'ont pas de corrélations simples significatives avec les temps des activités de GNR. Le temps de travail dans l'arbre est corrélé avec les temps de compréhension et d'action dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau (compréhension :  $P=0,0301$  ; action :  $P=0,0427$ ) et au 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur (compréhension :  $P=0,0339$  ; action :  $P=0,0118$ ). De même, les temps dans l'arbre des activités de compréhension et d'action sont corrélés avec leurs propres temps dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau (compréhension :  $P=0,0072$  ; action :  $P=0,0072$ ) et au 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur (compréhension :  $P=0,0301$  ; action :  $P=0,0175$ ). Une relation de corrélation est aussi visible pour ces activités entre les temps dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau et ceux au 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur (compréhension :  $P=0,099$  ; action :  $P=0,365$ ). Il y a donc deux interdépendances entre 4 variables. La première existe entre le temps de travail dans l'arbre, le temps de compréhension dans l'arbre, le temps de compréhension dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau et le temps de compréhension dans l'arbre au 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur. La seconde existe entre le temps de travail dans l'arbre, le temps d'action dans l'arbre, le temps d'action dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau et le temps d'action dans l'arbre au 2<sup>ème</sup> niveau. Enfin hormis l'activité de compréhension au 2<sup>ème</sup> niveau qui joue un rôle significatif sur les variations de temps de travail global ( $P=0,0427$ ), les autres variables concernant l'arbre ne présentent pas de corrélations simples significatives avec quelques temps d'activité.

**Par conséquent, pour GNR, les performances de travail global, de compréhension et d'action ont été plus influencées par les temps hors de l'arbre que ceux dans l'arbre.** Ces derniers sont d'ailleurs liés entre eux ce qui laisse penser à une pratique centrée hors de l'arbre. D'autant plus que si l'on se concentre sur le travail dans l'arbre, tous les aspects d'activités dans l'arbre, que ce soit dans sa globalité ou aux 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> niveaux ou inférieur, ont influencé le temps de travail dans l'arbre sans réellement avoir des répercussions sur les variations de temps des diverses activités. Seul le temps de compréhension au 2<sup>ème</sup> niveau ou inférieur de l'arbre montre une corrélation simple significative avec le temps de travail.

Pour GR, comme il a été indiqué auparavant, le temps de travail est corrélé au temps de compréhension de manière quasi-significative ( $P=0,0508$ ). Il apparaît que les variations de temps de travail s'expliquent avec le temps de compréhension passé hors de l'arbre ( $P=0,0438$ ) et que le temps de travail est aussi corrélé à un faible niveau de signification avec le temps de travail hors de l'arbre ( $P=0,1153$ ). Par conséquent, la place du travail hors de l'arbre et notamment celui de compréhension joue aussi dans ce groupe-ci sur les variations du temps de travail. On remarque, toutefois que le temps de compréhension a des niveaux de corrélations intéressant que ce soit avec son travail hors de l'arbre ( $P=0,0677$ ) ou son travail dans l'arbre ( $P=0,1153$ ) que l'on ne retrouve pas chez GNR. De la même manière, le temps d'action est aussi corrélé de manière significative avec le temps d'action hors de l'arbre ( $P=0,0098$ ) et de manière quasi significative avec le temps d'action dans l'arbre ( $P=0,0616$ ). Il apparaît donc que, contrairement à GNR, le travail dans l'arbre de GR a aussi des répercussions sur les variations de temps de compréhension et d'action même si cela ne se retranscrit pas sur le temps de travail au complet. D'ailleurs, pour GR, le temps de travail dans l'arbre est corrélé au temps de compréhension dans l'arbre ( $P=0,0117$ ) et le temps d'action dans l'arbre ( $P=0,0426$ ). De la même manière, il y a une corrélation quasiment significative entre le temps de compréhension dans l'arbre et le temps d'action dans l'arbre ( $P=0,931$ ). On observe donc une interdépendance des temps passé dans l'arbre pour GR qui n'existe pas entre les temps hors de l'arbre pour ce groupe. Si on rentre dans le détail des temps de travail dans l'arbre de chaque activité, on remarque que ces derniers corrélaient significativement avec leur temps passé au 1<sup>er</sup> niveau (travail :  $P=0,0198$ , compréhension :  $P=0,0198$ , action :  $P=0,0225$ ) et non pas avec leur 2<sup>nds</sup> niveaux dans l'arbre. Les temps de chaque activité sont d'ailleurs corrélés avec leur temps dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau (travail :  $P=0,1153$  ; compréhension :  $P=0,1153$ , action :  $P=0,0275$ ). On remarque ici deux interdépendances entre 3 variables. La première existe entre le temps de compréhension, le temps de compréhension dans l'arbre et le temps de compréhension dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau. La seconde existe entre le temps d'action, le temps d'action dans l'arbre et le temps d'action dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau. Cette interdépendance n'existe pas pour le temps de travail car ce dernier ne corréle pas avec son temps passé dans l'arbre. Par conséquent les variations de temps de compréhensions et d'action sont sensibles aux variations de temps



dans l'arbre et notamment celles au 1<sup>er</sup> niveau. On notera que ce résultat possède des probabilités de signification trop faibles pour exister pour l'activité totale de travail. On remarque, néanmoins, faiblement significative entre le temps de travail et le temps de travail dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau ( $P=0,01153$ ).

Ainsi, on retrouve, de la même manière que chez GNR, un travail hors de l'arbre chez GR qui impacte les variations de chaque activité (travail, compréhension, action). Toutefois le travail dans l'arbre de GR a joué un rôle sur les performances des phases de compréhension et d'action. Même si ce résultat ne se reflète pas sur les performances de travail global, c'est un point qui diffère totalement de GNR où le travail dans l'arbre dépendait des activités au 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> niveau sans sensibiliser les variations de temps de travail. **Pour GR, le travail dans l'arbre joue un rôle sur les variations de compréhension et c'est notamment dû à leur activité au 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre. On remarque ainsi une différence de pratique entre les deux groupes. Les étudiants ayant travaillé avec un modèle renommé au 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre ont utilisé ce facteur et montrent des corrélations simples intéressantes de cette utilisation avec les temps de chaque activité. A contrario, l'arbre joue un rôle moins important pour GNR sur les temps de chaque activité.** Ceci se reflète dans l'interdépendance des activités hors de l'arbre et leur rôle significatif sur les temps d'action, de compréhension et globalement de travail. L'interdépendance des temps chez GR existe pour les temps passés dans l'arbre. Par conséquent, les différences de travail entre GNR et GR montrent une rationalisation de l'utilisation de l'arbre et notamment du 1<sup>er</sup> niveau vis-à-vis de l'efficacité des temps de compréhension et d'action lorsque des éléments du modèle CAO ont été renommés. L'étude de la part de la répartition du travail de chaque groupe pourra nous donner plus d'information à ce sujet.

Auparavant, nous pouvons utiliser les données de temps de compréhension hors de l'arbre pour compléter les conclusions sur la comparaison des performances de temps des deux groupes.

#### 4.2.1.3 Comparaison du temps de compréhension hors de l'arbre entre GNR et GR

On constate, en effet, une interdépendance entre le temps de travail, le temps de compréhension et le temps de compréhension hors de l'arbre pour les deux groupes. Le temps de compréhension hors de l'arbre est lié de manière significative avec le temps de travail pour les deux groupes (GNR :  $P=0,083$  ; GR :  $P=0,0438$ ) ainsi qu'avec le temps de compréhension de manière significative pour GNR ( $P=0$ ) et quasi-significative pour GR ( $P=0,0677$ ). Quant à ces deux dernières variables, elles sont corrélées entre elle de manière significative pour GNR ( $P=0,0083$ ) et de manière quasi-significative pour GR ( $P=0,0508$ ).

Tableau 4.11 Statistiques résumées pour le temps de travail hors de l'arbre de GNR et GR

	<i>Groupe=GNR</i>	<i>Groupe=GR</i>
Moyenne	706,556	434,5
Ecart-type	398,64	248,014
Asymétrie std.	0,591317	1,4252
Aplatissement std.	-0,39591	-0,113002

Les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement (entre -2 et 2) du tableau 4.11 nous permettent de considérer la distribution des deux échantillons normale.

Tableau 4.12 Tests F et t de comparaison des moyennes entre GR et GNR pour les données le temps de travail hors de l'arbre de GNR et GR

F =	2,5835
Probabilité =	0,228514
Rapport des variances =	[0,527315; 11,6995]
t =	1,66219
Probabilité =	0,0586128
Différence entre les moyennes =	[-14,8728]

Le test F du tableau 4.12 montre qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle car la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05. Le test a été construit pour déterminer si la valeur du rapport des écarts-types est égale à 1,0 contre l'hypothèse alternative que la valeur du rapport n'est pas égale à 1,0. Par ailleurs, comme les intervalles contiennent la valeur 1, il n'y a pas de différence significative entre les écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0%. Par conséquent, pour ce cas, on considère qu'il n'y a pas de différence significative entre les écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0% dans le cadre du test t.

Pour ce dernier, nous avons choisis que l'hypothèse nulle soit rejetée seulement si la moyenne de GNR est significativement supérieure à la moyenne GR; de la même manière que pour les temps de travail et le temps de compréhension. Le tableau 4.12 montre qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle car la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05. Toutefois on approche très fortement ce seuil de signification. **Par conséquent, on montre encore une fois que les performances de GR sont meilleures que celles de GNR sans pour autant être significatives mais en approchant un peu mieux le seuil de signification que pour le temps de travail et le temps de compréhension.**

On remarque donc que travailler avec un modèle CAO renommé a amélioré les performances de travail et de compréhension avec des seuils de significations proches de 5% et sans oublier d'indiquer que ces conclusions reposent sur des associations de variables à des seuil de signification allant jusqu'à 11,53%, notamment sur les aspects de corrélation avec l'arbre. L'étude de la répartition du temps nous permet d'étudier les pratiques afin de voir si les étudiants de GR ont réellement utilisé la dénomination en comparaison avec les étudiants de GNR. Une chose intéressante de cette première étude et qui nous conforte dans cette idée est le fait d'observer un lien significatif entre les variables (travail, compréhension et action) de temps passé hors de l'arbre chez GNR alors que celui quasi-significatif existe chez GR entre les variables (travail, compréhension et action) de temps passé dans l'arbre.

#### **4.2.2 Analyse de la répartition du travail**

Dans cette section, on compare la proportion de temps passé dans l'arbre entre les deux groupes. Une comparaison des résultats des deux groupes permet d'observer s'il y a des différences dans l'utilisation de l'arbre. La première analyse porte sur la répartition des temps hors et dans l'arbre chez GR et GNR. La seconde analyse porte sur la comparaison du pourcentage des temps dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau entre GNR et GR.

##### **4.2.2.1 Analyse de la répartition des temps hors et dans l'arbre pour GR et GNR**

En premier lieu, on observe la répartition du temps hors et dans l'arbre pour chaque activité (travail, compréhension, action). Pour cela nous avons reporté les durées de chaque activité sur une base 100 pour établir le pourcentage de temps passé hors et dans l'arbre pour chaque participant (*Voir* ANNEXE IX). Cette analyse nous permet d'évaluer s'il y a une différence significative entre la durée de l'activité hors et dans l'arbre pour chaque groupe. La comparaison de la distribution du temps passé dans l'arbre entre les groupes nous permettra d'observer les différences entre eux.

Tableau 4.13 Statistiques résumées du pourcentage de temps des activités hors et dans l'arbre (GR et GNR)

			Hors de l'arbre	Dans l'arbre
GR	Travail Global	Moyenne	70,3012	29,6987
		Ecart-type	11,6026	11,6026
		Asymétrie std.	-0,881613	0,881613
		Aplatissement std.	-0,403976	-0,403976
	Compréhension	Moyenne	58,0212	41,9788
		Ecart-type	13,2841	13,2841
		Asymétrie std.	0,575001	-0,575001
		Aplatissement std.	0,364642	0,364642
	Action	Moyenne	84,005	15,995
		Ecart-type	6,59046	6,59046
		Asymétrie std.	-1,38777	1,38777
		Aplatissement std.	-0,258605	-0,258605
GNR	Travail Global	Moyenne	75,8078	24,1922
		Ecart-type	8,95079	8,95079
		Asymétrie std.	-0,657195	0,657195
		Aplatissement std.	0,249115	0,249115
	Compréhension	Moyenne	67,8733	32,1267
		Ecart-type	11,7907	11,7907
		Asymétrie std.	-1,09005	1,09005
		Aplatissement std.	1,43964	1,43964
	Action	Moyenne	85,95	14,05
		Ecart-type	7,89418	7,89418
		Asymétrie std.	-0,671277	0,671277
		Aplatissement std.	-0,944154	-0,944154

Les données du tableau 4.13 montrent que tous les échantillons à l'étude suivent une loi normale. Par ailleurs, tous les échantillons comparés entre eux ont le même écart-type. Par conséquent, il n'est pas utile de réaliser des tests F pour supposer l'égalité des écart-types.

Tableau 4.14 Test t entre les % de temps hors et dans l'arbre pour chaque activité de GR

Travail Global	t =	6,99885
	Probabilité =	0,00000625936
	Différence entre les moyennes =	[28,1599 ; 53,0451]
Compréhension	t =	2,4153
	Probabilité =	0,0299767
	Différence entre les moyennes =	[1,79674 ; 30,2883]
Action	t =	20,6389
	Probabilité =	7,01816E-12
	Différence entre les moyennes =	[60,9424 ; 75,0776]

Tableau 4.15 Test t entre les % de temps hors et dans l'arbre pour chaque activité de GNR

Travail Global	t =	12,2328
	Probabilité =	1,55676E-9
	Différence entre les moyennes =	[42,6707 ; 60,5604]
Compréhension	t =	6,43135
	Probabilité =	0,00000830111
	Différence entre les moyennes =	[23,9638 ; 47,5295]
Action	t =	19,3209
	Probabilité =	1,62892E-12
	Différence entre les moyennes =	[64,0111 ; 79,7889]

Les tests t des tableaux 4.14 et 4.15 sont construits pour que l'hypothèse nulle soit rejetée si la différence entre les moyennes est égale à 0,0 par rapport à l'hypothèse alternative que la différence n'est pas égale à 0,0. Le tableau 4.14 montre qu'on peut rejeter l'hypothèse nulle pour les échantillons de GR au seuil de signification de 5%. Le tableau 4.15 montre la même chose chez GNR. **Par conséquent, les participants de chaque groupe passent significativement plus de temps hors de l'arbre.** Ces résultats communs rejoignent ceux des études de corrélation mettant en évidence l'importance des travaux hors de l'arbre sur le temps de travail pour les deux groupes. La différence que l'on peut remarquer entre les deux groupes se trouve dans les proportions de travail global et de compréhension. GNR passe en moyenne environ 25% du temps de travail dans l'arbre pour 30% pour GR. De même que GNR passe en moyenne environ 32% du temps de compréhension dans l'arbre pour 42% pour GR.

Ainsi on remarque que GR tend à avoir une part de travail global et de compréhension dans l'arbre plus grande que celle de GNR. Cette part n'est toutefois pas significativement plus grande. On le constate à travers la comparaison des boîtes à moustaches du pourcentage de temps de travail (*Voir Figure 4.5*), temps de compréhension (*Voir Figure 4.6*).

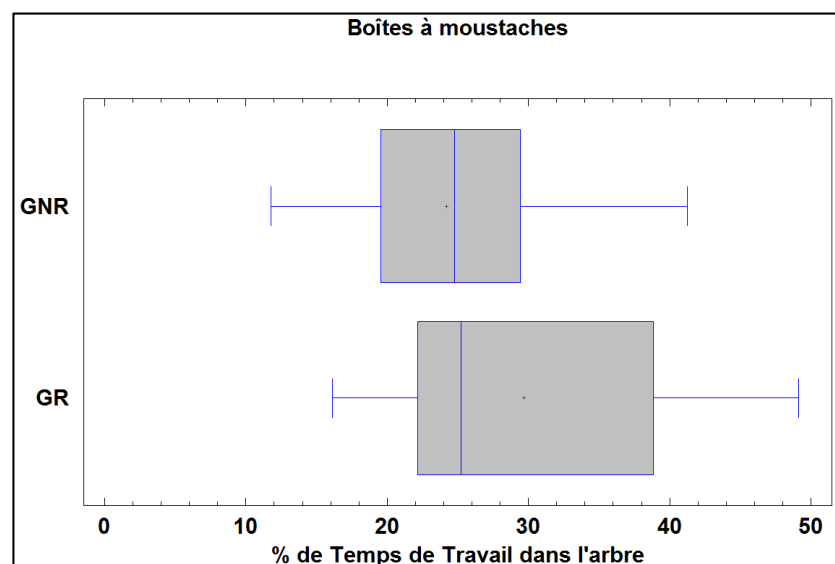


Figure 4.5 Boîtes à moustaches du pourcentage de temps de travail dans l'arbre de GNR et GR

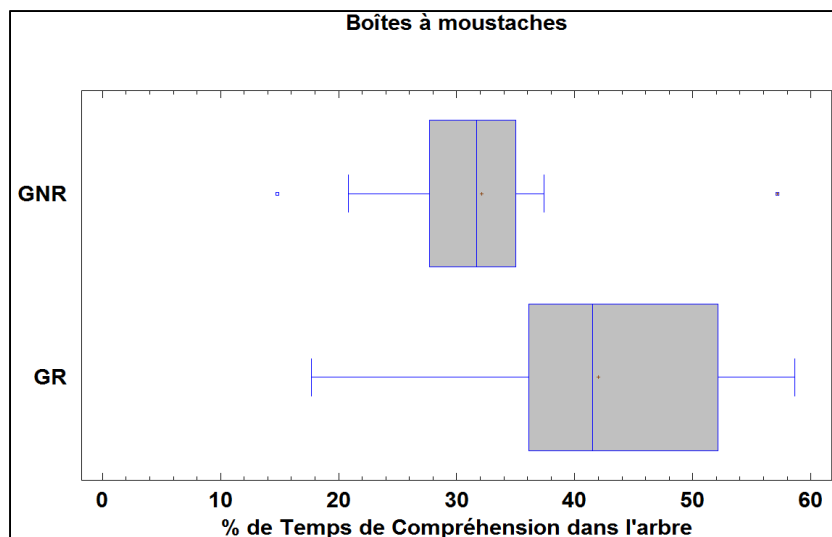


Figure 4.6 Boîtes à moustaches du pourcentage de temps de compréhension dans l'arbre de GNR et GR

Les pourcentages de temps de travail et de compréhension montrent une forte proportion des étudiants de GR qui tendent à travailler plus dans l'arbre que ceux de GNR. Ces graphiques dédiés au travail et à la compréhension indiquent que les intervalles de GR entre la médiane et le troisième quartile, représentant entre 50% et 75% de la portion de valeurs, sont plus étendus et proches de 50% sur l'échelle des valeurs que ceux de GNR.

#### 4.2.2.2 Comparaison de la répartition des temps dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau entre GR et GNR

Il s'agit d'observer et comparer le pourcentage du temps de l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau entre les deux groupes pour le travail global et les phases de compréhension. Pour cela, on met les temps de chaque activité du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> niveau de l'arbre ainsi que les temps dans le panneau Parent/Enfant sur une base 100 (*Voir ANNEXE X p.189*). L'analyse pour les phases d'actions n'apporte pas d'intérêt au vu des résultats précédents.



Tableau 4.16 Statistiques résumées du pourcentage de temps au 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre (GNR et GR)

		GNR	GR
Travail Global	Moyenne	62,67	74,6125
	Ecart-type	7,47147	13,6145
	Asymétrie std.	0,563038	-1,87296
	Aplatissement std.	0,844338	1,658596
Compréhension	Moyenne	63,7211	75,3663
	Ecart-type	8,82596	13,1936
	Asymétrie std.	0,470689	-1,71526
	Aplatissement std.	0,105073	0,914025

Les données du tableau 4.16 montrent que tous les échantillons à l'étude suivent une loi normale. Par ailleurs, au regard des moyennes, il apparaît que dans les deux groupes la part de travail global et de compréhension dans l'arbre effectué au 1<sup>er</sup> niveau soit la plus grande.

Tableau 4.17 Tests F et t de comparaison des moyennes  
entre GR et GNR pour le % de temps au 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre

Travail Global	F =	0,301167
	Probabilité =	0,11432
	Rapport des variances =	[0,0614709 ; 1,36385]
	t =	-2,2793
	Probabilité =	0,03770116
	Différence entre les moyennes =	[-23,1104 ; -0,774627]
Compréhension	F =	0,447502
	Probabilité =	0,282452
	Rapport des variances =	[0,0913392 ; 2,02654]
	t =	-2,16284
	Probabilité =	0,0471129
	Différence entre les moyennes =	[-23,1213 ; -0,169013]

Les tests F du tableau 4.17 montrent qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle car la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05. Le test a été construit pour déterminer si la valeur du rapport des écarts-types est égale à 1,0 par rapport à l'hypothèse alternative que la valeur du rapport n'est pas égale à 1,0. Par ailleurs, comme les intervalles contiennent la valeur 1, il n'y a pas de différence significative entre les écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0%. Par conséquent, on considère qu'il n'y a pas de différence significative entre les écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0% dans le cadre des tests t.

