



DIPLOME D'INGENIEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DE  
MECANIQUE DE PARIS (INGENIEUR SUPMECA)

TYPE : STAGE ASSISTANT INGÉNIEUR

ARAUJO SOARES LUCAS  
BEN MOALLEM CHIHEB  
HANACHI ABDELWAHAB  
MONTANARI FILIPPO

---

## Rapport de Stage :

# Projet MiniBee – CONCEPTION D'UN ATELIER D'ASSEMBLAGE

---



~ Page blanche ~



## Sommaire

<b>Chapitre 1 : INTRODUCTION AU PROJET</b> .....	1
1.1 Le Projet MiniBee .....	1
1.1.1 Histoire et points forts	
1.1.2 Spécifications techniques	
1.2 Notre projet « Conception d'un Atelier d'Assemblage » .....	3
1.2.1 Encadrement au sein du projet global MiniBee	
1.2.2 Déroulement du projet	
<b>Chapitre 2 : MODIFICATION DE LA MAQUETTE NUMERIQUE</b> .....	5
2.1 Encadrement du Problème .....	5
2.1.1 Introduction	
2.1.2 Spécifications du moteur EMRAX 188	
2.1.3 Spécifications de l'hélice E-Props	
2.2 Analyse et Modification des Pièces de la Maquette .....	6
2.2.1 Analyse et modification du bloc moteur	
2.2.2 Analyse et modification du bloc hélice	
2.2.1 Analyse et modification du bloc carénage	
2.3 Assemblage des éléments .....	12
2.3.1 Schémas d'assemblage	
2.3.2 Analyse des interférences	
<b>Chapitre 3 : CONCEPTION ET OPTIMISATION DE LA LIGNE D'ASSEMBLAGE</b> .....	17
3.1 Définition de la liste des Opérations .....	17
3.1.1 Approche adoptée	
3.2 Application de la méthode RPW .....	18
3.2.1 Notions introductives	
3.2.2 La méthode RPW	
3.2.3 Application de la méthode à notre ligne	
3.2.4 Optimisation de la solution donnée par la méthode RPW	
3.3 Implantation de la méthode RPW sur Excel en VBA .....	21
3.3.1 Du VBA, pourquoi ?	
3.3.2 Notions de base à connaître	
3.3.3 Eléments de l'interface utilisateur	
3.3.4 Détails du code développé	
<b>Chapitre 4 : MODELISATION ET ANALYSE DU PROCESSUS</b> .....	27
4.1 Notions Introductives .....	27
4.1.1 L'environnement DELMIA	
4.1.2 A propos d'EBOM et MBOM	
4.2 Manufactured Item Definition .....	28
4.2.1 Introduction : objectif de l'app et résultats attendus	
4.2.2 Fonctions principales	
4.2.3 Travail de l'année dernière	

4.2.4 Conception de la nouvelle nomenclature	
4.2.5 analyse de la conformité entre le MBOM et la liste des opérations	
4.3 Process Planning .....	36
4.3.1 Introduction : objectif de l'app et résultats attendus	
4.3.2 Fonctions principales	
4.3.3 Modélisation de notre processus d'assemblage	
4.3.4 Reference aux problèmes d'affectations	
4.4 Process Flow Simulation .....	43
4.4.1 Introduction : objectif de l'app et résultats attendus	
4.4.2 Fonctions principales	
4.4.3 Etude d'un fichier d'exemple prêt à la simulation	
4.4.4 Mise en place d'une simulation de test	
4.4.5 Recherche d'une solution au problème des sources	
4.4.6 Analyse dynamique du système pendant la simulation	
4.5 Analyse du problème avec la création des Portées .....	45
4.5.1 Encadrement du problème	
4.5.2 Création de plusieurs portées dédiées	
4.5.3 Comparaison avec le fichier d'exemple	
<b>Chapitre 5 : CONCEPTION DE L'ATELIER NUMERIQUE .....</b>	<b>53</b>
5.1 Plant Layout Design .....	53
5.1.1 Objectif de l'app et résultats attendus	
5.1.2 Fonctions principales	
5.1.3 Création du plan 2D de l'atelier	
5.1.4 Implantation de l'atelier dans l'environnement 3D	
5.1.5 La première zone	
5.1.6 La zone circulaire	
5.1.7 La troisième zone	
5.1.8 Le pont a treuil	
5.2 Les différentes activités dans l'atelier .....	60
5.2.1 Quelques définitions	
5.2.2 Le premier poste de travail	
5.2.3 Le deuxième poste de travail	
5.2.4 Le troisième poste de travail	
5.2.5 Le contrôle d'étanchéité	
5.3 Equipment Allocation .....	65
5.3.1 Objectif de l'app et résultats attendus	
5.3.2 Fonctions principales	
5.3.3 Travail accompli sur notre atelier	
5.3.4 Concernant la simulation visuelle de l'atelier	
<b>Annexe A : TRAVAIL EFFECTUE AVEC LES MODULES D'ERGONOMIE ....</b>	<b>71</b>
A.1 Module « <i>Ergonomics at work</i> » .....	71
A.1.1 Introduction et concepts fondamentaux	
A.1.2 Détails du tableau de bord de l'application	
A.1.3 Les fonctions de base de l'application	
A.1.4 Concernant les macro-activités	
A.1.5 Les problèmes rencontre lors le lancement de la simulation	
A.1.6 Le travail d'ergonomie fait sur notre atelier	
A.1.7 Les difficultés avec le modules « <i>Ergonomics at work</i> »	
A.2 Module « <i>Ergonomics Evaluation</i> » .....	81
A.2.1 Objectif de l'app	
A.2.2 Fonctions principales	
A.2.3 Ergonomic analysis	



## Liste des figures

<i>Figure 1.1</i>	Timeline du projet MiniBee.	1
<i>Figure 1.2</i>	Analyse de benchmark entre MiniBee et les types d'aérodynes traditionnels.	2
<i>Figure 1.3</i>	Motorisation hybride de MiniBee.	3
<i>Figure 1.4</i>	Etapes du déroulement du projet.	
<i>Figure 1.5</i>	Applications de la 3D EXPERIENCE utilisées aux fins du projet.	4
<hr/>		
<i>Figure 2.1</i>	Modèle numérique conçu l'année dernière.	5
<i>Figure 2.2</i>	Modification de la CAO du moteur EMRAX 188.	6
<i>Figure 2.3</i>	Encodeur réel.	7
<i>Figure 2.4</i>	CAO de l'encodeur simplifié.	
<i>Figure 2.5</i>	Nouvelle maquette des pales.	8
<i>Figure 2.6</i>	Mise en plante du nouveau demi-moyeu supérieur.	
<i>Figure 2.7</i>	Mise en plante du nouveau demi-moyeu inférieur.	9
<i>Figure 2.8</i>	Mise en plante de la plaque au-dessus du moyeu.	
<i>Figure 2.9</i>	Mise en plante du nouveau couvercle supérieur.	10
<i>Figure 2.10</i>	Vue de la méthode de jonction entre la plaque, le moyeu et le couvercle.	
<i>Figure 2.11</i>	Vues en coupe de l'ancienne et de la nouvelle flasque adaptatrice.	11
<i>Figure 2.12</i>	Mise en plante de la nouvelle flasque adaptatrice.	
<i>Figure 2.13</i>	Mise en plante de la cage de protection des fils électriques.	12
<i>Figure 2.14</i>	Mise en plante du couvercle inférieur.	
<i>Figure 2.15</i>	Assemblage du bloc moteur.	13
<i>Figure 2.16</i>	Assemblage du bloc hélice sauf le couvercle supérieur.	
<i>Figure 2.17</i>	Assemblage du bloc hélice + bloc moteur + couvercle supérieur.	14
<i>Figure 2.18</i>	Assemblage du bloc hélice + moteur sur le bloc carénage.	
<i>Figure 2.19</i>	Fonctions d'analyse des interférences.	15
<hr/>		
<i>Figure 3.1</i>	Répartition finale des opérations à l'intérieur des postes de travail.	20
<i>Figure 3.2</i>	Tableau des variables et options de débogage.	21
<i>Figure 3.3</i>	Exemples de procédure (à gauche) et de fonction (à droite).	22
<i>Figure 3.4</i>	Champs d'input de l'interface de l'optimisateur.	23
<i>Figure 3.5</i>	Champs d'output de l'interface de l'optimisateur.	
<i>Figure 3.6</i>	Code de la macro « rank ».	24
<i>Figure 3.7</i>	Code de la fonction « ligne_ant () ».	
<i>Figure 3.8</i>	Code de la procédure « tri ».	25
<i>Figure 3.9</i>	Code de la procédure « rpw ».	
<i>Figure 3.10</i>	Code de la procédure « RAZ ».	26
<hr/>		
<i>Figure 4.1</i>	Séquence des applications DELMIA utilisées au sein du projet.	27
<i>Figure 4.2</i>	Barre « Création » de l'app <i>Manufactured Item Definition</i> .	29
<i>Figure 4.3</i>	Types d'élément de fabrication.	
<i>Figure 4.4</i>	<i>Manufactured Item</i> du rotor extérieur de l'année 2018/2019.	30
<i>Figure 4.5</i>	Premier niveau du <i>Manufactured Item v.3</i> de l'année courant.	32
<i>Figure 4.6</i>	<i>Manufactured Item v.3</i> complet.	
<i>Figure 4.7</i>	<i>Manufactured Item v.5</i> complet.	33
<i>Figure 4.8</i>	Barre « Création » de l'app <i>Process Planning</i> .	36
<i>Figure 4.9</i>	Types de Systèmes dans l'app <i>Process Planning</i> .	37
<i>Figure 4.10</i>	Types d'Opérations dans l'app <i>Process Planning</i> .	

<i>Figure 4.11</i>	Analyse d'équilibrage de la charge de travail.	41
<i>Figure 4.12</i>	Diagramme Gantt créé par l'app <i>Process Planning</i> .	
<i>Figure 4.13</i>	Statut d'affectation des éléments de l'assemblage v.5.	42
<i>Figure 4.14</i>	Fichier PPR Context d'essai avec trois nœuds principaux.	43
<i>Figure 4.15</i>	Types d'Opérations dans l'app <i>Process Flow Simulation</i> .	
<i>Figure 4.16</i>	Onglet des préférences de simulation du système de production.	44
<i>Figure 4.17</i>	Tableaux affichés sur les opérations en appuyant F5.	
<i>Figure 4.18</i>	Vue d'un système général du fichier d'exemple.	45
<i>Figure 4.19</i>	Assemblage d'essai « Filippo Essai Assemblage (v.2) ».	
<i>Figure 4.20</i>	Rapport d'échec de simulation.	47
<i>Figure 4.21</i>	Tableau des opérations d'un système source.	
<i>Figure 4.22</i>	Légende des couleurs et des symboles de l'analyse dynamique.	48
<i>Figure 4.23</i>	Statut d'affectation des éléments du fichier d'essai.	51
<i>Figure 4.24</i>	Création d'une portée pour chaque sous-assemblage.	
<i>Figure 4.25</i>	Vue de l'arborescence des opérations du fichier d'essai.	
<i>Figure 4.26</i>	Statut d'affectation des éléments du fichier d'essai.	52
<hr/>		
<i>Figure 5.1</i>	Barres « Création de ressource » et « Outils de présentation » de l'app <i>Plant Layout Design</i> .	53
<i>Figure 5.2</i>	Editeur des paramètres.	54
<i>Figure 5.3</i>	Plan 2D de l'atelier d'assemblage du rotor extérieur.	55
<i>Figure 5.4</i>	Atelier équipé avec les premiers éléments fondamentaux.	56
<i>Figure 5.5</i>	Première zone de l'atelier.	
<i>Figure 5.6</i>	Support pivotant.	57
<i>Figure 5.7</i>	Support pour le moteur.	
<i>Figure 5.8</i>	Maquette du banc d'essai.	
<i>Figure 5.9</i>	Autres vues de la maquette du banc d'essai.	
<i>Figure 5.10</i>	Support du carénage.	58
<i>Figure 5.11</i>	Escalier et <i>step</i> à la disposition de l'opérateur au poste 3.	
<i>Figure 5.12</i>	Modèle CAO du pont à treuil ajouté dans l'atelier.	59
<i>Figure 5.13</i>	Vue de dessus du pont à treuil.	
<i>Figure 5.14</i>	Vue d'ensemble de l'atelier complet.	60
<i>Figure 5.15</i>	Le premier poste de travail.	61
<i>Figure 5.16</i>	Le deuxième poste de travail.	62
<i>Figure 5.17</i>	Détail du banc d'essai : vis de fixation moteur–banc.	63
<i>Figure 5.18</i>	Le troisième poste de travail.	64
<i>Figure 5.19</i>	CPF avec le trou pour le contrôle d'étanchéité.	65
<i>Figure 5.20</i>	Barre « Création » de l'app <i>Equipment Allocation</i> .	
<i>Figure 5.21</i>	Eléments impliqués dans l'app <i>Equipment Allocation</i> .	66
<i>Figure 5.22</i>	Exemples d'affectation d'opérations à différentes ressources.	
<i>Figure 5.23</i>	Diagramme de Gantt affichable en appuyant l'opérateur 2.	67
<i>Figure 5.24</i>	Affichage de l'état d'affectation des opérations aux ressources <i>utilisées</i> .	
<i>Figure 5.25</i>	Gestionnaire d'affectations d'une opération sélectionnée.	68
<i>Figure 5.26</i>	Tableau des relations complété avec les ressources.	69
<i>Figure 5.27</i>	Diagramme d'utilisation et équilibrage des ressources.	70
<i>Figure 5.28</i>	Vue de détail de l'arborescence des ressources.	

# Chapitre 1

## INTRODUCTION AU PROJET

### 1.1 Le Projet MiniBee

#### 1.1.1 HISTOIRE ET POINTS FORTS

Lancé en 2015 via 3 universités (ESTACA, Supméca et PoliTo), le projet MiniBee a comme objectif la conception d'un aéronef hybride à sustentation mixte avec la capacité d'effectuer des décollages et des atterrissages verticaux (VTOL, Vertical Take-Off and Landing) en transportant un équipage de quelques unités.

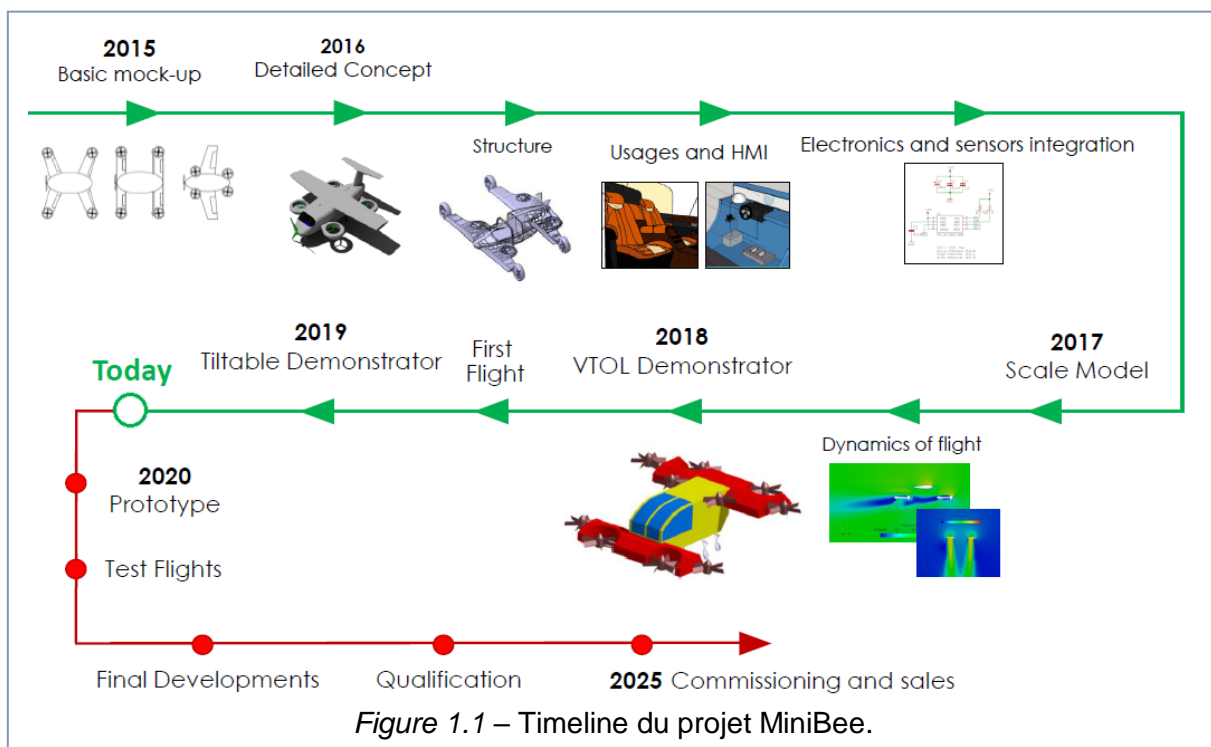
Un tel aéronef bénéficie d'un coût inférieur à celui d'un hélicoptère, de la vitesse d'un avion et de la stabilité d'un multicoptère, tout cela grâce à la conformation des moteurs électriques orientables et des surfaces porteuses. L'idée de base est celle d'avoir un avion moyen-courrier à fuselage détachable qui soit modulable en fonction de plusieurs configurations (avion-taxi, avion VIP, avion-ambulance).

Au cours des années 2015 et 2016, de nombreuses universités ont adhéré au dé-

veloppement du projet, permettant d'atteindre le TRL1 (Technology Readiness Level) en juin 2016. En été 2017, le projet a atteint le TR2 au Salon de l'Aéronautique de Paris et il se trouve actuellement au TRL3 avec plus de 15 universités impliquées et 10 partenaires industriels.

Le projet Mini-Bee est réalisé en vertu d'une « *lesser open-source license* » qui permet à plusieurs acteurs (universitaires, industriels, individuels) de collaborer dans un flux de travail *open-innovation*. En fait, les travaux du projet sont principalement partagés sur un wiki public.

La brève analyse de benchmark montrée à la *figure 1.2* met en évidence les principaux avantages techniques de MiniBee par rapport aux types d'aérodynes traditionnels. En particulier, il est possible d'identifier les points clés suivants :



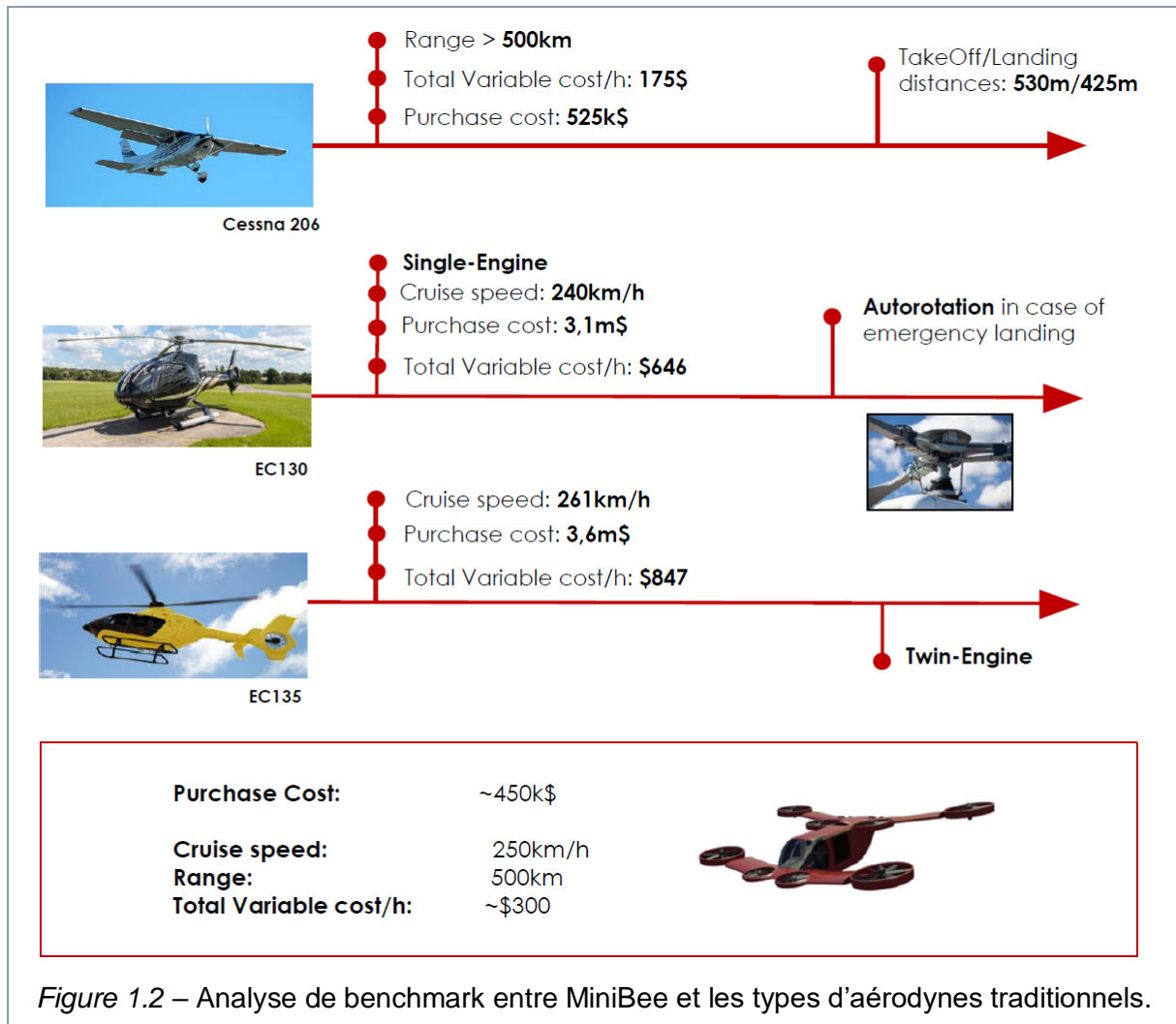


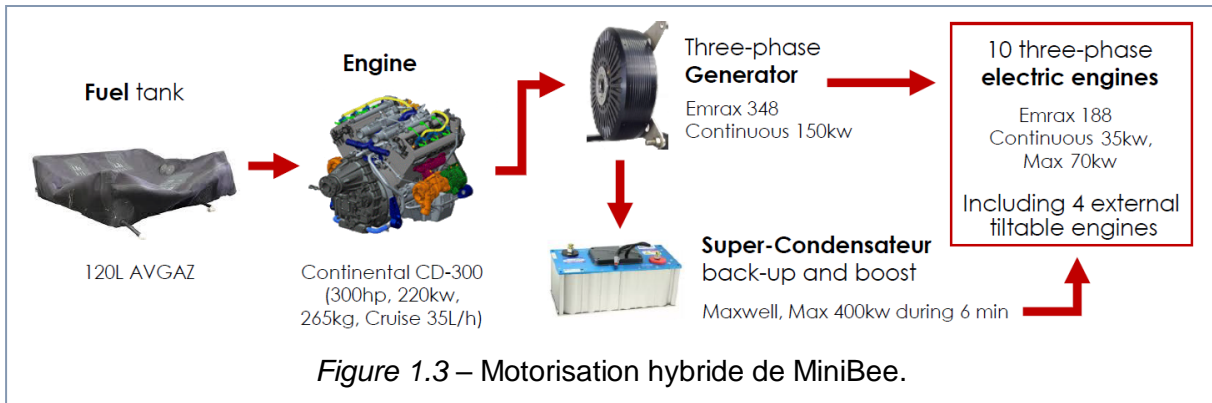
Figure 1.2 – Analyse de benchmark entre MiniBee et les types d'aérodynes traditionnels.

- Le système développé pour la gestion des opérations permettra une plus grande flexibilité et rapidité d'action grâce au système avancé de *decision making* et *flight path management*.
- L'entraînement des pilotes sera facilité par le développement de commandes intuitives et d'une interface user-friendly.
- Le design modulaire de MiniBee permettra d'améliorer les aspects MRO (Maintenance, Repair, Operations), c'est-à-dire les services indispensables fournis au client.
- L'adoption d'une philosophie de conception low-cost et l'implémentation de moteurs hybrides réduisent les coûts d'achat et opératifs de l'aéronef.

### 1.1.2 SPECIFICATIONS TECHNIQUES

Tout d'abord, il vaudrait la peine d'introduire brièvement le type de motorisation monté à bord de MiniBee.

Il s'agit d'un système hybride dans lequel l'énergie développée par un moteur à combustion interne est convertie en énergie électrique au moyen d'un transformateur, d'où elle est en tour transmise en partie aux utilisateurs (les moteurs électriques) et en partie à un système de super-condensateurs. Le point fort réside précisément dans ce dernier élément, puisque sa présence permet de faire face à des moments de grande dépense énergétique tout en disposant d'un moteur thermique sous-dimensionné, auquel il sera permis d'opérer de manière continue autour du point d'efficacité maximale.



Le tableau ci-dessous présente les principales spécifications techniques :

<i>MTOW</i>	120 0kg
<i>Payload</i>	350 kg
<i>Capacity</i>	2 crew, 2 passagers 2 crew, 1 patient

<i>Range</i>	500 km
<i>Endurance</i>	1h45
<i>Cruise speed</i>	250 km/h
<i>Max. speed</i>	300 km/h
<i>Max power</i>	250 kW
<i>Fuel tank</i>	300 L
<i>Batteries</i>	80kg

## 1.2 Notre projet « Conception d'un Atelier d'Assemblage »

### 1.2.1 ENCADREMENT AU SEIN DU PROJET GLOBAL MINIBEE

Dans le cadre du projet MiniBee, notre travail s'inscrit dans le domaine de la mise en production de l'aéronef. En particulier, notre projet intitulé « Conception d'un Atelier d'Assemblage » prend en charge la conception d'une possible conformation mécanique du rotor extérieur, ainsi que la modélisation de leur ligne d'assemblage.

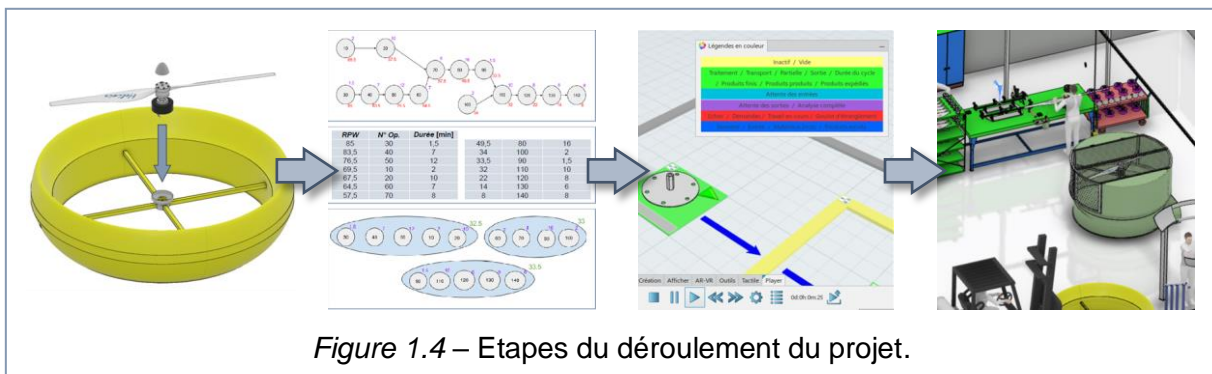
Notre travail envisage une bonne partie des défis relevé par l'industrie 4.0. En fait, on s'est proposé d'introduire les outils de conception numérique intégrée de la plateforme 3D EXPERIENCE afin de concevoir et simuler une ligne d'assemblage.

Outre le résultat pratique qu'on attend de ce projet, même l'exploration de ces nouvelles méthodes de conception et simulation revêt un aspect important.

A ce sujet, nous avons essayé de rassembler la connaissance acquise pendant le projet dans l'optique de la rendre disponible à ceux qui prendront en main le projet après nous.

### 1.2.2 DEROULEMENT DU PROJET

Dans un premier temps, nous nous sommes occupés de l'amélioration de la maquette numérique conçue l'année dernière. Pour ce faire, nous avons cherché des solutions alternatives qui étaient plus proches de la réalité et qui pouvaient améliorer les caractéristiques techniques de la





pièce, tout en tenant compte des contraintes imposées par les autres partenaires de développement et de la faisabilité de nos idées.

Ensuite, nous avons énuméré les opérations nécessaires à l'assemblage du rotor et les avons répartie dedans plusieurs postes de travail au moyen de la méthode d'optimisation RPW.

Après ce stade nous avons pu modéliser et simuler les opérations d'assemblage dans l'environnement DELMIA et, en même temps, nous avons conçu et construit une configuration possible de l'atelier.

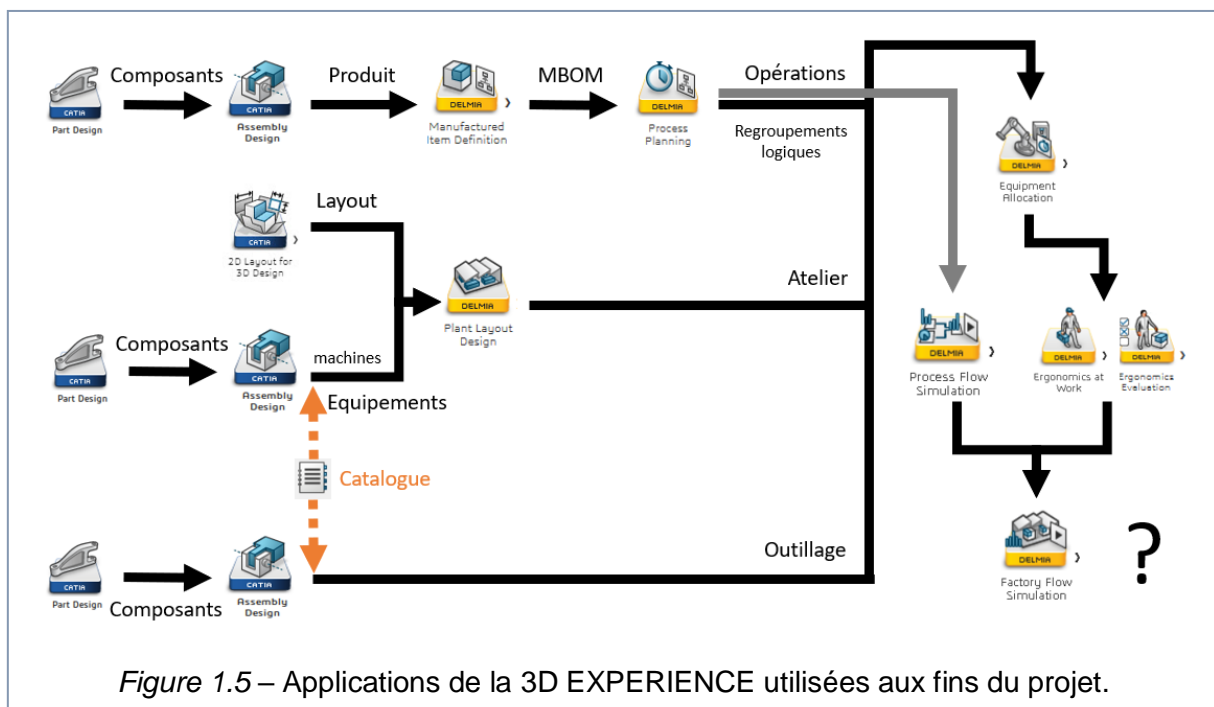
Nous nous sommes également lancés dans l'étude des applications d'ergonomie dans le but ultime de simuler un atelier dans tous ses aspects, bien que ce dernier point n'ait pas été atteint par l'équipe.

L'exécution des tâches ci-dessus a nécessité l'utilisation de plusieurs applications fai-

sant partie de la plate-forme 3D EXPERIENCE, dont les principales sont énumérées ci-après.

- Dans l'environnement *CATIA* :
  - Part Design,
  - Assembly Design.
- Dans l'environnement *DELMIA* :
  - Manufactured Item Definition,
  - Process Planning,
  - Process Flow Simulation,
  - Plant Layout Design,
  - Equipment Allocation,
  - Ergonomics at Work,
  - Ergonomics Evaluation,
  - Factory Flow Simulation.

Elles sont affichées à la *figure 1.5*, avec leurs outputs et dans l'ordre de rencontre au cours des différentes étapes du projet.



## Chapitre 2

### MODIFICATION DE LA MAQUETTE NUMERIQUE

#### 2.1 Encadrement du Problème

##### 2.1.1 INTRODUCTION

La première partie opérationnelle de ce projet a consisté à réviser et à modifier la maquette numérique à partir du matériel créé l'année dernière.

Pour comprendre la conformation réelle du produit fini, nous avons d'abord fait des recherches sur les caractéristiques des différents composants, à savoir l'hélice, le moteur et le carénage.

Le modèle numérique conçu l'année dernière est montré à la *figure 2.1* ; on peut observer tout de suite que la modélisation de l'hélice ne reflète pas la réalité, comme les pales sont constituées d'une seule extrusion et le moyeu est très simplifié.

Pour ce qui concerne le carénage, la maquette ainsi que les dimensions extérieures ont été fournies par les contraintes de projet. Par conséquent, les modifications apportées au modèle ont été minimales.

D'après le rapport de l'année dernière, nous savons que le moteur utilisé est l'EMRAX 188, tandis que l'hélice est produite par la société E-Props.

A partir des manuels d'utilisation de ces deux composants, nous avons pu extrapoler les informations relatives aux caractéristiques des produits et, surtout, les informations nécessaires au montage.

##### 2.1.2 SPECIFICATIONS DU MOTEUR EMRAX 188

En lisant le manuel de l'utilisateur nous avons pu apprendre les caractéristiques principales du moteur :

- la partie rotative du moteur (rotor) est celle extérieure,
- il s'agit d'un moteur/générateur synchrone à flux axial à aimant permanent,
- type d'entrée : triphasé sinusoïdal,
- moteur léger et compact,
- densité de puissance jusqu'à 10 kW/kg,
- très efficace (jusqu'à 98 %) et fiable.

En ce qui concerne les opérations de fixation, le moteur ne peut être monté sur le support (flasque adaptatrice) qu'à partir de l'arrière et avec au moins 6 boulons.

Le stator doit être monté sur le support avec des boulons vissés à l'intérieur du stator lui-même pour une longueur comprise entre 15 et 21 mm (trous de forage filetés M6, mesuré à partir de la surface plane du stator).

Une hélice, un arbre à brides avec profil rainuré (*Flanged Shaft with Inner Splines*, FSI) ou tout autre arbre peuvent être montés sur le devant du moteur en exploitant les 6 trous filetés sur le rotor consacrés à ce but. Ces vis doivent être vissées dans le rotor pour une longueur d'au moins 13 mm et au plus 13,8 mm.

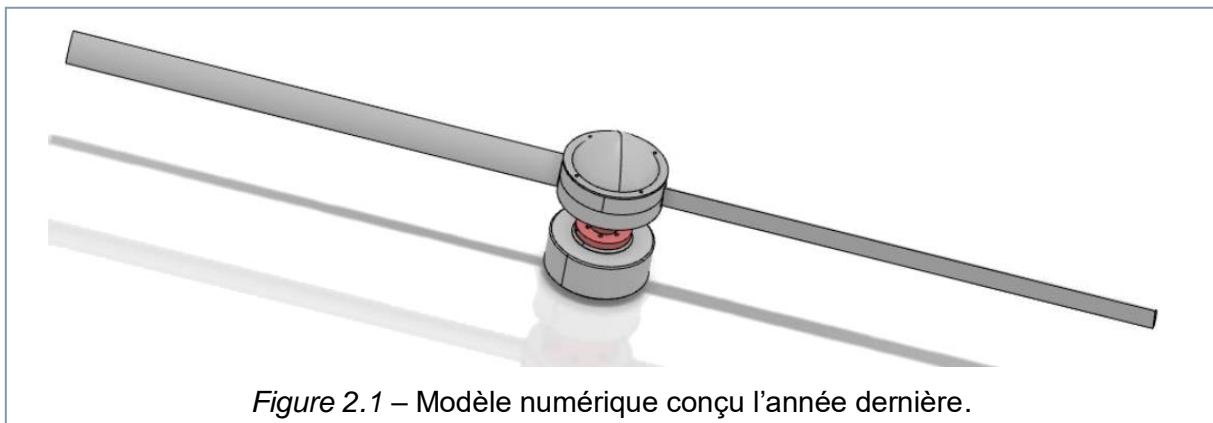


Figure 2.1 – Modèle numérique conçu l'année dernière.

Les mêmes exigences s'appliquent lorsque le client décide de prendre un ESO (*Extended Shaft with Outer Splines*). Pour résister au couple, l'arbre doit forcément être fixé à l'aide de 6 boulons.

Le moteur est de type triphasé simple (1xUVW) et le refroidissement est à air, donc les canules montées sur le stator pour le refroidissement par liquide ne sont pas nécessaires. L'air est aspiré par l'intervalle annulaire entre le stator et le rotor et est éjecté par les trous présents sur ce dernier.

### 2.1.3 SPECIFICATIONS DE L'HELICE E-PROPS

Le modèle d'hélice utilisé pour le projet réel n'a pas pu être défini avec certitude. Il a donc été décidé d'adopter un modèle arbitraire qui prévoyait toutes les fonctionnalités que l'opérateur pourrait avoir à monter. Le modèle d'hélice E-Props choisi pour notre projet n'est réglable qu'au sol et il est composé des parties suivantes :

- deux pales, fabriquées en fibres de carbone continues entre les surface et en résine époxyde renforcée par une âme à nid d'abeilles et un longeron interne.
- le moyeu, divisé en deux parties (supérieure et inférieure), en bois de hêtre imprégnés de résines spéciales.
- une mince plaque en aluminium anodisée en noir.
- vis, rondelles et écrous pour l'assemblage.

Chaque pièce est munie d'un numéro de série intégré dans les résines afin d'être traçable.

Les informations relatives au montage de l'hélice sur le moteur sont résumées dans le document « Propellers NG-D - Excerpt of User Manual » mentionné aux *sources* de ce rapport.

Voyez le manuel d'utilisation pour de plus amples informations.

## 2.2 Analyse et Modification des Pièces de la Maquette

### 2.2.1 ANALYSE ET MODIFICATION DU BLOC MOTEUR

Dans les paragraphes qui suivent, les composants modélisés l'année précédente seront analysés et modifiés en fonction des informations extraites des manuels de l'utilisateur.

Dans tous les cas, la propriété sera donnée aux aspects fonctionnels des différentes pièces plutôt qu'à respecter les dimensions réelles qui sont souvent incertaines.

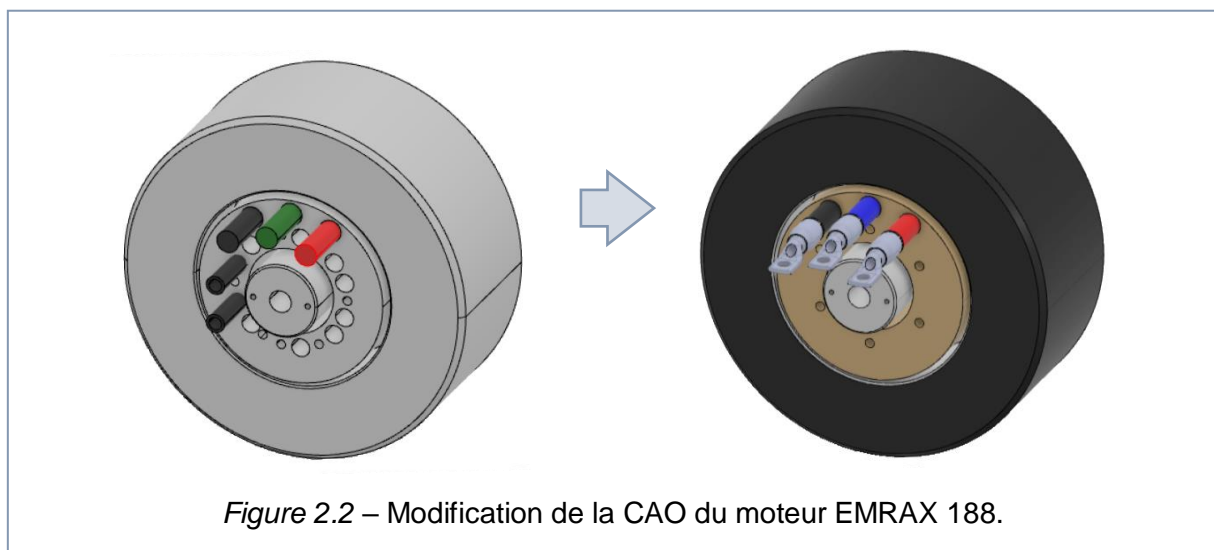


Figure 2.2 – Modification de la CAO du moteur EMRAX 188.



Tout d'abord, la CAO du moteur a été redéfinie comme le montre la *figure 2.2*.

Il est possible d'observer que le rotor est resté inchangé, tandis que le stator a subi une réduction du nombre de trous, l'enlèvement des canules de refroidissement et la modification des terminaux électriques, maintenant modélisés de manière plus réaliste.

En plus du moteur proprement dit, le bloc-moteur comprend également l'encodeur et ses deux vis de fixation D3L28.

On suppose que le modèle d'encodeur réel à utiliser est celui représenté dans la *figure 2.3*. Néanmoins, il a été décidé de ne pas reproduire exactement ce modèle à l'intérieur de notre maquette, mais plutôt d'en insérer un simplifié (montré en *figure 2.4*) toujours en s'assurant qu'il y ait l'espace nécessaire au logement du modèle réel.

Voici une liste récapitulative de toutes les interventions effectuées sur le modèle CAO du bloc moteur :

1. Les noms du stator et du rotor ont été correctement assignés car ils étaient inversés dans la maquette de l'année dernière. Le stator est l'élément intérieur, tandis que le rotor est l'élément extérieur.
2. Les trous de fixation présents sur le stator ont été refaits, car ceux qui existaient auparavant n'appartenaient pas au modèle EMRAX 188.
3. Les canules de refroidissement par liquide ont été supprimées.
4. Les gaines et les connecteurs des câbles électriques ont été ajoutés, et tous les problèmes d'interférence avec le carénage ont été résolus.
5. La CAO de l'encodeur a été laissée inchangée, bien qu'elle ne ressemble pas à l'élément réel. Cependant on s'est assuré qu'il y avait assez d'espace à l'intérieur de l'assemblage pour loger l'encodeur réel.

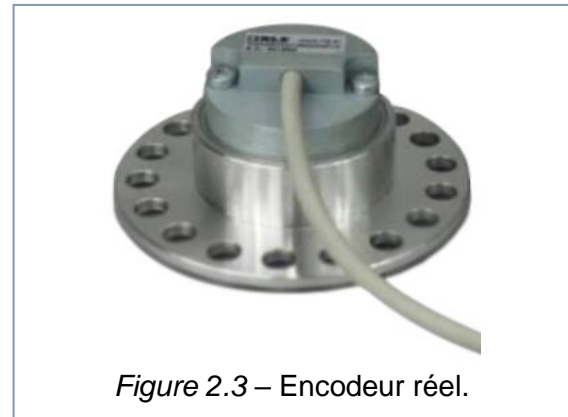


Figure 2.3 – Encodeur réel.

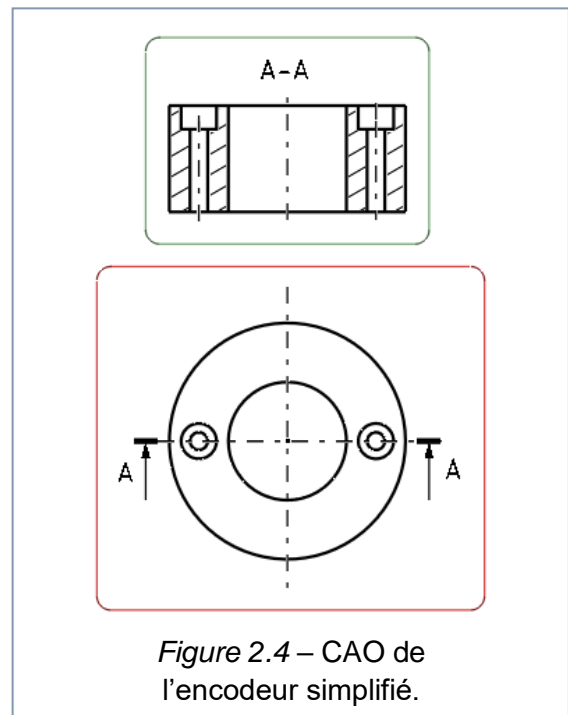


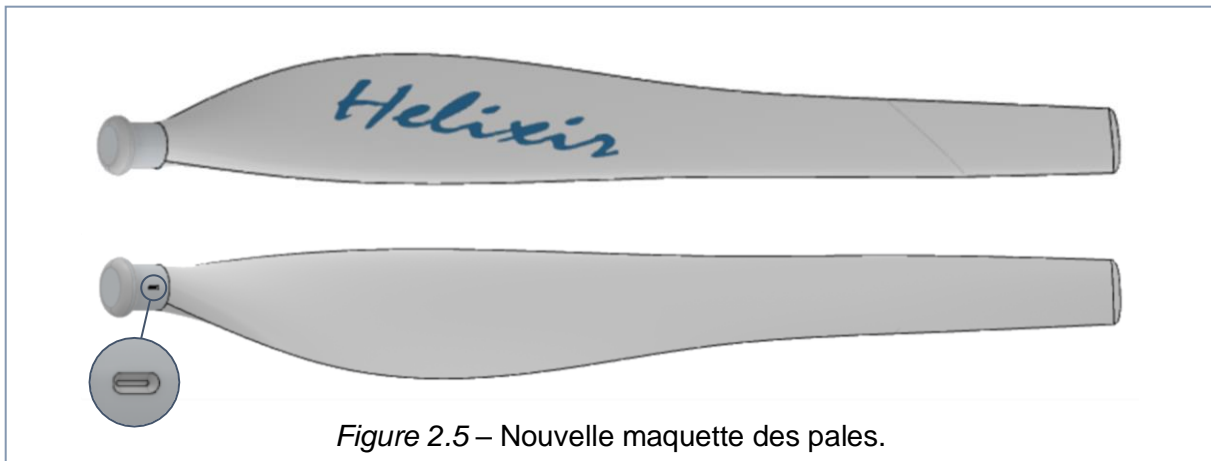
Figure 2.4 – CAO de l'encodeur simplifié.

## 2.2.2 ANALYSE ET MODIFICATION DU BLOC HELICE

Le bloc hélice est composé des deux pales, deux moitiés du moyeu, la plaque au-dessus du moyeu, le couvercle supérieur, la flasque adaptatrice et tous les éléments de jonction entre les pièces ci-dessus.

Ces éléments ont subi de profondes modifications par rapport aux versions précédentes. Ils seront énumérés et discutés dans le présent paragraphe.

Comme il a été précédemment indiqué, nous ne sommes pas au courant du modèle exact d'hélice à acheter, ni de ses dimensions. Cependant, il a été convenu que la



priorité va à l'aspect fonctionnel de la pièce plutôt qu'à la reproduction fidèle des dimensions réelles, car il est très important de fournir à l'opérateur toutes les informations nécessaires au montage.

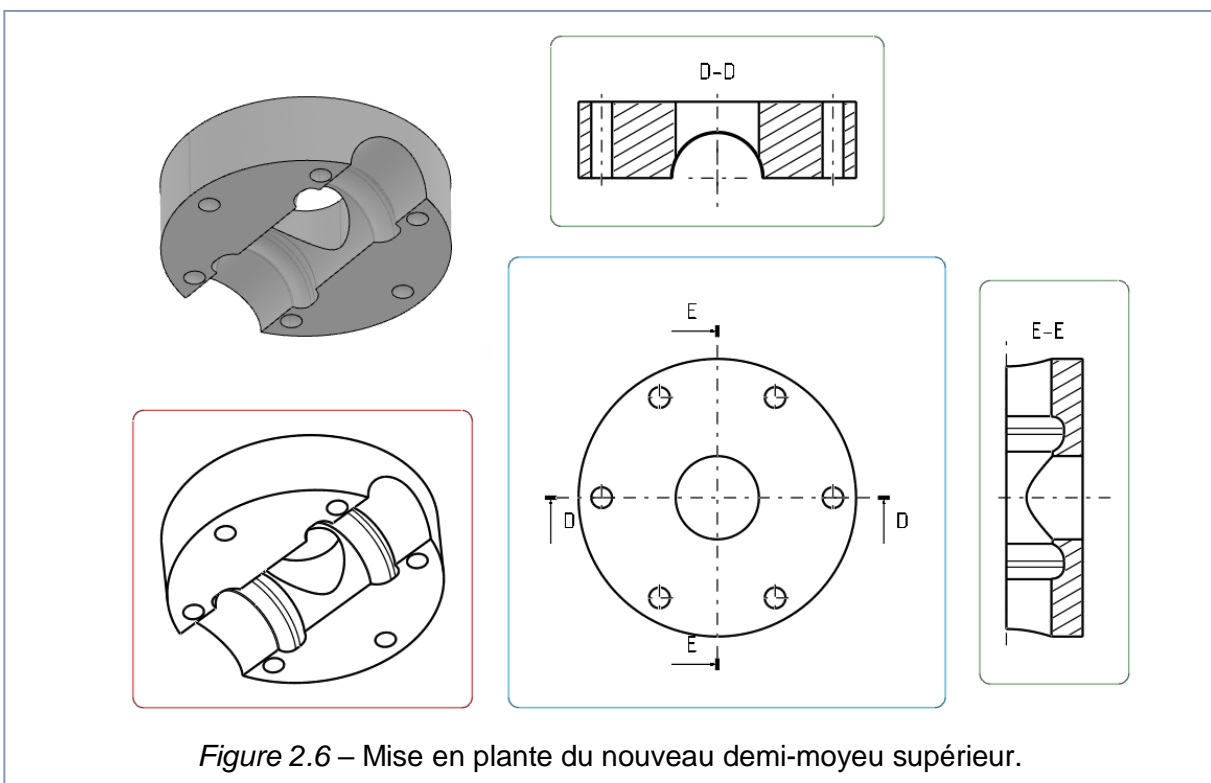
Un aspect important sur lequel nous avons réfléchi concerne la présence ou non des petits bosses/cavités nécessaires au positionnement des pales à l'intérieur du moyeu. Enfin ils ont été insérés dans les maquettes, pour que dans le cas où ils seraient présents l'opérateur devra disposer des instructions nécessaires pour en tenir compte, alors que dans le cas contraire l'instruction pourra être simplement ignorée.

### Pales :

Les pales de la maquette de l'année dernière sont déjà montrées à la *figure 2.1*. Pour le montage, il est essentiel que la racine des pales reflète le modèle réel muni de tous ses détails.

On a décidé de télécharger un modèle plus compatible avec la réalité à partir du web ([grabcad.com](http://grabcad.com)). L'extrémité de ce modèle a été modifiée de façon à être spéculaire à la forme interne du moyeu, elle a également été ajoutée la petite cavité nécessaire au montage.

Le résultat final est montré à la *figure 2.5*.



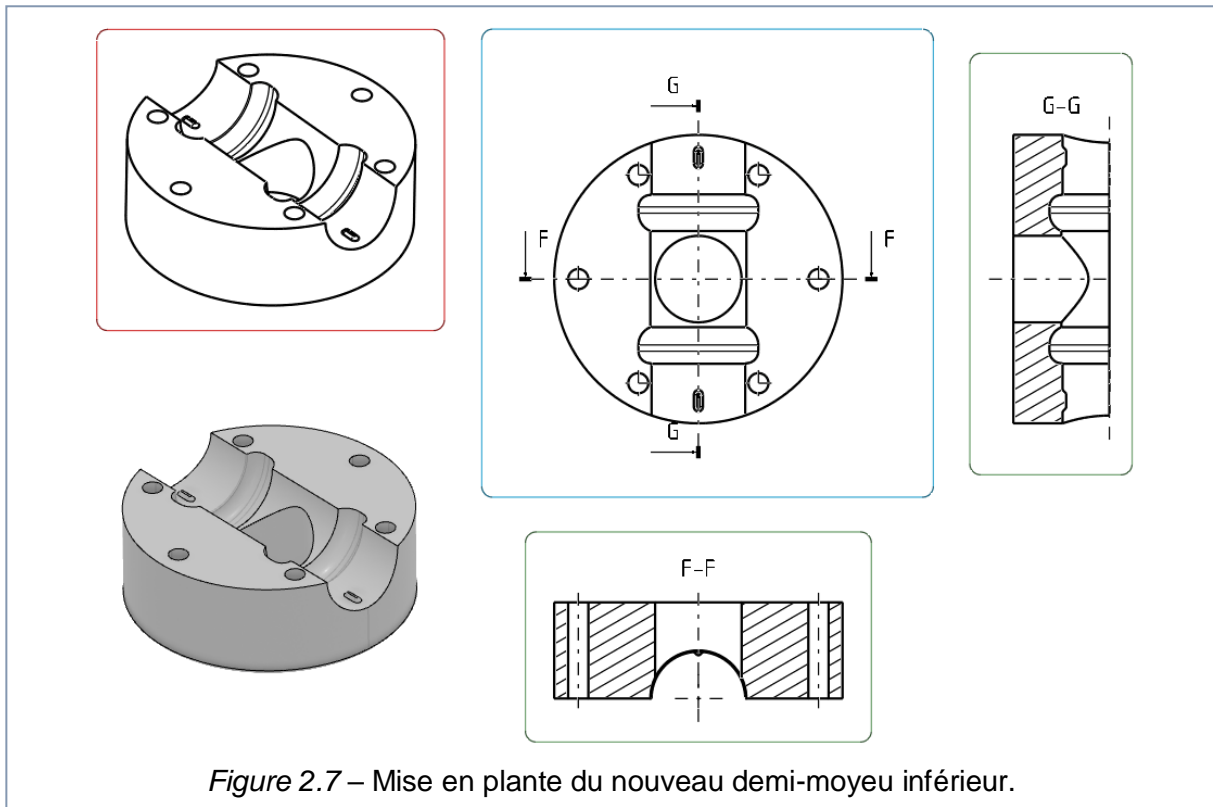


Figure 2.7 – Mise en plante du nouveau demi-moyeu inférieur.

#### Moyeu :

Les deux moitiés du moyeu ont été entièrement redessinées, car elles ne reflétaient absolument pas le produit réel.

Le nouvelle CAO du demi-moyeu supérieur et inférieur est représenté respectivement à la *figure 2.6* et à la *figure 2.7*.

Le moyeu a un diamètre de 120 mm et une hauteur totale de 73 mm.

Sur le demi-moyeu inférieur on peut remarquer les boutons complémentaires aux cavités présentes sur les pales.

#### Plaque :

La plaque placée au-dessus du moyeu est mentionnée dans le manuel E-Props NG-D, mais elle n'était pas présente dans la maquette passée. Il s'agit d'une simple plaque mince en aluminium qui permet entre autres de fixer le couvercle supérieur au moyeu.

La mise en plante de cette plaque est montrée à la *figure 2.8*.

#### Couvercle (capot) supérieur :

Le couvercle supérieur précédemment présent (bien visible dans la *figure 2.1*) a été

remplacé par un autre plus aérodynamique et plus proche des modèles fournis par la société E-Props.