Pour ces derniers, nous avons choisi que l'hypothèse nulle soit rejetée si la différence des moyennes est égale à 0 par rapport à l'hypothèse alternative que la différence n'est pas égale à 0. Le tableau 4.17 montre qu'on peut rejeter l'hypothèse nulle dans les deux cas au seuil de signification de 5%. **La part de temps dans l'arbre passé au 1<sup>er</sup> niveau est significativement plus grande chez GR que GNR. Cela confirme que les participants ayant un modèle renommé ont utilisé ce facteur pour réaliser les travaux de**

**modifications et notamment dans la phase de compréhension.** Les analyses suivantes concernent l'utilisation de commandes et les ouvertures de panneaux dans les deux groupes.

#### **4.2.3 Analyses de l'utilisation de commandes et des ouvertures de panneaux**

Dans un premier temps, il s'agit de comparer les utilisations de commandes et ouvertures de panneaux dans chaque groupe et entre eux lors des phases de compréhension, d'action et dans le travail global. Ces analyses correspondent aux points 1 et 2 de la 3<sup>ème</sup> partie de l'analyse statistique présentée au chapitre 3, section 3.2.3. Afin de réaliser des études comprenant une quantité de données suffisamment importante pour tirer des conclusions, nous avons regroupé toutes les commandes dans et hors de l'arbre pour chaque activité. Il s'agit d'évaluer si le fait de travailler un modèle renommé modifie les pratiques.

Le tableau 4.18 informe des médianes du nombre de commandes et du nombre d'ouvertures de panneaux de chaque situation pour chaque groupe et présente les résultats d'un test W de Mann-Whitney de comparaison des médianes de chaque groupe.

Tableau 4.18 Compilation du nombre de commandes  
et ouvertures de panneaux de chaque groupe  
pour chaque activité et test W de comparaison des médianes

	Compréhension						Action						Total Travail						
	Dans l'aire		Hors de l'aire		Tous lieux		Dans l'aire		Hors de l'aire		Tous lieux		Dans l'aire		Hors de l'aire		Tous lieux		
	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	Commandes CATIA	Ouverture de panneau	
GR	Participant 1	51	11	5	2	56	13	8	20	4	11	12	31	59	31	9	13	68	44
	Participant 3	4	17	1	18	5	35	0	9	0	5	0	14	4	26	1	23	5	49
	Participant 5	5	32	24	3	29	35	0	15	4	1	4	16	5	47	28	4	33	51
	Participant 7	2	35	0	3	2	38	2	25	0	1	2	26	4	60	0	4	4	64
	Participant 9	29	18	0	0	29	18	7	20	1	2	8	22	36	38	1	2	37	40
	Participant 11	7	40	0	3	7	43	1	15	1	10	2	25	8	55	1	13	9	68
	Participant 15	11	29	1	0	12	29	3	11	2	4	5	15	14	40	3	4	17	44
	Participant 17	1	38	0	17	1	55	0	15	0	14	0	29	1	53	0	31	1	84
	MÉDIANE	6	30,5	0,5	3	9,5	35	1,5	15	1	4,5	3	23,5	6,5	43,5	1	8,5	13	50
	Participant 2	6	34	0	36	6	70	3	52	0	14	3	66	9	86	0	50	9	136
GNR	Participant 4	16	14	9	5	25	19	2	12	1	14	3	26	18	26	10	19	28	45
	Participant 6	94	7	0	0	94	7	12	16	0	5	12	21	106	23	0	5	106	28
	Participant 8	83	18	11	1	94	19	14	11	2	4	16	15	97	29	13	5	110	34
	Participant 10	41	13	0	1	41	14	19	29	0	0	19	29	60	42	0	1	60	43
	Participant 12	11	15	1	14	12	29	1	10	0	6	1	16	12	25	1	20	13	45
	Participant 14	39	38	0	7	39	45	27	23	2	2	29	25	66	61	2	9	68	70
	Participant 16	0	51	1	42	1	93	0	11	0	5	0	16	0	62	1	47	1	109
	Participant 18	2	48	21	6	23	54	2	12	3	10	5	22	4	60	24	16	28	76
	MÉDIANE	16	18	1	6	25	29	3	12	0	5	5	22	18	42	1	16	28	45
	W=	25	39	33	27	24	34,5	20,5	36	43,5	31,5	24	34,5	22	35	36	26	23,5	35
TEST W	Probabilité =	0,31173	0,80966	0,79815	0,41081	0,2673	0,9232	0,14491	0,96138	0,47424	0,69819	0,26611	0,92291	0,19284	0,96157	0,96065	0,35887	0,24705	0,96157

Nous avons choisi de réaliser un test W car de nombreux échantillons ne suivaient pas la loi normale. Le test est construit pour que l'hypothèse nulle soit rejetée si la différence des



Tableau 4.20 Tests W de comparaison de l'ouverture de panneaux et de l'utilisation de commandes dans chaque situation de GNR

GROUPE = GNR			Total Travail			Compréhension			Action		
			Dans l'arbre	Hors de l'arbre	Tous Lieux	Dans l'arbre	Hors de l'arbre	Tous Lieux	Dans l'arbre	Hors de l'arbre	Tous Lieux
			Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau	Ouverture de panneau
Total Travail	Dans l'arbre	Commandes CATIA	49,5								
			0,452677								
	Hors de l'arbre	Commandes CATIA		64							
				0,0413055							
	Tous Lieux	Commandes CATIA			55						
					0,215185						
Compréhension	Dans l'arbre	Commandes CATIA				44					
						0,791077					
	Hors de l'arbre	Commandes CATIA					56				
							0,178455				
	Tous Lieux	Commandes CATIA						44			
								0,790866			
Action	Dans l'arbre	Commandes CATIA							59		
									0,11085		
	Hors de l'arbre	Commandes CATIA								72,5	
										0,00447906	
	Tous Lieux	Commandes CATIA									68,5
											0,0148563

La comparaison des deux tableaux montre que GR utilise significativement plus l'ouverture de panneaux dans l'arbre; résultat n'apparaissant pas chez GNR. Le fait de réaliser plus d'ouvertures de panneaux dans les phases d'action est tout à fait justifié par la construction de l'expérience où il s'agit de modifier les paramètres d'éléments existants. Ce changement passe nécessairement par l'ouverture de panneaux. Malgré le fait qu'on ne puisse pas dissocier le nombre de panneaux ouverts ou le nombre de commandes utilisées entre les groupes, il apparaît que le travail dans l'arbre de GR est significativement plus porté sur l'ouverture de panneaux. Par conséquent, l'utilisation de commandes de repérage pour ce groupe est significativement moins importante.

Pour affiner notre analyse sur les utilisations des ouvertures de panneaux, nous comparons les nombres d'ouvertures dans l'arbre au 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> niveau pour chaque activité chez GR et GNR. De la même manière que pour l'étude précédente, on réalise un test W pour chaque situation entre GR et GNR. Hors, ces tests ne montrent pas de différences significatives entre le 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> niveau dans les deux groupes (*Voir ANNEXE XI*). Cette analyse ne met donc pas en avant de différences significatives entre GR et GNR quant aux ouvertures de panneaux dans l'arbre. Et bien que nous remarquions une différence significative dans l'arbre entre l'utilisation de commande et d'ouverture de panneaux pour GR, qui n'existe pas chez GNR,

nous ne pouvons pas indiquer qu'il s'agit du fait que les étudiants ayant un modèle renommé utilisent moins de commandes de repérage. En effet, aucune différence statistiquement significative n'existe entre GR et GNR. Il apparaît donc ici une zone d'ombre dont il est difficile d'approfondir l'analyse statistique. Le faible nombre de commandes utilisées par les étudiants, tous groupes confondus, ainsi que les disparités d'utilisation de ces dernières au sein de chaque groupe rendent compliquée l'exploitation de ces données dans le but de tirer des conclusions plus précises. Néanmoins, il est possible de s'appuyer sur ces données pour notre étude qualitative.

#### 4.2.4 Analyse de l'influence de l'utilisation de commandes et des ouvertures de panneaux sur les temps de travail

Cette étude établit les corrélations des rangs de Spearman entre les commandes CATIA V5<sup>®</sup> utilisées, les ouvertures de panneaux et les performances de chaque activité. Pour cela, nous avons compilé les données dans le tableau de l'annexe XII p.192.

Les résultats des corrélations de GR sont présentés dans le tableau 4.21 et ceux de GNR dans le tableau 4.22. Pour cette analyse, on ne s'intéresse qu'aux corrélations de temps avec les commandes CATIA V5<sup>®</sup> ou les ouvertures de panneaux à chaque activité.

Tableau 4.21 Tableau de corrélation des commandes avec les performances de temps (GR)

		Travail Total			Compréhension			Action		
		Temps de Travail	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux	Temps de Compréhension	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux	Temps d'Action	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux
Travail Total	Temps de Travail		-0,2857 0,4497	0,3234 0,3923	0,7381 <b>0,0508</b>	-0,3234 0,3923	0,3832 0,3106	0,3095 0,4128	-0,4338 0,2511	0,119 0,7528
	Commandes CATIA	-0,2857 0,4497		-0,7785 <b>0,0394</b>	-0,0952 0,8011	0,994 <b>0,0085</b>	-0,8743 <b>0,0207</b>	-0,5 0,1859	0,9157 <b>0,0154</b>	0 1
	Ouverture de panneaux	0,3234 0,3923	-0,7785 <b>0,0394</b>		-0,0719 0,8492	-0,7349 0,0518	0,9518 <b>0,0118</b>	0,6826 0,0709	-0,7637 <b>0,0433</b>	0,3114 0,41
	Temps de Compréhension	0,7381 <b>0,0508</b>	-0,0952 0,8011	-0,0719 0,8492		-0,1317 0,7274	-0,0599 0,8741	-0,1667 0,6592	-0,2048 <b>0,5879</b>	0,0952 0,8011
Compréhension	Commandes CATIA	-0,3234 0,3923	0,994 <b>0,0085</b>	-0,7349 0,0518	-0,1317 0,7274		-0,8494 <b>0,0246</b>	-0,515 0,173	0,897 <b>0,0176</b>	-0,012 0,9747
	Ouverture de panneaux	0,3832 0,3106	-0,8743 <b>0,0207</b>	0,9518 0,0118	-0,0599 0,8741	-0,8494 <b>0,0246</b>		0,7306 0,0533	-0,8546 <b>0,0238</b>	0,1198 0,7513
	Temps d'Action	0,3095 0,4128	-0,5 0,1859	0,6826 0,0709	-0,1667 0,6592	-0,515 0,173	0,7306 0,0533		-0,3374 0,3721	0,4762 0,2077
	Commandes CATIA	-0,4338 0,2511	0,9157 <b>0,0154</b>	-0,7637 <b>0,0433</b>	-0,2048 0,5879	0,897 <b>0,0176</b>	-0,8546 0,0238	-0,3374 0,3721		0,1807 0,6325
Action	Ouverture de panneaux	0,119 0,7528	0 1	0,3114 0,41	0,0952 0,8011	-0,012 0,9747	0,1198 0,7513	0,4762 0,2077	0,1807 0,6325	

Tableau 4.22 Tableau de corrélation des commandes avec les performances de temps (GNR)

		Travail Total			Compréhension			Action		
		Temps de Travail	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux	Temps de Compréhension	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux	Temps d'Action	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux
Travail Total	Temps de Travail		-0,569 0,1075	0,8703 0,0138	0,9333 0,0083	-0,6444 0,0684	0,8034 0,0231	0,6167 0,0811	-0,3096 0,3812	0,3766 0,2868
	Commandes CATIA	-0,569 0,1075		-0,8025 0,0232	-0,5188 0,1422	0,9748 0,0058	-0,7437 0,0354	-0,1757 0,6192	0,8277 0,0192	-0,2017 0,5684
	Ouverture de panneaux	0,8703 0,0138	-0,8025 0,0232		0,7782 0,0277	-0,8824 0,0126	0,9454 0,0075	0,5188 0,1422	-0,4664 0,1871	0,3319 0,3478
Compréhension	Temps de Compréhension	0,9333 0,0083	-0,5188 0,1422	0,7782 0,0277		-0,5941 0,0929	0,795 0,0245	0,4833 0,1716	-0,3515 0,3202	0,1506 0,6701
	Commandes CATIA	-0,6444 0,0684	0,9748 0,0058	-0,8824 0,0126	-0,5941 0,0929		-0,8613 0,0148	-0,1757 0,6192	0,7899 0,0255	-0,1261 0,7214
	Ouverture de panneaux	0,8034 0,0231	-0,7437 0,0354	0,9454 0,0075	0,795 0,0245	-0,8613 0,0148		0,3013 0,3942	-0,5084 0,1504	0,0168 0,9621
Action	Temps d'Action	0,6167 0,0811	-0,1757 0,6192	0,5188 0,1422	0,4833 0,1716	-0,1757 0,6192	0,3013 0,3942		0,3347 0,3438	0,8452 0,0168
	Commandes CATIA	-0,3096 0,3812	0,8277 0,0192	-0,4664 0,1871	-0,3515 0,3202	0,7899 0,0255	-0,5084 0,1504	0,3347 0,3438		0,2101 0,5524
	Ouverture de panneaux	0,3766 0,2868	-0,2017 0,5684	0,3319 0,3478	0,1506 0,6701	-0,1261 0,7214	0,0168 0,9621	0,8452 0,0168	0,2101 0,5524	

On constate que pour GR, ni l'utilisation des commandes, ni l'ouverture de panneaux n'influe sur les performances du travail global, de la compréhension ou de l'action. Tandis que pour GNR, les ouvertures de panneaux sont corrélés avec les temps de travail global (Ouverture de panneaux lors des phases compréhension :  $P = 0,0231$  ; Ouverture de panneaux pendant le travail global :  $P = 0,0138$ ) et les temps de compréhension (Ouverture de panneaux lors de la compréhension :  $P = 0,0245$  ; Ouverture de panneaux pendant le travail global :  $P = 0,0287$ ). De la même manière, les ouvertures de panneaux lors des phases d'action ont joué un rôle significatif sur les performances de cette activité ( $P = 0,0168$ ). On constate une différence d'influence de la pratique entre deux groupes qui nous permet d'en apprendre un peu plus sur l'impact de dénomination. **Il apparaît que les ouvertures de panneaux et l'utilisation de commandes pour un participant travaillant avec un modèle renommé n'a pas influencé ses performances tandis que pour un participant travaillant avec un modèle non renommé, l'ouverture de panneaux a une incidence sur ces temps.**

#### 4.2.5 Bilan des analyses statistiques

Lors des analyses des temps, la comparaison des performances entre les deux groupes a été réalisée à travers trois variables interdépendantes : le temps de travail, le temps de compréhension et le temps de compréhension hors de l'arbre. Les trois études ont montré de



meilleurs temps pour GR mais avec des niveaux de signification au-dessus du seuil choisi (Temps de travail :  $P = 0,0969651$  ; Temps de compréhension :  $P = 0,0945787$  ; Temps de compréhension hors de l'arbre :  $P = 0,0586128$ ). Pour affiner notre analyse, on a évalué les niveaux de significations des corrélations des temps de travail, ainsi que ceux de ses composantes (les phases de compréhension et d'action), avec les temps hors de l'arbre et dans l'arbre; que ce soit au global, qu'au 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> niveau. On remarque que dans les deux groupes, les activités hors de l'arbre sont corrélées avec le temps de travail global de manière significative chez GNR et quasi significativement pour GR. L'étude de la répartition du travail entre hors et dans l'arbre nous montre effectivement que le travail hors de l'arbre occupe une part significativement importante pour les deux groupes.

On remarque toutefois que le travail de compréhension et d'action dans l'arbre de GR joue un rôle sur leurs variations de temps relative avec des seuils de signification intéressant (Temps de compréhensions :  $P = 0,1153$  ; Temps d'action :  $P = 0,0616$ ), même si ce résultat ne se reflète pas sur le temps de travail global. Il apparaît que les activités dans l'arbre de ce groupe dépendent essentiellement du travail effectué au 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre, où la dénomination a été réalisée. Pour GNR, le travail dans l'arbre dépend des travaux effectués à tous les niveaux sans distinction. Il y a donc une différence de pratique entre les deux groupes qui se traduit par une rationalisation du travail de GR dans l'arbre vis-à-vis des temps de compréhension et d'action.

On constate aussi deux pratiques bien distinctes lorsqu'on analyse les interdépendances de chaque groupe. Pour GR, l'interdépendance est quasi-significative entre les temps dans l'arbre tandis que chez GNR, elle existe dans ses temps hors de l'arbre. Ces résultats indiquent que GNR a concentré son travail hors de l'arbre tandis que GR a montré un intérêt à travailler dans l'arbre tout au long de l'expérience. Même si le travail hors de l'arbre reste important dans les deux groupes, on remarque, par ailleurs, que GR passe un pourcentage de travail dans l'arbre plus important que GNR. Il apparaît aussi que GR passe un pourcentage de son temps dans l'arbre au 1<sup>er</sup> niveau de manière significativement plus importante que GNR.

L'interdépendance des temps passés dans l'arbre et l'influence considérable du premier niveau chez GR montre que les étudiants de ce groupe ont utilisé la dénomination. À contrario, l'absence de dénomination chez GNR est reflétée par un rejet de l'arbre pour se focaliser sur le travail hors de l'arbre qui est constaté à travers la pauvreté de l'influence de l'arbre dans les performances de temps et l'interdépendance des temps hors de l'arbre. La rationalisation du travail dans l'arbre de GR, associé à de meilleures performances que GNR, montre que le travail de dénomination réalisé sur le modèle a permis d'améliorer le travail de modification. Ces conclusions se basent toutefois sur des associations de variables à des seuils de significations de corrélation allant jusqu'à 11,53% et des niveaux de signification dans la comparaison des temps entre 0,05 et 0,10.

Par ailleurs, même si l'étude met en évidence l'impact de renommer dans le travail de modification, elle met aussi en avant que les temps des activités de modification dépendent du travail hors de l'arbre. Il s'agit du travail qui occupe le plus grand pourcentage des activités de modification et, comme indiqué en début de cette partie, le temps de travail global dépend du temps de compréhension, notamment celui passé hors de l'arbre ; qu'on ait travaillé un modèle CAO renommé ou non. Partant de ce constat, il existe d'autres facteurs qui entrent en jeu dans le travail de modification et qui pourraient aussi justifier les niveaux de signification de notre étude étant donné qu'ils pourraient avoir la capacité de créer des divergences au sein même des échantillons à l'étude.

Des facteurs, que nous avons identifiés au préalable dans le projet et pouvant potentiellement jouer un rôle dans le travail de modification, sont les utilisations de commandes CATIA V5<sup>®</sup> dédiées au repérage d'éléments et les ouvertures des panneaux. La comparaison des pratiques entre les deux groupes à ce sujet n'a pas présenté de différences hormis le fait que GR soit le seul à utiliser significativement plus les ouvertures de panneaux que les commandes CATIA V5<sup>®</sup> dans l'arbre sans pour autant utiliser plus d'ouverture de panneaux ou moins de commandes CATIA V5<sup>®</sup> que GNR. Une étude plus approfondie des ouvertures de panneaux dans l'arbre pour les deux groupes, n'a pas présenté de différences

entre eux. Malheureusement, la faible quantité de données sur les commandes et les disparités de leurs utilisations au sein de chaque groupe ne nous permettent pas de détailler des analyses statistiques à ce sujet. Par conséquent, il est difficile d'établir des conclusions sur la dénomination vis-à-vis de l'utilisation des commandes dédiées au repérage. Néanmoins, l'étude de l'influence des commandes et des ouvertures de panneaux dans chaque groupe a mis en évidence que ni l'un ni l'autre ne joue un rôle dans les performances des travaux de modification pour GR, tandis que pour GNR, les ouvertures des panneaux ont eu une influence significative (Travail :  $P = 0,0138$  ; Compréhension :  $P = 0,0231$ , Action :  $P = 0,0168$ ). Par raisonnement d'élimination des méthodologies de repérage des éléments à modifier, si ni les commandes, ni les panneaux ont eu une incidence sur les performances de GR, on peut être amené à penser que la dénomination a joué un rôle à ce sujet. Ce raisonnement est à prendre avec précaution car l'influence de commandes dédiées au repérage des éléments est difficile à mettre en évidence. L'expérience n'est de toute manière pas construite pour évaluer son impact. Toutefois, la compilation de pratiques d'étudiants à travers le visionnement des enregistrements vidéo nous permet d'approfondir l'influence de facteurs qui peuvent jouer sur le travail de modification.

### **4.3 Étude qualitative**

L'analyse statistique met en évidence qu'il existe d'autres facteurs que la dénomination jouant sur les performances du travail de modification. Un aspect a retenu notre attention puisqu'il semble considérablement influencer le travail de modification d'un modèle CAO. Il s'agit de la capacité à comprendre l'intention de conception du modèle à modifier. Bien que la dénomination des éléments soit une expression de l'intention de conception, nos observations montrent qu'il existe d'autres paramètres entrant en jeu et qui sont déjà évoqués dans la littérature. Les observations du travail des participants mettent en évidence des différences de connaissances déclaratives et procédurales liées à l'exploration d'un modèle, mais aussi de connaissances stratégiques permettant de choisir, transmettre et comprendre une intention de conception. Ces différences se retrouvent au sein de chaque

groupe et semblent expliquer certains aspects de bonnes et contre-performances des participants.