La nouvelle maquette a été téléchargée à partir du web et sa taille a été ajustée de

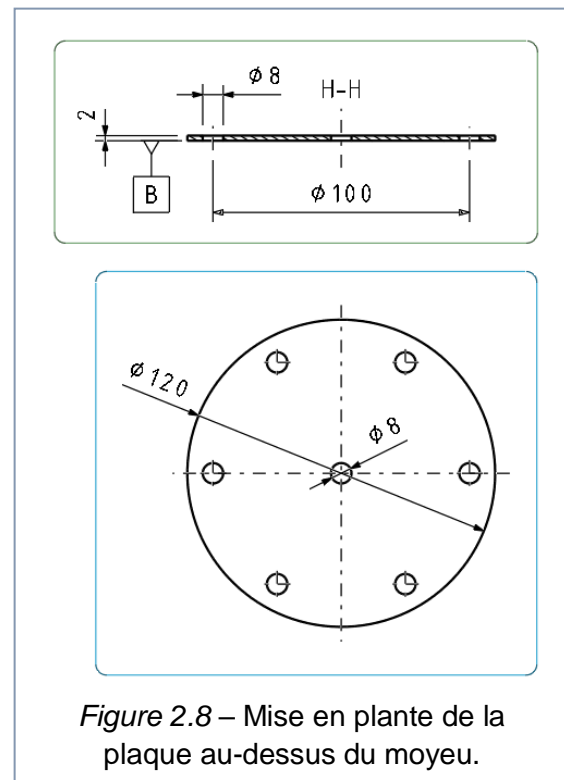
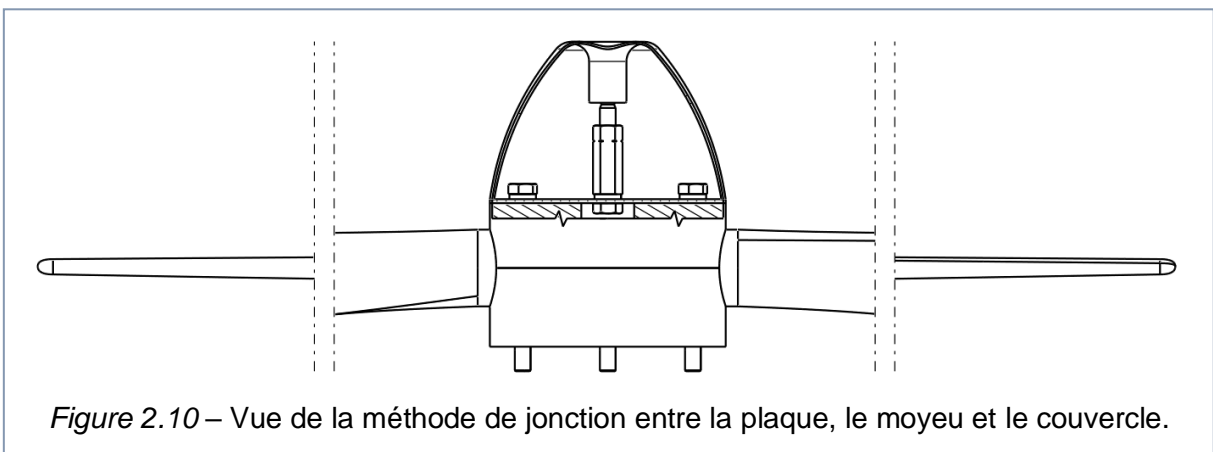
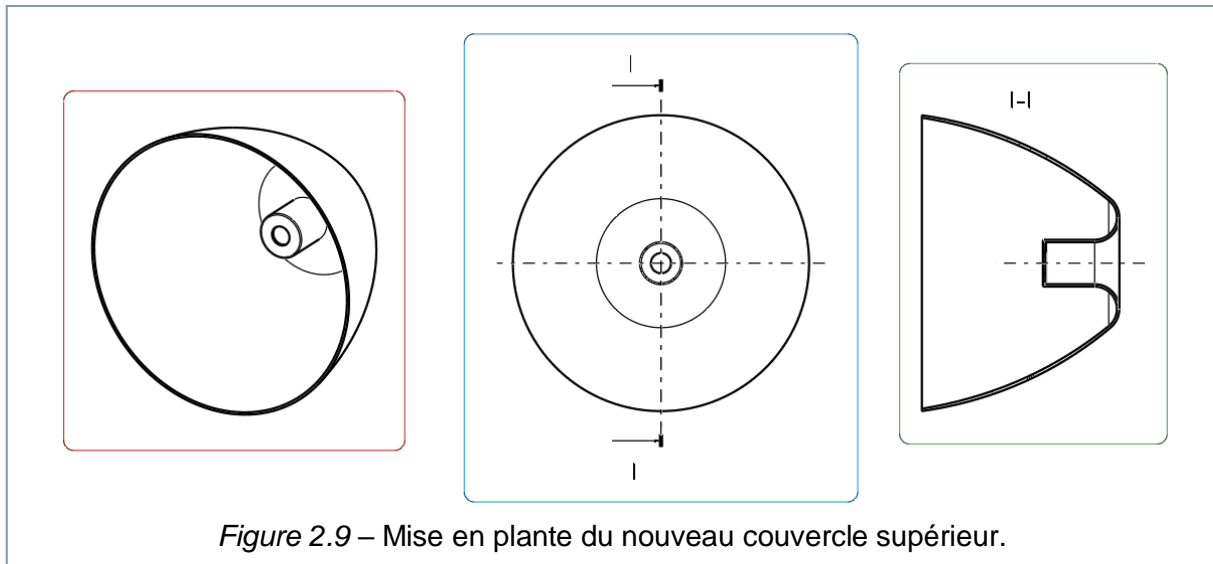


Figure 2.8 – Mise en plante de la plaque au-dessus du moyeu.



manière à avoir le diamètre maximal égal à celui du moyeu.

La mise en plante du nouveau couvercle supérieur est montrée à la *figure 2.9*.

La fixation du couvercle supérieur au bloc hélice est assurée par une jonction interne consistant en une vis M8L16 au-dessous de la plaque qui est fixée à un écrou M8 double, auquel est fixée à son tour la vis M8L25 qui maintient le couvercle uni au reste de l'assemblage.

Entre la plaque et l'écrou, une rondelle Nord-Lock a été placée.

Un vue coupée qui montre la méthode de jonction du couvercle sur le bloc hélice est affichée dans la *figure 2.10*.

#### **Flasque adaptatrice :**

Cette pièce était déjà présente dans la maquette de l'année dernière, toutefois nous

avons décidé d'apporter quelques modifications pour résoudre certains manquements.

Tout d'abord, le diamètre de l'arbre a été réduit et un trou à son centre a été créé de manière à réduire le poids de la pièce dû à la présence excessive de matériel.

La structure courante se compose d'une section fermée d'une épaisseur de 6 mm, plus que suffisante pour supporter les charges résultant du poids de l'aéronef et le couple généré par le moteur. Un bref calcul a été mis en place pour démontrer ce qu'on vient de dire, de façon à confirmer que la résistance de la pièce est bien au-dessus des contraintes qu'elle devra gérer. Ensuite, un petit échelon a été ajouté au-dessus de la partie en contact avec le moyeu pour faciliter la phase d'assemblage entre ces deux éléments.

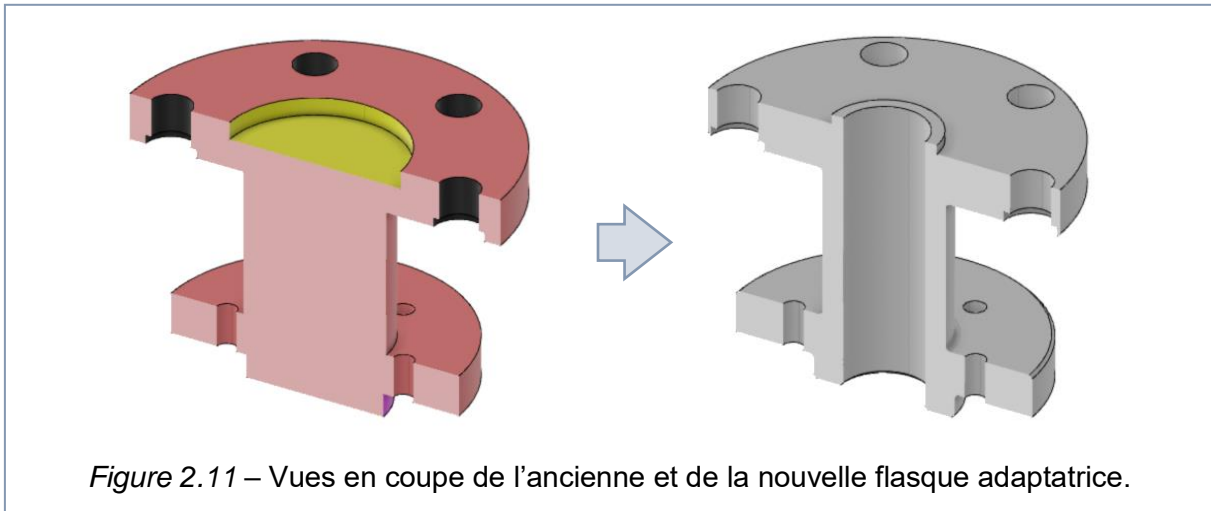


Figure 2.11 – Vues en coupe de l'ancienne et de la nouvelle flasque adaptatrice.

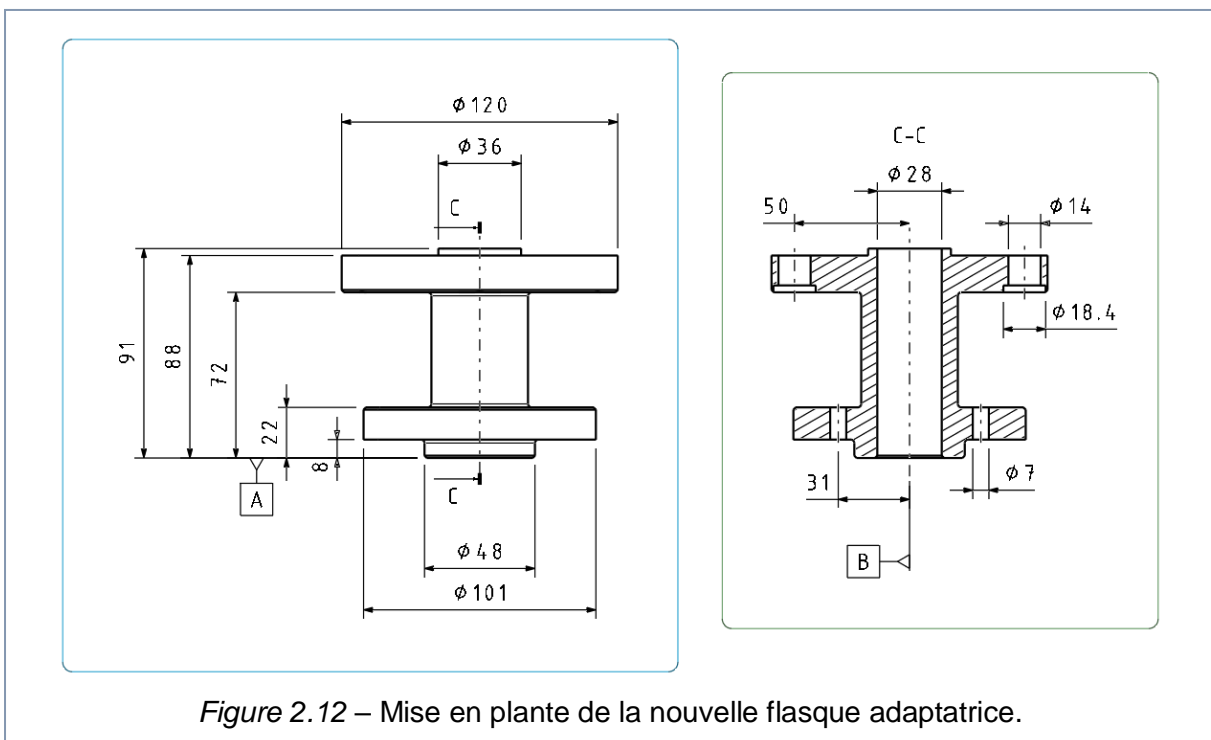


Figure 2.12 – Mise en plante de la nouvelle flasque adaptatrice.

Enfin, des congés et des chanfreins ont été créés en plusieurs points. En particulier les premiers ont l'objectif de limiter le risque de fissures sur une pièce aussi fortement sollicitée que la flasque.

Tous ces changements sont bien visibles dans les deux vues en coupe dans la *figure 2.11*.

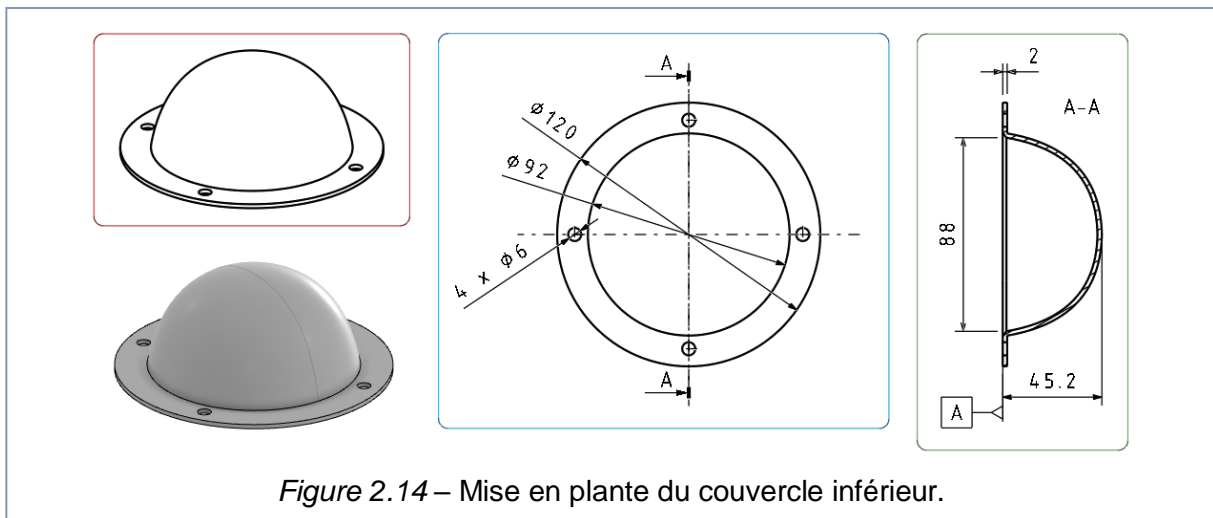
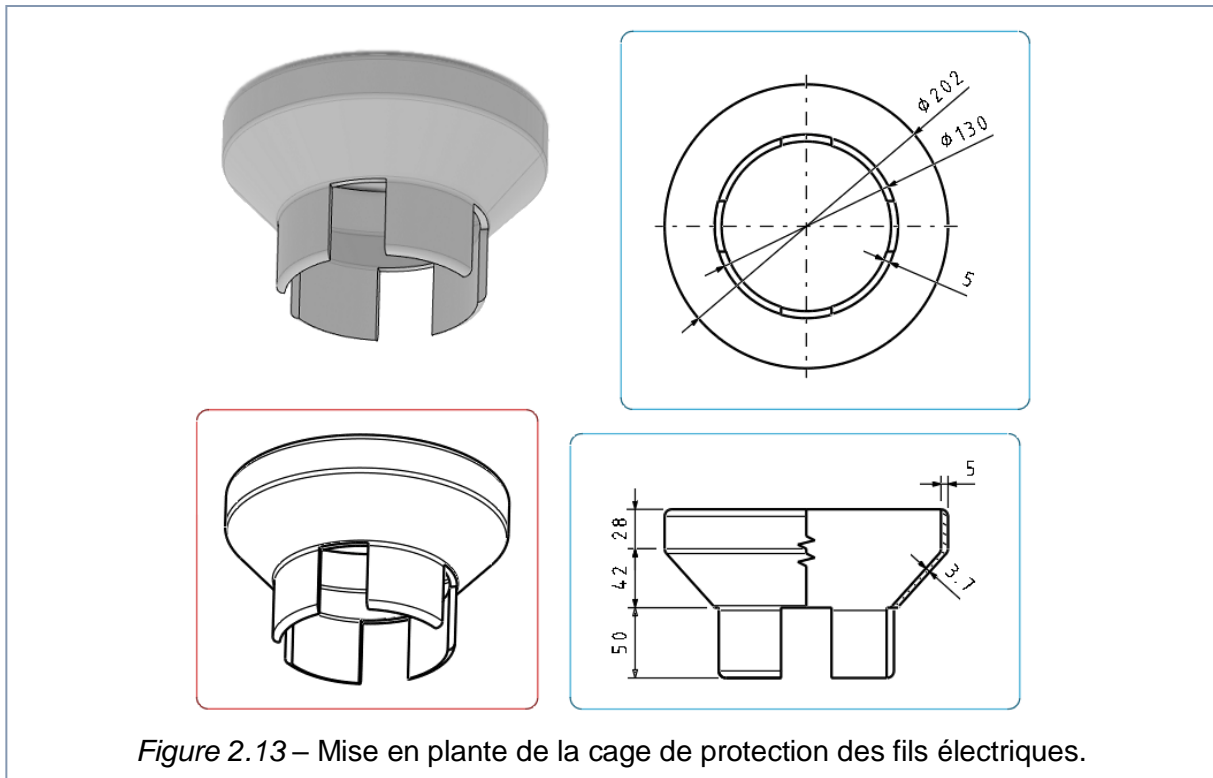
Tous ces éléments qui font partie du bloc hélice sont fixés ensemble par six vis M8 L90, six rondelles Nord-Lock, et six écrous qui dedans l'assemblage s'appellent pions de cisaillement.

### 2.2.3 ANALYSE ET MODIFICATION DU BLOC CARENAGE

Le bloc carénage est composé du carénage proprement dit, de la cage de protection des fils électriques et du couvercle inférieur.

Les deux derniers éléments énumérés ci-dessus n'ont pas été modifiés par rapport au travail de l'année dernière. Leurs mises en plante sont montrées respectivement à la *figure 2.13* et à la *figure 2.14*.

Le carénage a subi une légère modification afin d'éliminer les interférences entre celui-ci et les terminaux électriques du moteur



une fois que les éléments sont tous assemblés.

Le couvercle inférieur est fixé au carénage avec quatre vis D4L6, tandis que le bloc

moteur + hélice est fixé au moyen de six vis D6L90.

## 2.3 Assemblage des éléments

### 2.3.1 SCHEMAS D'ASSEMBLAGE

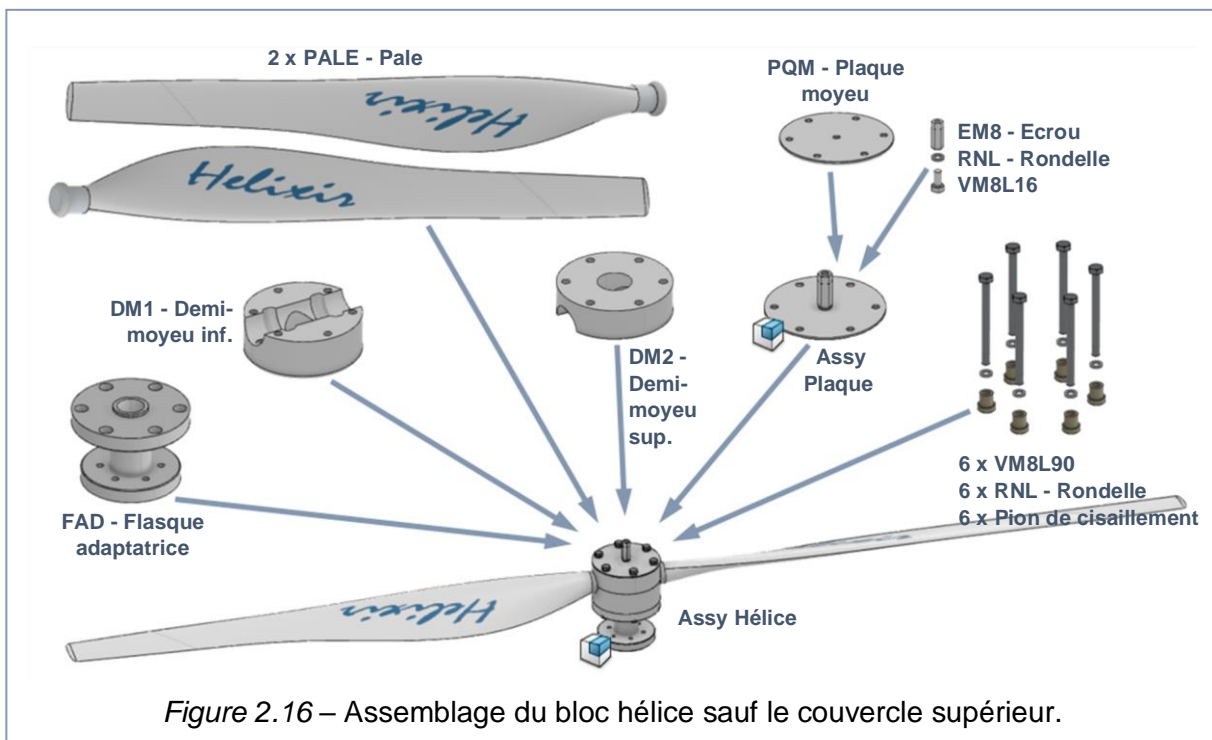
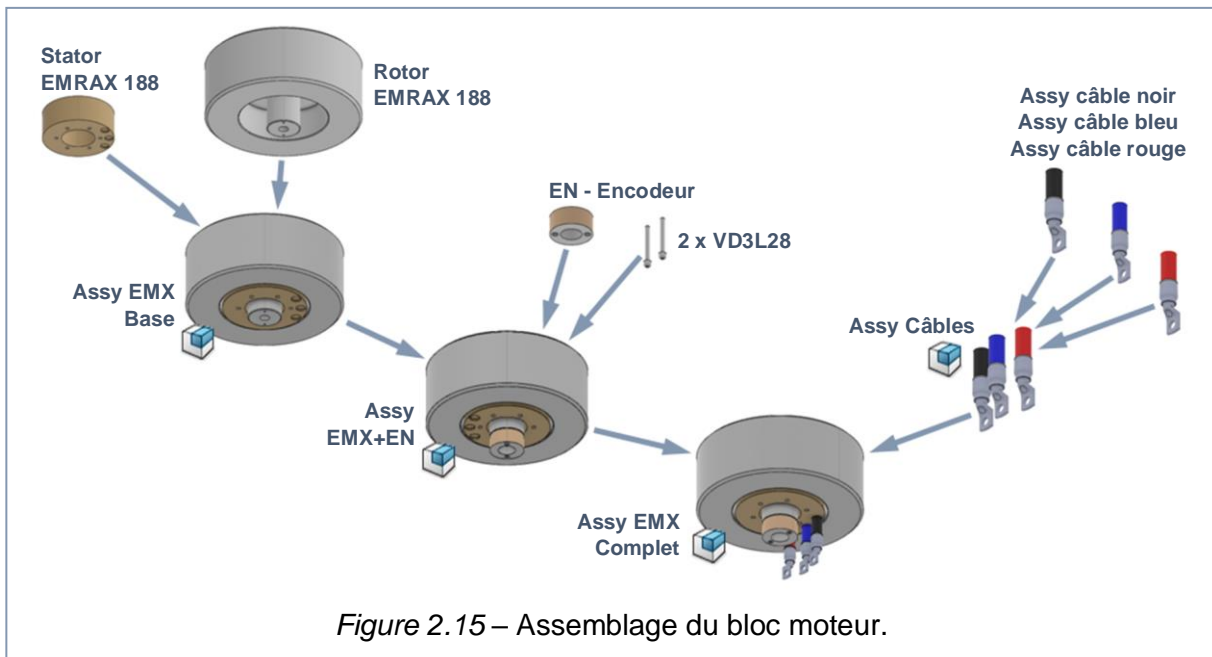
Jusqu'à présent, tous les éléments qui participeront à l'assemblage ont été présentés et décrits.

Dans ce paragraphe on va afficher l'ordre d'assemblage des composants à côté de leur nom assiégré dans la base de données 3D EXPERIENCE.

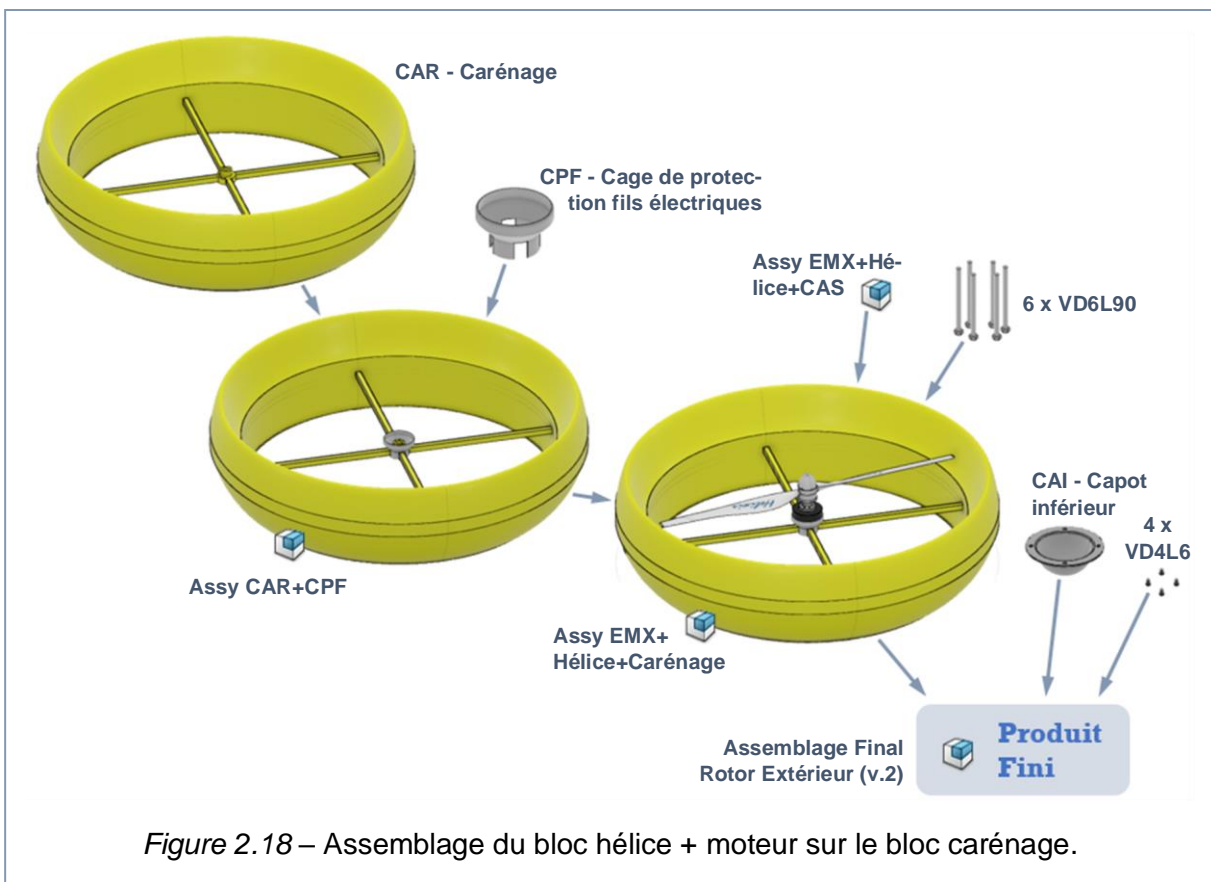
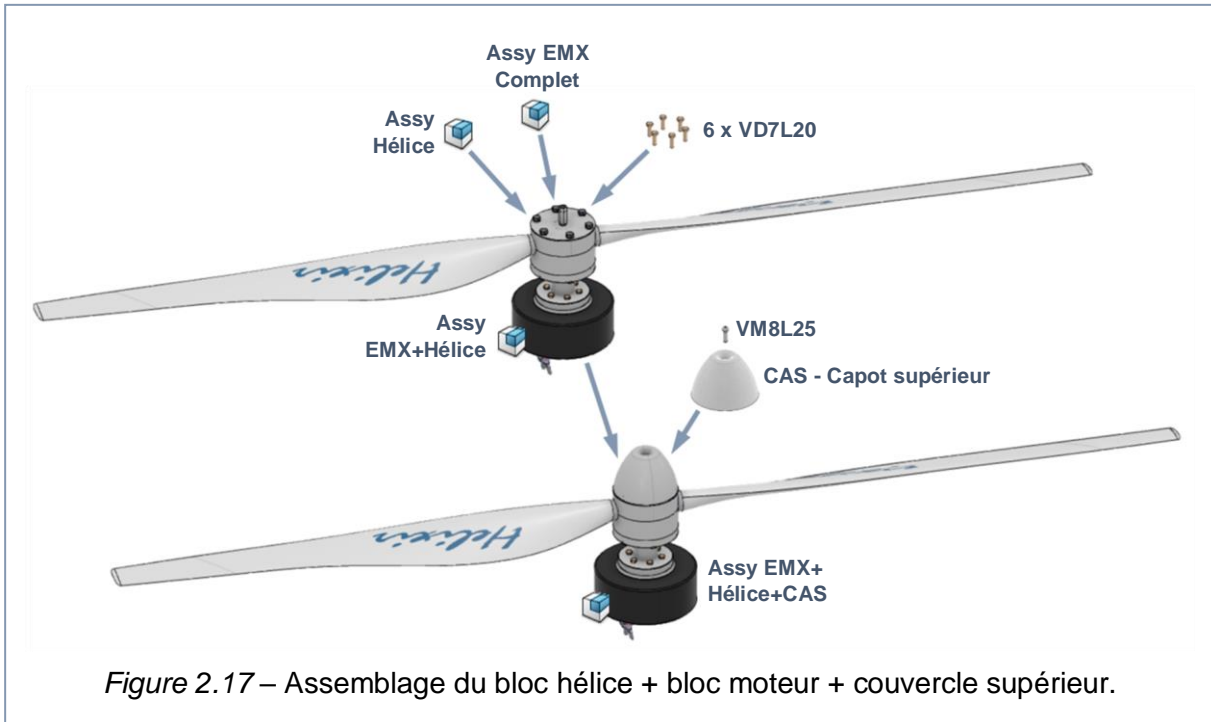
*Remarque :* cette base de données contient deux versions de l'assemblage final du rotor extérieur. La première (v.1) a été créée dans les premières étapes du projet et elle ne suit pas une logique d'assemblage précise. La seconde (v.2) a été créée a posteriori en tenant compte de l'ordre d'assemblage des différentes pièces et des

sous-assemblages qui se seraient révélés utiles dans les étapes successives du projet.

Les schémas présentés dans les pages suivantes font référence à la deuxième version de l'assemblage, bien que les parties élémentaires soient de toute façon communes aux deux versions.









### 2.3.2 ANALYSE DES INTERFERENCES

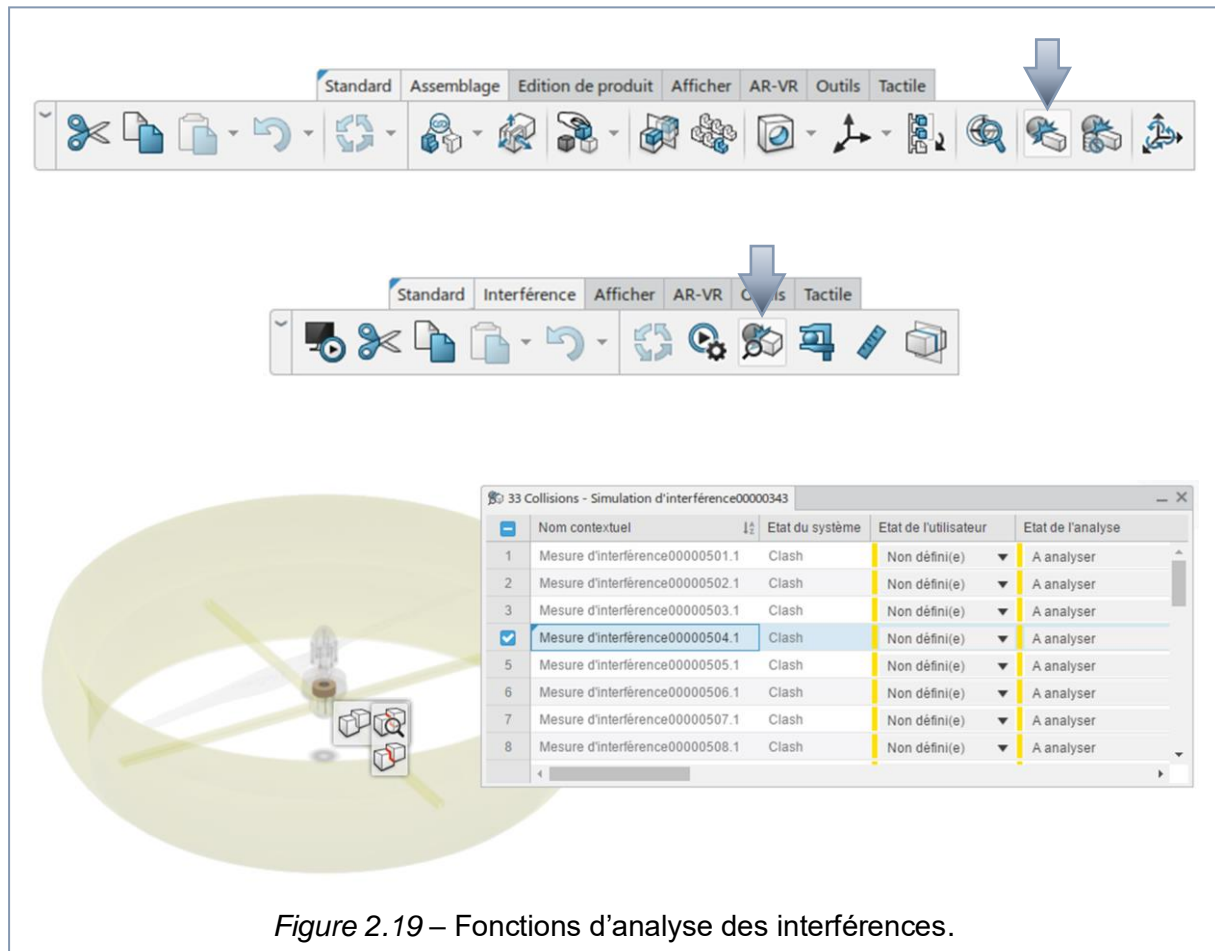
L'application *CATIA Assembly Design* de la plateforme 3D EXPERIENCE dispose d'une fonction qui permet de calculer les interférences existant dans un certain assemblage. Cette fonction permet aussi de définir les spécifications de l'analyse de manière à identifier les collisions, les contacts et les dégagements entre les objets.

La procédure d'analyse des interférences est montrée à la *figure 2.19*.

Tout d'abord, cliquez la fonction appelée « *Créer une simulation d'interférence* » dans le menu « *Assemblage* ». Cette opération vous permet d'ouvrir l'environnement

de simulation contenu dans l'application *ENOVIA Interference Check*. A ce point sélectionnez la fonction « *Analyser les interférences* » et vérifiez l'état de votre produit.

Dans notre cas il y a plusieurs interférences entre les différentes pièces ; cependant il s'agit d'interférences dues surtout aux collisions entre les éléments de fixation et leurs trous, à l'exception de la petite collision entre deux terminaux électriques du moteur et le carénage, éléments flexibles qui ne constituent pas un réel problème au moment du montage.





## Chapitre 3

### CONCEPTION ET OPTIMISATION DE LA LIGNE D'ASSEMBLAGE

#### 3.1 Définition de la liste des Opérations

##### 3.1.1 APPROCHE ADOPTÉE

La liste des opérations a été établie en tenant compte de toutes les pièces présentes dans la maquette et de l'ordre d'assemblage requis par ces derniers.

En outre, les outils nécessaires et les durées des opérations ont été estimées par le groupe et révisés a posteriori lors de la con-

ception de l'atelier. Une attention particulière a été attribuée au choix d'outils appropriés aux types de jonction prévus dans les différentes parties de l'assemblage.

La liste des opérations est donc présentée ci-dessous.

N° Op.	Description opération	Outils	Mise en position [min]	Temps opératoire [min]	Durées [min]	Prédécesseurs immédiats
10	Montage Encodeur sur EMRAX 188	Visseuse à pointe six pans	1	1	2	-
20	Shunter les câbles électriques avec les connecteurs des câbles électriques sur l'EMRAX et les isoler	Pince + pince coupante + clé + Pistolet à Air Chaud	2	8	10	10
30	Montage de vis centrale plus l'écrou centrale sur la plaque du moyeu	2 clés	0,5	1	1,5	-
40	Positionnement de demi-moyeu inférieur sur la pièce adaptatrice puis positionnement des pales sur le demi-moyeu inférieur et fermeture par le demi-moyeu supérieur et l'ensemble plaque plus vis-écrou central	Visseuse avec douille à six pans creux	2	5	7	30
50	Equilibrage des pales	Clinomètre + Maillet	2	10	12	40
60	Serrage de l'ensemble pales moyeu avec la pièce adaptatrice à travers 6 pions de cisaillement et 6 vis à tête hexagonales	clé dynamométrique	1	6	7	50
70	Assemblage de l'ensemble pales + moyeux avec l'ensemble EMRAX+Encodeur par 6 vis	clé dynamométrique	2	6	8	60/20
80	Contrôle d'équilibrage des pales	treuil + banc d'essai	6	10	16	70
90	Fixation de couvercle supérieur	Visseuse à pointe six pans	1	1	2	80
100	Positionnement de la cage de protection des câbles électriques	Maillet	0,5	1	1,5	-
110	Passage de l'installation électrique dans les trous de carénage	treuil + tire cable	5	5	10	100/90
120	Mise en place et fixation de l'ensemble moteur pales sur le carénage	treuil + visseuse douille à six pans creux avec réglage	2	6	8	110
130	Fixation de capots inférieur	Visseuse à pointe six pans	4	2	6	120
140	Contrôle d'étanchéité	Pistolet haute pression + capteur d'humidité	3	5	8	130

## 3.2 Application de la méthode RPW

### 3.2.1 NOTIONS INTRODUCTIVES

#### **Qu'est-ce qu'une ligne de production est ?**

Une *ligne de production* représente une série de postes de travail organisés ayant pour fonction finale de produire un bien ou un service. Dans notre cas on peut parler aussi de *chaîne de production*, qu'on retrouve notamment au sein des usines, des fabriques, des manufactures et autres bureaux d'activité.

Une *chaîne de production* peut également être définie comme l'ensemble des processus structurés nécessaires pour la fabrication d'un produit, à partir des opérations de transformation des matières premières jusqu'à la distribution sur le marché.

Notre ligne prévoit l'assemblage d'un seul produit et, en plus, elle présente toutes les caractéristiques nécessaires afin de pouvoir être équilibrée avec un SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*), c'est-à-dire une série de méthodes d'équilibrage consacrées à l'optimisation des lignes classiques single-model.

Ces méthodes sont normalement classifiées dans deux macro-catégories : les méthodes heuristiques et les méthodes itératives.

- Les méthodes heuristiques (du grec « *euristikein* » = découvrir) sont des algorithmes qui recherchent des solutions admissibles (mais pas nécessairement optimales) au problème d'optimisation; ils privilégient la rapidité dans la recherche d'une solution au détriment de sa qualité.
- Les méthodes itératives, par contre, sont des algorithmes qui procèdent par itérations au cours desquelles ils déterminent une succession de solutions approximatives raffinées qui se rapprochent graduellement de la solution cherchée.

### 3.2.2 LA METHODE RPW

La méthode du  *poids positionnel classé* (Ranked Positional Weight) fait partie de la catégorie des méthodes heuristiques, où un algorithme relativement simple fournit une solution possible qui n'est pas nécessairement la meilleure.

De façon générale, la méthode vise à attribuer une série d'opérations à des postes de travail toute en respectant les contraintes d'antériorité et le temps de cycle objectif. La procédure est enfin décrite ci-après :

**Étape 1 :** Dessinez le diagramme de priorité des opérations.

**Étape 2 :** Déterminez le  *poids de position* (RPW) pour chaque élément de travail. Il s'agit de la somme des temps opératoires sur le plus long chemin depuis l'opération en question et jusqu'à la dernière opération du réseau.

**Étape 3 :** Classez les éléments de travail dans l'ordre décroissant du RPW.

**Étape 4 :** Choisissez l'élément avec le RPW le plus élevé et attribuez-le au premier poste de travail disponible. Ensuite, sélectionnez le suivant.

Continuez jusque la somme des temps opératoires dans le poste ne soit pas violé. Suivez également les contraintes de priorité.

**Étape 5 :** Répétez l'étape 4 jusqu'à ce que toutes les opérations soient attribuées aux postes de travail.

### 3.2.3 APPLICATION DE LA METHODE A NOTRE LIGNE

Avant de se lancer dans le calcul il est nécessaire de fixer certaines données ; nous supposons que la quantité de rotors qu'on souhaite d'assembler par jours est égale à 12. Aussi nous nous mettons dans le cas où on a 8 heures de travail par jour.

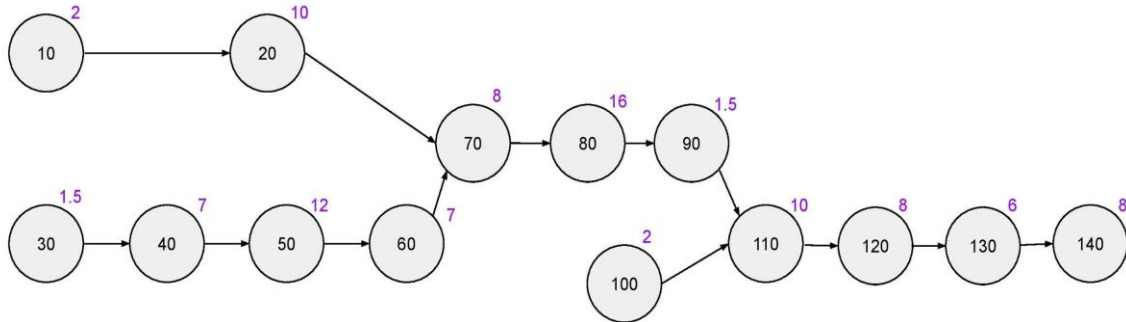
Avec ces données, il est possible de calculer le temps de cycle objectif, c'est-à-dire les heures de travail par jour divisées par la quantité de produits à assembler :

$$T_c = 480\text{min}/12 = 40\text{min}$$

quantité désirée / jour	12
heures de travail / jour	8h
temps de cycle objectif	40min

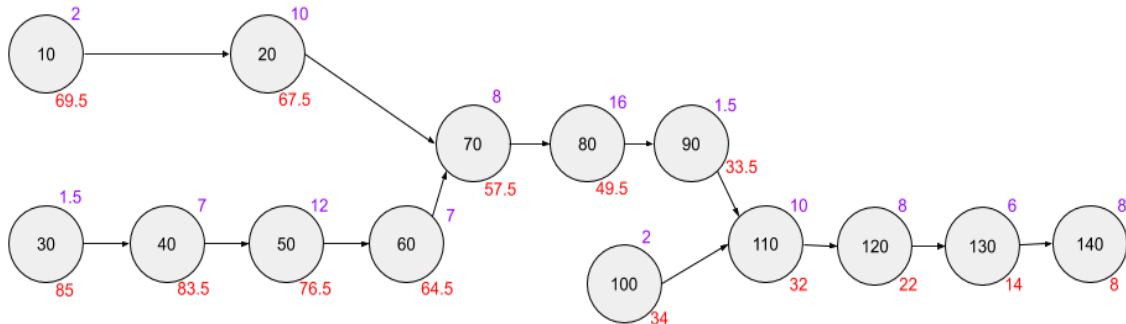
À ce stade, on peut appliquer la méthode RPW à notre liste d'opérations :

**Etape 1 :**  
Diagramme de priorité.



Légende :  
■ Numéro d'opération, ■ Temps opératoire [min]

**Etape 2 :**  
Calcul du poids de position pour chaque élément de travail.

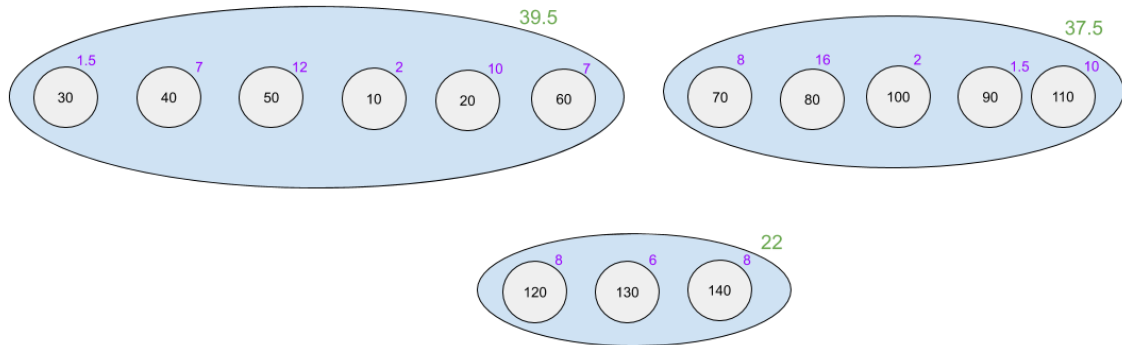


Légende :  
■ Numéro d'opération, ■ Temps opératoire [min], ■ Ranked positional weight

**Etape 3 :**  
Classement des éléments selon leur RPW.

RPW	N° Op.	Durée [min]			
85	30	1,5	49,5	80	16
83,5	40	7	34	100	2
76,5	50	12	33,5	90	1,5
69,5	10	2	32	110	10
67,5	20	10	22	120	8
64,5	60	7	14	130	6
57,5	70	8	8	140	8

**Etape 4 et 5 :**  
 Attribution des opérations aux postes de travail.



Légende :

■ Numéro d'opération, ■ Temps opératoire [min], ■ Somme des temps opératoires [min].

**3.2.4 OPTIMISATION DE LA SOLUTION DONNEE PAR LA METHODE RPW**

Comme on a déjà mentionné que la méthode RPW nous permet d'obtenir une solution faisable mais pas nécessairement optimal, donc, on peut regrouper d'une autre manière tout en respectant les règles de le RPW pour avoir des groupements plus équilibrés.

L'optimisation se fait de manière à rapprocher les temps opératoires des postes et à minimiser les encours entre eux.

La répartition finale des opérations à l'intérieur des postes de travail est montrée à la figure 3.1.

Deux indices d'équilibrage ont été calculés afin de pouvoir comparer la solution donnée directement par la méthode RPW avec la solution obtenue de l'équilibrage manuel des opérations :

- Niveau d'équilibrage  $k_1 = \frac{M * T_c - T_w}{M * T_c}$
- Indice d'équilibrage  $k_2 = \frac{T_w}{M * T_c}$

Sachant que :

- $M$  nombre de postes de travail,
- $T_c = \max(D_i)$
- $T_w = \sum D_i$   
avec  $D_i$  somme des temps opératoires dans le poste  $i$ .

Le niveau d'équilibrage  $k_1$  nous renseigne sur le moyen d'écart entre les temps opératoires des différentes postes de travail. Plus l'écart diminue, plus  $k_1$  s'approche de la valeur unitaire.

Les valeurs que ces deux indices prennent pour nos deux solutions sont visibles dans le tableau à la page suivante.

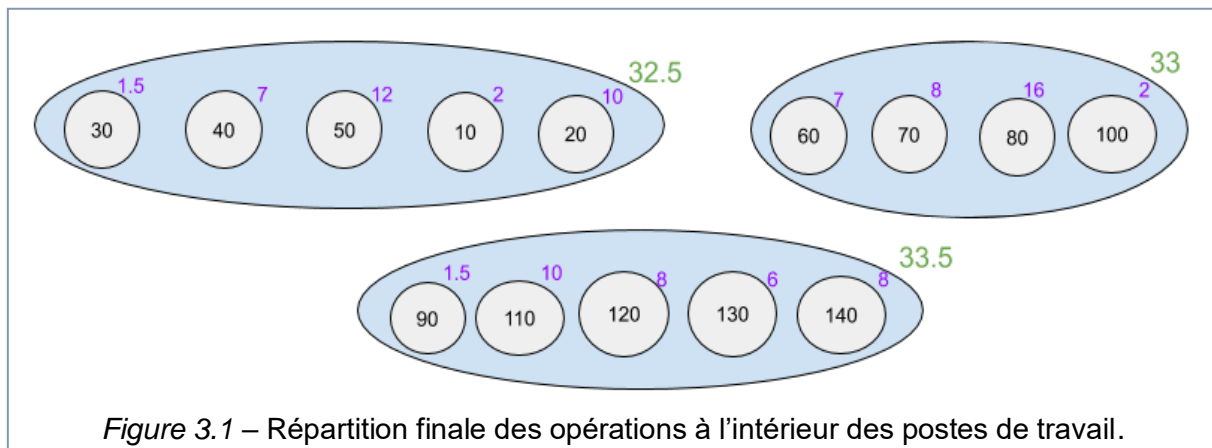


Figure 3.1 – Répartition finale des opérations à l'intérieur des postes de travail.

N° poste de travail	Solution donnée par RPW			Solution optimisée manuellement		
	Somme des temps opératoires [min]	Niveau d'équilibre $k_1$	Indice d'équilibre $k_2$	Somme des temps opératoires [min]	Niveau d'équilibre $k_1$	Indice d'équilibre $k_2$
1	39,5	16,46%	83,54%	32,5	1,49%	98,51%
2	37,5			33		
3	22			33,5		

### 3.3 Implantation de la méthode RPW sur Excel en VBA

#### 3.3.1 DU VBA, POURQUOI ?

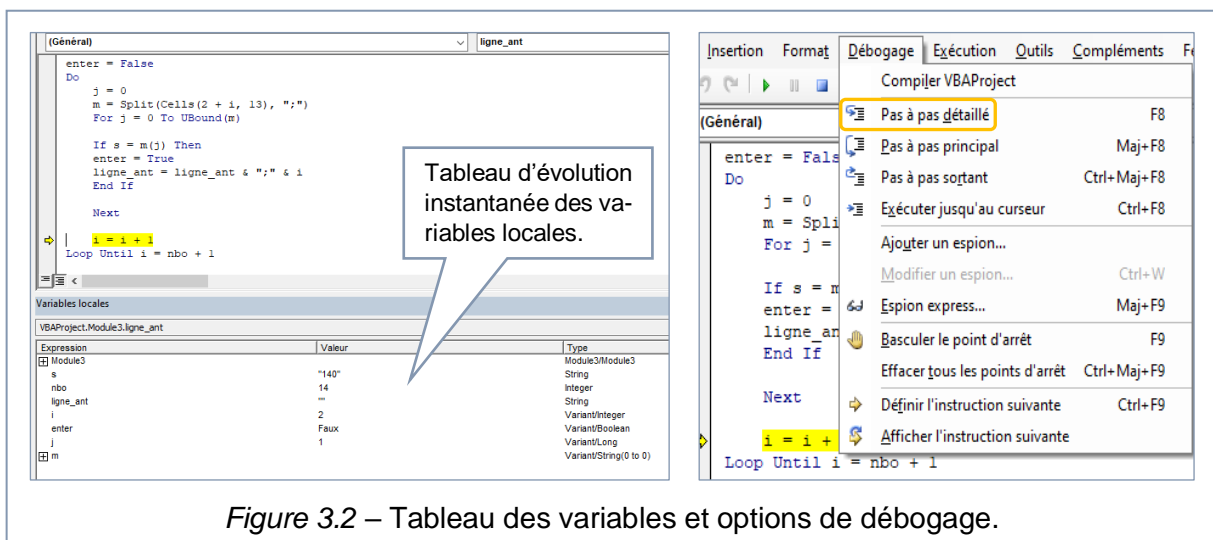
Le VBA (Visual Basic for Applications) est un langage de script qui est utilisé notamment dans les applications de la suite bureautique de Microsoft Office (Excel, Word, Access mais aussi Outlook et PowerPoint). Dans notre cas, nous avons travaillé avec le *VBA.excel*.

Les points forts de ce langage sont énumérés ci-après :

- Génération automatique d'un code VBA en utilisant des actions manuelles L'enregistreur de macros sous Microsoft Excel (Onglet Développeur / Enregistrer une Macro) permet de générer facilement du code VBA dans une procédure, ensuite, toute la séquence d'action effectuée entre le début et la fin de l'enregistrement est enregistrée dans une procédure VBA, qui pourra être ré

exécutée à l'identique. Il est possible de modifier ce code ou de programmer directement dans la VBE (Onglet Développeur / Visual Basic).

- Lisible et compréhensible : en utilisant le *VBA.excel* on peut avoir une interface homme/machine (appelée aussi tableau de bord) claire et facile à comprendre.
- Flexibilité du code: la flexibilité de VBA vous permet d'arriver au même résultat par des chemins différents. Chacun peut donc adopter une manière de programmer qui lui convient le mieux.
- Facilité de compiler et de localiser l'erreur s'il existe : à l'aide de l'option « pas à pas détaillé » on peut balayer tout le programme et suivre l'évolution des variables par compilation de ligne.



The image shows two parts of the VBA IDE. On the left, a code window displays VBA code for a loop. A callout box points to the line `i = i + 1` with the text "Tableau d'évolution instantanée des variables locales." Below the code is a 'Variables locales' window showing a table of local variables and their values. On the right, the 'Débogage' (Debug) menu is open, showing various options for stepping through the code, with 'Pas à pas détaillé' highlighted.

Expression	Valeur	Type
Module3		Module3/Module3
s	"140"	String
nbo	14	Integer
ligne_ant	"	String
i	2	Variant/Integer
enter	Faux	Variant/Boolean
j	1	Variant/Long
m		Variant/String(0 to 0)

Figure 3.2 – Tableau des variables et options de débogage.



### 3.3.2 NOTIONS DE BASE A CONNAITRE

#### Enregistrement d'une macro :

Les *macros* permettent d'automatiser un processus et de gagner un temps considérable par rapport à celui consacré à son développement.

Les *macros* vont donc vous permettre d'automatiser tout une série de tâches, comme par exemple :

- insérer une ligne automatiquement,
- copier-coller des données automatiquement,
- détecter des données, les additionner,
- créer des feuilles.

En l'occurrence, on a utilisé l'enregistreur d'une macro pour générer un code VBA qui pouvait réorganiser les opérations selon les poids positionnels décroissants.

#### Définition de « procédure » et de « fonction » :

Elles sont des entités informatiques qui encapsulent une portion de code relativement indépendant et qui effectuent un traitement spécifique bien identifié (asservissement, tâche, calcul, etc.). Elles permettent de diviser un problème en décomposant le programme à réaliser en portions de code plus faciles à produire, à utiliser, à gérer et à entretenir.

Une *procédure* a la particularité de ne retourner aucune valeur et de réaliser une opération (tâche) bien déterminée et dont l'emploi joue le rôle d'une instruction ad-hoc. Par contre, une *fonction* retourne une et une seule valeur, conformément à la définition mathématique de fonction.

La tâche du programmeur est de combiner les différentes pièces de code (des deux types : fonctions et procédures) afin d'obtenir le résultat souhaité. Dans cette optique, une procédure peut faire appel à des fonctions mais aussi à d'autres procédures, tout comme une fonction peut faire appel à d'autres fonctions et même à des procédures (même si cette dernière combinaison n'a pas vraiment d'utilité).

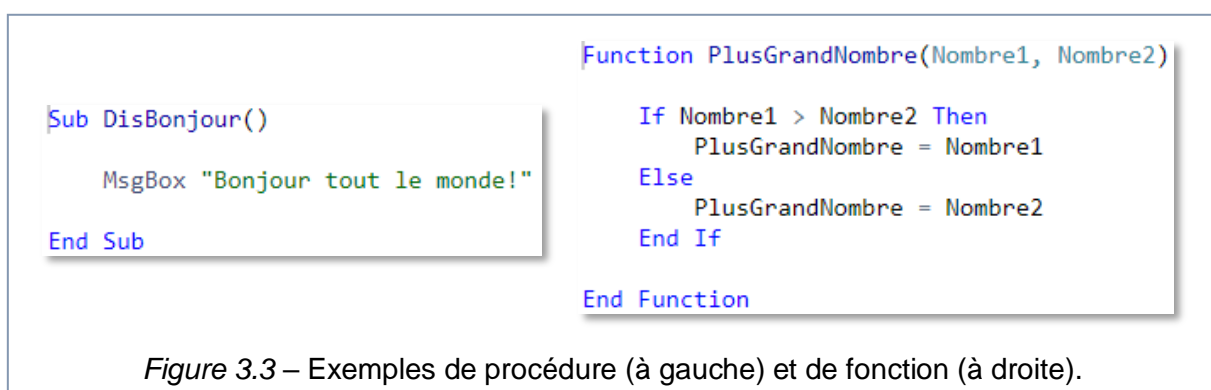
La *figure 3.3* montre sur la gauche un exemple de procédure, sans ni inputs (arguments) ni sorties, tandis que sur la droite on trouve un exemple de fonction avec deux arguments et une sortie. Les valeurs de tous les arguments doivent être fournies pour que la fonction puisse fonctionner.

#### Les structures répétitives (boucles) :

Une structure répétitive, également appelée structure itérative ou encore boucle, permet de répéter plusieurs fois l'exécution d'une ou plusieurs instructions.

Le nombre de répétitions peut être connu à l'avance ou dépendre de l'évaluation d'une condition.

- La boucle *while* (ou « *TantQue* »), permet de répéter des instructions tant qu'une condition est vérifiée. La variante *do\_while* a la particularité d'effectuer au moins une itération de la boucle même si la condition d'entrée n'est pas respectée.
- La boucle *for*, (ou « *Pour* »), permet de répéter des instructions tant qu'une condition est vérifiée. Elle permet de définir une initialisation qui a lieu une





seule fois et une étape qui a lieu après chaque tour de boucle.

L'instruction *exit* est utilisée comme sortie alternative d'une boucle dans certaines conditions particulières.

### 3.3.3 ELEMENTS DE L'INTERFACE UTILISATEUR

Dans les deux figures ci-dessous, on affiche l'interface utilisateur de l'optimiseur en VBA.

Les champs d'input présentés à la *figure 3.4* permettent d'insérer :

- les données de déroulement journalières, telles que le nombre de pièces à

produire chaque jour et le temps d'ouverture de l'usine,

- les opérations de la ligne identifiées par des nombres progressifs multiples de 10, associées à leur durée et leurs liens de priorité.

Par contre, à la *figure 3.5* on peut observer les champs d'output. Ils informent l'utilisateur en ce qui concerne :

- le nombre de postes de travail, donné par le nombre de lignes occupées à l'intérieur du tableau central.
- la répartition des opérations à l'intérieur des postes de travail, ainsi que la durée totale pour chacun d'eux.

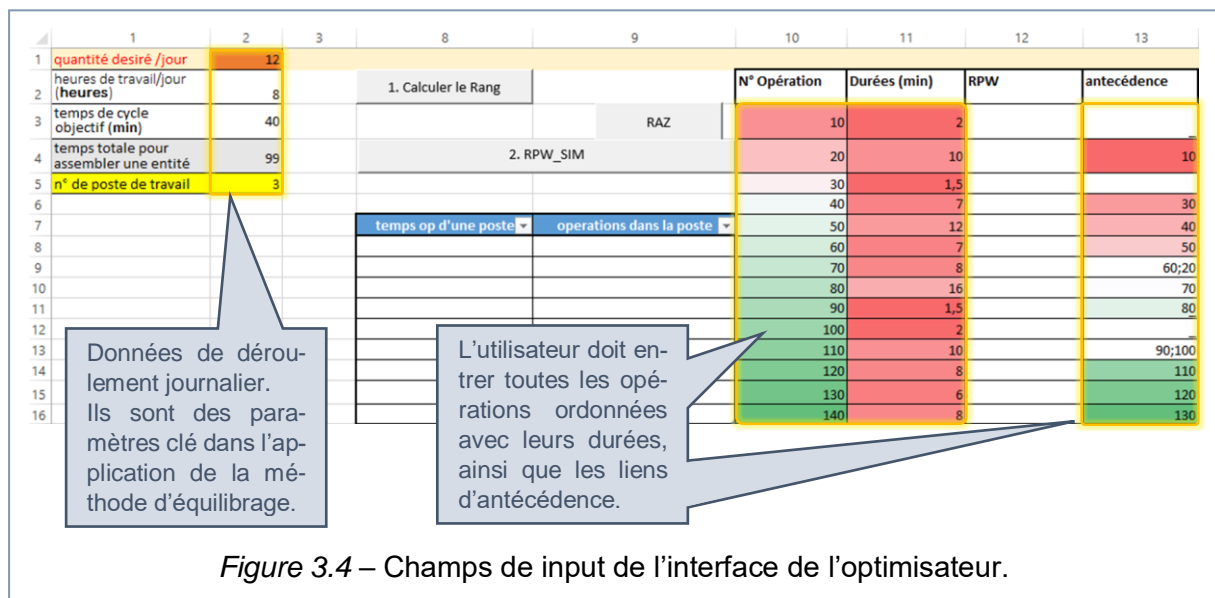


Figure 3.4 – Champs de input de l'interface de l'optimiseur.