Pour détailler un aspect déjà évoqué dans la revue de littérature, la connaissance déclarative représente la connaissance des commandes et techniques d'un système CAO qu'il faut utiliser (savoir quoi/ce qui existe) alors que la connaissance procédurale met en valeur la connaissance de comment utiliser une commande ou une technique pour réaliser une modélisation (savoir comment) (Chester, 2007, p. 26). Ce sont les types de connaissances que l'on retrouve dans les manuels des systèmes CAO car il s'agit d'un savoir propre à chaque logiciel. La connaissance stratégique se définit par la connaissance de méthodes alternatives permettant de réaliser un tâche spécifique ainsi que par la capacité à adopter un processus de choix parmi ses méthodes de réalisations (Chester, 2007, p. 23). Ce type de connaissances définit la représentation mentale que l'on se fait d'un objet puisqu'il s'agit de la capacité mentale à visualiser et déconstruire un modèle dans ces principaux éléments (Rynne *et al.*, 2010, p. 164). L'idée est de considérer un modèle davantage comme une entité dynamique que statique ; non pas comme un solide, mais comme une composition d'éléments pouvant être modifiée de manière individuelle ou dans un ensemble (Rynne & Gaughran, 2007). Aujourd'hui, on considère la connaissance stratégique comme ce qui différencie un novice d'un expert du fait qu'elle s'acquiert dans la pratique au sein de travaux itératifs permettant d'emmagasiner des connaissances pertinentes (Rynne *et al.*, 2010, p. 174). La connaissance stratégique est très importante dans la création d'un modèle robuste, mais aussi dans l'efficacité d'un travail de modification.

Malheureusement, la connaissance stratégique est peu enseignée chez les novices. La formation CAO s'axe essentiellement sur les connaissances déclarative et procédurale. Selon l'étude chez les usagers en CAO, menée par Ye et al. (2004, p. 1457), seuls 8% des sondés pensent que les études CAO sont adéquates du fait qu'elles se concentrent sur quel bouton pousser. Cela rejoint un autre sondage déjà évoqué montrant que pour 76% des usagers CAO, il est difficile de trouver les paramètres de conception ou d'identifier les relations et, pour 81%, il est difficile de modifier un modèle « étranger » (Salehi & McMahon, 2009, p. 141).

Même si l'étude réalisée n'est pas construite dans le but d'identifier les problèmes de compréhension de l'intention de conception chez les étudiants, on observe certains aspects déjà mis en évidence dans d'autres études que l'on peut enrichir.

- **Pauvreté dans l'habileté à créer un modèle mental (Johnson & Diwakaran, 2011)**

Johnson et Diwakaran indiquent : « Students did not think highly of models that required a significant amount of time to alter » (2011, p. 1756). Ils mettent en évidence la préférence des étudiants pour les modèles dont les éléments sont faciles à modifier. Cela met en évidence une difficulté à comprendre comment le modèle a été construit, à faire les liens entre les éléments et aussi à comprendre comment il va réagir lorsqu'on le modifie.

Tout d'abord, dix des dix-sept étudiants (P2 – P3 – P5 – P7 – P9 – P10 – P11 – P14 – P16 – P18) ont démarré l'exercice en se lançant directement sur la première modification à réaliser. Il n'y a pas eu de travail d'analyse préalable du modèle pour comprendre sa structure globale. Des participants (P10 – P11 – P16 – P17 – P18) ont eu des difficultés à faire le lien entre les éléments de l'arbre de construction et notamment entre ceux du set géométrique, présent initialement dans l'espace « non visible », et ceux du corps principal, présent dans l'espace « visible ». Soit ils n'ont pas identifié que les éléments de l'espace « non visible » étaient les éléments du set géométrique : des étudiants travaillent avec le B-Rep en affichant les éléments de l'espace « non visible » sans prendre connaissance du set géométrique. Soit ils n'ont pas vu que les éléments du set géométrique étaient dans l'espace « non visible » : les étudiants ouvrent des panneaux de définition d'éléments du corps principal mais n'identifient pas les plans de coupes sur le B-Rep. C'est uniquement en recherchant dans le set géométrique qu'ils repèrent ces plans. Par ailleurs, certains (P11 – P16 – P17) ont même travaillé les éléments géométriques sans les afficher. Il s'agissait d'avancer sous forme d'essai-erreur, basculer de manière répétée entre l'espace « visible » et « non visible » et tenter d'identifier quel plan de coupe définit telle face de la pièce. Par exemple, pour la modification 1a), les participants sélectionnent la surface « Décalage.Plancher-Incliner »/ « Décalage.1 » avec ce mode de fonctionnement au lieu d'identifier le plan

«Plan.Fond-de-Poche»/«Plan.7» (Voir Figure 4.7). Il apparaît ici une difficulté à connecter les surfaces et plans avec les découpes qui définissent la forme du modèle.

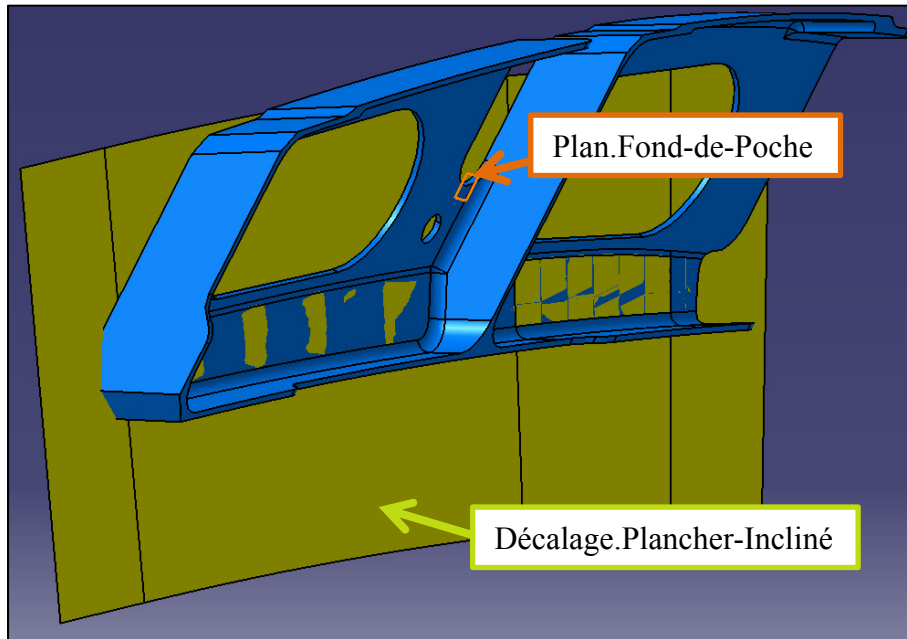


Figure 4.7 «Plan.Fond-de-Poche» et «Décalage.Plancher-Incliné»

En deuxième lieu, le fait d'avoir certaines esquisses non contraintes a perturbé plusieurs participants (P7 – P10 – P11 – P14 – P16 – P17 – P18). Les participants n'ont pas cherché à comprendre pour quelle raison des esquisses n'étaient pas contraintes. Le choix de laisser des degrés de variabilité non bloqués avait pour objectif de laisser de la liberté aux participants pour modifier les éléments en forme ou dimension. Seules les esquisses des deux poches n'ont pas été contraintes (Voir Figure 4.8). Il est vrai que ce point peut remettre en question la robustesse globale d'un modèle au stade de conception détaillée. Néanmoins, nous voulons laisser cette flexibilité pour introduire l'instruction de modification 3d), c'est à dire soit un espace supplémentaire de la pièce à explorer et modifier. Dans tous les cas, le fait d'avoir des esquisses avec des degrés de variabilité non bloqués a poussé les participants à contraindre ces dernières avec des valeurs aléatoires et à préférer jouer sur ces valeurs plutôt que déplacer l'esquisse avec le curseur. Il semble qu'il y a un sentiment d'inconfort avec le fait de manipuler des esquisses n'étant pas iso contraintes.

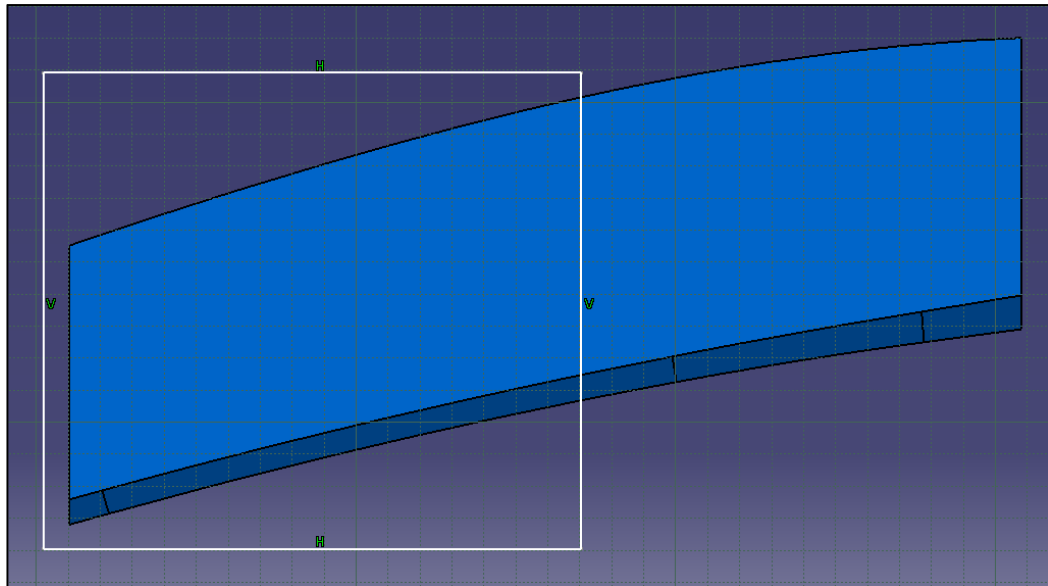


Figure 4.8 Esquisse Poche Gauche

Le manque de vision globale du modèle s'observe aussi dans la manière de gérer certaines modifications. Pour la modification 1a), des étudiants (P3 – P5 – P10 – P11) ont décalé les extrusions (*Voir* Figure 4.9) au lieu de modifier la définition du plan décalé du plancher (*Voir* Figure 4.10). De même, pour la modification n°2, des étudiants (P10 – P11 – P17 – P18) ont décalé les esquisses plutôt que le plan de coupe de l'inner-machined step (*Voir* Figure 4.11). A travers ces modifications, il apparaît que le travail de compréhension de l'intention de conception n'est pas complet. Il s'en suit, pour la modification n°2, que le décalage des esquisses n'a pas permis d'aboutir au succès de la modification, la direction de l'extrusion n'étant pas parallèle au plan de coupe. En ce qui concerne la modification 1a), le plan décalé du plancher reste à 0,06 in alors que l'épaisseur du plancher est de 0,08 in. Il y a une déconnexion avec l'intention de conception initiale pouvant mener à des incompréhensions et être préjudiciable pour une nouvelle série de modifications.

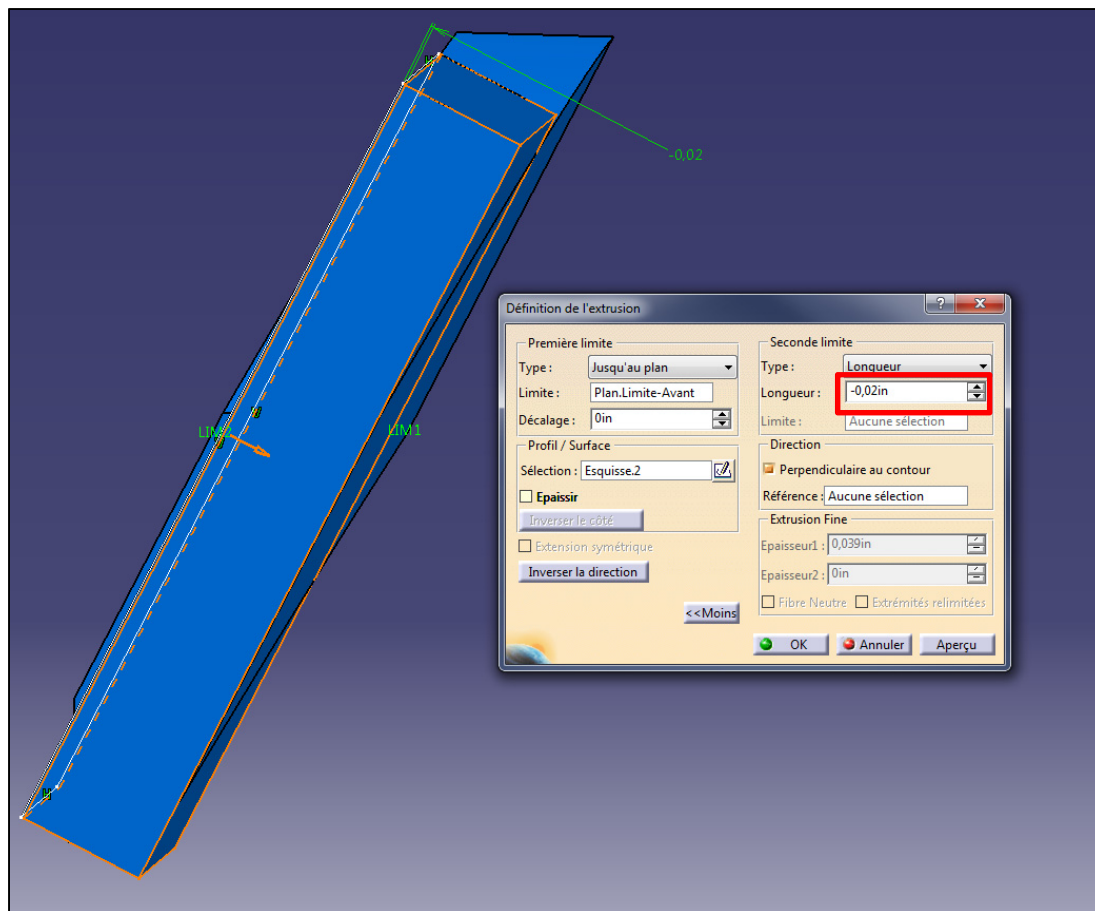


Figure 4.9 Décalage de l'Extrusion Poche Gauche



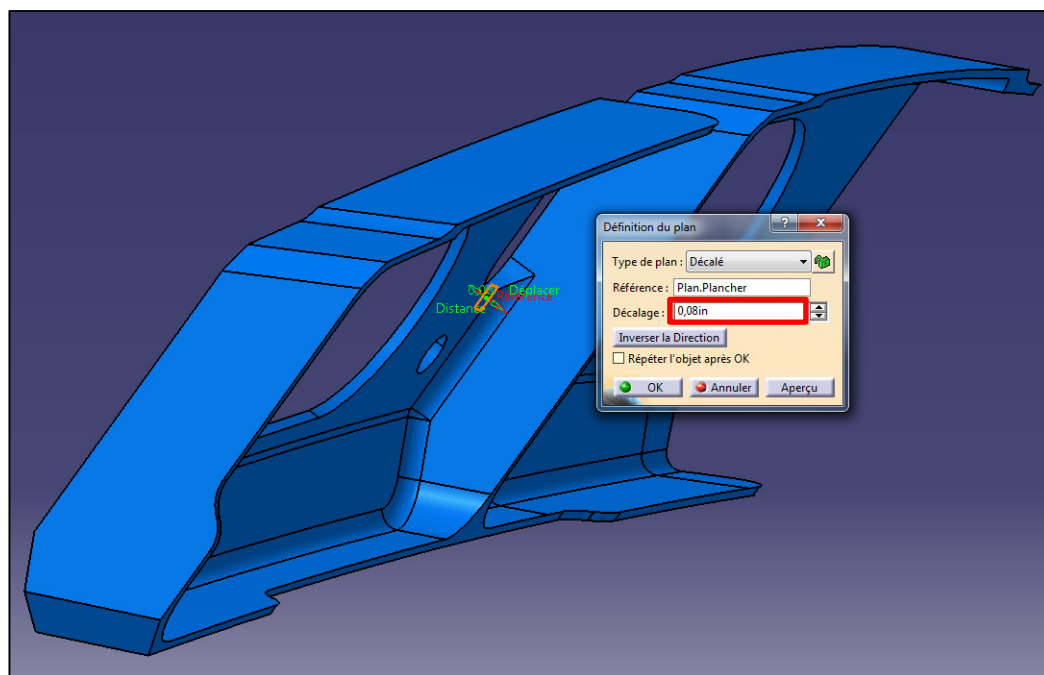


Figure 4.10 Décalage du «Plan.Fond-De-Poche»

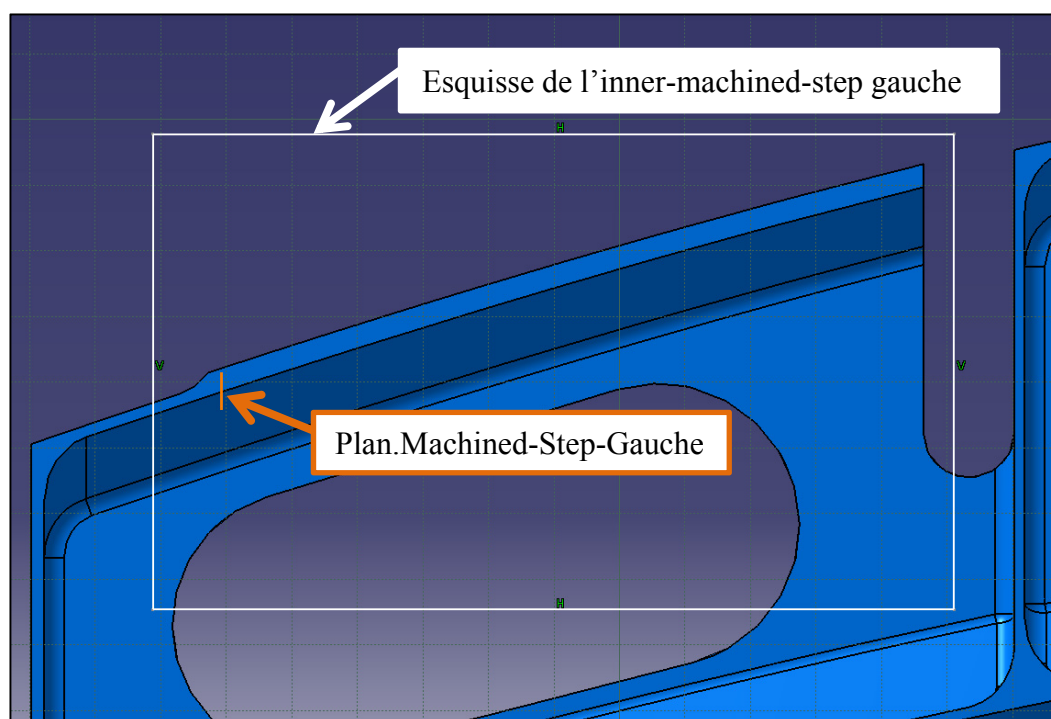


Figure 4.11 Esquisse Inner-machined-Step Gauche et «Plan.Machined-Step-Gauche»

Enfin, des erreurs, telles que la modification du mauvais élément, le traitement de modification par création de matière ou de surfaces, un mauvais repositionnement de congé, sont compliquées à reprendre (P3 – P5 – P7 – P9 – P10 – P11 – P14 – P16). C'est-à-dire que les participants ont eu des difficultés à revenir à la conception originelle. On constate des difficultés à retrouver l'élément qui a été modifié ou créé et parfois à faire le tri dans l'arbre entre les nouveaux éléments et ceux présents au départ. On observe un travail où il n'y a pas eu une compréhension préalable suffisante de la construction et où il n'y a pas de réflexion sur la manière dont le modèle réagit aux actions appliquées. Pour mettre en évidence ce point, on observe la perte des repères de construction du machined step central chez certains étudiants (P3 – P5 – P10 – P12 – P16 – P18). La figure 4.12 rend compte des éléments reliés au plan du machined step central. Le fait de modifier des connexions de plans ainsi que le changement de paramètres de positionnement a impliqué la perte des informations de la position initiale. Certes sa construction ne peut pas être jugée robuste et c'est la raison pour laquelle le travail de modification à son sujet n'a pas été pris en compte dans l'étude statistique. Il n'en reste pas moins que les étudiants ont mené des changements sans étudier les liens entre les éléments au préalable ni réfléchi à l'impact de leurs actions. Si bien que même avec l'annulation de toutes les actions réalisées, il a été difficile de retrouver la construction initiale du machined step.