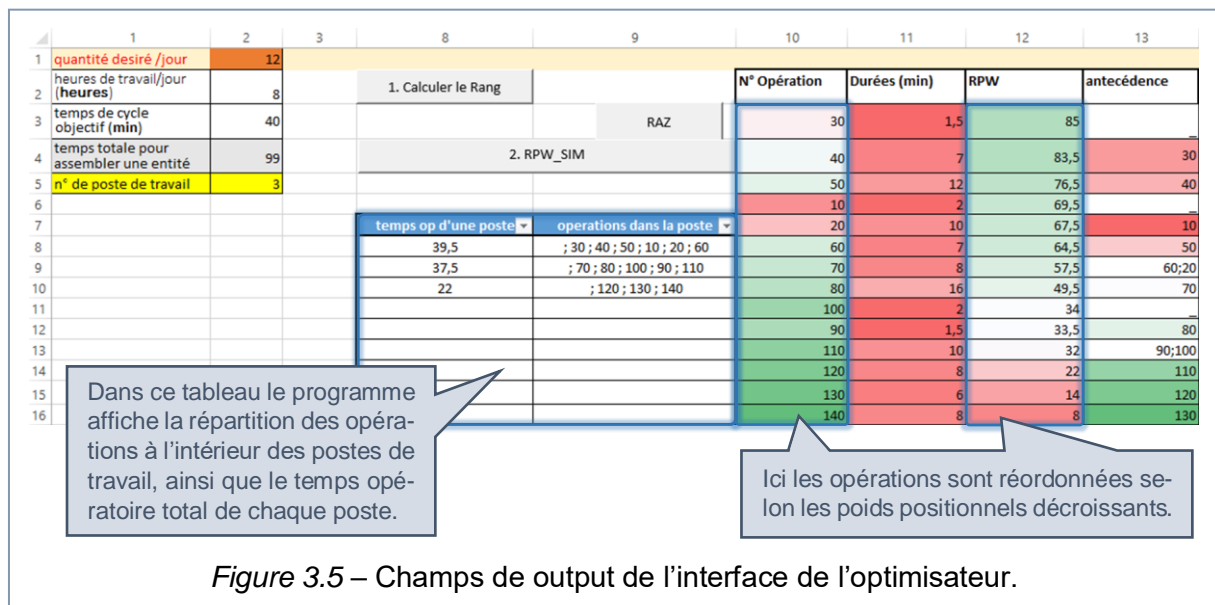


Figure 3.5 – Champs de output de l'interface de l'optimiseur.

- les opérations réorganisées selon leur valeur de RPW, qui est montré dans la troisième colonne du tableau à droite de l'interface.

### 3.3.4 DETAILS DU CODE DEVELOPPE

Dans notre procédure d'implantation de la méthode RPW, nous avons choisi de créer deux paliers d'exécution :

- 1<sup>er</sup> palier, sous forme de la macro commandée par le bouton « Calculer le Rank » :

1. Calculer le Rang

Dans cette macro le programme est censé calculer les poids positionnels des opérations et les afficher en ordre décroissant.

- 2<sup>ème</sup> palier, sous forme d'une deuxième macro commandée par le bouton « RPW\_SIM » :

2. RPW\_SIM

Dans cette macro le programme va assigner les opérations du processus aux postes de travail en appliquant les dernières étapes de la méthode RPW.

*Remarque* : l'ordre des boutons est très important, puisque il n'est pas possible d'avoir un résultat correct en appuyant sur le 2<sup>ème</sup> bouton avant le 1<sup>er</sup>.

Toutes les macros et les fonctions créées dans le cadre du programme d'optimisation seront montrées aux figures montrées par la suite dans le paragraphe.

```
Global nbo As Integer 'déclarer le variable global nbo comme entier
Sub rank() ' nommer la procedure
Dim s As String ' déclarer s comme une chaine de car

nbo = 0 'initialisation de l'indice de nombre d'opération
While Cells(3 + nbo, 10) <> "" 'tant que les cellules ne sont pas vides le compteur s'incrémente
nbo = nbo + 1
Wend

For i = nbo - 1 To 0 Step -1 'balayer les lignes du tableau de bas vers le haut
S_Rank = 0 'la somme des ranks est initialisé à 0
s = Cells(3 + i, 10) 'affecter l'indice de l'op au variable s
p = ligne_ant(s, nbo) 'la fonction retourne la position où on a trouvé une antécédance

If p = "" Then
Rop = Cells(3 + i, 11) 'si il ne trouve pas dans les colonnes de précédance
'donc le rank de l'op Rop=durée de l'op

Cells(3 + i, 12) = Rop
Else
j = 0
m = Split(p, ";")
For j = 1 To UBound(m)
S_Rank = S_Rank + Cells(3 + Val(m(j)) - 1, 12)
j = j + 1
Next

Rop = Cells(3 + i, 11) + S_Rank
Cells(3 + i, 12) = Rop
End If

Next

Call tri

End Sub
```

Le code de cette macro est dédié au calcul des poids positionnels et à leur réordonnement dans l'ordre décroissant. Dans cette procédure nous avons fait référence à deux autres fonctions : « tri » et « ligne\_ant () ».

Figure 3.6 – Code de la macro « rank ».

```

Function ligne_ant(s As String, nbo As Integer) As String
i = 1
enter = False
Do
    j = 0
    m = Split(Cells(2 + i, 13), ";")
    For j = 0 To UBound(m)

        If s = m(j) Then
            enter = True
            ligne_ant = ligne_ant & ";" & i
        End If

    Next

    i = i + 1
Loop Until i = nbo + 1

    If enter = False Then
        ligne_ant = ""
    End If

End Function

```

Figure 3.7 – Code de la fonction « ligne\_ant () ».

```

Sub tri()
'
' tri Macro
'
'
    Range("J2").Select
    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    ActiveWorkbook.Worksheets("Feuill").Sort.SortFields.Clear
    ActiveWorkbook.Worksheets("Feuill").Sort.SortFields.Add Key:=Range("L3:L" & nbo + 2)
        , SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlDescending, DataOption:=xlSortNormal
    With ActiveWorkbook.Worksheets("Feuill").Sort
        .SetRange Range("J2:M" & nbo + 2)
        .Header = xlYes
        .MatchCase = False
        .Orientation = xlTopToBottom
        .SortMethod = xlPinYin
        .Apply
    End With
    Range("G2").Select
End Sub

```

Figure 3.8 – Code de la procédure « tri ».

```
Sub rpw()  
Dim i As Integer  
Dim k As Double  
Dim op As String  
  
i = 1  
k = 0  
op = ""  
cumul = 0  
Tc = Cells(3, 2)  
While Cells(2 + i, 10) <> 0  
  
    While Cells(2 + i, 10) <> 0 And (k + Cells(2 + i, 11) < Tc)  
        k = k + Cells(2 + i, 11)  
        i = i + 1  
        op = op + " ; " + CStr(Cells(1 + i, 10))  
  
    Wend  
Cells(8 + j, 8) = k  
Cells(8 + j, 9) = op  
k = 0  
op = ""  
j = j + 1  
  
Wend  
  
End Sub
```

Figure 3.9 – Code de la procédure « rpw ».

```
Sub RAZ()  
,  
, RAZ Macro  
,  
  
While Cells(8 + i, 8) <> ""  
NL = NL + 1  
i = i + 1  
Wend  
Range("H8:I" & 8 + NL).ClearContents  
Range("L3:L1200").ClearContents  
End Sub
```

Figure 3.10 – Code de la procédure « RAZ ».

## Chapitre 4

### MODELISATION ET ANALYSE DU PROCESSUS

#### 4.1 Notions Introductives

##### 4.1.1 L'ENVIRONNEMENT DELMIA

DELMIA est un logiciel de simulation qui par définition permet d'explorer les frontières entre le monde virtuel et le monde réel. Les solutions données par cette sorte de logiciels réduisent le prototypage physique, accroissent la confiance dans la performance des produits, accélèrent les décisions de conception et améliorent la connaissance du comportement réel dans un environnement virtuel.

Les applications DELMIA offrent une gamme complète de solutions qui permettent de simuler l'entier processus de fabrication. Ces applications couvrent une gamme de solutions qui comprennent l'optimisation de l'aménagement de l'usine, de la robotique et des activités d'usinage, l'étude des questions liées aux facteurs humains et la planification des processus et des ressources. En outre, ils comprennent la gestion des opérations de fabrication, la production allégée, la chaîne d'approvisionnement et l'optimisation.

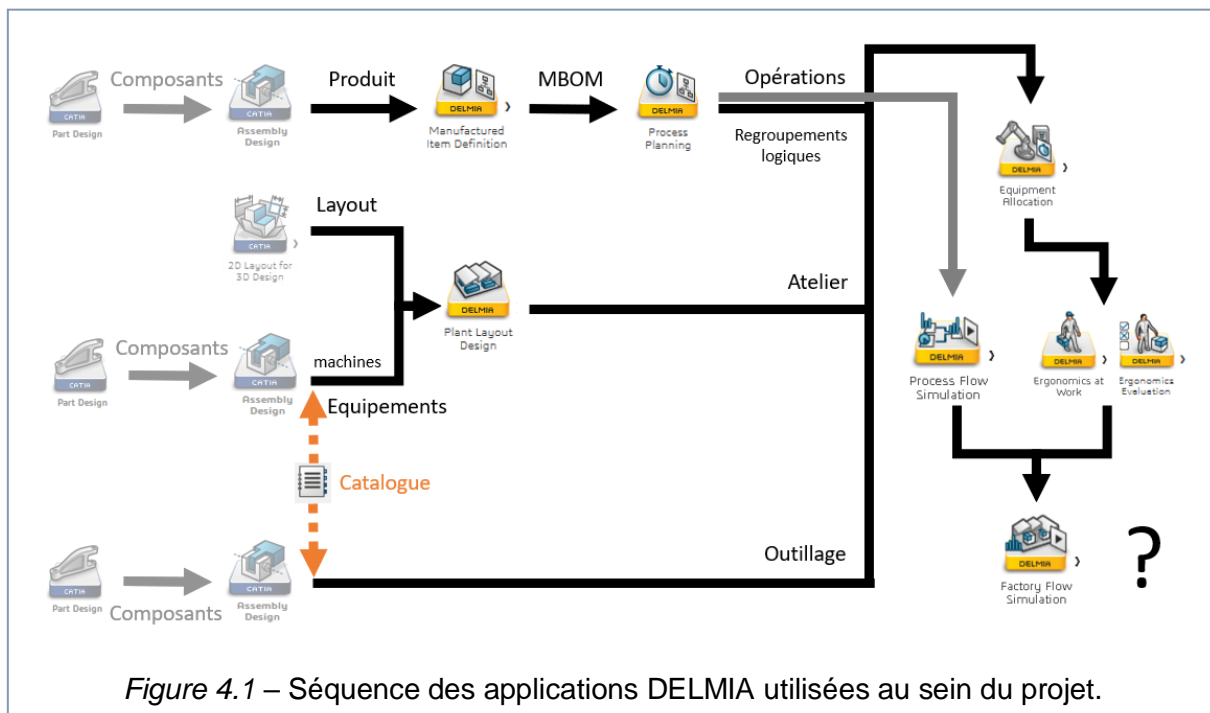
La *figure 4.1* montre la séquence d'applications qui seront explorées et utilisées pendant le déroulement de ce projet. Les sous-chapitres suivants décrivent le travail réalisé avec chacune d'elles.

Les solutions développées au moyen des applications DELMIA sont rassemblées dans des « Contextes PPR » (Product, Process, Resource). Ces objets faisant partie de la logique PLM sont brièvement introduits dans les documents liés au rapport.

##### 4.1.2 A PROPOS D'EBOM ET MBOM

L'EBOM et la MBOM sont deux différents types de nomenclatures qui permettent de voir l'organisation d'un produit de manière conforme aux besoins.

Dans ce chapitre, trois principaux types de nomenclature produit seront définis : CAD-BOM, EBOM et MBOM. Chacune de ces nomenclatures correspond à un besoin d'informations différent en fonction de son



positionnement (bureau d'études, production, expédition, montage ...).

Tout d'abord, « BOM » est un acronyme signifiant « Bill Of Materials », c'est-à-dire une liste de composants ou documents qui vont définir le produit en question.

Cette organisation va ensuite être modulée en fonction de son usage. Par exemple, le Bureau d'étude connaît très bien la structure des produits selon l'arbre de construction CAO. Avec des outils appropriés, il est possible d'extraire cette arborescence de construction communément appelée CAD-BOM.

La **CADBOM** ne contient que ce qui a été « dessiné ». Elle devra donc être complétée avec d'autres composants qui n'apparaissent pas dans les dessins (colles, graisses, etc.) et ré-agencée de manière à donner une vision fonctionnelle du produit qui lui permettra de mieux gérer les modifications ou évolutions. Elle deviendra donc au final ce qu'on appelle EBOM (Engineering BOM).

L'**EBOM** est une structure qui reflète la définition technique d'un produit, construit en utilisant des assemblages (groupes fonctionnels d'information) et des pièces (constructions mécaniques/électriques ou logicielles – spécifiées par CAO 3D, CAO 2D, schémas ou spécifications). L'EBOM reflète la définition complète de la façon dont un produit devrait apparaître dans le monde

réel et la façon dont l'information provenant de différentes disciplines est intégrée au sein d'une organisation pour définir ce produit.

Après l'étape de conception, il est nécessaire d'acheter, fabriquer, expédier, maintenir ou rénover. Toutes ces étapes nécessitent des regroupements ou réagencements spécifiques. Pour fabriquer, il faut structurer les nomenclatures en fonction de nombreux critères tel que les sites de fabrication, les modes d'approvisionnement, les moyens de production, les processus de fabrication, etc.

C'est ici qu'intervient la MBOM (Manufacturing BOM) avec ses variantes.

La MBOM est créée à partir de l'EBOM en utilisant des processus de copie et de synchronisation. Au cours de ces processus, certaines branches de la nomenclature peuvent être supprimé ou restructuré.

La **MBOM** présente une structure qui reflète la manière dont le produit sera fabriqué. Les niveaux dans le MBOM reflètent les étapes de fabrication nécessaires pour construire le produit.

Sur la base de la même EBOM différents MBOM peuvent exister, puisque une entreprise pourrait décider que dans l'un de leurs usines de fabrication ils assemblent seulement le produit, tandis que dans une autre usine ils ont des outils pour fabriquer certaines pièces leur-mêmes. Pour ces raisons les deux MBOMs seront différents.

---

## 4.2 Manufactured Item Definition

### 4.2.1 OBJECTIF DE L'APP ET RESULTATS ATTENDUS

Comme on l'a juste indiqué, l'environnement DELMIA met à disposition plusieurs applications afin de permettre la modélisation des processus d'assemblage d'un produit et pour analyser les performances le long de toutes les étapes de conception.

Grâce à l'application *Manufactured Item Definition*, il est possible d'arriver à concevoir la *manufactured item structure* (structure des éléments de fabrication, c'est-à-dire le MBOM) au moyen des suivantes étapes fondamentales :

- Tout d'abord, il faut créer la tuile racine associée à l'assemblage de fabrication global.

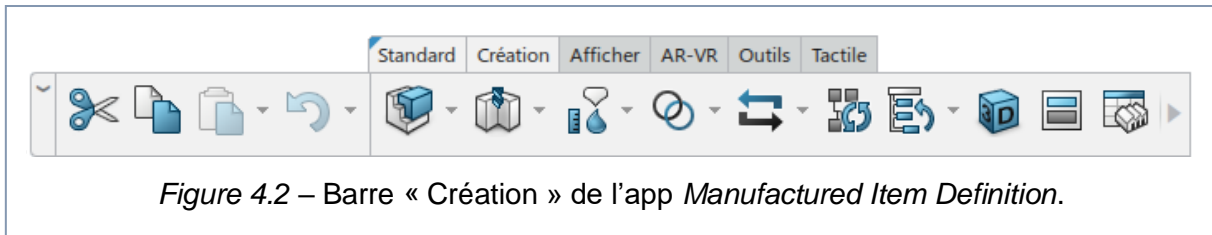


Figure 4.2 – Barre « Création » de l'app *Manufactured Item Definition*.

- Ensuite, il est nécessaire de créer la portée entre l'élément de fabrication et la racine de l'arbre du produit.
- A ce point la structure des éléments de fabrication (c'est-à-dire le MBOM) doit être créée et, après, les produits physiques doivent être affectés aux différentes tuiles.
- Enfin, l'utilisateur peut examiner l'état d'affectation des produits avec la fonction Vue 3D et gérer et regrouper les produits.

#### 4.2.2 FONCTIONS PRINCIPALES

La figure 4.2 montre la barre « Création » avec les fonctions les plus importantes de l'app *Manufactured Item Definition*.



#### Créer une portée élément-produit :

Une portée est une connexion entre une structure de produits physiques et une structure d'éléments de fabrication (*manufactured items*, ceux qui font partie du MBOM). Cette fonction est la première à utiliser après la création du fichier, car elle est essentielle afin d'assigner les produits aux éléments de fabrication.



#### Assemblage de fabrication :

Cette fonction permet de créer des éléments de fabrication à partir de la tuile ou du nœud sélectionné dans l'arborescence. Un nouvel élément ne peut être créé qu'en tant que prédécesseur d'un élément existant.

Outre l'assemblage de fabrication, d'autres types d'éléments existent, comme la montre la figure 4.3.

L'arborescence de l'assemblage de fabrication peut également être créée et gérée plus facilement par la fonction « Editeur de feuille de calcul PPR ».

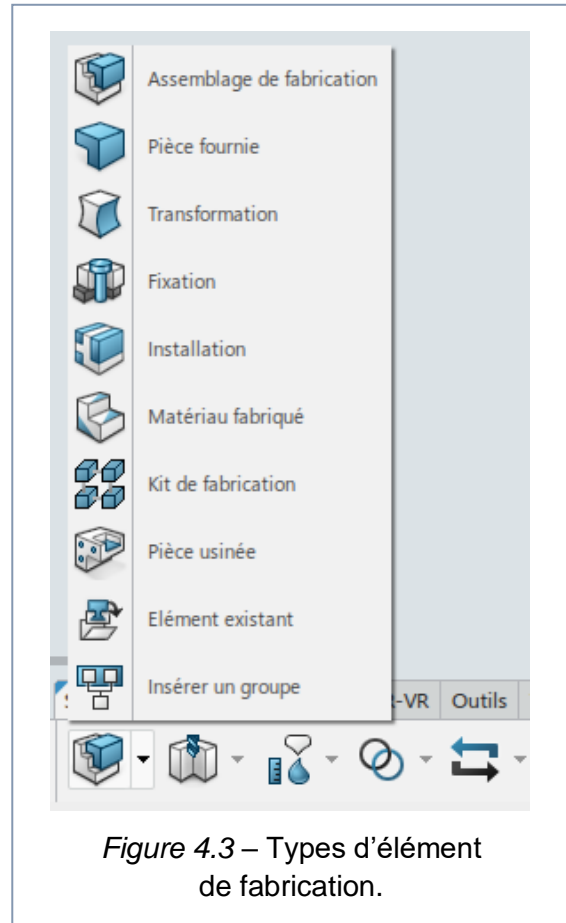




Figure 4.3 – Types d'élément de fabrication.



#### Gestionnaire d'affectations :

Après avoir créé les portées appropriées, il est possible d'affecter les produits aux éléments de fabrication grâce à cette fonction. On remarque que afin d'affecter un produit à l'arbre de la MBOM, l'existence d'une portée entre eux est essentielle. L'interface de la fonction permet d'afficher et affecter les éléments non encore assignés  ou les éléments déjà assignés  qui sont ré-affectables grâce au bouton avec la double flèche.



#### Vue 3D :

Grâce au panneau d'affichage 3D il est possible de visualiser et d'explorer les



différentes parties du produit à leur place à l'intérieur de l'assemblage.

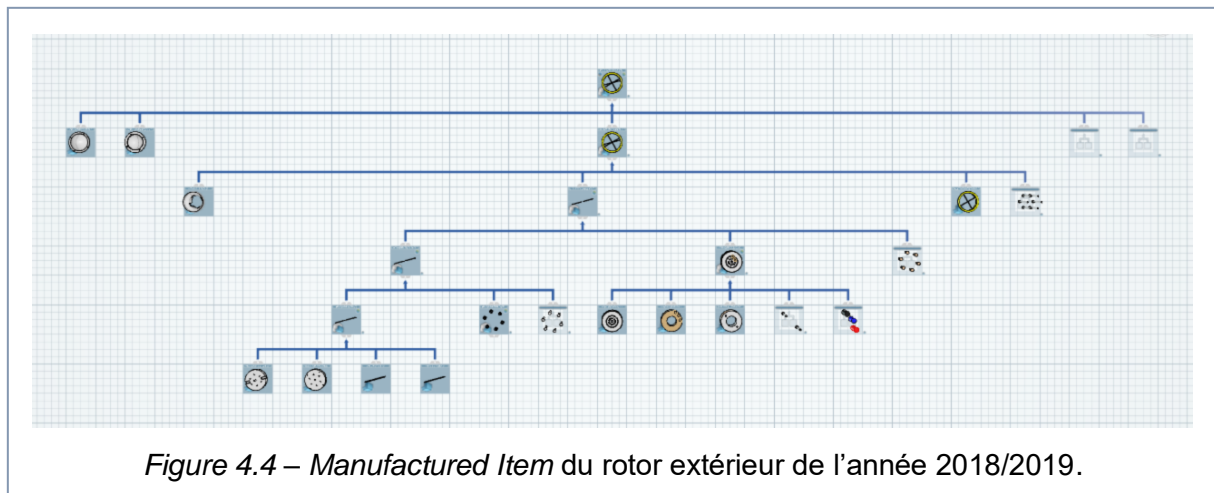
#### 4.2.3 TRAVAIL DE L'ANNEE DERNIERE

Tout d'abord, nous avons étudié le travail présenté dans le rapport de l'année der-

nière afin de le réutiliser autant que possible et de comprendre la logique retenue. Les acronymes utilisés pour identifier les différentes pièces et le diagramme d'assemblage développé en 2018/2019 sont présentés ci-après.

Acronyme	Description
CAR	Carénage
M	Moteur EMRAX 188
EN	Encodeur
VISF	Vis de fixation encodeur + moteur
TR	Tubes de refroidissement
PALES	Pales
DM1	Demi-moyeu 1
DM2	Demi-moyeu 2
VIS H	Vis de centrage de moyeu
AS3	Ensemble moteur + encodeur + hélice
ECROU	Ecrou frein de vis de centrage de moyeu
VIS	Vis à tête hexagonale asse moyeu

PCIS	Pions de cisaillements
PAD	Pièce adaptateur
VISFM	Vis de fixation de l'ensemble moteur Hélice
VIS6PC	Vis six pans creux
VIS6PC	Câble électrique Moteur
CE	Produit fini
AS4	Assemblage moyeux + Pales
AS2	Pions de cisaillements
AS1	Moteur + encodeur et montage des câbles
GC	Grande cage
PC	Petite cage
VISGC	Vis de serrage grand cage
VISPC	Vis de serrage petit cage
RNL	Rondelles anti-vibration Nord-lock



Comme le montre la *figure 4.4*, la MBOM créée sur la plate-forme 3D EXPERIENCE a été organisée sur cinq niveaux (quatre dans la version « papier »). Elle ne contient que des assemblages de fabrication et des pièces fournies ; tous les autres éléments de fabrication que l'app met à la disposition

de l'utilisateur n'ont pas été exploités. Normalement ils sont utiles pour modéliser des processus plus complexes qu'un simple assemblage, tels que la production de pièces interne à l'usine et les procédés de transformation (peinture, traitements chimiques, etc).



#### 4.2.4 CONCEPTION DE LA NOUVELLE NOMENCLATURE

Le tableau ci-dessous présente la première

version « papier » du MBOM, y compris les acronymes et les subdivisions en trois niveaux.

N°	Niveau	ID	Nom/description	Quantité
1	0	AS1	Produit-fini	1
2	1	AS2	Ensemble (capot inférieur + 4*vis M4 L6)	1
3	1	AS3	Ensemble (capot supérieur + visM8 L25)	1
4	1	AS4	Ensemble (pales + deux moyeux + flasque + 6*pions de cisaillement + 6*vis M7 L20 + écrou M8 + 7*rondelles Nord-Lock + plaque + 6*vis M8 L90)	1
5	1	AS5	Ensemble (moteur EMRAX 188 + câbles électriques + 6*vis M6 L90 + encodeur + 2*vis M3 L28)	1
6	1	AS6	Ensemble (carénage + cage de protection)	1
7	2	AS7	Sous-ensemble (plaque + écrou M8 + vis M8 L16)	1
8	2	CAR	Carénage	1
9	2	CPF	Cage de protection des fils électriques	1
10	2	VM6L90	Vis carénage + moteur (Vis D6 L90)	6
11	2	CAE	Câbles électriques	3
12	2	VM3L28	Vis encodeur + moteur	2
13	2	EN	Encodeur	1
14	2	M	Moteur	1
15	2	CAI	Capot inférieur	1
16	2	VM4L6	Vis capot inf. + carénage	4
17	2	CAS	Capot supérieur	1
18	2	VM8L25	Vis écrou + capot sup.	1
19	2	PCIS	Pion de cisaillement	6
20	2	VM8L90	Vis moyeu + flasque	6
21	2	RNL	Rondelles Nord-Lock*	7
22	2	VM7L20	Vis flasque + moteur	6
23	2	PALE1	Pale 1**	1
24	2	PALE2	Pale 2**	1
25	2	FAD	Flasque adaptatrice	1
26	2	DM1	Demi-moyeu inférieur	1
27	2	DM2	Demi-moyeu supérieur	1
28	3	EM8	Ecrou dans le capot sup.	1
29	3	PQM	Plaque moyeu	1
30	3	VM8L16	Vis plaque + écrou dans le capot sup.	1

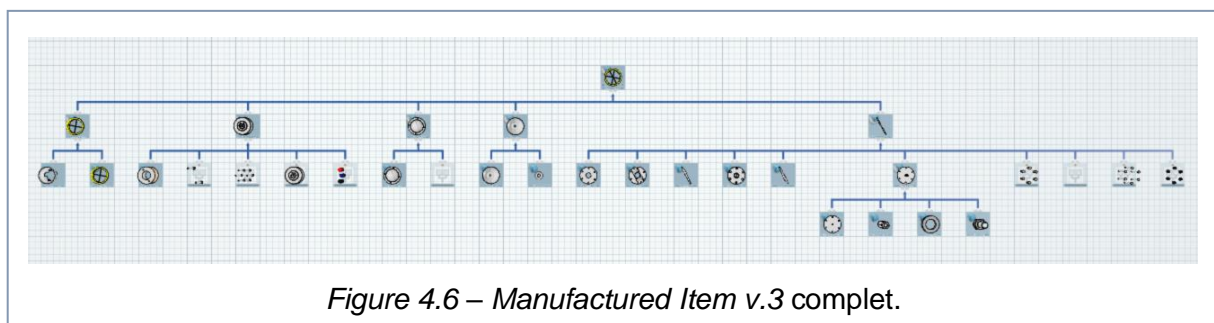
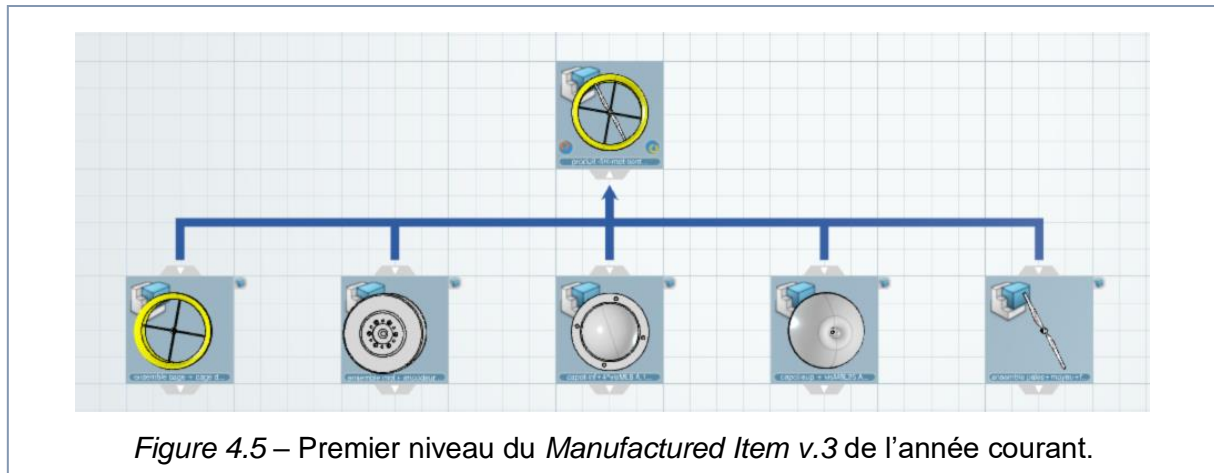
\*Remarque : six rondelles anti-vibration sont situés dans le 2<sup>ème</sup> niveau tandis la dernière est située dans le 3<sup>ème</sup> niveau. Pour cette raison, on a choisi de mettre toutes les rondelles dans le niveau 2. Une solution alternative serait d'attribuer deux numéros d'élément différent aux deux groupes de rondelles placés sur les différents niveaux.