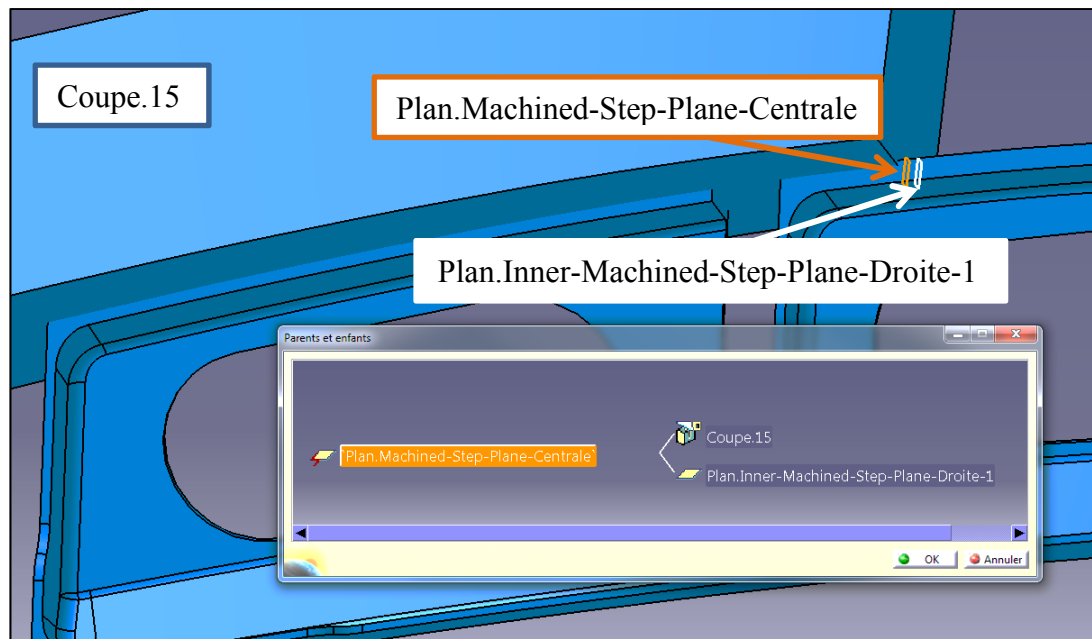


Figure 4.12 Connexions avec «Plan.Machined-Step-Plane-Centrale»

- **Difficulté à décomposer de manière efficace des tâches assignées (Rynne et al., 2010)**

Rynne et al. expliquent que les étudiants démontrent des difficultés à réfléchir à des démarches efficaces de réalisation de tâches de modélisation assignées. Ceci même lorsqu'ils maîtrisent le logiciel CAO. En ce qui nous concerne, il n'y a pas de démarche d'exploration du modèle et de processus de travail clairement identifiables chez les participants.

C'est en ouvrant de façon aléatoire certains panneaux du set géométrique que des étudiants (P2 – P3 – P7 – P11) réussissent des modifications. Ils se basent sur le fait que l'élément sélectionné se situe dans la zone de la modification, parfois sur le nom de l'élément et sur le fait que la valeur qu'il découvre à l'ouverture du panneau correspond à la valeur qui doit être changée. Il n'y a pas de recherche des connexions entre les éléments. Cette difficulté à faire le lien entre les éléments s'observe dans la navigation à travers le modèle alors que l'on n'identifie pas quelle modification les participants s'appêtent à entreprendre (P3 – P16) ou lorsqu'ils changent de modification de façon très récurrente (P2 – P11 – P17). Il apparaît aussi que le fait de voir des participants (P10 – P11 – P17) ne pas repérer l'élément à

modifier pose des doutes sur leur compréhension du travail à réaliser ou de la démarche à entreprendre pour le réaliser. Par ailleurs, des participants (P2 – P11 – P16) font de nombreuses actions de changement qu'ils annulent puis recommencent. Certaines d'entre elles correspondent aux bonnes modifications à réaliser. On remarque ici de l'hésitation dans le travail effectué. Cette navigation sans cohérence et ces signes d'incertitude mettent en évidence le manque d'une approche systématique dans l'exploration du modèle et dans les actions à effectuer.

- **Difficulté à structurer son modèle et communiquer cette organisation du modèle (Salehi & McMahon, 2009)**

L'étude de Salehi et McMahon met en évidence l'importance de structurer un modèle et que les concepteurs apprécient avoir une description de cette dernière. Elle montre aussi les difficultés « to identify, determine and represent parameters and associative relationships » (2009, p.142). Dans notre étude, on enrichit ces aspects en observant comment les participants interagissent avec le modèle, notamment le type d'actions de modification qu'ils réalisent et les démarches qu'ils entreprennent pour les mettre en place.

Il apparaît que pour les modifications n°1, la difficulté à comprendre l'intention de conception conduit à des créations d'éléments pour augmenter l'épaisseur du modèle (P2 – P5 – P10 – P11 - P14 – P16 – P17) (*Voir Figure 4.13*). Certains étudiants (P2 – P5 – P14 – P17) se lancent dans la création d'éléments sans tenter de comprendre l'intention de conception. Nous n'observons aucune phase de compréhension précédant ces actions de création. De plus, les étudiants ne se soucient pas du lieu où le nouvel élément s'insère dans l'arbre. On observe l'insertion d'éléments surfaciques dans le corps principal voir parfois dans des ensembles booléens. Il n'y a pas d'organisation identifiable des nouveaux éléments dans l'arbre. Ce manque de structure dans le travail effectué traduit une absence de volonté à communiquer autour de la construction des nouveaux éléments. Par ailleurs, la plupart des créations finissent par un abandon et une suppression des éléments créés dès lors qu'ils mènent à des discontinuités au niveau des arrêtes, chanfreins et/ou congés. Les étudiants font

marche arrière lorsqu'ils n'arrivent pas à combler ces discontinuités : enlever la matière en trop, combler le manque de matière, etc. Il apparaît une réflexion uniquement sur le rendu final du B-rep et non pas sur le processus de modélisation. On retrouve là le fait que les participants ont une vision du modèle comme un solide c'est à dire centré sur l'objet final réalisé. Ils ne considèrent pas le modèle CAO comme un objet dynamique où il s'agit de prendre en compte l'organisation des éléments qui le constituent.

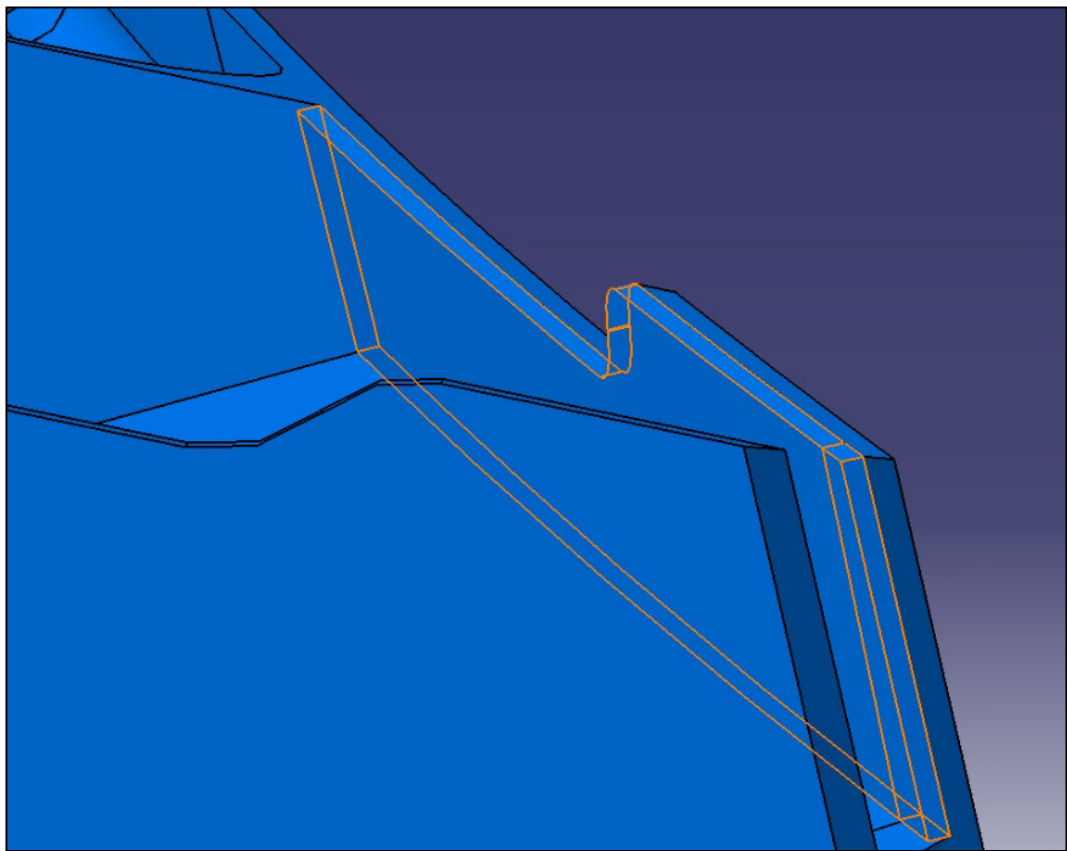


Figure 4.13 Création de surface épaisse pour modification 1b)

Enfin, pour des participants (P2 – P5 – P7 – P9 – P11 – P16 – P17 –P18), l'ouverture du diagnostic de mise à jour CATIA V5® remet en question le travail effectué. La figure 4.14 renseigne le diagnostic de la mise à jour pour «Chanfrein.Murs-Ouverts» lorsque l'on modifie la valeur de décalage de «Plan.Mur-Intérieur-Limite-1».

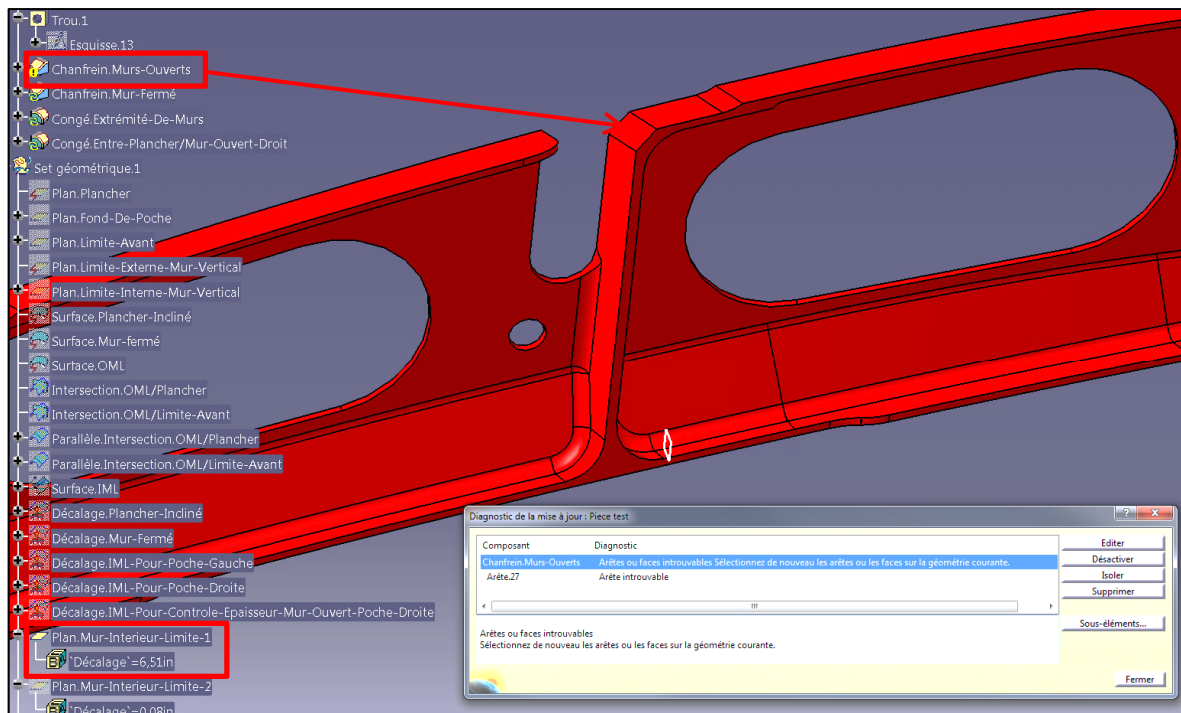


Figure 4.14 Diagnostic de la mise à jour

La pièce devenant rouge est considérée comme un signal d'erreur chez les étudiants. Ces derniers font marche arrière sans même lire le détail du diagnostic alors qu'il s'agissait parfois de la bonne procédure de modification. Typiquement, pour l'exemple de la figure 4.14, le logiciel demande de replacer le chanfrein lié au déplacement d'arêtes du modèle. Pour certains participants, ce panneau est ressenti comme la conséquence d'une mauvaise action alors qu'il devrait être perçu comme un signal de vérification des aspects impactés par l'action réalisée avant de déterminer si cette dernière était bonne ou mauvaise.

A travers ces observations, on constate que le manque de compréhension de l'intention de conception touche autant les participants ayant un modèle renommé (Participants au numéro impair) que les participants ayant un modèle non renommé (Participant au numéro pair). La sélection des participants s'est fait sur le principe que les étudiants choisis avaient une bonne maîtrise du logiciel CATIA V5® (donc de bonnes connaissances des commandes) et avaient déjà réalisé des pièces aéronautiques dont la complexité était similaire à celle proposée. Il n'en reste pas moins qu'après concertation avec leurs professeurs, le travail de modification

d'un modèle « étranger » reste un exercice nouveau pour certains étudiants. Cela explique le manque de connaissances pour l'exploration d'un modèle et la compréhension d'une intention de conception nécessaire au travail de modification.

Pour revenir sur le sujet des utilisations de commandes, les analyses de la section 4.2.3 n'ont pas mis en évidence de différences significatives à ce sujet. Nous avons répertorié la quantité d'utilisations de chaque commande dans et hors de l'arbre au sein du tableau 4.23. Ce dernier indique aussi le nombre moyen d'utilisations pris sur les deux groupes, ainsi que la part d'utilisation de chaque commande par rapport à l'ensemble des commandes. Ces données sont présentées qu'à titre indicatif étant donné les disparités qui existent chez les étudiants.

Tableau 4.23 Utilisations des commandes dans et hors de l'arbre (GR et GNR)

		Nombre de commandes utilisées	Commandes dans l'arbre							Commandes hors de l'arbre					
			Afficher/cacher	Activer/Désactiver	Centrer sur	Définition de l'objet de travail	Parent/Enfant	Propriété	Modifier le support d'esquisse	Afficher/cacher	Activer/Désactiver	Centrer sur le graphe	Définition de l'objet de travail	Parent/Enfant	Propriété
G R	Participant 1	6	49	3	1	1	1	4	0	4	0	2	0	3	0
	Participant 3	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	Participant 5	2	0	4	0	1	0	0	0	0	0	28	0	0	0
	Participant 7	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Participant 9	4	29	0	0	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	Participant 11	1	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Participant 15	3	8	3	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	1
	Participant 17	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G N R	Participant 2	3	0	0	0	8	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Participant 4	3	15	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	8
	Participant 6	2	37	0	0	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Participant 8	4	19	6	0	70	0	0	2	13	0	0	0	0	0
	Participant 10	2	2	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Participant 12	3	5	0	0	5	0	0	2	1	0	0	0	0	0
	Participant 14	4	17	3	0	44	0	0	2	2	0	0	0	0	0
	Participant 16	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Participant 18	2	3	1	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0
MOYENNE		2,65	11,82	1,18	0,18	15,53	0,12	0,35	0,41	3,00	0,00	1,82	0,00	0,18	0,53
Pourcentage d'utilisation de la commande par rapport à l'ensemble des commandes (%)			44,10	2,80	0,51	26,65	0,25	1,16	1,40	14,52	0,00	6,44	0,00	0,26	2,03

Bien que l'utilisation de la plupart des commandes nécessaires au travail de modification ait été observée à travers l'étude, il n'en reste pas moins que la majorité des participants ne connaît pas les commandes utiles aux repérages d'éléments. Les participants ont utilisé en moyenne 2,65 commandes parmi les 7 présentées. Seuls les outils « Afficher/Cacher » et « Définition de l'objet de travail » sont fortement utilisés (plus de 10 participants), avec une part de 58,62% des utilisations de commandes pour le premier et 26,65% pour le second; soit

une fréquence de 85,27% des commandes utilisées. Les autres commandes sont utilisées par moins de 6 participants. On rappelle aussi que l'analyse statistique a montré que les participants ont utilisé davantage les ouvertures de panneaux que les commandes. Au démarrage de l'étude, nous pensions que les étudiants étaient familiers avec ces commandes puisqu'elles sont au programme de leur apprentissage. Nous envisagions même, dans nos hypothèses, que leur utilisation influe sur la dénomination étant donné qu'il présente la même fonction d'aider au repérage d'éléments. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'examiner des données à leur sujet. Malheureusement, étant donné que le travail d'exploration de modèle étranger est nouveau pour les participants, il apparaît qu'ils n'ont pas l'habitude d'utiliser ces commandes dans d'autres types d'exercices. On constate ici une faiblesse dans les connaissances déclaratives et procédurales nécessaires à l'exploration d'un modèle.

Les difficultés à réaliser le travail de modification semble dépendre de difficultés à comprendre l'intention de conception et le fait de renommer des éléments du modèle n'a pas eu un effet clairement significatif à ce sujet puisqu'on retrouve les mêmes difficultés dans les deux groupes. L'étude qualitative de l'exercice indique que pour comprendre une intention de conception afin de réaliser un travail de modification, il faut :

- Posséder les connaissances déclarative et procédurale pour naviguer dans un modèle et identifier les relations entre les éléments.
- Posséder la connaissance stratégique pour savoir comment décomposer le modèle, évaluer les conséquences d'une modification sur le modèle et sur l'intention de conception établie.

Ce constat se confirme lorsque l'on observe le travail effectué par les étudiants ayant bien performés. Pour cela, nous avons observé les participants ayant réalisé le travail de modification en moins d'une heure et un nombre de reprises inférieur à 4. On rappelle qu'une reprise définit un changement de tâche de travail suite à l'échec de cette dernière : soit l'étudiant abandonne un travail de changement pour réaliser un travail de compréhension concernant la même ou une autre modification, soit il abandonne un travail de



compréhension concernant une modification pour réaliser un travail de compréhension concernant une autre modification. En ce qui concerne le temps de travail de modification, pour l'étude qualitative, il s'agit de la durée de la vidéo qui a déjà été présentée à la partie 4.1.1.

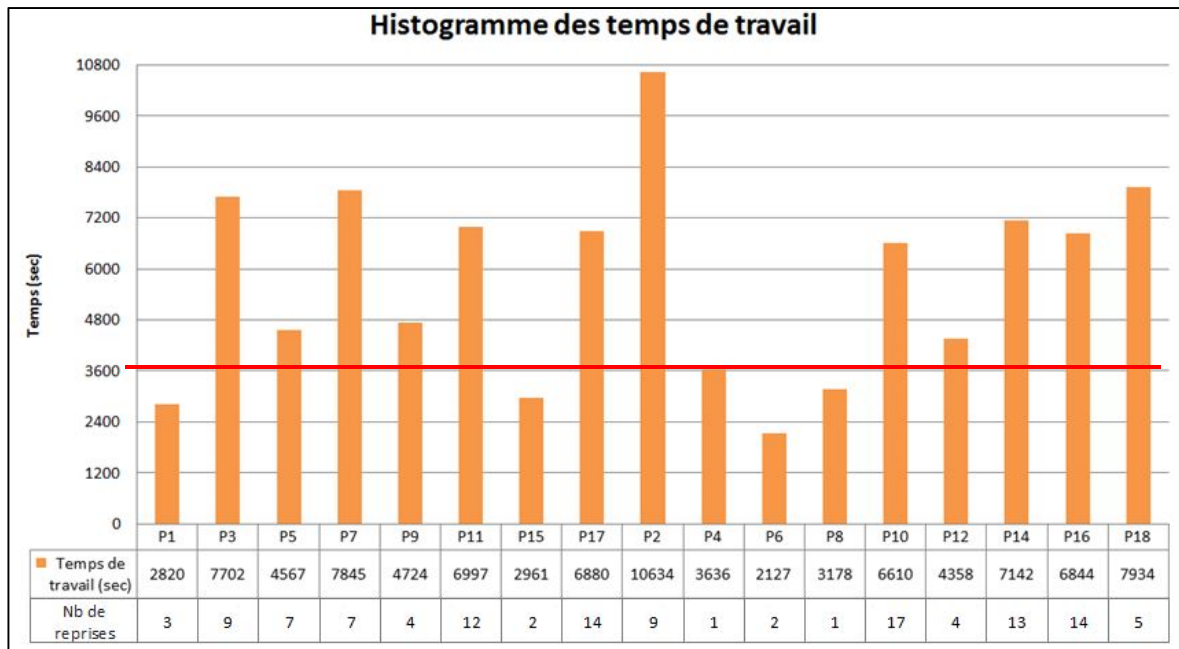


Figure 4.15 Histogramme des temps de travail et nombres de reprises

L'histogramme (*Voir* Figure 4.15), indique que, selon nos critères, les participants ayant bien performé sont les participants : P1 – P4 – P6 – P8 – P15. On notera, d'ailleurs, que ces étudiants appartiennent aux deux groupes d'étude et qu'en se reportant au tableau 4.1 de la section 4.1.1, leur taux de réussite pour les modifications retenues pour l'analyse statistique est de 100%. Ces cinq participants sont donc les personnes ayant le mieux réussi le travail demandé.

L'examen des pratiques de ces participants montre que le fait de renommer des éléments du modèle ne semble pas être le facteur ayant déterminé leur performance. Certes les observations indiquent que les étudiants P1 et P15 se sont aidés de la dénomination pour repérer directement des éléments dans l'arbre afin de déterminer lesquels modifier.

Néanmoins ces participants ont aussi prouvé leur capacité à se construire une représentation mentale du modèle. Le participant P1, tout comme d'autres (P6 – P8), n'a pas montré de signe d'incompréhension quant aux liens entre les éléments du set géométrique et la forme du modèle dès lors qu'il passe tous les éléments cachés dans l'espace « visible ». Leur rapidité d'exécution indique que la connexion entre les éléments du corps principal et du set géométrique s'est faite instinctivement dans leur esprit. Tous ces participants prennent le temps d'analyser la structure du modèle en développant l'arbre ligne par ligne soit en ouvrant les panneaux de définitions (P1 – P4 – P15) ou en utilisant l'outil « Définition de l'objet de travail » (P6 – P8). De cette manière, ils ont une idée très claire de la structure globale du modèle. Des étudiants (P1 – P6) n'ont même pas eu besoin de parcourir l'ensemble des liens entre les éléments pour réaliser certains travaux de modification. Dès lors qu'ils ont compris que la plupart des coupes sont définies par les éléments du set géométrique, il apparaît que leurs efforts de repérage se concentrent sur le set géométrique et non plus sur les liens entre les éléments du corps principal et ceux du set géométrique. Encore une fois la rapidité d'exécution met en évidence la logique et la certitude dans le travail effectué qui diffère des ouvertures aléatoires d'autres étudiants présentées plus haut. De plus, on observe l'utilisation de l'outil « Parent/Enfant » chez l'étudiant P1 dans le but de faire les liens entre certains éléments qui ne transparaissaient pas dans la lecture ligne par ligne de l'arbre. Pour rappel, l'ordonnancement des éléments de l'arbre facilite les connexions entre le corps principal et le set géométrique, mais ne retranscrit pas littéralement les liens entre les surfaces et plans du set géométrique. C'est uniquement dans le but de faire le lien entre des éléments du set géométriques que nous avons observé l'utilisation de l'outil « Parent/Enfant ». On notera aussi que le participant P6 a modifié les paramètres graphiques des éléments booléens pour différencier certains éléments sur le B-Rep et ainsi avoir une meilleure visibilité sur le B-Rep. Par ailleurs, le participant P4 a, quant à lui, utilisé l'outil « Propriété » sur le B-Rep pour déterminer l'appartenance d'une partie du B-Rep à un élément de l'arbre. De par ces observations, il apparaît très clairement, chez les participants ayant bien performé, une volonté et une rapidité à comprendre la construction du modèle et à se former une représentation mentale de sa structure. Par ailleurs, on remarque que le participant P1 ayant un modèle renommé a utilisé l'objet « Parent/Enfant » dans le but d'améliorer sa lecture de

l'arbre alors que les étudiants P4 – P6 ont utilisé l'outil « Propriété » dans le but d'améliorer la lecture du B-Rep. **Il apparaît ici que, tout comme il a été démontré lors de l'analyse statistique, les étudiants ayant un modèle renommé tendent à accroître leur efficacité de travail dans l'arbre alors que ceux ayant un modèle non renommé accroissent l'efficacité de travail hors de l'arbre.**

Du point de vue de la capacité à décomposer de manière efficace des tâches assignées, les étudiants ayant bien performé en termes de temps de travail démontrent aussi un très faible taux de reprises. C'est le signe d'une bonne compréhension des instructions et de l'intention de conception permettant de mener les bonnes actions de changement. On observe qu'ils prennent le temps de lire les instructions sur le cahier des charges puis passent ensuite par une étude de la construction en déroulant le modèle élément après élément si la connaissance préalable de la structure globale ne leur permet pas de trouver la solution directement. Enfin, dès que la structure du modèle a bien été comprise, ils procèdent à l'action de changement sur le bon élément. Leur travail est limpide à travers leur rapidité d'exécution et l'approche systématique avec laquelle ils abordent chaque modification. Leur interaction avec le modèle démontre de la cohérence et de la certitude quant aux tâches effectuées. Par exemple, l'ouverture du diagnostic de mise à jour CATIA V5<sup>®</sup> conduit soit à une désactivation de l'élément concerné (P1 –P15), soit à l'annulation de l'action (P4 –P6 – P8). Ensuite les étudiants s'assurent qu'il s'agit bien de la bonne instruction de modification et/ou du bon élément à modifier pour enfin s'affairer au travail de mise à jour du modèle. On n'observe aucun abandon de la tâche, ni d'hésitation suite à l'ouverture du diagnostic de mise à jour CATIA V5<sup>®</sup>. Les participants considèrent ce panneau comme un signal de vérification du modèle et non pas comme le signe d'une mauvaise action. De plus, le fait d'avoir une vision claire de la structure du modèle a permis aux participants P1 et P6 d'être les seuls à réussir le déplacement de la découpe du stringer (Modification 3c)) tel qu'on l'attendait. Leur analyse complète du modèle a permis d'identifier les éléments du set géométrique qui contraignaient l'esquisse de la découpe et ainsi de mener les bonnes actions pour obtenir le résultat attendu, mais aussi de préserver l'intention de conception à cet endroit du modèle. Ces deux participants sont les seuls à avoir déplacé tous les éléments définis par le plan du stringer vers

un autre plan et ainsi préserver cette construction de la découpe du stringer. La figure 4.16 montre l'état des connexions avec le plan de la découpe du stringer avant la modification. La figure 4.17 présente les connexions avec le nouveau plan «Plan.32», créé par décalage du plan de la découpe du stringer.

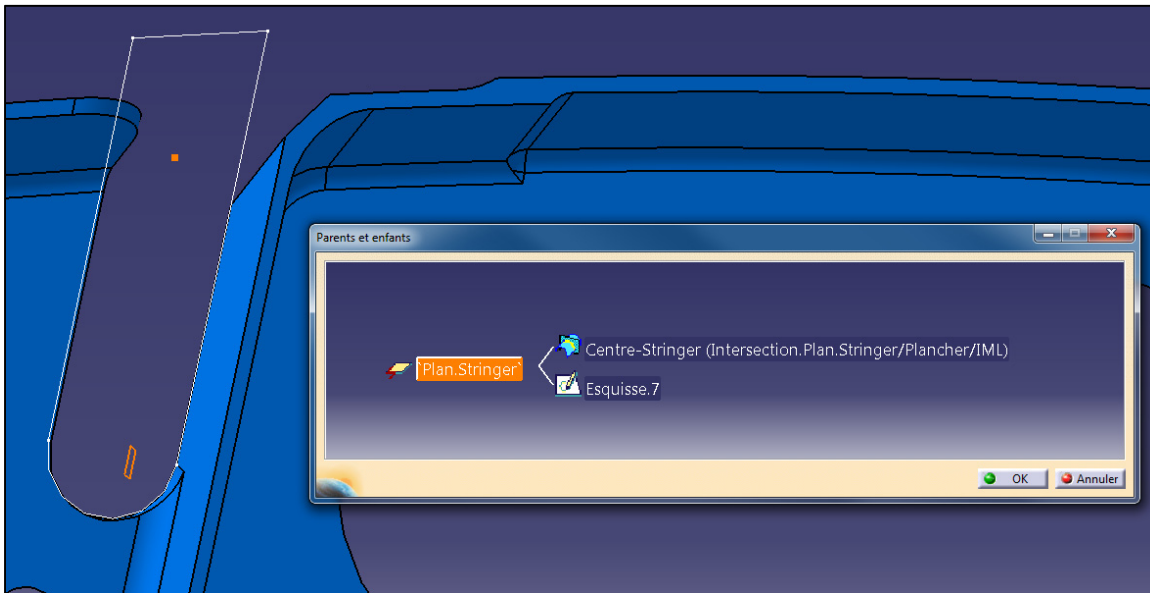


Figure 4.16 Connexions avec «Plan.Stringer»

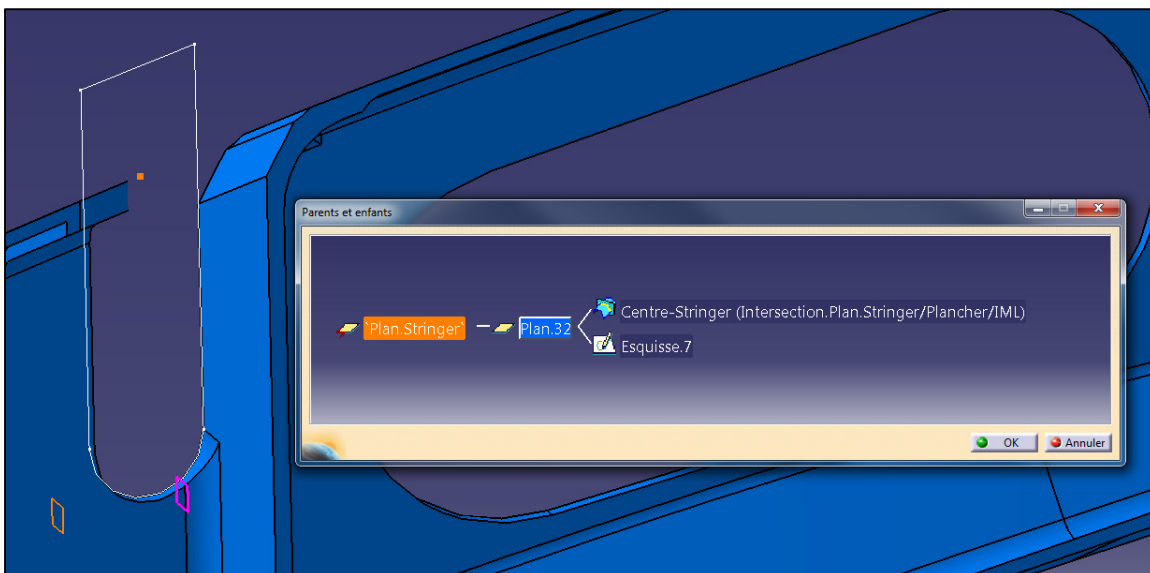


Figure 4.17 Connexions avec «Plan.32»

**On retrouve aussi cette préservation de la construction chez des étudiants ayant bien performé dans le fait de renommer les nouveaux éléments du modèle apparus suite aux travaux de modification (P1 – P4 – P15).**

Par conséquent, les signes de faiblesse ayant impacté la contre-performance de plusieurs participants sont les points forts des étudiants ayant bien performé dans le travail de modification. On retrouve chez ces derniers l'utilisation d'outils permettant de comprendre la construction du modèle, la capacité à se former une représentation mentale de sa structure dans le but d'aborder les tâches de manière systématique et cohérente et enfin la volonté de conserver l'intention de conception afin de maintenir la robustesse du modèle.

#### **4.4 Synthèse des résultats**

Ce chapitre fait l'état des résultats que notre expérience nous a permis d'obtenir. Les études préliminaires ont indiqué que nos résultats se basent sur une population de participants ayant un taux de réussite entre 78% et 100% vis-à-vis des modifications, qui ont pu être retenus pour nos analyses statistiques. Ces études confirment aussi qu'il ne nous est pas interdit de compiler les données des participants provenant de l'ENA et l'ETS dans chacune des populations à l'étude. Partant de ces constats, nous avons réalisé des analyses statistiques en prenant soin d'indiquer les situations où la loi normale s'applique et celle où elle ne s'applique pas. De cette manière, nous avons pu mettre en place les tests adéquats en précisant à chaque fois les hypothèses évaluées sur lesquelles reposent nos résultats. Quant aux analyses de corrélations, nous avons porté une attention particulière à présenter les niveaux de significations des relations exprimées afin qu'il soit possible de mesurer le degré de certitude de nos résultats. Le bilan des analyses statistiques est une synthèse des diverses analyses ne considérant que leurs résultats. En ce qui concerne l'étude qualitative, elle s'appuie sur d'autres études pour expliquer le regroupement d'observations et les constats effectués. Elle tend aussi à apporter des précisions sur des aspects qui n'ont pas pu être montrés à travers les analyses statistiques ou dont les résultats ont été mis en évidence avec prudence.



## CONCLUSION

Cette recherche tend à répondre à la question suivante :

La dénomination d'éléments d'un modèle CAO améliore-t-elle le travail de modification ?

Pour cela, nous avons mené des études sur les temps de modification et les pratiques du travail de modification. Il s'agissait de décomposer le travail de modification en deux phases (les phases de compréhension et d'action) afin de mesurer l'amélioration des performances de temps lorsqu'on renomme des éléments d'un modèle CAO. Nous voulions aussi examiner les éventuelles différences dans l'utilisation de l'arbre lorsqu'on ajoute cet aspect à un modèle en analysant les pratiques dans et hors de l'arbre. Nous avons aussi cherché à confronter les utilisations de commandes et d'ouverture de panneaux des deux populations afin d'évaluer s'il y avait des changements de pratiques avec un modèle renommé.

Dans la mise en place de notre expérience, il a fallu prendre en considération certains facteurs pouvant influencer nos résultats. Nous avons pris soin de minimiser les variations en construisant le cadre de cette expérience. L'objectif est d'établir des pratiques de modification homogènes entre les populations à l'étude afin de s'assurer que le principal facteur de variation entre les deux groupes soit la dénomination du modèle. Il est essentiel que la dénomination choisie appartienne à un domaine spécifique où les pratiques de modélisation et le langage adopté soient communs à l'ensemble des concepteurs afin d'apporter de l'information explicite à l'intention de conception du modèle. Nos résultats traduisent donc de l'impact de renommer des éléments dans le cadre de l'expérience mise en place.

Cette recherche met en évidence que renommer les éléments du premier niveau d'un modèle CAO a amené les participants à utiliser ce facteur pour réaliser un travail de modification. La comparaison avec un groupe d'étudiants travaillant avec un modèle non renommé montre qu'il s'agit d'une différence de pratique entre les deux groupes. Pour les participants

travaillant avec un modèle non renommé, seuls les travaux hors de l'arbre ont montré un impact sur les temps de travail, tandis que pour les participants travaillant avec un modèle renommé, on constate que le travail dans l'arbre, et notamment au 1<sup>er</sup> niveau, a aussi joué un rôle sur les performances de temps de compréhension et d'exécution du travail de modification. On remarque, par ailleurs, que les ouvertures de panneaux ont montré des niveaux significatifs de corrélations positives sur le temps travail dans l'arbre uniquement pour le groupe « non renommé ». Pour le groupe «renommé», ni les ouvertures de panneaux, ni l'utilisation des commandes n'ont montré une corrélation avec le temps de travail dans l'arbre. Ces constats mettent donc en évidence que la dénomination a permis une rationalisation du travail dans l'arbre qui n'existe pas chez les étudiants ayant travaillé avec un modèle non renommé. Cette rationalisation du travail dans l'arbre a permis au groupe « renommé » d'obtenir de meilleurs temps que le groupe « non renommé », notamment pour les phases de compréhension. Nous restons toutefois prudents sur cette conclusion étant donné les niveaux de significations de nos résultats. Cela d'autant plus que le travail de modification a significativement été effectué hors de l'arbre, laissant ainsi penser que d'autres facteurs entrent en jeu dans les performances d'un travail de modification.

L'étude met justement en avant que, quel que soit le modèle à modifier, les performances du travail de modification sont liées aux activités de compréhension, c'est-à-dire à la capacité de comprendre l'intention de conception présente dans le modèle. Nos observations des aspects de bonnes et contres performances de chaque participant mettent aussi en avant cette importance de comprendre l'intention de conception d'un modèle pour sa modification. Nos travaux permettent de présenter certaines pratiques qui ont amené des participants à obtenir de bonnes performances dans le travail de modification :

- L'acquisition d'une représentation mentale d'un modèle : il s'agit de penser le modèle comme un objet dynamique. En effet, un modèle CAO n'est pas qu'une simple représentation 3D de la pièce. Il est constitué d'une structure d'éléments qu'il est nécessaire de comprendre et qui, parfois, n'est pas clairement visible dans l'arbre de construction. Une exploration, préalable au travail de modification, de la structure globale du modèle CAO permet de se



faire une idée de la construction mise en place et des connexions entre les éléments principaux.

- Adopter une approche systématique dans le travail de modification : le travail de modification passe par une bonne compréhension des instructions de modification et l'identification des éléments de construction impliqués. Pour cela, une analyse de la connexion des éléments est essentielle pour être en mesure de transformer les paramètres des éléments en question ou de les remplacer en considérant les ramifications des éléments substitués.
- Préserver l'organisation d'un modèle et sa communication : l'exécution d'une action de modification doit prendre en considération l'impact qu'elle aura sur l'intention de conception originel. Cette transformation doit être effectuée en connaissance de la structure du modèle initial afin de préserver sa robustesse. La qualité d'une modification ne passe pas uniquement par le résultat qu'elle apporte sur le B-Rep. Les répercussions des changements d'un élément sur d'autres éléments dont les paramètres ne doivent pas être modifiés sont à prendre en compte afin que les reconnexions respectent la construction initiale. Il s'agit de permettre à l'arbre de construction de conserver et transmettre un message cohérent pour toutes personnes devant travailler sur le modèle CAO.

La dénomination peut jouer un rôle dans le repérage d'éléments ainsi que dans la compréhension de la structure d'un modèle CAO si, comme dans notre expérience, le choix des noms s'inscrit dans le vocabulaire pratiqué par les utilisateurs de ce modèle. Par contre, l'étude n'évoque pas si les efforts réalisés au préalable pour établir une stratégie de dénomination sont rentabilisés du fait que nous ne mettons pas en évidence un meilleur taux de réussite lorsque l'on renomme des éléments d'un modèle CAO et que les améliorations de temps ne sont pas suffisamment significatives pour confirmer des bénéfices dans le cadre de travaux de modification.

D'autre part, l'étude cible aussi des commandes CATIA V5<sup>®</sup> dédiées au repérage d'éléments qui peuvent être bénéfiques au travail de modification. Malheureusement, bien que ces commandes soient aux programmes de formation en CAO des étudiants, l'étude montre que

la majorité d'entre eux ne sont pas familiers avec l'utilisation de ces commandes. Il n'est donc pas possible dans cette étude d'apporter des conclusions statistiques sur l'utilisation de ces commandes lorsqu'un modèle est renommé comme cela avait été prévu. Toutefois, il existe dans nos observations des exemples d'utilisations de ces commandes pour assister la lecture d'un arbre renommé ainsi qu'aidant la compréhension des connexions de partie du B-Rep avec des éléments de l'arbre non renommé. Par conséquent, l'utilisation de commandes dédiées au repérage semble apporter une assistance dans les pratiques de chaque groupe.

On constate donc que la maîtrise des connaissances déclaratives et procédurales liées à l'exploration d'un modèle, telles que les commandes dédiées au repérage d'élément, ainsi que des connaissances stratégiques, telles que celles qui ont permis à une poignée de participants de performer, est essentielle au travail de modification. Des études (Chester, 2007 ; Johnson & Diwakaran, 2011) montrent qu'il est possible d'améliorer l'apprentissage, l'identification et l'utilisation de stratégies efficaces sans affecter l'acquisition des connaissances de commandes dédiées à la modélisation de pièce. Partant de ce constat, si les participants à l'expérience partageaient le même niveau de compétence sur ces sujets, il serait possible d'avoir des populations plus homogènes et, à priori, plus performantes pour reprendre la démarche expérimentale mise en place dans le cadre de cette recherche. De cette manière, il sera possible d'obtenir des seuils de signification plus intéressants pour évaluer les corrélations entre les activités au premier niveau de l'arbre et leur performance de travail dans la modification d'un modèle CAO.

Par ailleurs, au-delà des objectifs fixés, cette recherche amène une réflexion sur la formation de la CAO, notamment au sujet la modification de modèles CAO. La revue de littérature fait état des enjeux du travail de modification dans le cadre du développement de produit. Elle met en évidence l'importance de l'intention de conception, notamment sa communication et sa compréhension. L'étude réalisée guide vers des conditions de dénomination pour communiquer une intention de conception. Elle donne aussi un aperçu des connaissances utiles à la compréhension d'une intention de conception et à son exploitation dans le cadre d'un travail de modification.

L'ensemble de ces conclusions ne concerne pas uniquement le logiciel de modélisation CATIA V5<sup>®</sup>. Si nous avons travaillé sur ce système CAO c'est parce qu'il s'agit du logiciel en place dans les établissements collaborateurs. L'évaluation de la littérature repose sur divers systèmes CAO ainsi que sur des pratiques générales en modélisation 3D. La démarche expérimentale est aussi applicable à d'autres systèmes de modélisation 3D. Il ne s'agit donc pas d'une critique spécifique au système CATIA V5<sup>®</sup>, mais bien de conclusions applicables à tout système CAO, qu'il s'agisse de versions postérieures à celle utilisée ou de systèmes CAO concurrents.