\*\*Remarque II : Dans ce cas, deux numéros d'élément différents ont été assignés aux deux pales. Comme les pales sont

identiques et se trouvant dans le même niveau, elles pourraient même avoir le même identifiant.

Sur la plateforme 3D EXPERIENCE, on peut trouver au total cinq versions réalisées cette année au moyen de l'application *Manufactured Item Definition*.

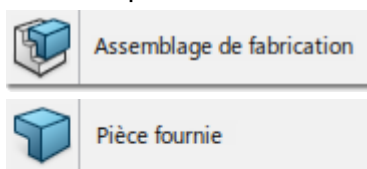
La **version 3** de « *Manufactured Item RE* » montrée dans les figures 4.5 et 4.6 est la première version complète réalisée sur le



modèle de l'année précédente (l'acronyme RE signifie *Rotor Extérieur*).



- Les niveaux sont organisés en fonction des critères de priorité d'assemblage : sur le même niveau peuvent être placés tous les éléments qui peuvent être assemblés indépendamment des autres pièces sur ce niveau.
- Les opérations dont le produit sortant est le même que celui entrant (e.g. l'équilibrage des pales) ne sont pas pris en compte pour la construction du diagramme.
- Les seuls éléments utilisés dans le diagramme sont « assemblages de fabrication » et « pièces fournies ».



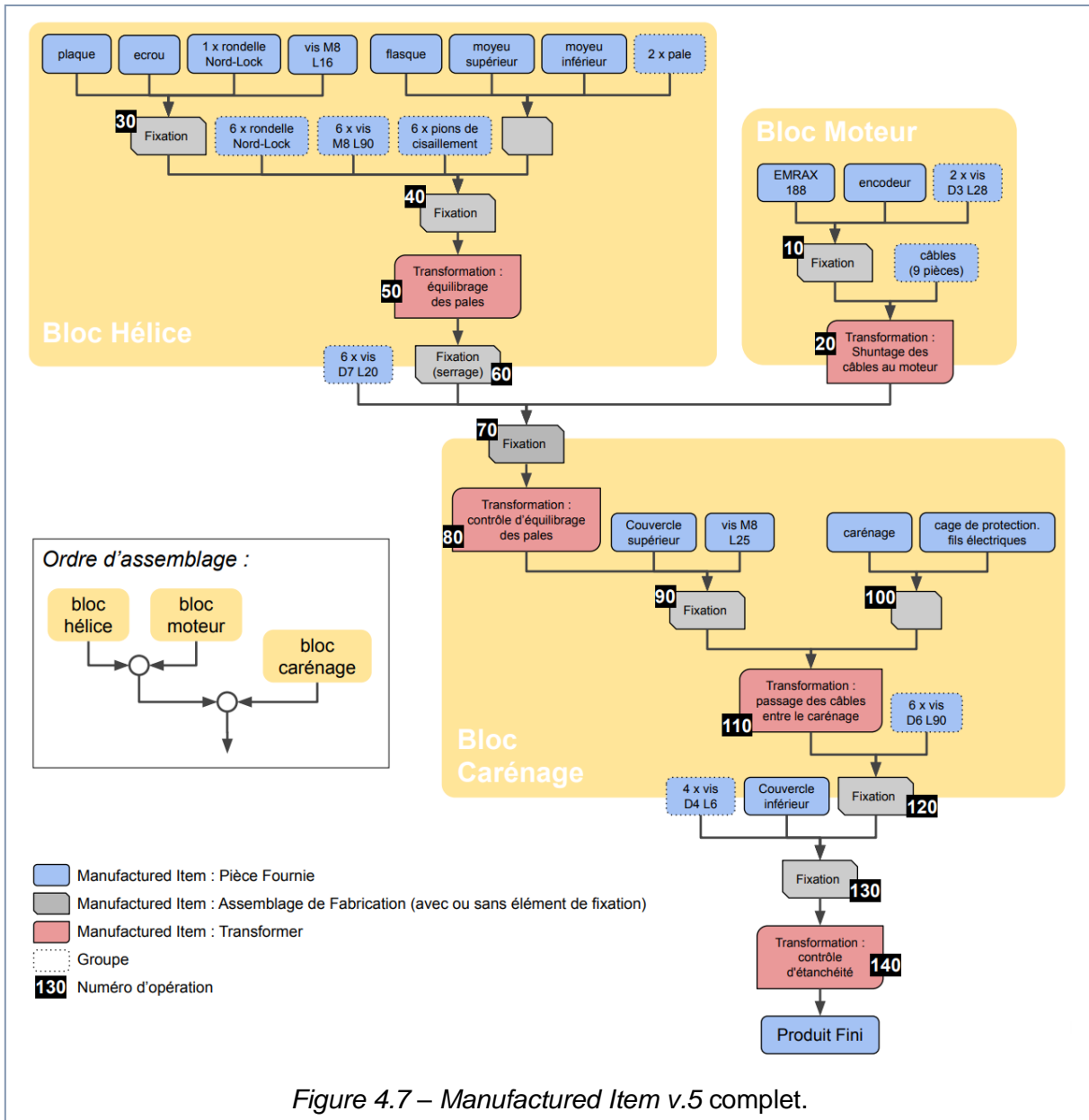
- Il a été décidé d'utiliser les groupes pour recueillir les éléments du même type, typiquement des éléments de serrage (vis et écrous).

- Les trois blocs de base (carénage, moteur, hélice) sont disposés sur le premier niveau avec les deux couvercles, supérieur et inférieur.

La **version 5** de « *Manufactured Item RE* » schématisée à la *figure 4.7* est la deuxième version complète réalisée.

Lors du développement de cette version, on a décidé d'exploiter davantage les ressources fournies par le logiciel et de construire un MBOM plus complet et conforme aux principes énoncés au *paragraphe 4.1.2*. Cette version est organisée selon les principes suivants :

- Les niveaux sont organisés en tenant compte de l'ordre d'assemblage, et donc le concept de niveau perd sa signification précédente. Dans ce cas chaque saut de niveau dans le diagramme coïncide avec une opération d'assemblage ou de transformation.



- Les éléments présents dans le diagramme en plus des deux déjà utilisés sont « Fixation » et « Transformer ».

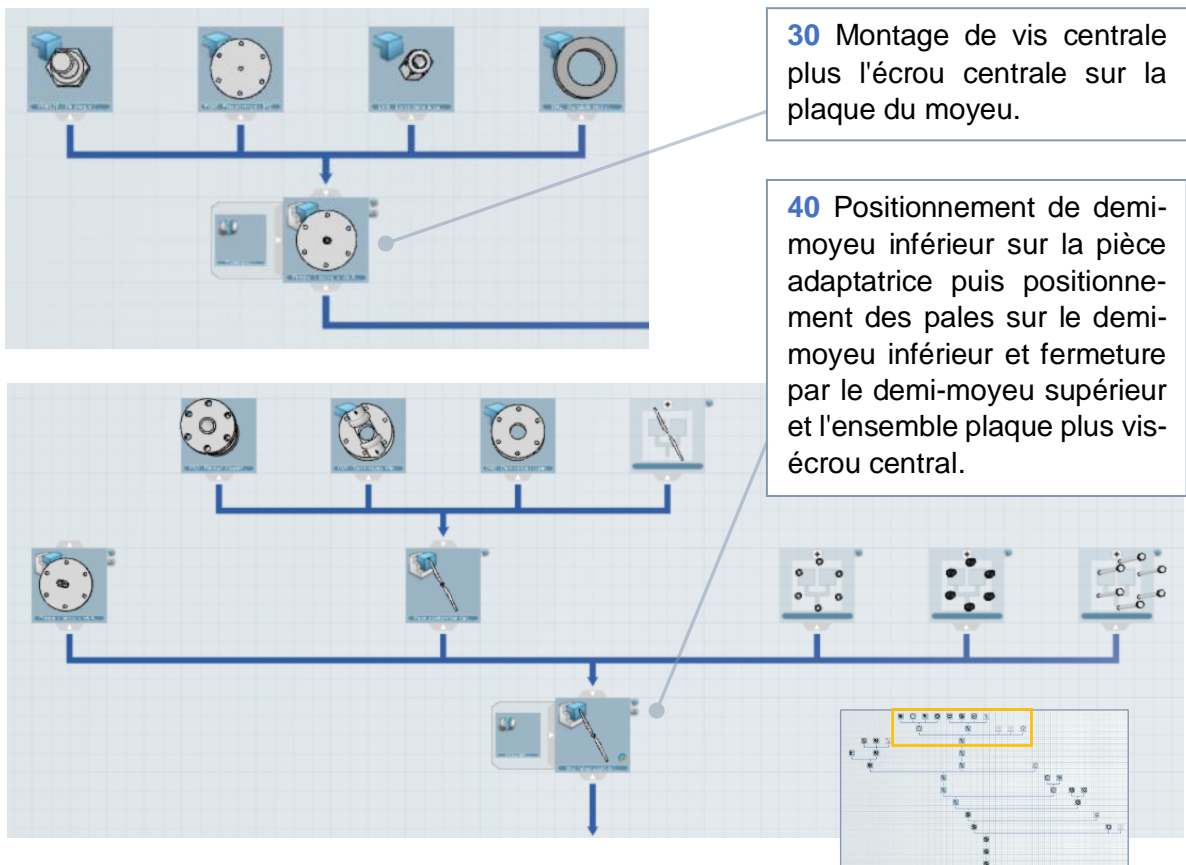
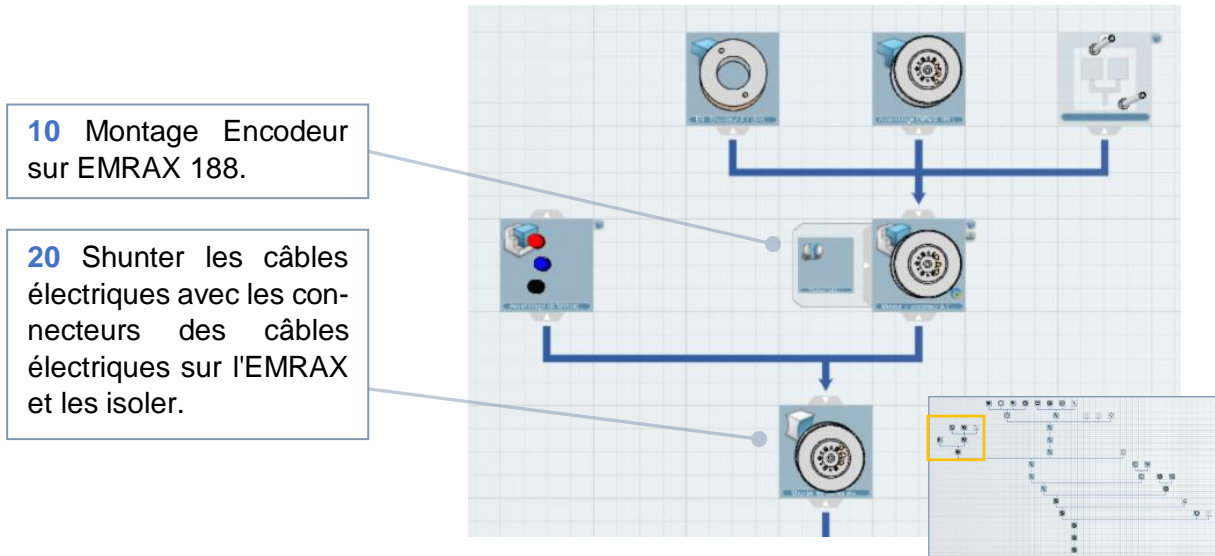


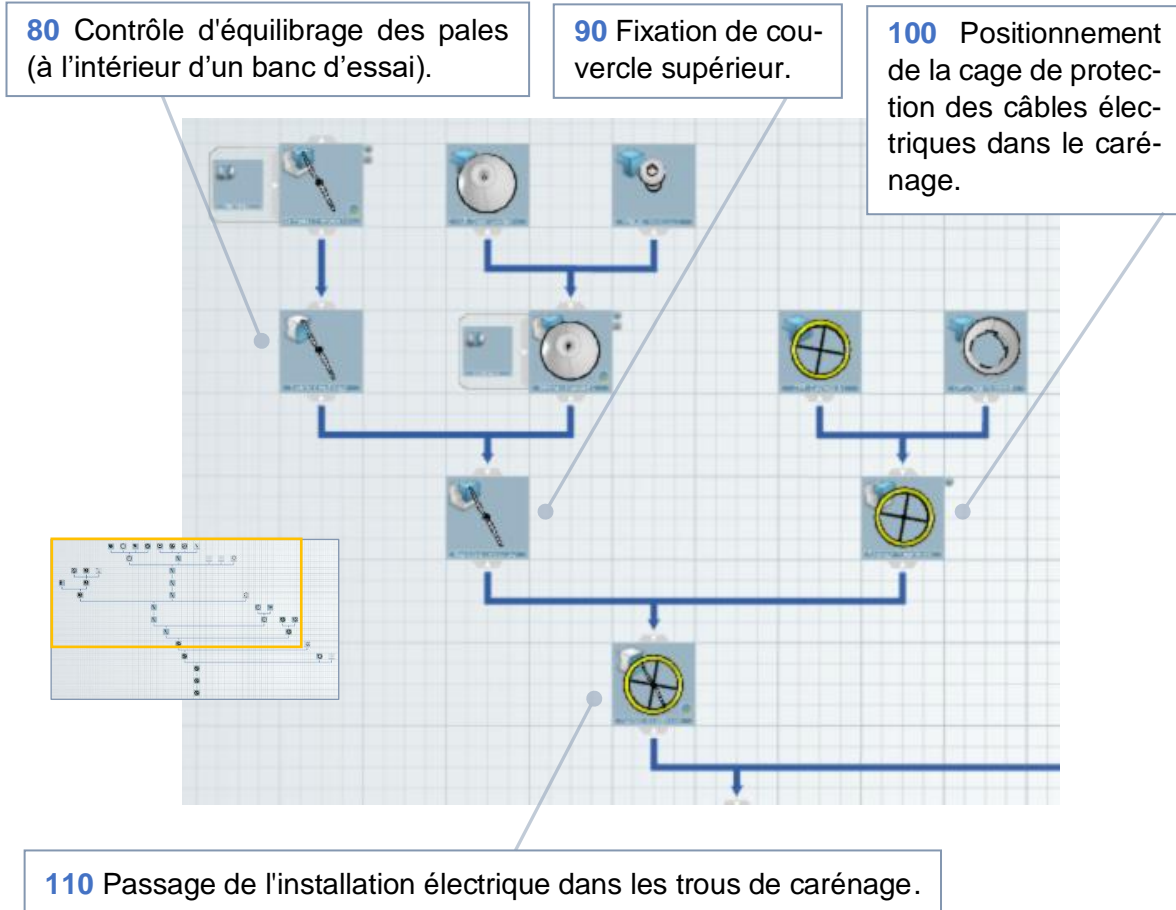
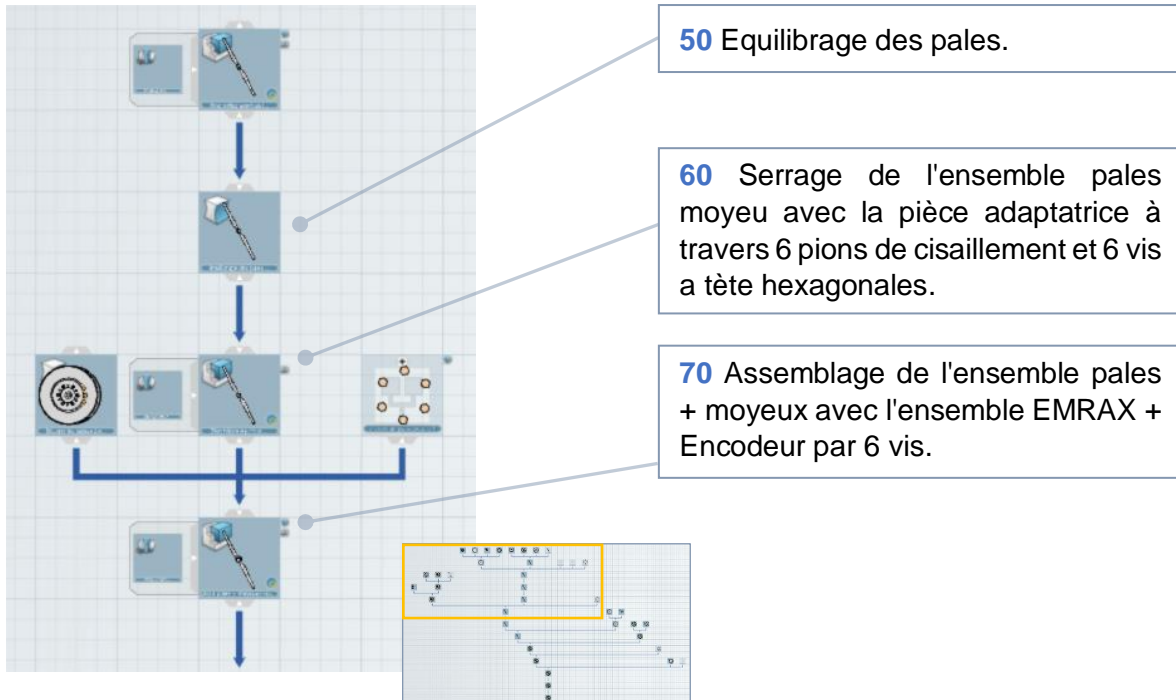
- Les opérations considérées sont celles énumérées dans le sous-chapitre 3.1.

#### 4.2.5 ANALYSE DE LA CONFORMITE ENTRE LE MBOM ET LA LISTE DES OPERATIONS

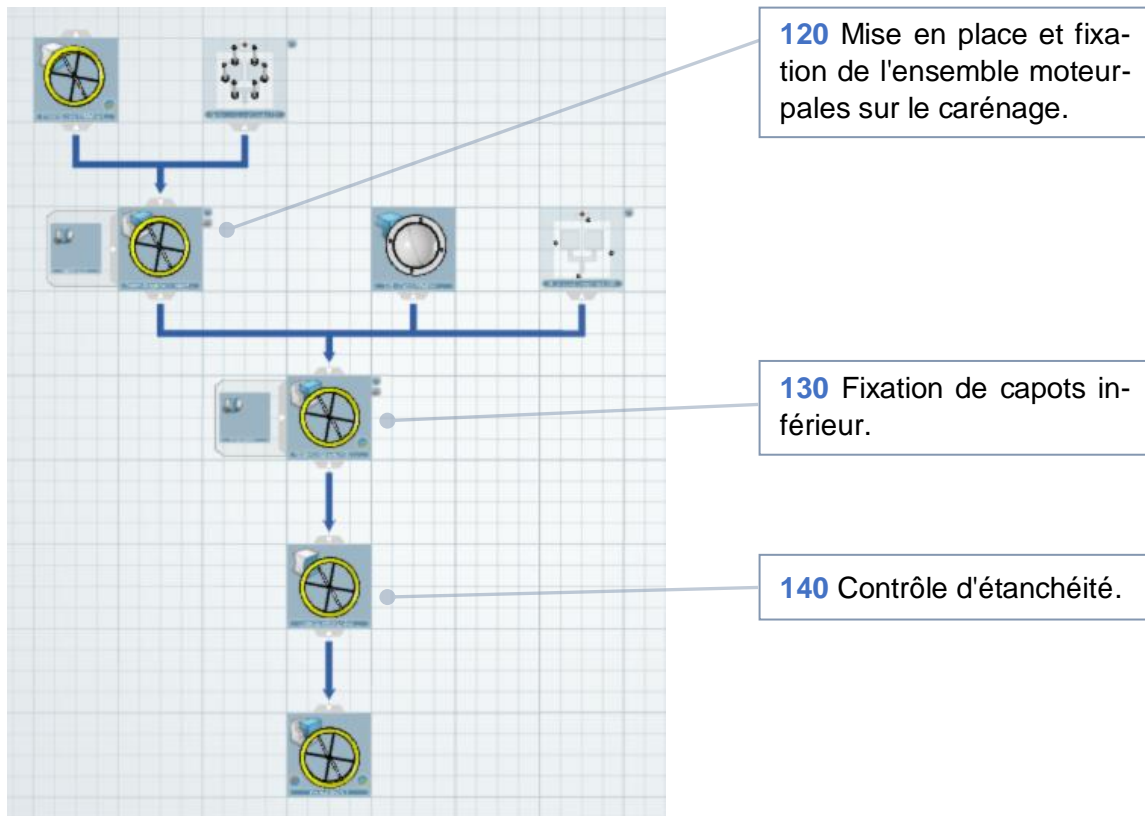
La procédure de création de la MBOM sur l'application *Manufactured Item Definition* a été suivie parallèlement par la vérification de conformité entre la création des niveaux du MBOM et les opérations qui leur correspondent. Pour ce faire, nous nous sommes aidés au moyen de l'application web *Google Drawing* en faisant des modèles d'essai similaires à celui montré dans la *figure 4.7*.

Le contrôle de conformité étape par étape pour la création de la version 5 du MBOM est montré ci-dessous.









## 4.3 Process Planning

### 4.3.1 OBJECTIF DE L'APP ET RESULTATS ATTENDUS

L'outil de planification du processus reçoit en entrée le MBOM conçu au moyen de l'application *Manufactured Item Definition*, où les niveaux de montage du produit final ont été définis, ainsi que les opérations de fixation, transformation et contrôle effectuées afin d'atteindre chaque étape. La modélisation du processus requiert également d'autres entrées :

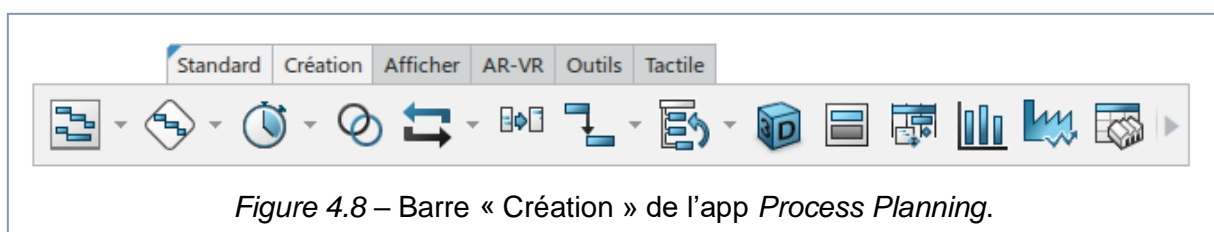
- la liste des opérations,
- leurs temps d'exécution,
- le nombre de postes de travail,
- la présence d'opérations de chargement pour les différentes pièces.

Au moyen de cette application, il est possible d'obtenir une séquence d'opérations ordonnées et reliées entre elles par des contraintes de priorité et des flux de produits, ainsi qu'une répartition équilibrée de la charge de travail sur tous les postes disponibles.

### 4.3.2 FONCTIONS PRINCIPALES

La *figure 4.8* montre la barre « Création » de l'application *Process Planning*.

On peut remarquer que les fonctions dédiées à la connexion et à l'attribution d'éléments sont parfaitement analogues à celles de l'application *Manufactured Item Definition*.







### Gérer les portées :

Fonction tout à fait similaire à celle décrite au *paragraphe 4.2.2*, qui permet dans ce cas de créer une connexion entre le nœud-système général de l'app *Process Planning* et les assemblages de fabrication présents dans le même contexte PPR.

La création des portées est cruciale afin d'affecter les éléments de fabrication aux différentes opérations.



### Système général :

Les systèmes sont des unités de regroupement des opérations selon les critères choisis par l'utilisateur. Différents types de systèmes sont disponibles, comme le montre la *figure 4.9*, bien que certains d'entre eux ne soient généralement utilisés que dans des applications succinctes.

Dans notre cas, il a été décidé de créer trois systèmes généraux, un pour chaque poste de travail.



### Opération générale :

Une fois qu'un système a été créé on peut y ajouter des opérations.

Le logiciel permis d'ajouter tous les différents types d'opérations montrées à la *figure 4.10* ; cependant, dans notre travail, nous n'avons utilisé que celles de type général, de chargement et de transfert.

La durée des opérations peut être attribuée dans leurs onglets « Propriétés ».



### Créer un flux de produit :

À l'aide de cette commande on peut créer un flux de produit entre deux systèmes, deux opérations, ou un système et une opération. Ces flux sont indiqués par des flèches bleu foncé.



### Créer un lien de précedence :

Il est possible de créer des contraintes de temps pour spécifier les liens de synchronisation ou de priorité entre les opérations, tout représenté par des flèches turquoise. Les contraintes de temps sont affichées également dans le diagramme Gantt fourni par le logiciel.

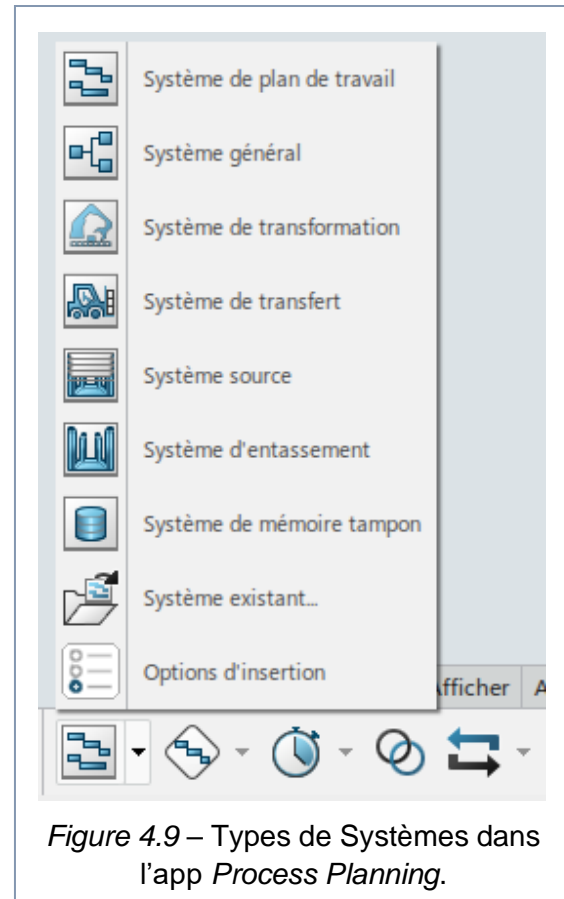


Figure 4.9 – Types de Systèmes dans l'app *Process Planning*.

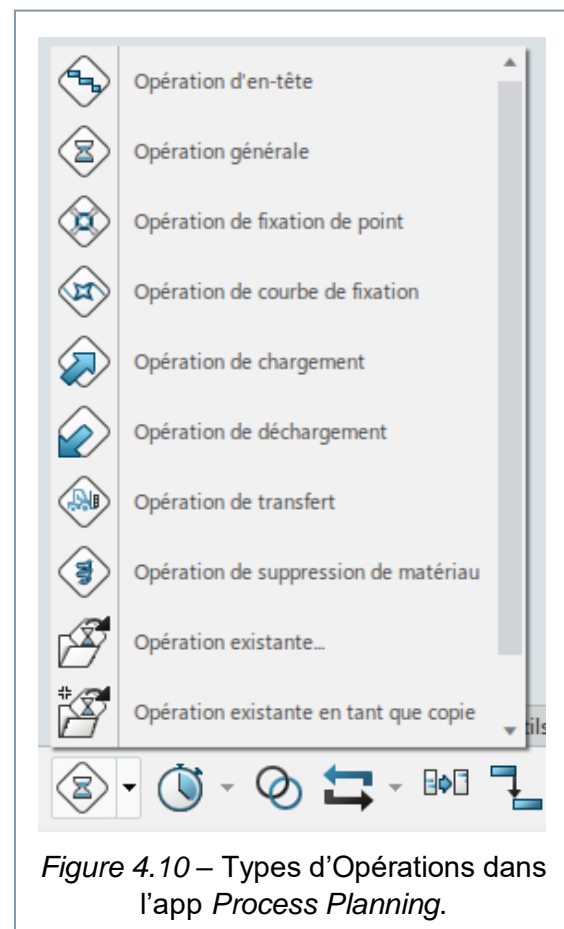


Figure 4.10 – Types d'Opérations dans l'app *Process Planning*.