## ANNEXE I

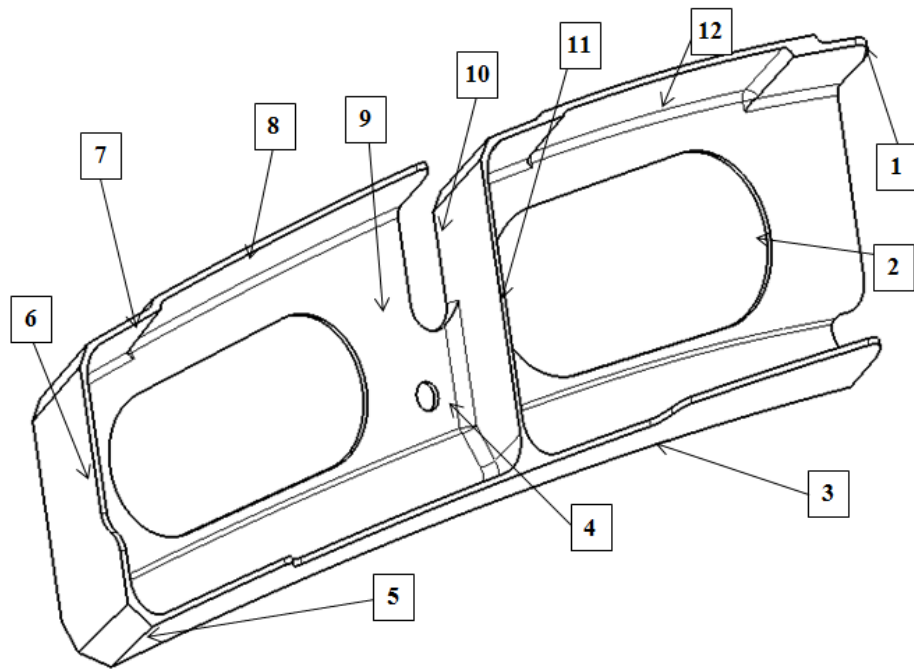
### QUESTIONNAIRE

#### Questionnaire

---

##### Pièce Usinée

Associer les mots aux numéros correspondant à leur emplacement sur la pièce.

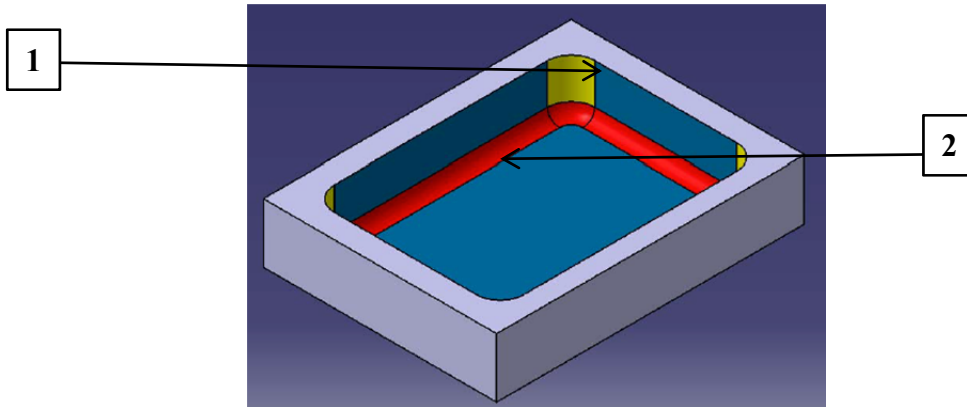


- 1 •
- 2 •
- 3 •
- 4 •
- 5 •
- 6 •
- 7 •
- 8 •
- 9 •
- 10 •
- 11 •
- 12 •

- Machined step
- Mur ouvert
- Mur Intérieur / Raidisseur
- Découpe Stringer
- Poche
- Mur vertical
- Trou oblong
- Chanfrein
- Congé d'arête
- Inner Machined step
- Mur fermé
- Trou

### Corner radius et fillet radius

Distinguer le corner radius et le fillet radius sur la pièce suivante. Entourer la bonne réponse.

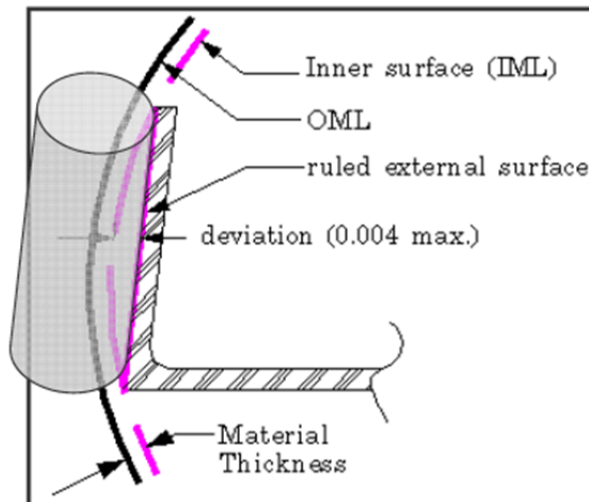


1 : Corner radius / Fillet radius

2 : Corner radius / Fillet radius

### OML et IML

En vous aidant du schéma, associer l'OML (Outer Line Mold) et de l'IML (Inner Line Mold) aux définitions qui suivent.



\_\_\_\_\_ représente l'enveloppe maitresse de l'avion qui définit l'aérodynamisme de l'avion  
 \_\_\_\_\_ est représentée par une surface réglée\* qui sera usinée avec le côté de l'outil

\*surface réglée : Surface où en chaque point passe au moins une droite appartenant entièrement à la surface

## ANNEXE II

### EXERCICE DE MODIFICATION

#### INSTRUCTION DE L'EXERCICE

---

Ce document présente le modèle «**PieceIntercostale.CATpart**» ainsi que les modifications à y apporter.

Il s'appuie sur les principes de modélisation et le vocabulaire acquis en conception assistée par ordinateur de composants aéronautiques. Vos manipulations sur l'ordinateur sont enregistrées via le logiciel Screenpresso.

##### ENREGISTREMENT DE L'EXPÉRIENCE :

**Veillez-vous référer à la feuille « Instruction Screenpresso » avant de démarrer l'exercice**

- 1) Ouvrir le dossier «Projet de Modification»
- 2) Copier le modèle «PieceIntercostale.CATpart» dans le dossier « Espace de travail »
- 3) Renommer le modèle avec le numéro qui vous a été attribué :  
PieceIntercostale-XX.CATpart
- 4) Ouvrir CATIA V5 R21 dans Démarrage/Tous les programmes/Mécanique/Catia  
ATTENTION : Il se peut que la licence ne soit pas active. Si c'est le cas, veuillez l'activer et relancer CATIA V5 R21
- 5) Dans CATIA V5, aller dans Fichier/Ouvrir pour ouvrir le modèle précédemment renommé
- 6) S'assurer que le système de mesure est en Pouce (in) : Aller dans Outil-Options-Paramètres et mesure
- 7) Réaliser les modifications demandées : **Il n'y a pas de procédures spécifiques transmises pour réaliser les modifications du modèle, vous êtes libre d'utiliser tous les moyens à votre connaissance pour effectuer le travail demandé.**

**ATTENTION :** Aux termes de vos modifications, assurez-vous dans l'arbre de construction qu'aucun élément ne soit isolé ou désactivé.

**La pièce est considérée modifiée lorsque toutes les tâches ont été effectuées et qu'aucun détail, tels que congés d'arête et chanfreins ne manque.**

Nous vous conseillons d'enregistrer votre travail aux termes de chaque modification effectuée.

## PRESENTATION DE LA PIECE

Dénomination : Pièce Intercostale

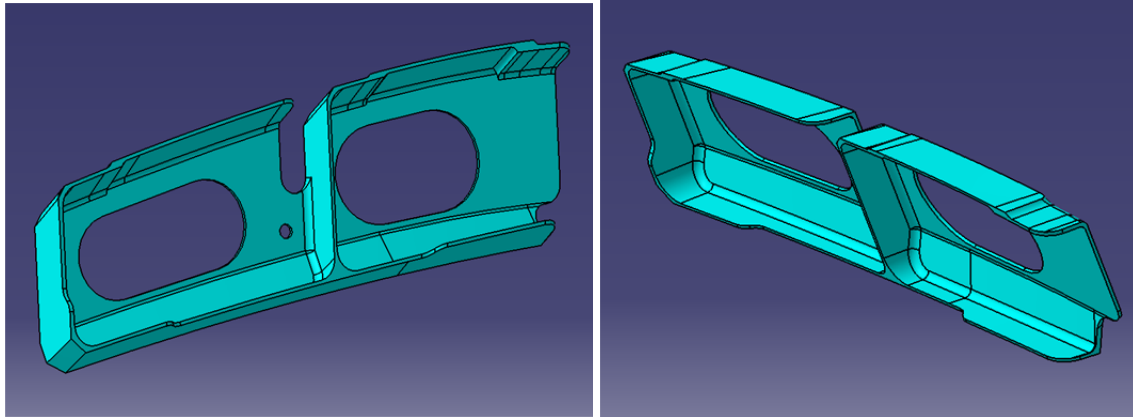


Figure.1 – Vues de la Pièce Intercostale

Description : Pièce structurelle fixée au plafond du cockpit, composée d'un mur ouvert pour loger un stringer. La pièce a été réalisée sous CATIA V5 conformément à la méthodologie de pièces usinées enseignée en modélisation aéronautique.

## DIMENSIONS

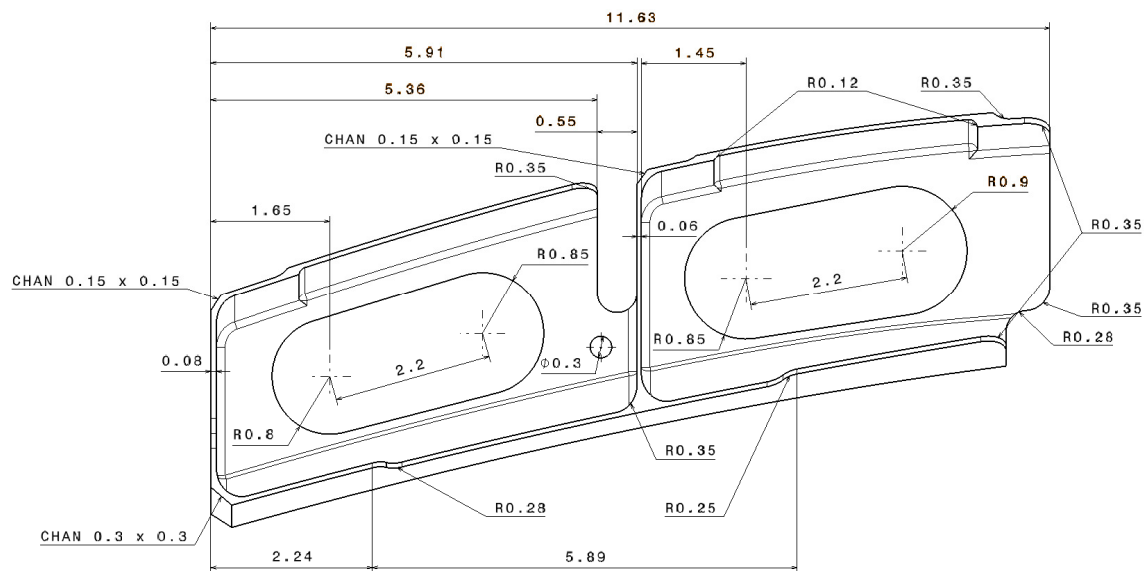


Figure.2 – Vue de Face avec dimensions



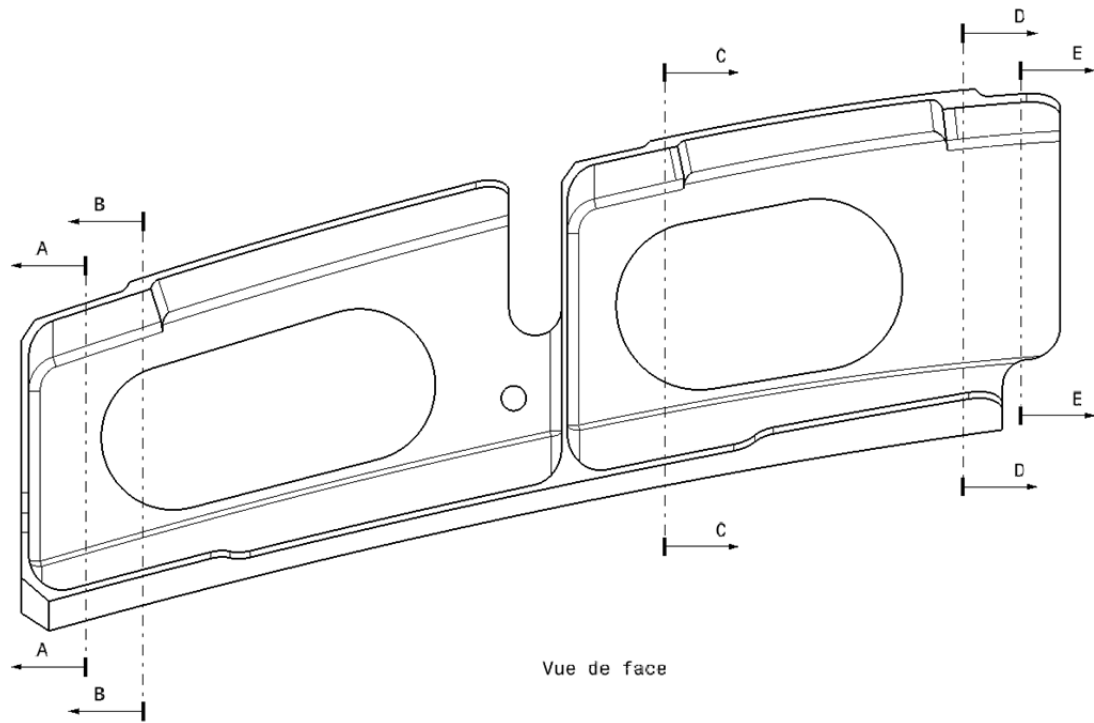


Figure.3 – Vue de Face avec plans de coupes

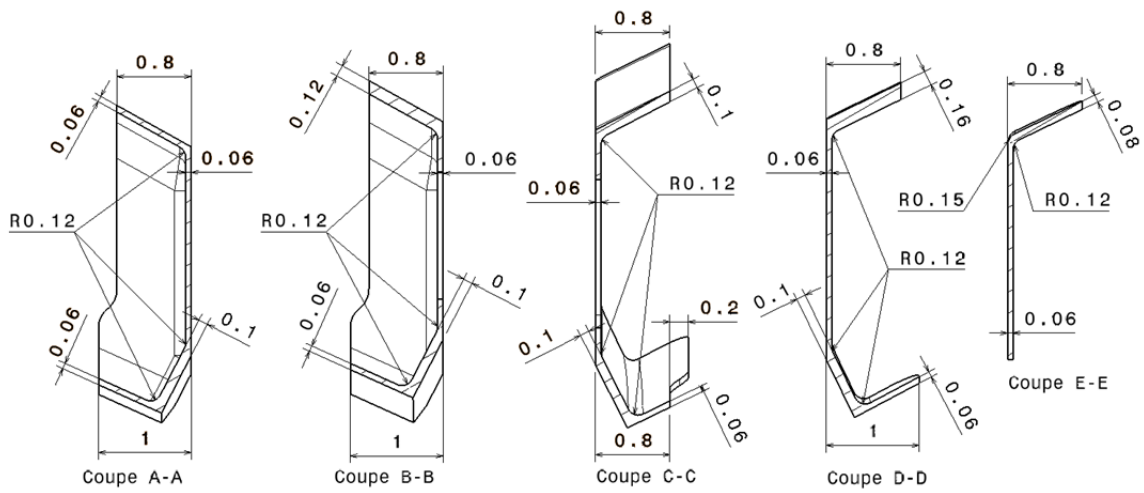


Figure.4 – Plans de coupe

## MODIFICATIONS A REALISER

### 1 – Modifications des épaisseurs

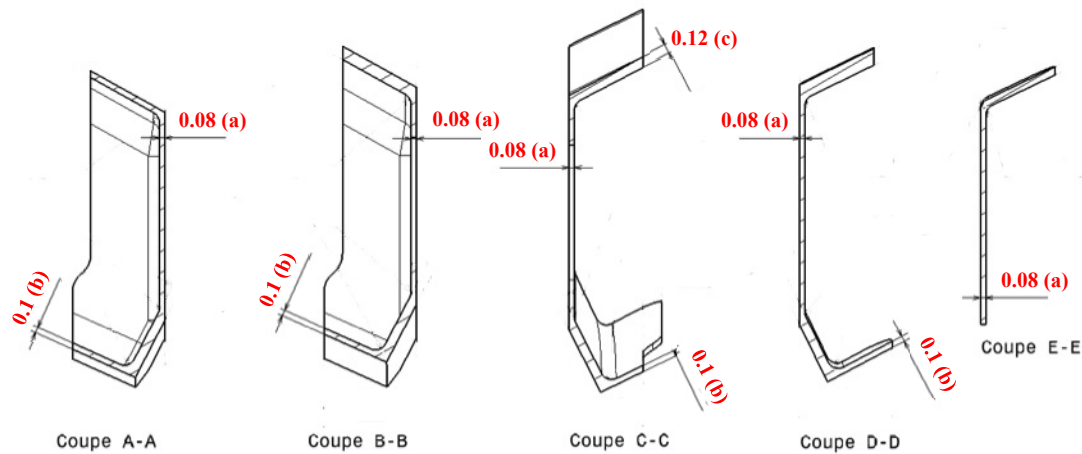


Figure.5 – Modifications des épaisseurs de plancher et murs

#### Commentaire :

- a. Augmenter l'épaisseur du plancher de 0.06 à 0.08 in
- b. Augmenter l'épaisseur du mur fermé de 0.06 à 0.1 in
- c. Passer l'épaisseur du mur ouvert entre les machined-step extérieur et intérieur de la coupe C - C de 0.1 à 0.12 in.

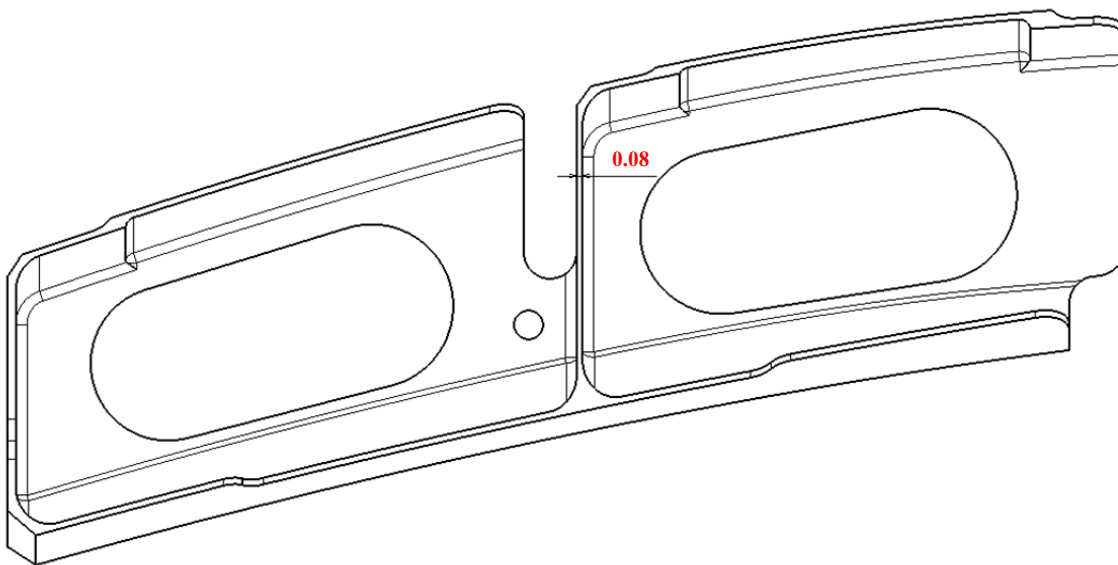


Figure.6 – Modification d'épaisseur du mur intérieur

- d. Augmenter l'épaisseur du mur intérieur de 0.06 à 0.08 in par la droite. La valeur 5.91 doit rester stable.

## 2 – Agrandissement de l'écart machined-step gauche / inner machined-step gauche

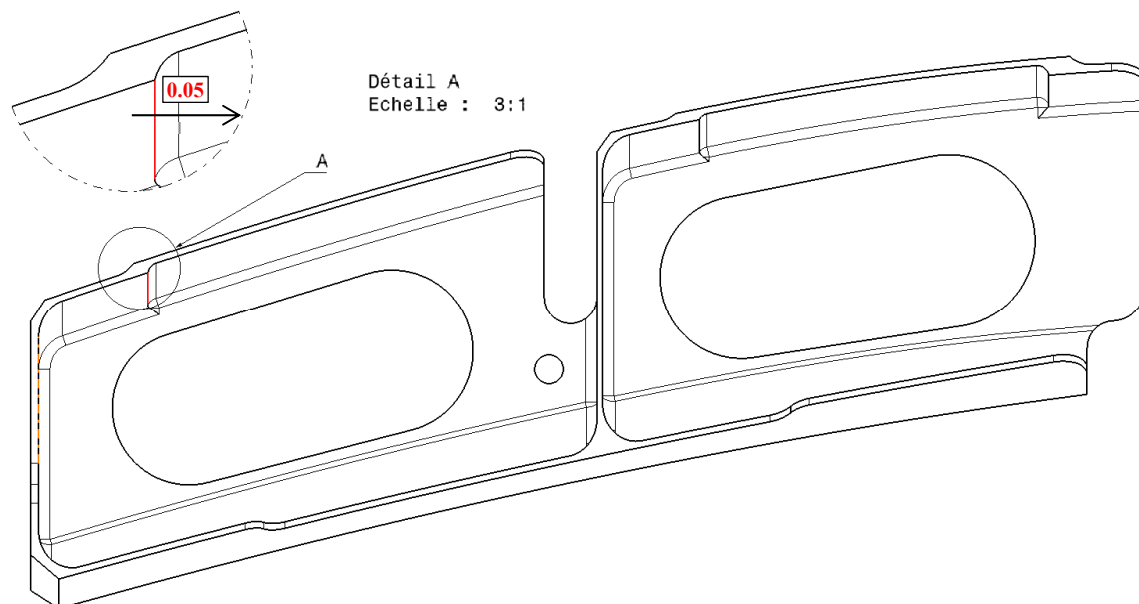


Figure.7 – Agrandissement de l'écart machined-step gauche / inner machined-step gauche

Commentaire : Déplacer horizontalement l'inner machined-step gauche de 0.05 pour agrandir son écart avec le machined-step gauche.

### 3- Déplacement de la découpe du stringer

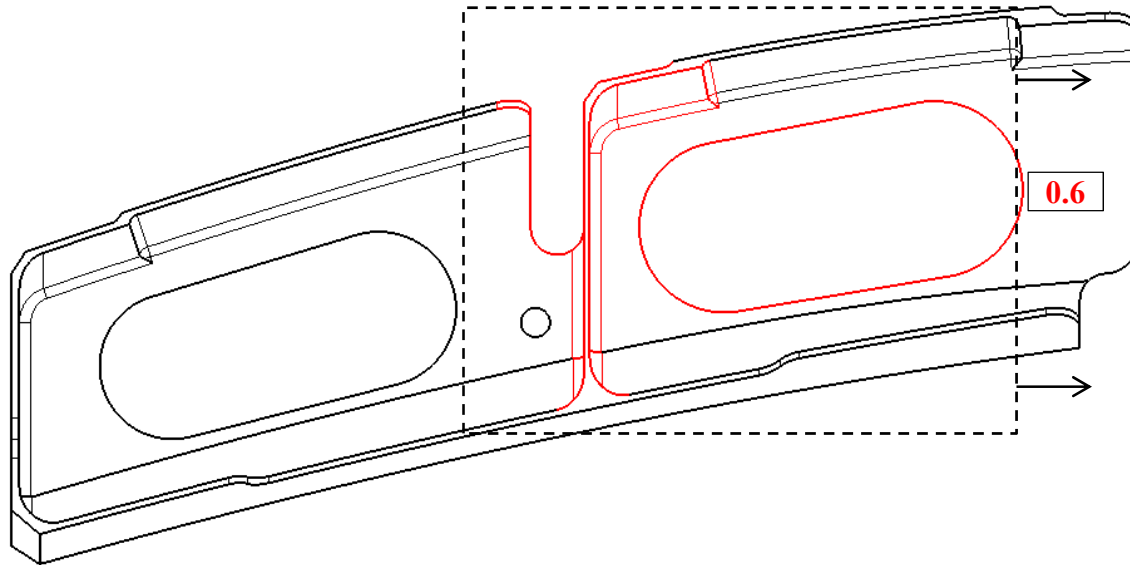


Figure.8 – Déplacement de la découpe du stringer

**Commentaire :** Attention le déplacement à l'horizontale de la découpe du stringer implique le déplacement de plusieurs éléments tous représentés en rouge. Voici les étapes à suivre :

- Le mur intérieur doit être déplacé de 0.6 in, tout en préservant son épaisseur. Le trou oblong devrait se déplacer automatiquement de 0.6 in par rapport à sa position initiale, tout en préservant sa distance avec le mur intérieur.
- Le machined-step extérieur central doit être déplacé de 0.6 in. Le côté gauche de l'inner machined-step de la poche droite devrait se déplacer automatiquement de 0.6 in et l'espacement entre les machined-steps reste préservé.
- Déplacer la découpe du stringer de 0.6 in tout en préservant ses dimensions. Le mur ouvert gauche devrait s'agrandir de 0.6 in dans le déplacement de la découpe du stringer.
- Résoudre l'incohérence d'apparition de matière que ces opérations ont créée au niveau de l'inner machined-step gauche.

#### 4 – Agrandissement du trou

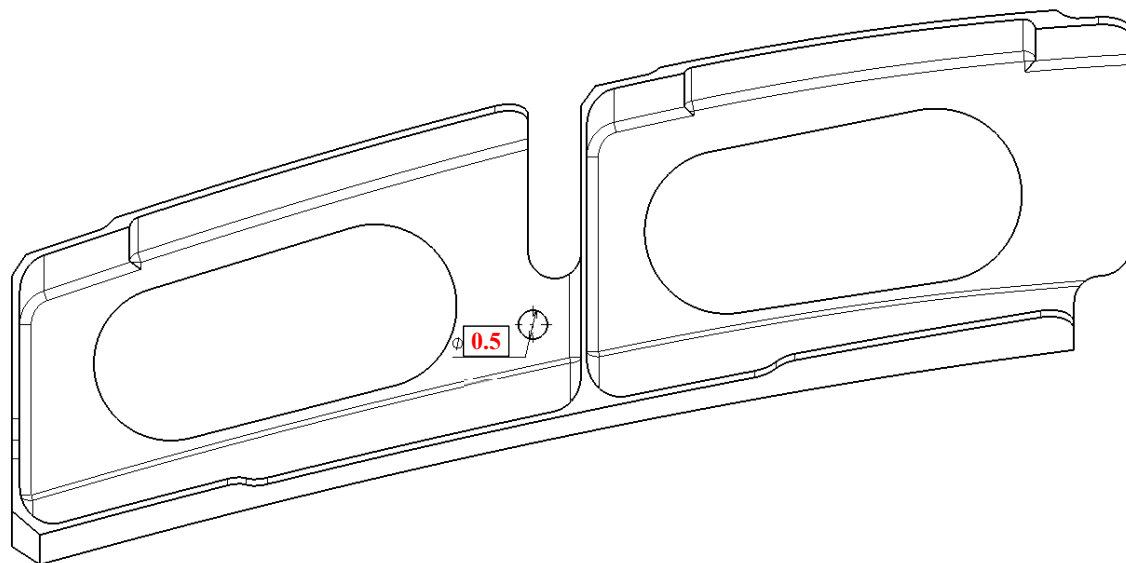


Figure.9 – Agrandissement du trou

Commentaire : Agrandir le diamètre du trou de 0.3 à 0.5 in.

#### 5 – Modification des congés des Inner machined-step

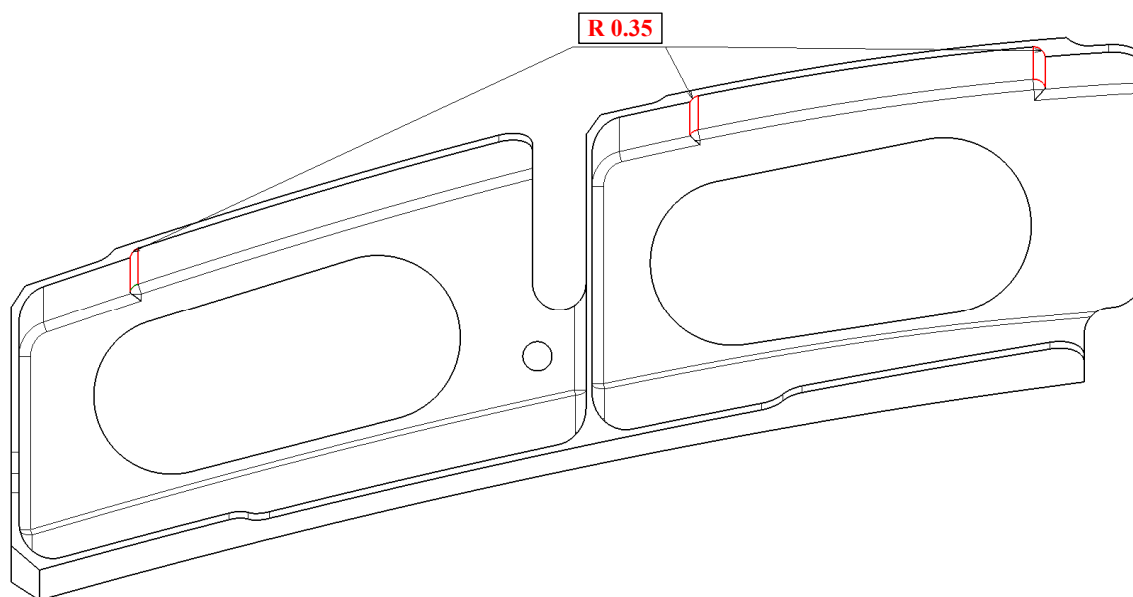


Figure.10 – Modification des congés des Inner machined-step

Commentaire : Modifier le rayon du congé de 0.12 à 0.35 in. Attention les fillet rad de 0.12 reste inchangés.

## 6 – Allongement du trou oblong gauche

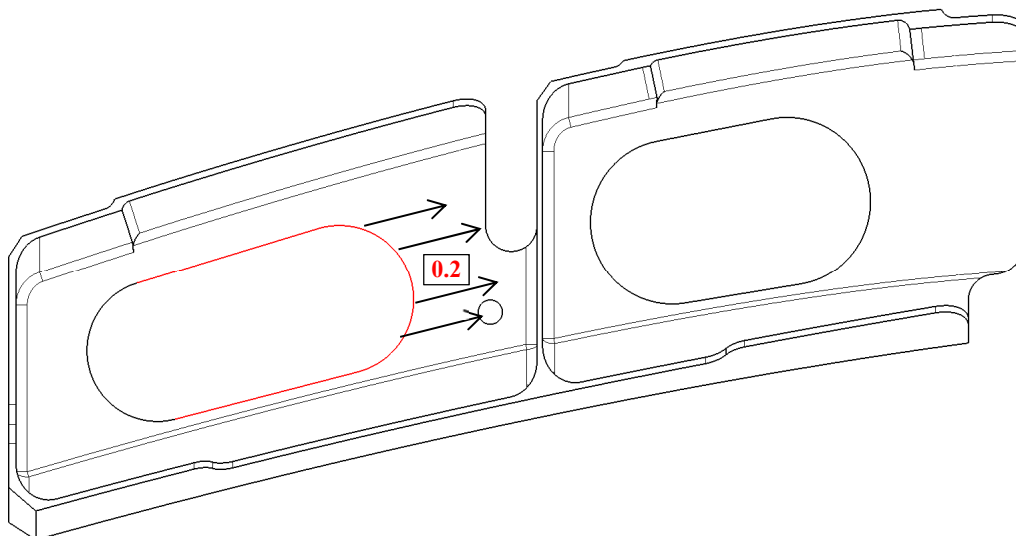


Figure.11 – Allongement du trou oblong gauche

Commentaire : Allonger le trou oblong linéairement, c'est-à-dire dans la continuité de la position actuelle de la poche.

## FIN DU TEST

---

- 1) Appeler un des organisateurs pour vérification de la pièce
- 2) Enregistrer la pièce modifiée
- 3) Reprendre la feuille « Instruction Screenpresso » pour terminer l'enregistrement

En vous remerciant pour votre participation à ce test.

## ANNEXE III

## COMPILATION DES DONNÉES DE TEMPS

Modification		TOTAL																	
Phase		Compréhension				Action				TOTAL MODIFICATION									
		Temps Total de modification	Temps 8+rep	Temps dans l'aire	Temps 1er niveau	Temps 2ème niveau ou - Parent/enfant	Temps dans Parent/enfant	Temps Total de modification	Temps 8+rep	Temps dans l'aire	Temps 1er niveau	Temps 2ème niveau ou - Parent/enfant	Temps dans Parent/enfant	Temps Total de modification	Temps 8+rep	Temps dans l'aire	Temps 1er niveau	Temps 2ème niveau ou - Parent/enfant	Temps dans Parent/enfant
R E N O M	Participant 1	792	331	461	364	57	40	318	234	84	39	45	0	1110	565	545	403	102	40
	Participant 3	1008	830	178	139	39	0	313	278	35	29	6	0	1321	1108	213	168	45	0
	Participant 5	539	315	224	109	115	0	472	412	60	20	40	0	1011	727	284	129	155	0
	Participant 7	333	195	138	111	27	0	631	554	77	68	9	0	964	749	215	179	36	0
	Participant 9	655	271	384	335	44	5	572	422	150	95	55	0	1227	693	534	430	99	5
M M É	Participant 11	614	374	240	207	33	0	936	830	106	101	5	0	1550	1204	346	308	38	0
	Participant 15	623	336	287	179	108	0	420	351	69	55	14	0	1043	687	356	234	122	0
	Participant 17	1233	824	409	331	78	0	1307	1157	150	117	33	0	2540	1981	559	448	111	0
	Participant 2	2038	1392	646	326	320	0	962	865	97	50	47	0	3000	2257	743	376	367	0
	Participant 4	957	599	358	229	129	0	754	659	95	48	47	0	1711	1258	453	277	176	0
N O N R E N O M M É	Participant 6	392	168	224	179	45	0	398	296	102	73	29	0	790	464	326	252	74	0
	Participant 8	1111	741	370	243	127	0	535	413	122	69	53	0	1646	1154	492	312	180	0
	Participant 10	646	444	202	142	60	0	932	823	109	64	45	0	1578	1267	311	206	105	0
	Participant 12	455	329	126	76	50	0	342	312	30	16	14	0	797	641	156	92	64	0
	Participant 14	857	557	300	168	132	0	827	631	196	145	51	0	1684	1188	496	313	183	0
M M É	Participant 16	1326	1130	196	113	83	0	679	639	40	20	20	0	2005	1769	236	133	103	0
	Participant 18	1262	999	263	182	81	0	796	754	42	22	20	0	2058	1753	305	204	101	0





ANNEXE IV

UTILISATION DE COMMANDES (PHASE DE COMPRÉHENSION)

Modification Phase	TOTAL Modif.																
	Comprehension										Commandes sur la Base de Penneau						
	Commandes d'ordre										Commandes sur la Base de Penneau						
	Afficher/cacher	Activer/Désactiver	Commenter	Définir le travail	Propriété	Modifier le support	Classement	Classement	Classement	Classement	Afficher/cacher	Activer/Désactiver	Classement	Classement	Classement	Classement	Classement
Participant 1	46	3	1		1			4	6	1	2						2
Participant 3	4							1	10	6					5	13	
Participant 5		4		1				4	26	2						1	2
Participant 7	2							4	20	11					1	2	
Participant 9	23			4	1	1		2	10	6							
Participant 11	7							10	13	17					3		
Participant 15	5	3		3				3	24	2				1			
Participant 17	1							18	19	1					6	7	4
Participant 2				5	1			10	22	2					8	28	
Participant 4	13		2			1			12	2	2			7	2	1	2
Participant 6	30			64				2	5								
Participant 8	18	6		57		2		5	12	1	11				1		
Participant 10	2			39				1	11	1						1	
Participant 12	5			4		2			14	1	1				1	13	
Participant 14	10	3		24		2		6	31	1						5	2
Participant 16								8	29	14	1				6	6	30
Participant 18	1	1						32	15	1	21					4	2



## ANNEXE V

## UTILISATION DE COMMANDES (PHASE D'ACTION)

TOTAL Modif.																
Modification Phase		Action														
		Commandes dans l'ordre						Commandes sur la Base de Paramètre								
		Afficher/cacher	Activer/Désactiver	Décaler sur l'objet de travail	Paramètre/ent	Propriété	Modifier la support de l'enquête	Cliquez sur un élément du Corps d'un niveau inf	Cliquez sur un élément du Corps d'un niveau inf	Cliquez sur un élément du Corps d'un niveau inf	Cliquez sur un élément du Corps d'un niveau inf	Propriété	Cliquez sur un élément du Corps d'un niveau inf	Cliquez sur un élément du Corps d'un niveau inf		
		Participant 1	3			1	4				2			2	1	8
		Participant 3							2	7				1	4	
R		Participant 5						1	9	5					1	
E		Participant 7	2					5	11	9				4		
O		Participant 9	6			1		1	10	9						
M		Participant 11	1					5	5	5	1					
M		Participant 13														
E		Participant 15	3					1	5	5	2				3	1
		Participant 17						3	11	1					4	10
		Participant 2				3		19	15	18				2	12	
N		Participant 4	2						6	6			1	2	11	1
O		Participant 6	7			5		1	9	6					3	2
N		Participant 8	1			13		1	4	6	2				2	2
R		Participant 10				19		1	16	12						
E		Participant 12				1			5	5				1	5	
O		Participant 14	7			20		5	13	5	2				2	
M		Participant 16						2	7	2				1	1	3
E		Participant 18	2					1	8	3	3			1	8	1



## ANNEXE VI

### TEST F ENTRE LES DONNÉES DE TEMPS DE L'ENA ET L'ETS (GNR)

GNR	Temps de Compréhension	F =	0,308992
		Probabilité =	0,286272
		Rapport des variances =	[0,0204619 ; 3,08347]
	Temps d'Action	F =	0,840877
		Probabilité =	0,839328
		Rapport des variances =	[0,0556841 ; 8,39122]
	Temps de Travail	F =	0,308053
		Probabilité =	0,285116
		Rapport des variances =	[0,0203997 ; 3,0741]

Le tableau montre qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle dans chacune des situations car la valeur de la probabilité n'est pas inférieure à 0,05. Les tests ont été construits pour déterminer si la valeur du rapport des écarts-types est égale à 1,0 contre l'hypothèse alternative que la valeur du rapport n'est pas égale à 1,0.



## ANNEXE VII

### TEST F DES DONNÉES DE TEMPS ENTRE GNR ET GR

Temps de Compréhension	F =	3,25666
	Probabilité =	0,137443
	Rapport des variances =	[0,664713 ; 14,748]
Temps d'Action	F =	0,422952
	Probabilité =	0,251086
	Rapport des variances =	[0,0863283 ; 1,91536]

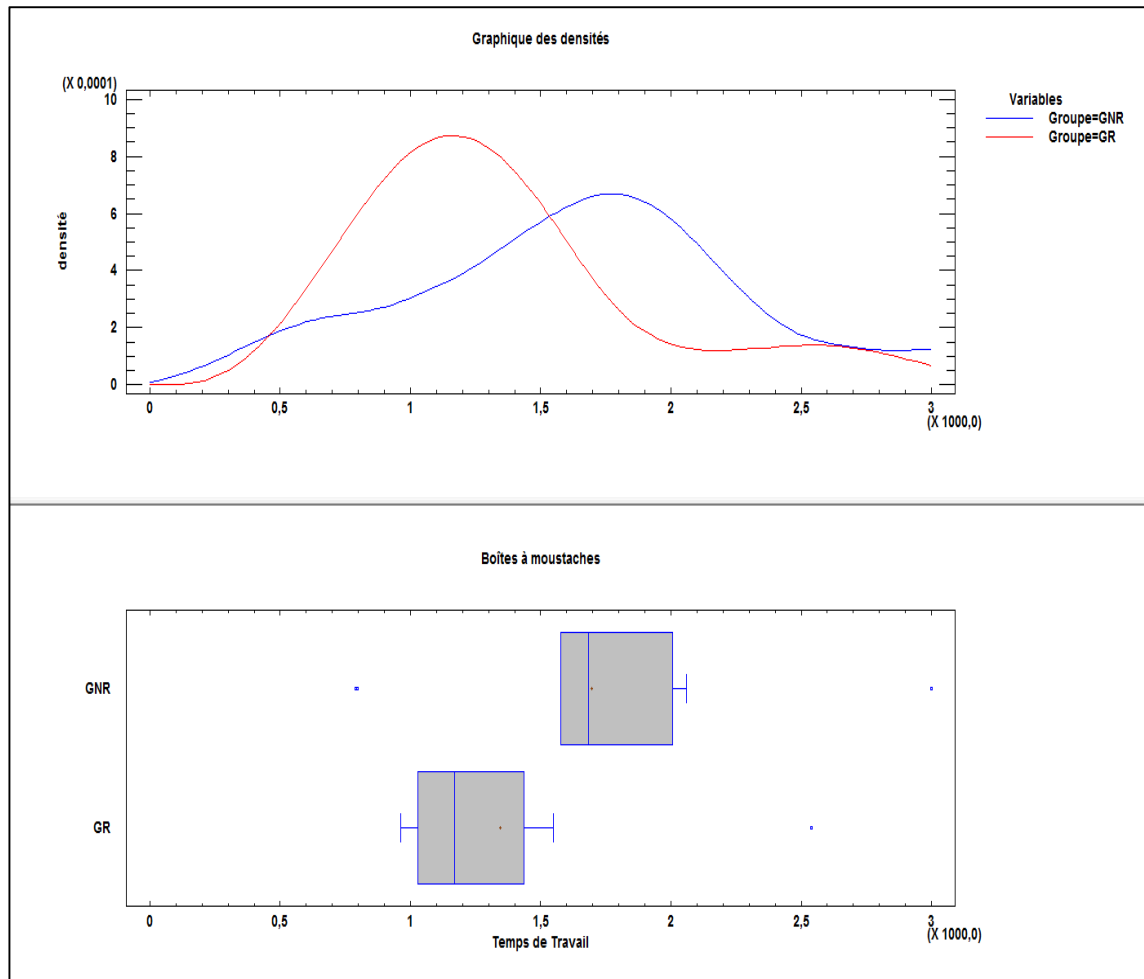
Le tableau montre qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle dans chacune des situations car les valeurs de la probabilité ne sont pas inférieures à 0,05. Les tests ont été construits pour déterminer si la valeur du rapport des écarts-types est égale à 1,0 contre l'hypothèse alternative que la valeur du rapport n'est pas égale à 1,0. Par ailleurs, comme les intervalles contiennent la valeur 1, il n'y a pas de différence significative entre les écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0%. Par conséquent, pour ce cas, nous pouvons considérer l'égalité des écarts-types des deux échantillons au niveau de confiance de 95,0% dans le cadre de nos tests t.