### Gestionnaire d'affectations :

Cette fonction est identique à celle vue pour l'attribution des produits aux éléments de fabrication. Dans ce cas, elle est utilisée pour affecter les éléments de fabrication aux opérations. Appuyez F5 pour afficher les relations de chaque objet.



### Processus Gantt :

Cette fonction permet d'afficher le diagramme Gantt du processus généré automatiquement par le logiciel. Ce diagramme présente les opérations, la subdivision en systèmes et les contraintes de précedence.



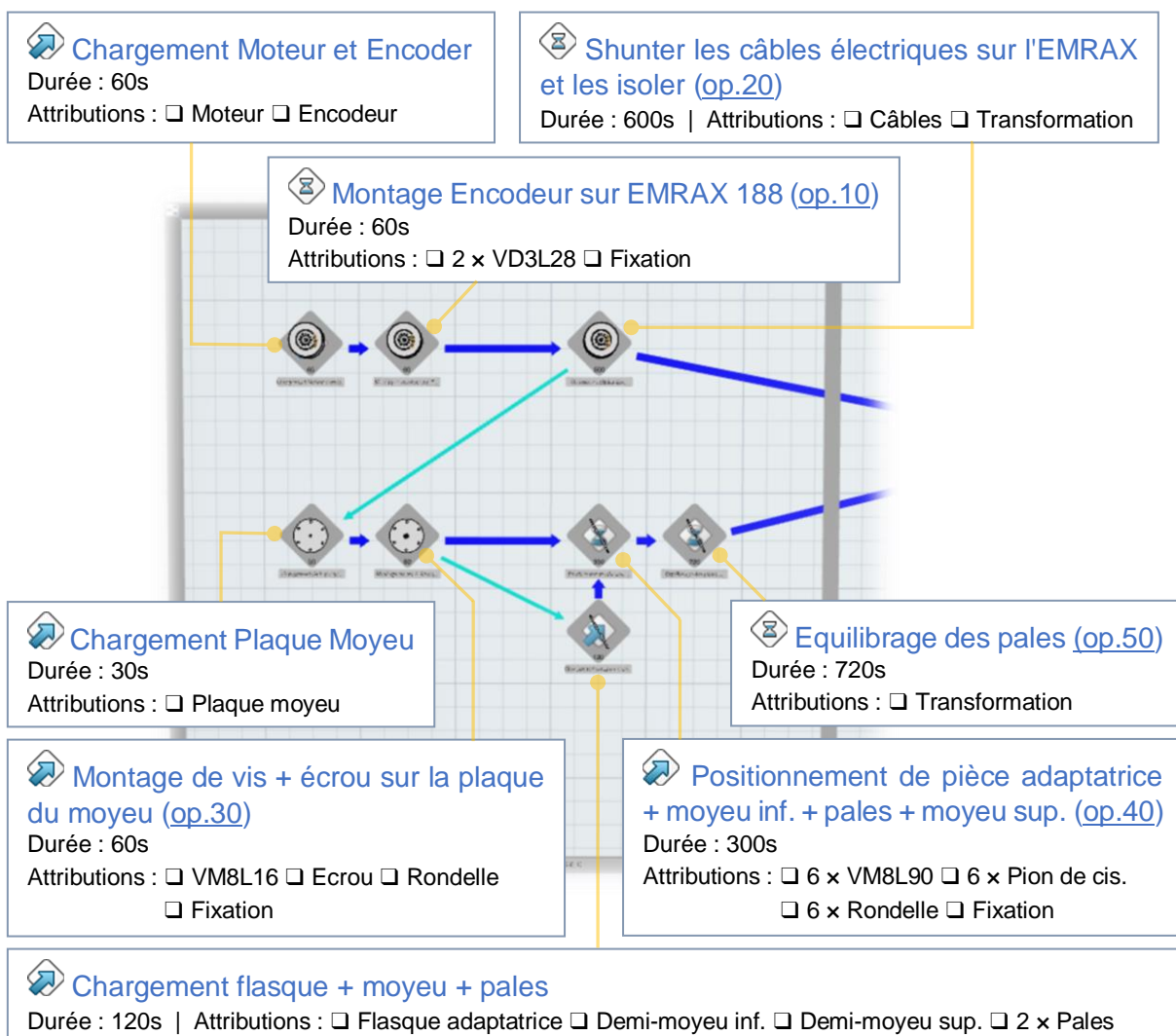
### Equilibrage de la charge de travail :

Grâce à cette commande, il est possible de contrôler la répartition du travail sur les différents systèmes.

### 4.3.3 MODELISATION DE NOTRE PROCESSUS D'ASSEMBLAGE

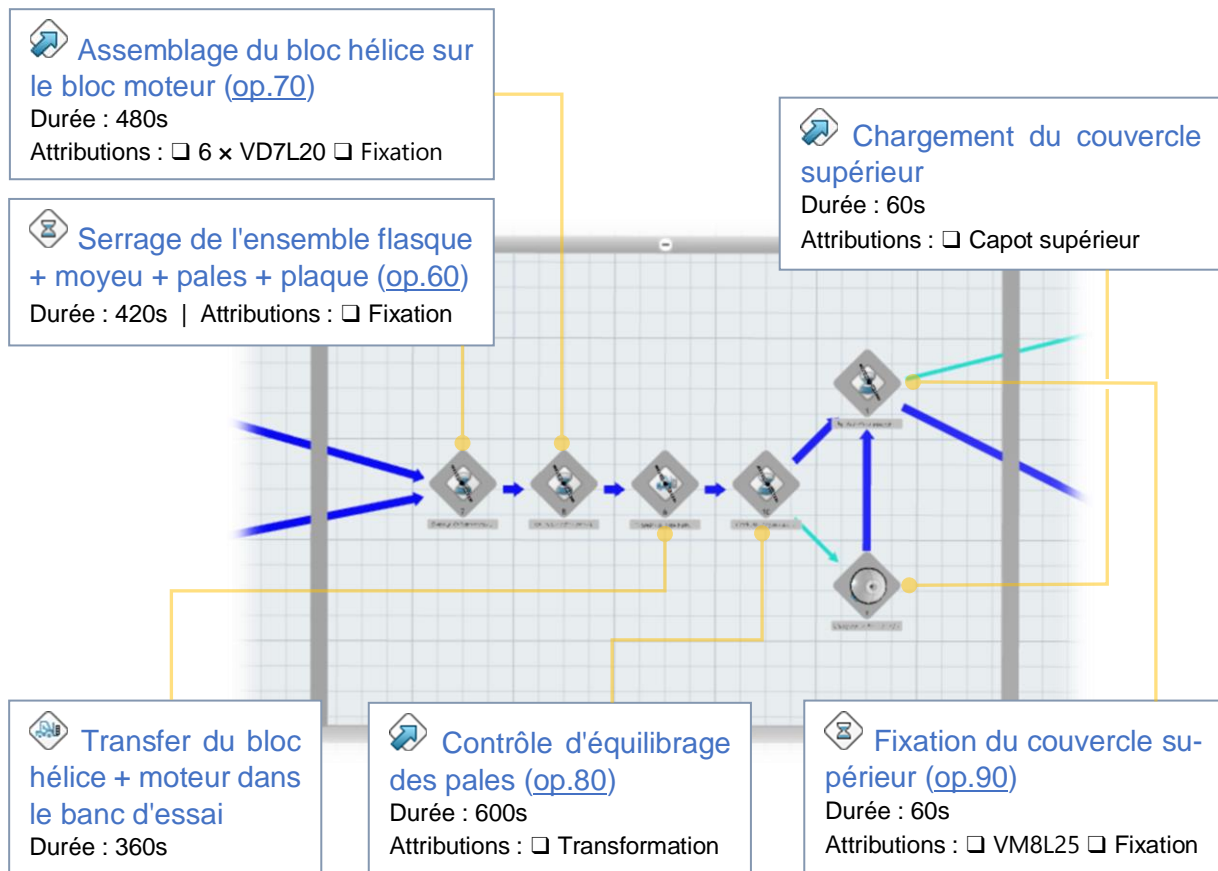
Une première version complète du processus d'assemblage a été créée à partir de la version 5 du MBOM ; elle peut être affichée dans le fichier « Manufactured Item RE (v.5) » avec l'application *Process Planning*. Dans cette version les opérations générales ont été utilisées pour décrire les opérations d'assemblage proprement dites. Les temps de « mise en position » ont été attribués aux opérations de chargement des différentes pièces sur le poste de montage, tandis que les opérations de transfert symbolisent le transport des sous-assemblages d'un poste de travail à l'autre.

Le contenu du fichier est montré et décrit ci-dessous étape par étape parallèlement à la vérification de conformité avec la liste d'opérations développée par l'équipe.



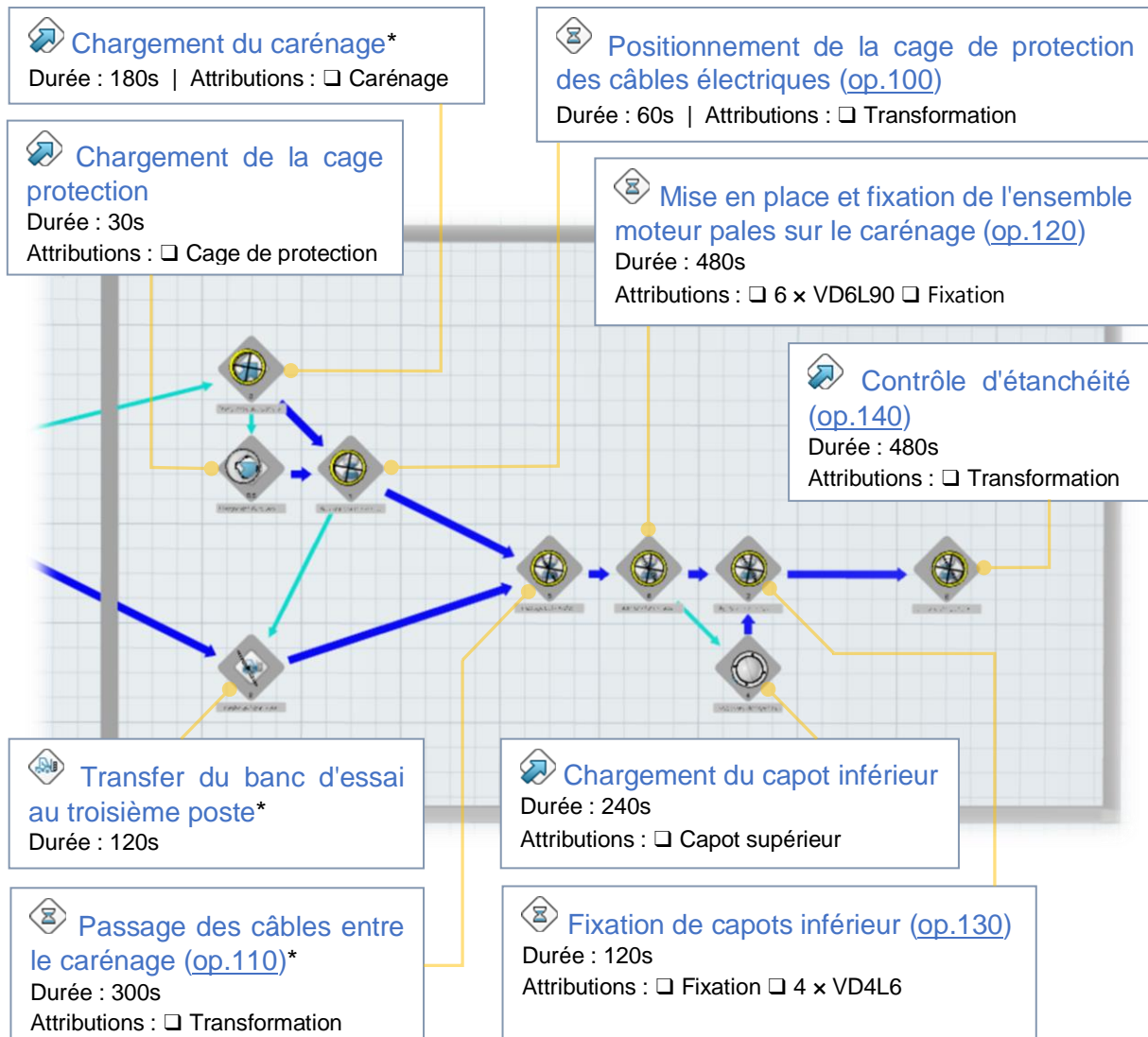
*Observations a posteriori :*

- Avant l'opération 40, une opération de chargement a été créée pour le positionnement des éléments du bloc hélice sur le support, mais cette opération pourrait ne pas être nécessaire puisque l'op. 40 (*Positionnement de pièce adaptatrice + moyeu inf. + pales + moyeu sup.*) est elle-même le chargement des pièces.
- Une opération de rotation du double support performée par les opérateurs 1 ou 2 aurait pu être ajoutée après l'équilibrage des pales (op. 50). Cependant, on a ensuite choisi de modéliser telle opération directement dans les applications d'ergonomie, car il n'y a pas vraiment de pièces d'assemblage impliquées.



*Observations a posteriori :*

- Il serait mieux de diviser l'opération 70 (*Assemblage du bloc hélice sur le bloc moteur*) en deux opérations différentes :
  - transfert du bloc hélice vissé de la table pivotante vers le dessus du moteur,
  - fixation du bloc hélice au bloc moteur par les vis.
- Enfin, il a été décidé de confier les opérations de transport (80 et 100) des sous-ensembles aux opérateurs 2 et 3 en commandant le treuil de façon autonome. Cependant, cette décision laisse en suspens certaines questions, y compris la prise en compte du fait que le treuil ne peut transférer qu'une seule pièce à la fois. D'autres solutions comprennent un opérateur extérieur à la commande du treuil et/ou la présence de deux treuils sur le même échafaudage.



*\*Remarque et observation :*

- La création des opérations « *Chargement du carénage* » et « *Transfer du banc d'essai au troisième poste* » a rendu nécessaire un réarrangement des durées écrites dans la liste des opérations, car ces tâches n'étaient pas été considérées. La solution proposée ici a réparti les 5 minutes de *mise en position* de l'op. 110 sur le chargement du carénage (3 mins) et sur le transport de l'assemblage du banc d'essai au poste n°3 (2 mins). Toutefois, une solution alternative pourrait prévoir que le chargement du carénage soit effectué avec un chariot élévateur conduit par un opérateur externe. Dans ce cas le chargement ne serait pas à inclure dans le présent processus d'assemblage.

Grâce à la fonction « Equilibrage de la charge de travail » il est possible de conduire une analyse de la répartition des opérations sur les différents postes, après ou même avant l'affectation des éléments de fabrication aux opérations.

En fait, cette fonction ne prend en compte que les opérations réparties dans les différents systèmes ainsi que leurs durées et les contraintes qui les unissent. La figure 4.11 montre l'analyse du système présenté ci-dessus.

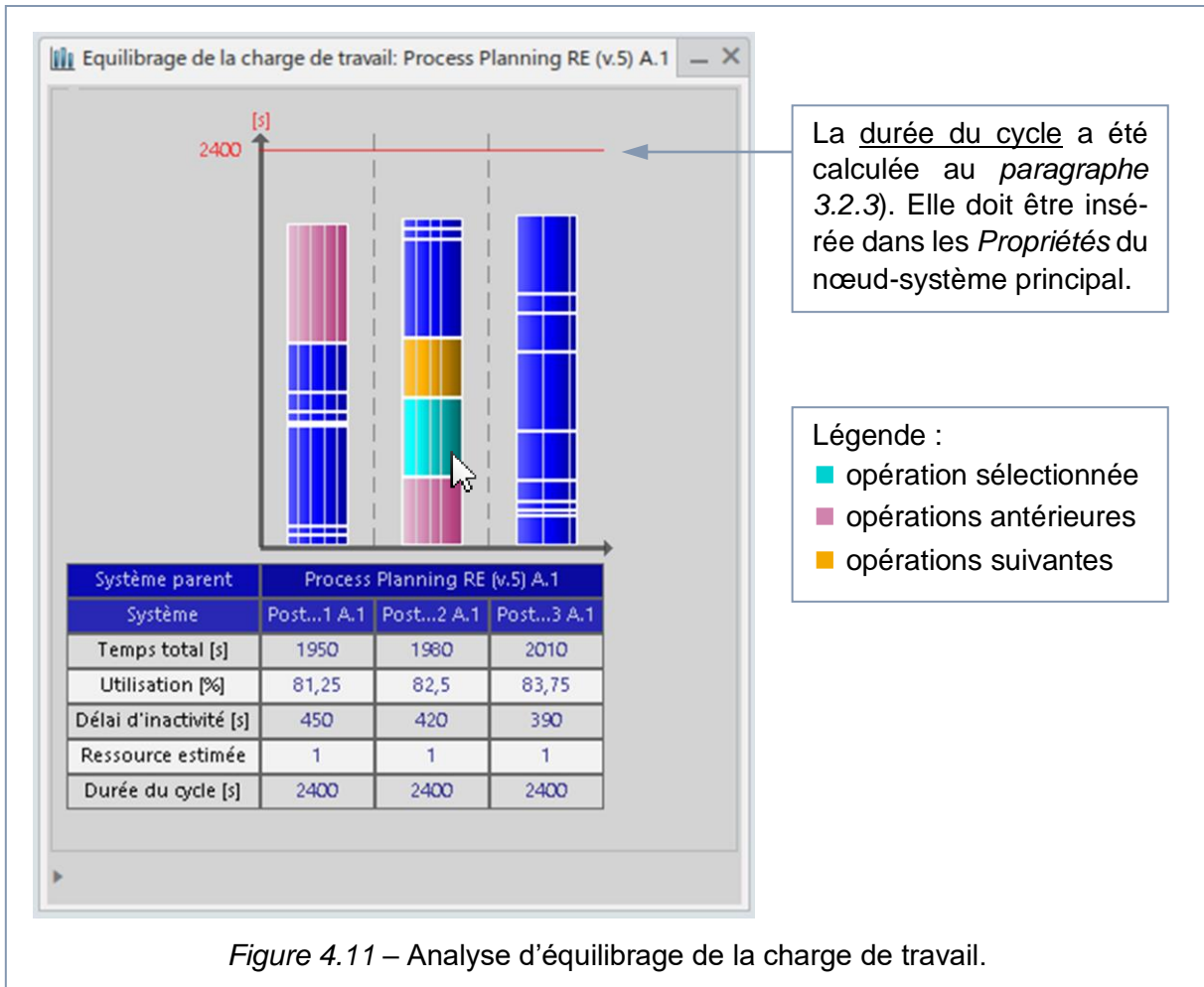


Figure 4.11 – Analyse d'équilibrage de la charge de travail.

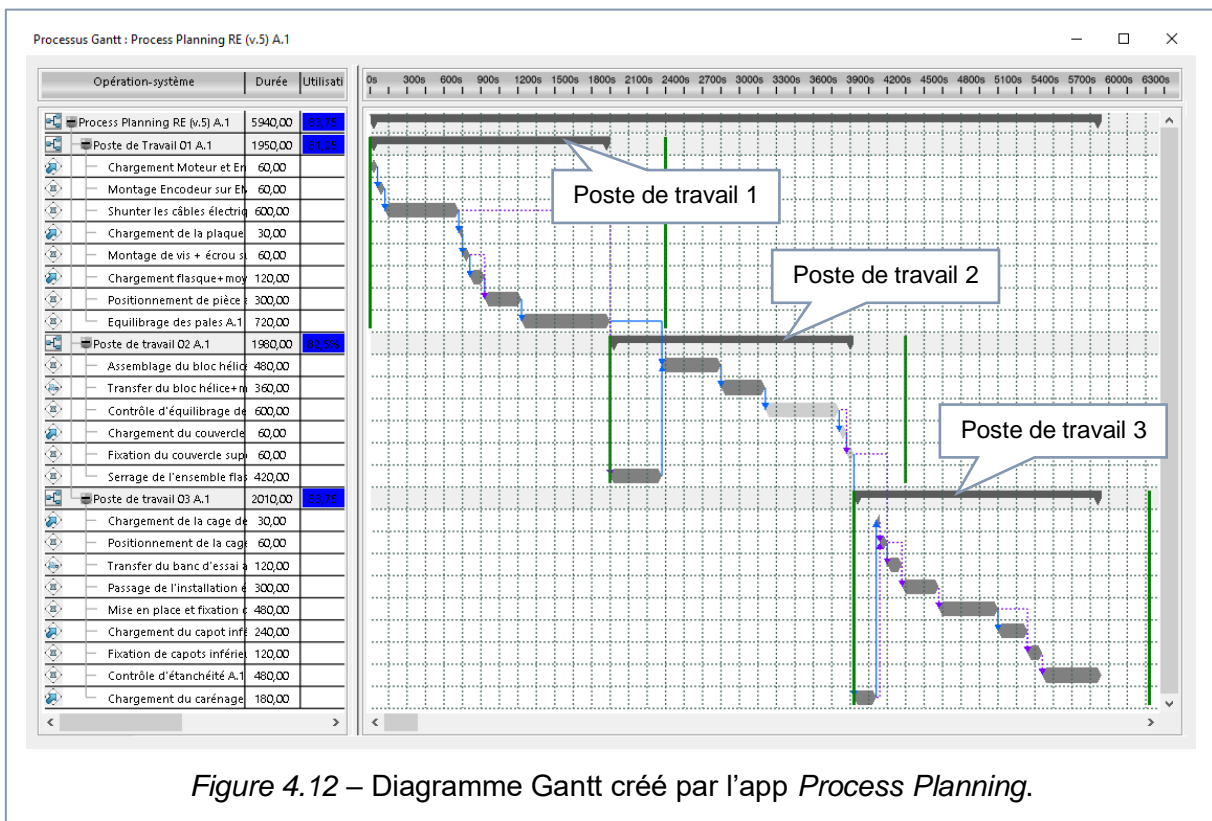


Figure 4.12 – Diagramme Gantt créé par l'app *Process Planning*.



Enfin, la fonction « Processus Gantt » permet de générer un diagramme Gantt comme celui montré à la *figure 4.12*.

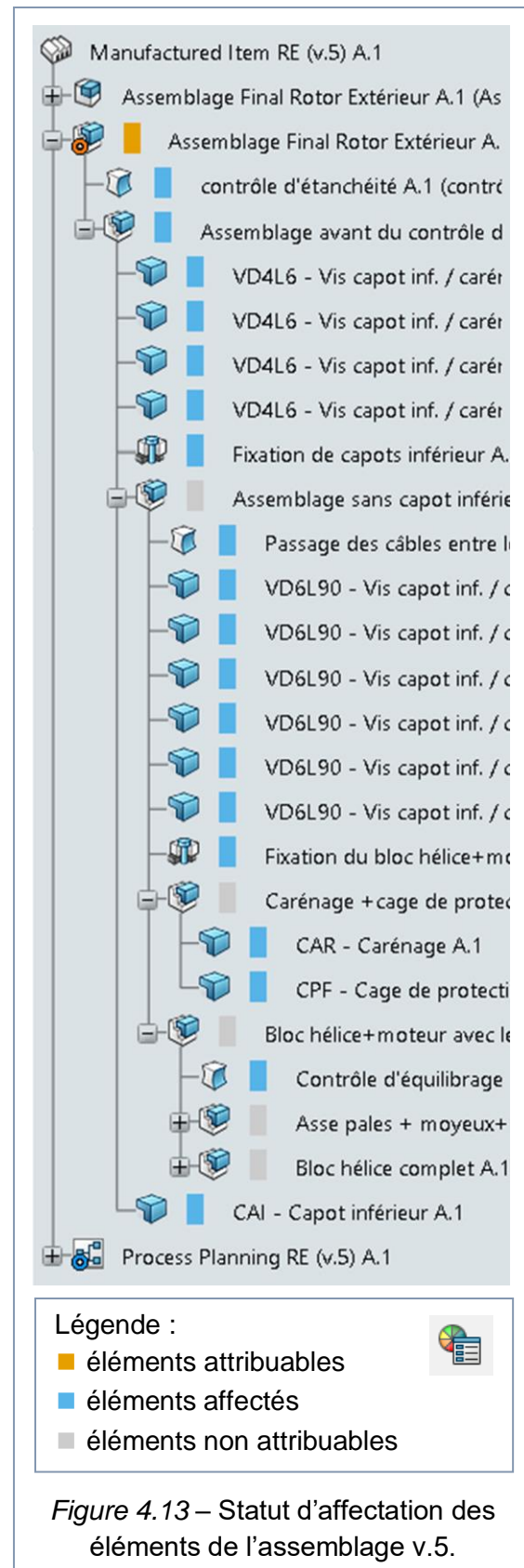
A l'intérieur de celui-ci, on peut voir la répartition des opérations sur les trois postes de travail et les contraintes qui les unissent, tandis que dans le tableau à côté sont affichés les noms des opérations, leur durée, le pourcentage d'utilisation du système, les éléments affectés et d'autres informations. En outre, un clic droit sur l'espace du diagramme permet de le télécharger au format XML

#### 4.3.4 REFERENCE AUX PROBLEMES D'AFFECTATIONS

Au cours de l'affectation des éléments de fabrication aux opérations nous avons relevé un problème grave interne au logiciel.

Ce problème peut être observé clairement dans la *figure 4.13* : une fois que la portée entre le système général et le seul assemblage de fabrication principale a été créée, grâce à l'aide de la commande « B.I. Essentials » on peut observer que tous les sous-assemblages présents dans le MBOM figurent comme *non attribuables*. Cette condition rend évidemment impossible l'affectation correcte de tous les éléments aux opérations correspondantes.

Plusieurs solutions ont été tentées sans toutefois parvenir à résoudre le problème. Elles sont quand même présentées et expliquées en détail au *sous-chapitre 4.5* consacré à la discussion détaillée du problème.





## 4.4 Process Flow Simulation

### 4.4.1 OBJECTIF DE L'APP ET RESULTATS ATTENDUS

La simulation d'événement discret est le processus d'organisation du comportement d'un système complexe comme une séquence ordonnée d'événements bien définis.

Grâce à l'application *Process Flow Simulation* il est possible de visualiser et modifier les systèmes de production dans l'environnement 3D pendant leur phase de conception et, ensuite, l'app permet d'évaluer et affiner ces systèmes de production lors de leur analyse de faisabilité et de performance.

En ouvrant le PPR contexte avec l'app *Process Flow Simulation* on peut voir qu'aucun nouveau fichier n'a été ajouté. En fait le travail est exécuté sur le même fichier-nœud créé et modélisé avec l'app *Process Planning*, comme le montre la *figure 4.14*.

### 4.4.2 FONCTIONS PRINCIPALES

Les fonctions de l'application *Process Flow Simulation* sont pour la plupart identiques à celles du *Process Planning*, à l'exception de certains types supplémentaires d'opérations qu'il est maintenant possible d'insérer dans le fichier.

En observant la *figure 4.15* on peut remarquer en particulier les nouvelles opérations « source », « de mémoire tampon » et « d'entassement », qui sont fondamentaux

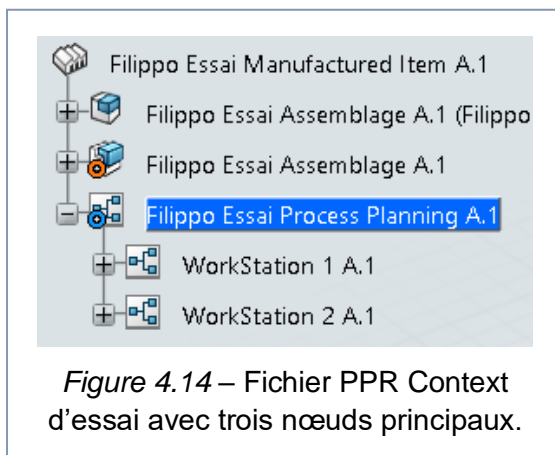


Figure 4.14 – Fichier PPR Context d'essai avec trois nœuds principaux.

afin de gérer les flux de produits en entrée et en sortie. Ces nouvelles opérations ne peuvent être ajoutées que dedans leurs systèmes contextuels.

### Préférences de simulation du système de production :

Cette commande, placée au centre du côté gauche de l'écran, vous permet de modifier les paramètres de simulation ainsi que les préférences de suivi et d'analyse dynamique des flux de produits entre les systèmes.

La *figure 4.16* montre l'onglet « Options de simulation ». Il faudrait remarquer en particulier la coche « Activer la création automatique de sources et de puits », puisqu'elle a nous permis enfin de résoudre des problèmes rencontrés lors de la création des systèmes sources.