## ANNEXE VIII

### GRAPHIQUES DE L'ANALYSE DU TEMPS DE TRAVAIL DE GNR ET GR





## ANNEXE IX

### RÉPARTITION EN % DU TEMPS HORS ET DANS L'ARBRE POUR CHAQUE ACTIVITÉ DE GR ET GNR

	Compréhension				Action			TOTAL TRAVAIL DE MODIFICATION			
	Temps Total de Compréhension	Temps de Compréhension hors de l'arbre	Temps de Compréhension dans l'arbre	Temps Total d'action	Temps d'Action hors de l'arbre	Temps d'Action dans l'arbre	Temps Total de Travail	Temps de Travail hors de l'arbre	Temps de Travail dans l'arbre		
GR	Participant 1	100	41,79	58,21	100	73,58	26,42	100	50,90	49,10	
	Participant 3	100	82,34	17,66	100	88,82	11,18	100	83,88	16,12	
	Participant 5	100	58,44	41,56	100	87,29	12,71	100	71,91	28,09	
	Participant 7	100	58,56	41,44	100	87,80	12,20	100	77,70	22,30	
	Participant 9	100	41,37	58,63	100	73,78	26,22	100	56,48	43,52	
	Participant 11	100	60,91	39,09	100	88,68	11,32	100	77,68	22,32	
	Participant 15	100	53,93	46,07	100	83,57	16,43	100	65,87	34,13	
	Participant 17	100	66,83	33,17	100	88,52	11,48	100	77,99	22,01	
	Participant 2	100	68,30	31,70	100	89,92	10,08	100	75,23	24,77	
	Participant 4	100	62,59	37,41	100	87,40	12,60	100	73,52	26,48	
GNR	Participant 6	100	42,86	57,14	100	74,37	25,63	100	58,73	41,27	
	Participant 8	100	66,70	33,30	100	77,20	22,80	100	70,11	29,89	
	Participant 10	100	68,73	31,27	100	88,30	11,70	100	80,29	19,71	
	Participant 12	100	72,31	27,69	100	91,23	8,77	100	80,43	19,57	
	Participant 14	100	64,99	35,01	100	76,30	23,70	100	70,55	29,45	
	Participant 16	100	85,22	14,78	100	94,11	5,89	100	88,23	11,77	
	Participant 18	100	79,16	20,84	100	94,72	5,28	100	85,18	14,82	



## ANNEXE X

### RÉPARTITION EN % DU TEMPS DANS L'ARBRE AU 1<sup>ER</sup> ET 2<sup>ÈME</sup> NIVEAU POUR LE TRAVAIL TOTAL ET LA COMPRÉHENSION

	Compréhension				TOTAL TRAVAIL DE MODIFICATION			
	Temps dans l'arbre	Temps de Compréhension au 1 <sup>er</sup> niveau de l'arbre	Temps de Compréhension au 2 <sup>ème</sup> niveau de l'arbre	Temps de Compréhension dans Parent/enfant	Temps dans l'arbre	Temps de Travail au 1 <sup>er</sup> niveau de l'arbre	Temps de Travail au 2 <sup>ème</sup> niveau de l'arbre	Temps de Travail dans Parent/enfant
Participant 1	100	78,96	12,36	8,68	100,00	73,94	18,72	7,34
Participant 3	100	78,09	21,91	0,00	100,00	78,87	21,13	0,00
Participant 5	100	48,66	51,34	0,00	100,00	45,42	54,58	0,00
Participant 7	100	80,43	19,57	0,00	100,00	83,26	16,74	0,00
Participant 9	100	87,24	11,46	1,30	100,00	80,52	18,54	0,94
Participant 11	100	86,25	13,75	0,00	100,00	89,02	10,98	0,00
Participant 15	100	62,37	37,63	0,00	100,00	65,73	34,27	0,00
Participant 17	100	80,93	19,07	0,00	100,00	80,14	19,86	0,00
Participant 2	100	50,46	49,54	0,00	100,00	50,61	49,39	0,00
Participant 4	100	63,97	36,03	0,00	100,00	61,15	38,85	0,00
Participant 6	100	79,91	20,09	0,00	100,00	77,30	22,70	0,00
Participant 8	100	65,68	34,32	0,00	100,00	63,41	36,59	0,00
Participant 10	100	70,30	29,70	0,00	100,00	66,24	33,76	0,00
Participant 12	100	60,32	39,68	0,00	100,00	58,97	41,03	0,00
Participant 14	100	56,00	44,00	0,00	100,00	63,10	36,90	0,00
Participant 16	100	57,65	42,35	0,00	100,00	56,36	43,64	0,00
Participant 18	100	69,20	30,80	0,00	100,00	66,89	33,11	0,00



## ANNEXE XI

### ANALYSE DES OUVERTURES DE PANNEAUX AU 1<sup>ER</sup> et 2<sup>ÈME</sup> NIVEAU DE L'ARBRE (GR ET GNR)

Tableau-A 4.24 Ouvertures de panneaux au 1er et 2nd niveau de l'arbre de GR et GNR et test W pour chaque activité

		Compréhension		Action		Total Travail	
		Ouverture dans l'arbre		Ouverture dans l'arbre		Ouverture dans l'arbre	
		Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.	Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.	Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.
GR	Participant 1	5	6	15	5	20	6
	Participant 3	7	10	7	2	14	23
	Participant 5	6	26	6	9	12	27
	Participant 7	15	20	14	11	29	22
	Participant 9	8	10	10	10	18	10
	Participant 11	27	13	10	5	37	13
	Participant 15	5	24	6	5	11	24
	Participant 17	19	19	4	11	23	26
	MÉDIANE	7,5	16	8,5	7	19	22,5
GNR	Participant 2	12	22	37	15	49	50
	Participant 4	2	12	6	6	8	13
	Participant 6	2	5	7	9	9	5
	Participant 8	6	12	7	4	13	12
	Participant 10	2	11	13	16	15	12
	Participant 12	1	14	5	5	6	27
	Participant 14	7	31	10	13	17	36
	Participant 16	22	29	4	7	26	35
	Participant 18	33	15	4	8	37	19
	MÉDIANE	6	14	7	8	15	19
TEST W	W=	46	33	42	28	42,5	31
	Probabilité =	0,358573	0,809661	0,59299	0,467191	0,563461	0,664422

Le test W du tableau A 4.24 est aussi construit pour que l'hypothèse nulle soit rejetée si la différence entre les médianes est à 0 par rapport à l'hypothèse alternative que la différence n'est pas égale à 0. A nouveau, la valeur de la probabilité de chaque test est supérieure ou égale à 0,05. Il n'y a donc pas de différences statistiquement significatives entre les médianes de chaque échantillon au niveau de confiance de 95,0%.

Les tableaux A 4.25 et A 4.26 montrent les résultats des tests W entre les ouvertures au 1<sup>er</sup> niveau de l'arbre et ceux du 2<sup>nd</sup> niveau pour chaque groupe. Ces tableaux se lisent de la même manière que les tableaux 4.19 et 4.20.

Tableau-A 4.25 Test W entre les ouvertures de panneau au 1er et 2nd niveau de l'arbre pour GR

GROUPE = GR			Compréhension	Action	Total Travail
			Ouverture dans l'arbre	Ouverture dans l'arbre	Ouverture dans l'arbre
			Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 1er niveau
Compréhension	Ouverture dans l'arbre	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.	45 0,187958		
Action	Ouverture dans l'arbre	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.		24 0,427476	
Total Travail	Ouverture dans l'arbre	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.			30,5 0,916293

Tableau-A 4.26 Test W entre les ouvertures de panneau au 1er et 2nd niveau de l'arbre pour GNR

GROUPE = GNR			Compréhension	Action	Total Travail
			Ouverture dans l'arbre	Ouverture dans l'arbre	Ouverture dans l'arbre
			Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 1er niveau	Clique sur un élément de 1er niveau
Compréhension	Ouverture dans l'arbre	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.	60,5 0,0836398		
Action	Ouverture dans l'arbre	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.		47,5 0,56768	
Total Travail	Ouverture dans l'arbre	Clique sur un élément de 2ème niveau ou inf.			45,5 0,690796



## ANNEXE XII

### DONNÉES DE L'ÉTUDE DE CORRÉLATION SUR LES COMMANDES ET OUVERTURES DE PANNEAUX

	Travail Total			Compréhension			Action			
	Commandes CATIA	Ouverture de panneaux	Temps de Travail	Commandes CATIA Total	Ouverture de panneaux Total	Temps de Compréhension	Commandes CATIA Total	Ouverture de panneaux Total	Temps de d'action	
GR	Participant 1	68	44	1110	56	13	792	12	31	318
	Participant 3	5	49	1321	5	35	1008	0	14	313
	Participant 5	33	51	1011	29	35	539	4	16	472
	Participant 7	4	64	964	2	38	333	2	26	631
	Participant 9	37	40	1227	29	18	655	8	22	572
	Participant 11	9	68	1550	7	43	614	2	25	936
	Participant 15	17	44	1043	12	29	623	5	15	420
	Participant 17	1	84	2540	1	55	1233	0	29	1307
	Participant 2	9	136	3000	6	70	2038	3	66	962
	Participant 4	28	45	1711	25	19	957	3	26	754
GNR	Participant 6	106	28	790	94	7	392	12	21	398
	Participant 8	110	34	1646	94	19	1111	16	15	535
	Participant 10	60	43	1578	41	14	646	19	29	932
	Participant 12	13	45	797	12	29	455	1	16	342
	Participant 14	68	70	1684	39	45	857	29	25	827
	Participant 16	1	109	2005	1	93	1326	0	16	679
	Participant 18	28	76	2058	23	54	1262	5	22	796



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aberdeen Group. 2006. *The transition from 2D drafting to 3D modelling benchmark report*. Boston, MA : Aberdeen group Inc. 23 p.
- Alducin-Quintero, G., M. Contero, J. Martin-Gutiérrez, D. A. Guerra-Zubiaga et M. D. Johnson. 2011. « Productivity Improvement by Using Social-Annotations about Design Intent in CAD Modelling Process ». *Online Communities and Social Computing*, vol.6778, p.153-161.
- Alducin-Quintero, G. et M. Contero. 2012. « 3D Model Annotation as a Tool for Improving Design Intent Communication : A Case Study on its Impact in the Engineering Change Process ». In *Proc. ASME. 45011 ; vol.2 : 32<sup>nd</sup> Computers and Information in Engineering Conference* (Chicago, August 12-15 2012), p. 349-356. Chicago IL : ASME.
- Amirouche, F. M. L. 2004. *Principles of computer-aided design and manufacturing*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 510 p.
- Baillargeon, G. 2003. *Statistique appliquée et outils d'amélioration de la qualité*, 2<sup>ème</sup> édition. Trois-Rivières, QC : Les Éditions SMG, 571 p.
- Camba, J., M. Contero, M. Johnson et P. Company. 2014. « Extended 3D annotations as a new mechanism to explicitly communicate geometric design intent and increase CAD model reusability ». *Computer-Aided Design*, vol.57, p. 61-73.
- Chang, T.C. 1990. *Expert Process Planning for Manufacturing*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 283 p.
- Chester, I. 2007. « Teaching for CAD expertise ». *International Journal of Technology and Design Education*, vol.17, n°1, p.23-35.
- Cozzens, R. 2006. *CATIA V5 Workbook : releases 10 & 11*. Mission, Kan. : SDC Publications.
- Contero, M., P. Company, C. Vila et N. Aleixos. 2002. « Product data quality and collaborative engineering ». *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, n°3, p. 32-42.

- Corney, J. 1997. *3D Modeling with the ACIS Kernel and toolkit*. Chichester : Wiley, 294 p.
- Creswell, J.W. 2007. *Qualitative inquiry and research design : Choosing among five approaches*, 2<sup>nd</sup> edition. Sage, CA : Thousand Oak, 448 p.
- Cross, N. 1989. *Engineering Design methods*. Chichester : Wiley, 230 p.
- Da Silveira, G., D. Borenstein et F. S. Fogliatto. 2001. « Mass Customization : Littérature review and research directions ». *International Journal of Production Economics*, vol. 72, n°1, p. 1-13.
- Datar, S., C. C. Jordan, S. Kekre S. Rajiv et K. Srinivasan. 1997. « The advantages of time-based new product development in a fast-cycle industry ». *Journal of Marketing Research*, vol. 34, n°1, p. 36-49.
- De Graaf, R. 1996. « Assessing Product Development, Visualizing Process and Technology Performance with RACE 2 » PhD thesis, Eindhoven, Eindhoven University, Faculty of Technology Management, 229 p.
- Diwakaran, R. P. et M. D. Johnson. 2012. « Analyzing the effect of alternative goals and model attributes on CAD model creation and alteration ». *Computer-Aided Design*, vol. 44, p. 343-353.
- Hartman, N. W. 2005. « Defining expertise in the use of constraint-based CAD tools by examining practicing professionals ». *The Engineering Design Graphics Journal*, vol. 69, n°6, p. 6-15.
- Jankowski, G. 2002. « Creating robust parametric sketches ». In : Cadalyst. En ligne. < <http://www.cadalyst.com/manufacturing/creating-robust-parametric-sketches-9783> >. Consulté le 21 octobre 2015.
- Jarrat, T. A. W., C. M. Eckert, N. H. M. Caldweel et P. J. Clarkson. 2010. « Engineering change: an overview and perspective on the litterature ». *Research in Engineering Design*, vol. 22, n°2, p. 103-124.
- Johnson, M. D. et R. P. Diwakaran. 2011. « An educational exercise examining the role of model attributes on the creation and alteration of CAD models ». *Computers & Education*, vol 57, p. 1749-1761.

- Kamrani, A. K. 2013. « An overview of Computer-Aided Design ». In *Methods in Product Design : New strategies in reengineering*, sous la dir. de Kamrani, A. K., Azimi et Al-Ahmari, p. 54-72. Boca Raton, FL : CRC Press.
- Karamoko M. et I. O. Ida. 2015. « Histogramme et courbe de densité de Kernel ». In : DMS-Wiki Université de LAVAL. En ligne. < <http://archimede.mat.ulaval.ca/dokuwiki/doku.php?id=r:tutoriels:histogramme> >. Consulté le 21 octobre 2015.
- Karsenty, L. 1996. « An empirical evaluation of design rational documents ». In : *Proc. SIGCHI conference on humans factors in computing systems* (Vancouver, April 13-18 1996), p. 150-156. New York, NY : ACM.
- Lombard, M. 2009. *SolidWorks 2009 Bible*. Indianapolis, IN : Wiley Publishing, 1200 p.
- LAROUSSE. [s.d.] « Définitions de élément ». In *LAROUSSE*. En ligne < <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9l%C3%A9ment/28372?q=%C3%A9l%C3%A9ment#28235> >. Consulté le 21 octobre 2015.
- Liker, J. K., M. Fleicher et D. Arnsdorf. 1992. « Fulfilling the promises of CAD ». *Sloan Management Review*, vol. 33, n°3, p. 74-86.
- Leedy, P. D. & J. E. Ormrod. 2013. *Practical Research : Planning and design*, 10<sup>th</sup> ed. New Jersey, NY : Person Education Inc, 304 p.
- Mandorli F. et H. E. Otto. 2013. « Negative knowledge and a novel approach to support MCAD education ». *Computer-Aided Design*, vol. 10, n°6, p. 1007-1020.
- Maurino, M. 1994. *La gestion des données techniques : Technologie du concurrent engineering*. Paris : Masson, 188 p.
- McMahon, C. A. & J. Browne, 1998. *CADCAM : Principles, Practice and Manufacturing Management*. Harlow, UK : Addison Wesley Longman. 688 p.
- Meyer, M. A., J. M. Booker. 1991. *Eliciting and analyzing expert judgment : A practical guide*. San Diego : Academic Press, 459 p.
- Michaud, M. 2012. *CATIA Core Tools : Computer aided three-dimensional interactive application*, 1<sup>st</sup> edition. New York, NY : McGraw Hill, 765 p.

- Norman, G. R., V. R. Le Blanc et L. R. Brooks. 2000. « On the difficulty of noticing obvious features in patient appearance ». *Psychological Science*, vol 11, n°2, p.112-117.
- Otto K. et K. Wood. 2001. *Product design : techniques in reverse engineering and new product development*. Upper Saddle River, NY : Prentice Hall, 1104 p.
- Pahl G. et W. Beitz. 1996. *Engineering design : a systematic approach*, 2<sup>nd</sup> edition. London : Springer, 397 p.
- Pena-Mora, F., D. Sriram et R. Logcher. 1993. « SHARED-DRIMS: SHARES Design recommendation-intent management system ». In : *Enabling technologies : infrastructure for collaborative enterprises, proceedings, second workshop* (Morgantown, April 20-22 1993), p. 213-221. IEEE Press.
- Polkinghorne, D.E. 1989. « Phenomenological research methods ». In *Existential-Phenomenological Perspectives in Psychology*, sous la dir. de Valle, R. S. et Halling, S, p. 41-60. New York, NY : Plenum Press.
- Planchard, D. 2005. *SolidWorks 2005 : the basics : a working knowledge of SolidWorks*. Mission, KA : SDC Publications, 242 p.
- Regli, W. C., X. Hu, M. Atwood et W. Sun. 2000. « A survey of design rationale systems: Approches, representation, capture and retrieval ». *Engineering with Computers*, vol. 16, p. 209-235.
- Rynne, A. et W. F. Gaughran. 2008. « Cognitive modelling strategies for optimum design intent in parametric modelling ». *Computers in Education Journal*, vol. 18, n°3, p. 55-68.
- Rynne, A., W. F. Gaughran et N. Seery. 2010. « Defining the variables that contribute to developing 3D CAD modelling expertise ». In *IDATER online conference graphicacy and modelling 2010*. (Loughborough University, December 14<sup>th</sup> 2010), p. 161-178. Loughborough Design School : Design Education Research Group.
- Salehi V. et C. McMahon. 2009. « Action research into the use of parametric associative CAD systems in an industrial context ». In *International Conference on Engineering Design (ICED) 2009*. (Stanford University, August 24-27 2009), p. 133-144. Stanford, CA : Norell Bergendahl, M., M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad et U. Lindemann.

- Sanders, D. H. et F. Allard. 1992. *Les statistiques, une nouvelle approche*, 2<sup>ème</sup> édition. Saint-Laurent, QC : McGraw-Hill, 498 p.
- Shah, J. J., P. Sreevalsan, R. Billo, et A. Mathew. 1988. *Current status for features technology : report for task 0*. «Technical Report», R-88-GM-04.4. Arlington, TX : CAM-I, Inc.
- Shah, J.J. 1991. « Assessment of features technology ». *Computer-Aided Design*, vol. 23, n° 5, p. 331-343.
- Shah, J. J. & M. Mäntylä. 1995. *Parametric and feature-based CAD/CAM : concepts, techniques, and applications*. New York, NY: J. Wiley and Sons, 619 p.
- Shahin, T. M. M. 2008. « Feature-based design – An overview ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 5, n° 5, p. 639-653.
- Simard, C. 2002. *Notions de statistique*. Sainte-Foy, QC : Éditions Le griffon d'argile, 341 p.
- Spiegel, M.R. 2002. *Statistique*. « Mini Schaum's ». Paris : EdiScience Dunod, 148 p.
- Taraud, D. et G. Glemarec. 2008. *Le guide de la CAO*. Paris: Dunod, 180 p.
- Tickoo, S. 2014. *CATIA V5R21 for Designers*. Shererville, IN : CADCIM Technologies, 737 p.
- Toogood, R. 2004. *Pro/engineer wildfire 2.0 : tutorial and multimedia CD*. Mission, KA : Schroff Development Corporation, 346 p.
- Ulrich, K. T. et S. D. Eppinger. 2008. *Product design and development*, 4<sup>th</sup> edition. Boston, MA : McGraw-Hill Higher Education, 384 p.
- Wright, I.C., A. P. Duckworth, A. Jebb, D. B. Dickerson. 2000. « Research into the process of engineering change within incremental product design ». In *Proceedings of Design for excellence : engineering design conference 2000* (Brunel University, 18 February 2005), pp 449-456. Brunel University, UK : Professional Engineering Publishing.

Ye, X., W. Peng, Z. Chen et Y. Cai. 2004. « Today's students, tomorrow's engineers : an industrial perspective on CAD education ». *Computer-Aided Design*, vol. 36, p.1451-1460