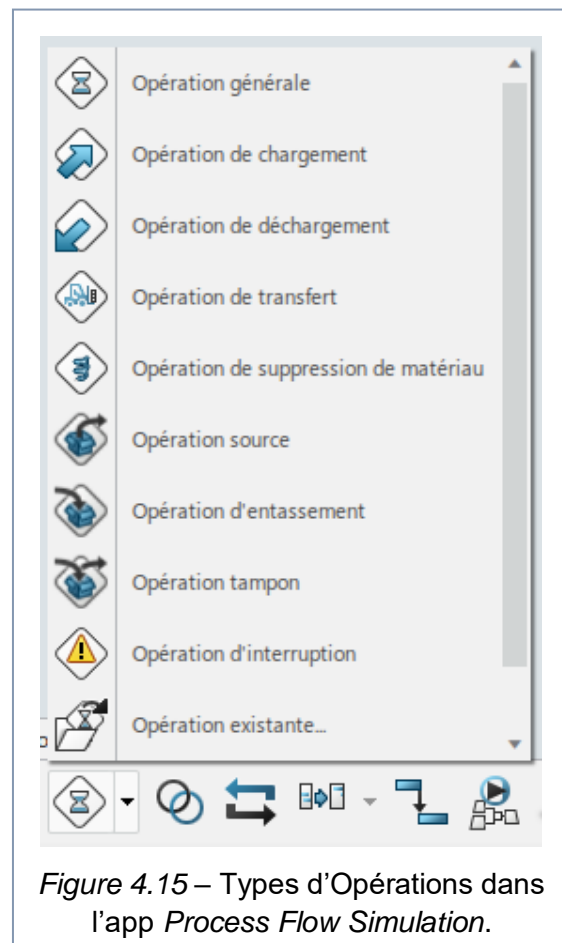


Figure 4.15 – Types d'Opérations dans l'app *Process Flow Simulation*.

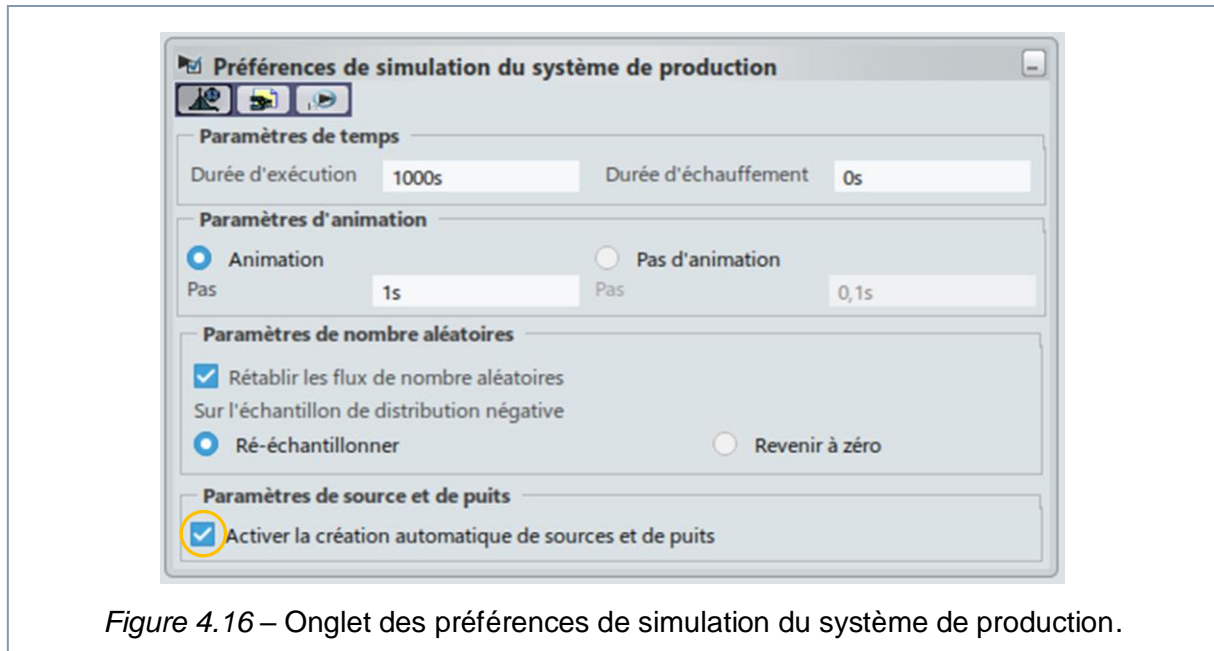


Figure 4.16 – Onglet des préférences de simulation du système de production.



Enfin, la commande « Lecture » au centre de la boussole 3D EXPERIENCE permet de démarrer la simulation une fois que le nœud-système principal est sélectionné.

#### 4.4.3 ETUDE D'UN FICHER D'EXEMPLE PRET A LA SIMULATION

Dans le fichier « *exercice1 - PROCESS FLOW SIMULATION* » chargé sur la plateforme 3Dexp nous avons pu observer que :

1. Les objets attribués aux opérations en tant que inputs et outputs sont en fait les produits physiques liés aux éléments de fabrication affectés, et non les éléments eux-mêmes. En outre, tous les sous-assemblages réels apparaissent dans l'arbre des produits physiques en tant que produits individuels.
2. Il est important que les *Instance Names* ne soient pas effacés et qu'ils reflètent bien la pièce à laquelle ils appartiennent. En effet, ils sont ceux qui vont figurer dans le tableau des relations ou en appuyant F5 (dans ces cas les produits sont appelés « pièces », comme le montre la figure 4.17).
3. Chaque opération a un seul élément de la MBOM affecté, qu'il soit une pièce fournie ou un assemblage de fabrication.
4. Chaque pièce qui entre dans la simulation est affectée à son opération source et, après, à son opération de chargement dans le système générale. Pareillement, les assemblages intermédiaires et ceux qui sortent sont affectés aux opérations que les produisent, que

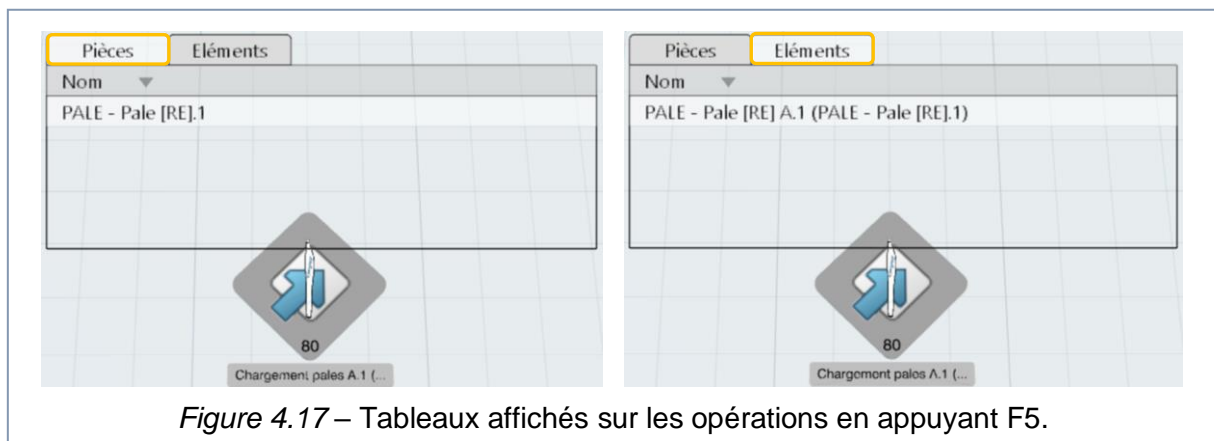
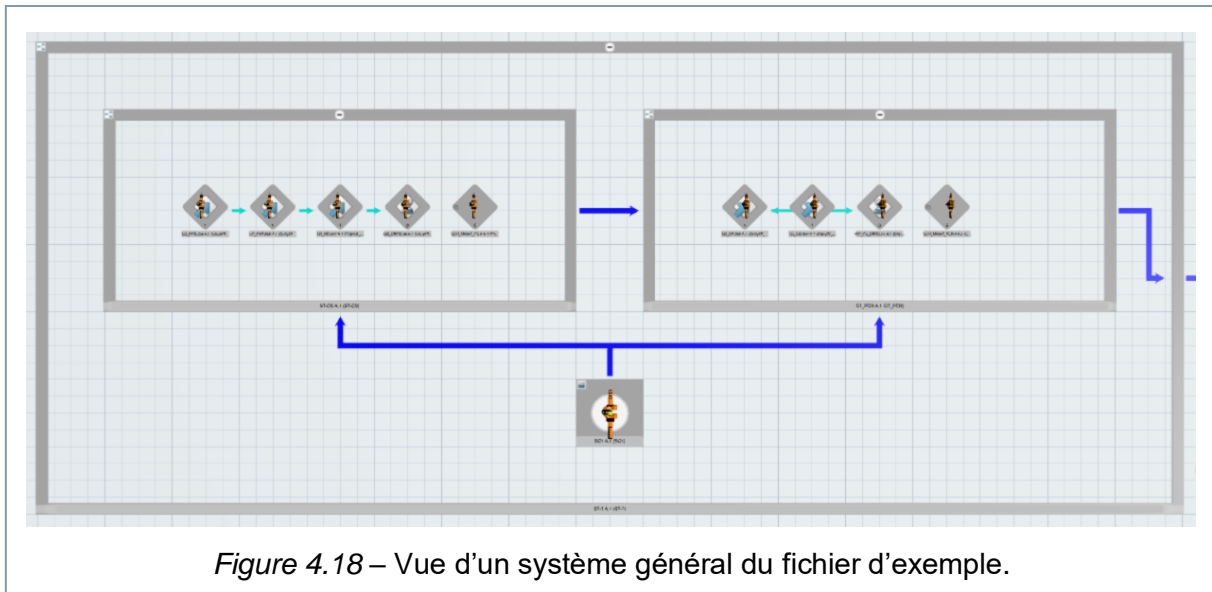


Figure 4.17 – Tableaux affichés sur les opérations en appuyant F5.



les traitent et, enfin, à leurs opérations d'entassement. Pour les sous-assemblages il n'y a pas d'opérations de chargement.

5. Les systèmes source, de mémoire tampon et d'entassement ne sont pas expansibles, donc le réglage des opérations contenues dans eux doit être fait par l'onglet « Définir les opérations », affichable grâce au menu contextuel (clic droit) des systèmes.
6. Enfin, à l'intérieur des systèmes il n'y que des contraintes de précedence, tandis que les flux de produits ne sont créés que entre les systèmes comme le montre la *figure 4.18*.

Pour ce qui concerne la méthode de construction de la MBOM, il est possible d'observer que le diagramme de fabrication du fichier d'exemple est tout à fait similaire à

notre MBOM v.3 décrit au *paragraphe 4.2.4*.

#### 4.4.4 MISE EN PLACE D'UNE SIMULATION DE TEST

















La recherche d'une méthode de simulation pour notre assemblage a requis des attentives activités de test. Toutes ces activités ont été menées sur des fichiers d'essai simplifiés (dont l'assemblage est montré à la *figure 4.19*), de manière à ne pas corrompre les fichiers de travail principaux concernant l'assemblage de l'entier rotor extérieur.

Il a également été envisagé de prendre comme exemple la modélisation présentée par les fichiers téléchargés de la plateforme *3DS Learning Space*.

Une fois que toutes les informations énumérées au paragraphe précédent ont été enregistrées, nous avons procédé avec la définition de notre système de test.

En premier lieu, la liste des opérations circoscrite à l'assemblage réduit a été modifiée et écrite plus en détail de manière à pouvoir être effectivement simulable une

fois qu'elle est implémentée dans le système. Cette liste est présentée dans le tableau ci-après.

Opération	Temps op.	Élément affecté
 Chargement plaque moyeu	10s	PQM
 Chargement écrou	10s	EM8
 Chargement vis centrale	10s	VM8L16
 Vissage de vis centrale plus l'écrou centrale sur la plaque du moyeu	60s	Assy plaque
 Chargement flasque adaptatrice	40s	FAD
 Chargement demi-moyeu inférieur	40s	DM1
 Chargement pales	160s	PALE.1, PALE.2
 Chargement demi-moyeu supérieur	40s	DM2
 Chargement des 6 vis de fixation	100s	VM8L90 (toutes le 6)
 Chargement des 6 pions de cisaillement	100s	PCIS (toutes le 6)
 Vissage des 6 boulons autour du moyeu	360s	Assy hélice
 (Transfert vers un autre système. on n'est pas sûr que cette op. soit effectivement à ajouter)	120s	Assy hélice
 Equilibrage des pales	600s	Assy hélice
 Chargement capot supérieur	30s	CAS
 Chargement vis centrale	30s	VM8L25
 Fixation de couvercle supérieur	60s	Produit fini

Par la suite, le MBOM de l'assemblage a été créé sur le modèle de la v.3 grâce à l'application *Manufactured item Defintion*. On s'est assuré qu'à l'intérieur du diagramme apparaissent tous les sous-assemblages appelés dans la liste des opérations, à savoir *Assy plaque*, *Assy hélice* et le *Produit fini*.

À ce point, nous avons commencé à implémenter les opérations dans le système digital avec une utilisation combinée des applications *Process Planning* et *Process Flow Simulation*.

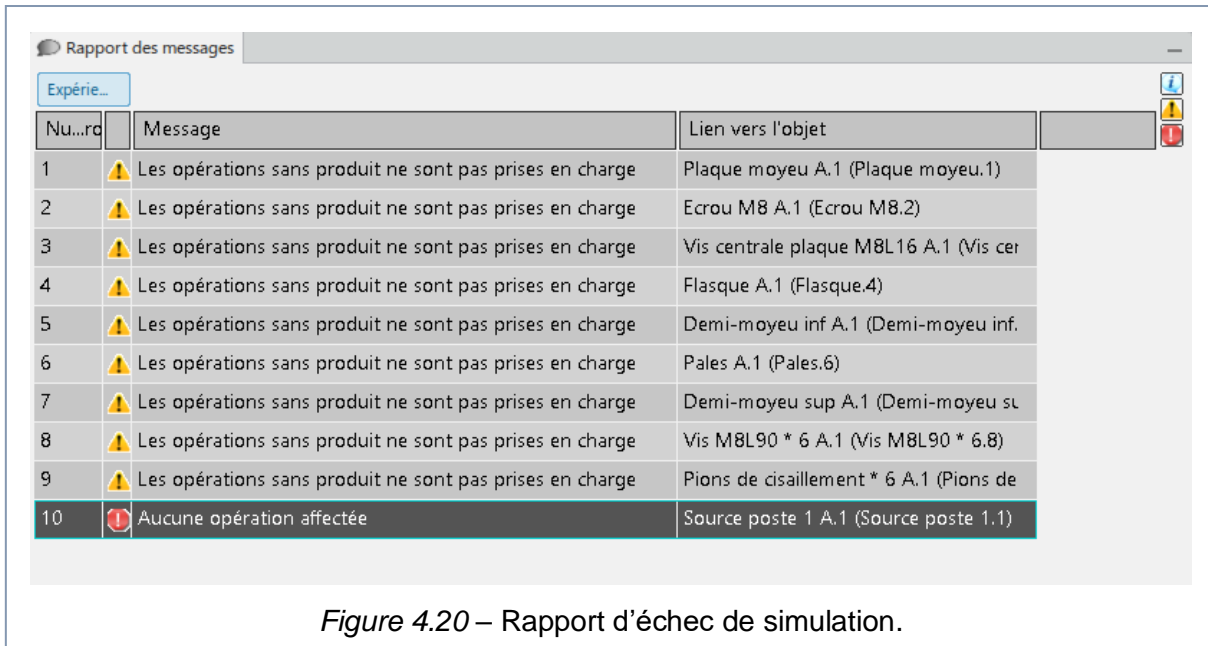
Les opérations générales et de chargement ont été créés dans les systèmes généraux et à chacune d'elles sa durée a été attribuée.

Puis il a été le tour des systèmes source et d'entassement complétés avec leurs opérations contextuelles. Les paramètres de ces opérations doivent être définis dans le panneau « Définir les opérations » auquel on peut accéder en cliquant droit sur le système d'appartenance.

Enfin, les flux de produits et les contraintes de précédence ont été ajoutés comme l'on a observé dans le fichier d'exemple.

Au moment d'affecter les éléments de fabrication aux opérations deux graves problèmes au sein du logiciel ont été relevés :

- Le premier problème concerne l'impossibilité de définir les produits sortant des opérations *source*. En fait, en lançant la



simulation le logiciel reporte les messages d'erreur de la *figure 4.20* et arrête la simulation.

- Le second problème a déjà été mentionné dans le *paragraphe 4.3.4* et concerne l'impossibilité d'affecter les sous-assemblages intermédiaires du MBOM aux opérations.

#### 4.4.5 RECHERCHE D'UNE SOLUTION AU PROBLEME DES SOURCES

Nous avons d'abord réalisé une étude comparative entre notre fichier et le fichier d'exemple présenté au *paragraphe 4.4.3*. Il a été remarqué la possibilité d'afficher la colonne « Processus » à l'intérieur du panneau « Définir les opérations », laquelle était précédemment cachée et indique les éléments de fabrication associés aux opérations. Comme le montre la *figure 4.21*, dans notre cas elle est vide bien que les

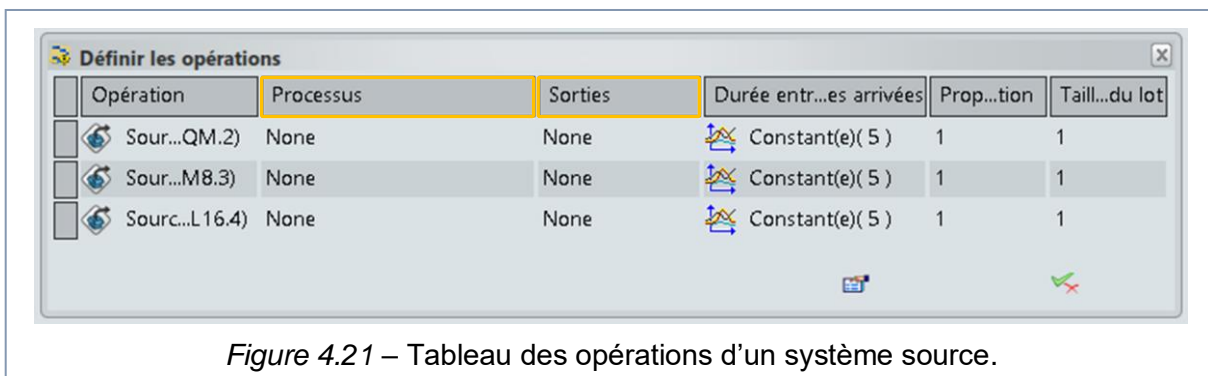
éléments aient été correctement attribués par la « Gestionnaire d'affectations ».

Ne pouvant trouver aucune différence entre la configuration de notre fichier et celle du fichier d'exemple, nous avons conclu qu'il s'agit d'un problème du logiciel.

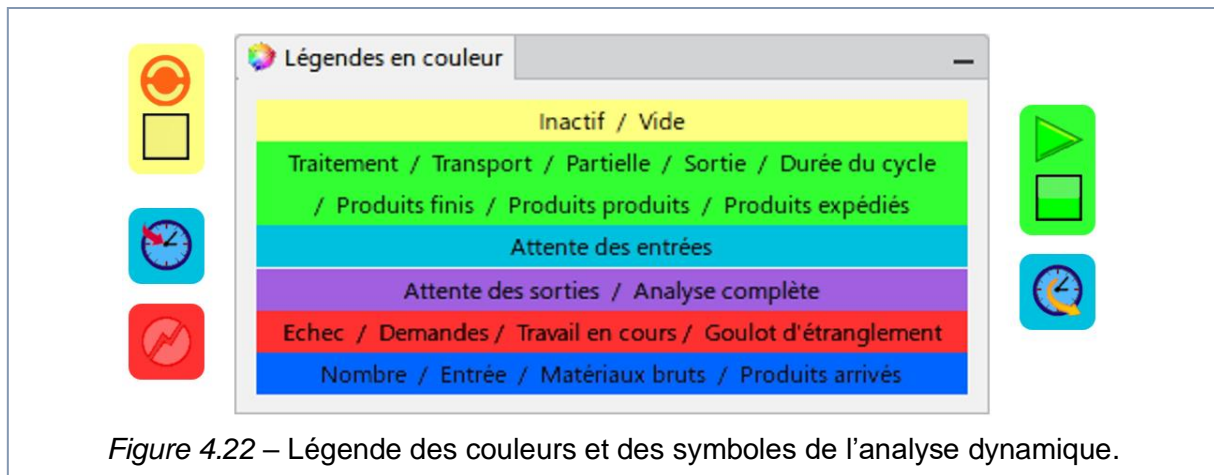
Cependant, grâce à une recherche sur le web nous avons finalement pu surmonter le problème en cochant l'option « Activer la création automatique de sources et de puits », dans le panneau des préférences de simulation (voir la *figure 4.16*).

Ce choix nous a permis de lancer la simulation sans avoir à créer de systèmes source ou d'entassement, qui ont donc été supprimés.

Ce faisant, il est possible de lancer la simulation pour des petits assemblages où le deuxième problème mentionné au paragraphe précédent n'est pas rencontré.







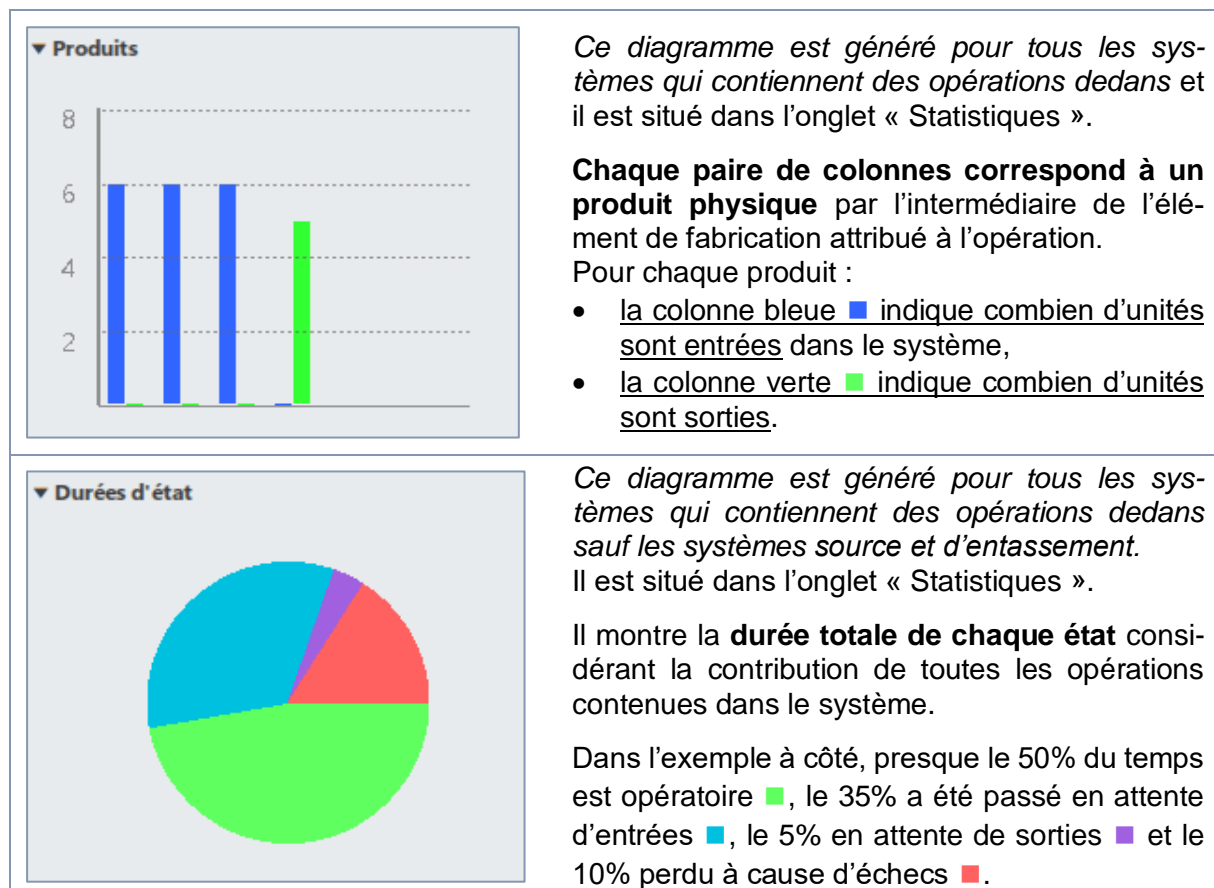
#### 4.4.6 ANALYSE DYNAMIQUE DU SYSTÈME PENDANT LA SIMULATION

Pendant la simulation il est possible d'afficher les diagrammes qui concernent l'état du système avec des mises à jour dynamiques.

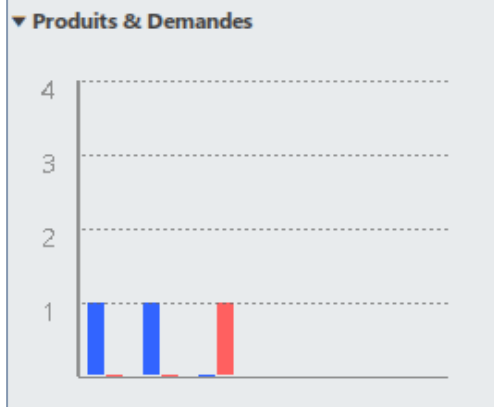
Plusieurs diagrammes peuvent être ouverts et positionner dans l'écran au même temps. Ils contiennent des informations différentes selon le type de système analysé et, lorsque la simulation est redémarrée, ils conservent leurs positions.

Avant de continuer, il faut d'abord connaître la signification des couleurs et des symboles adoptés par le logiciel qui ont été reportés et décrits à la figure 4.22.

Après avoir démarrée la simulation il suffit de cliquer sur un système dans l'arbre pour afficher ses diagrammes d'analyse dynamique. Huit différents types de diagramme peuvent être affichés en fonction de la nature du système sélectionné :



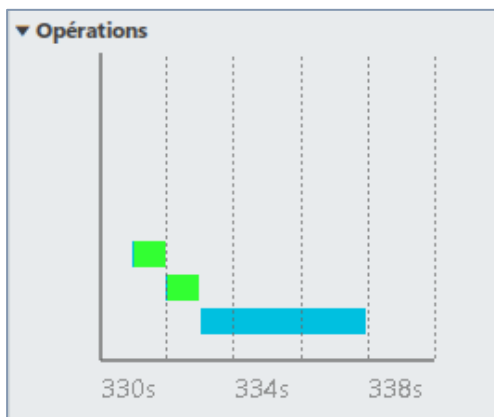




Ce diagramme est généré pour tous les systèmes qui contiennent des opérations dedans. Il est situé dans l'onglet « Etat du système ».

Chaque paire de colonnes correspond à une opération contenue dans le système, et pour chaque opération :

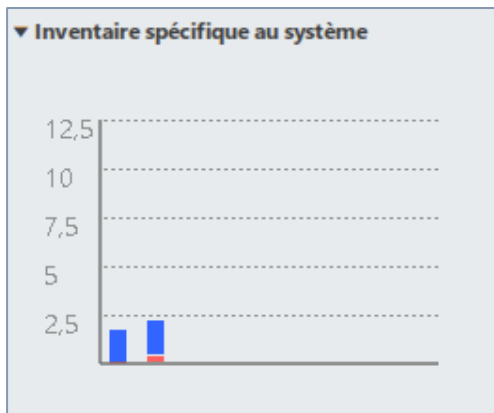
- la colonne bleue ■ indique combien d'unités sont prêtes au moment à avancer dans la ligne,
- la colonne rouge ■ indique combien d'unités sont demandées au moment pour avancer dans la ligne.



Ce diagramme est généré pour tous les systèmes qui contiennent des opérations dedans. Il est situé dans l'onglet « Etat du système ».

Il est une représentation dynamique du Diagramme Gantt concernant le système sélectionné, où les couleurs indiquent la façon dont le temps est passé.

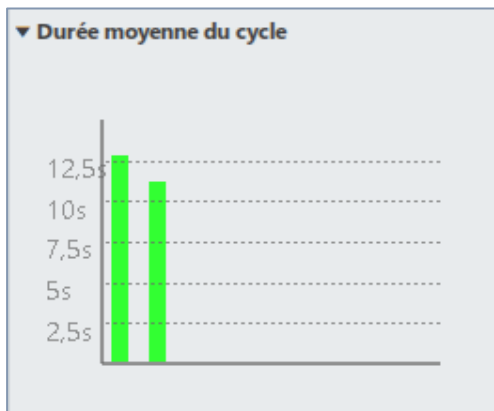
(■ temps opératoire de traitement, ■ temps passé en attente d'entrées.)



Ce diagramme est généré pour les systèmes généraux qui regroupent d'autres systèmes et il est situé dans l'onglet « Statistiques ».

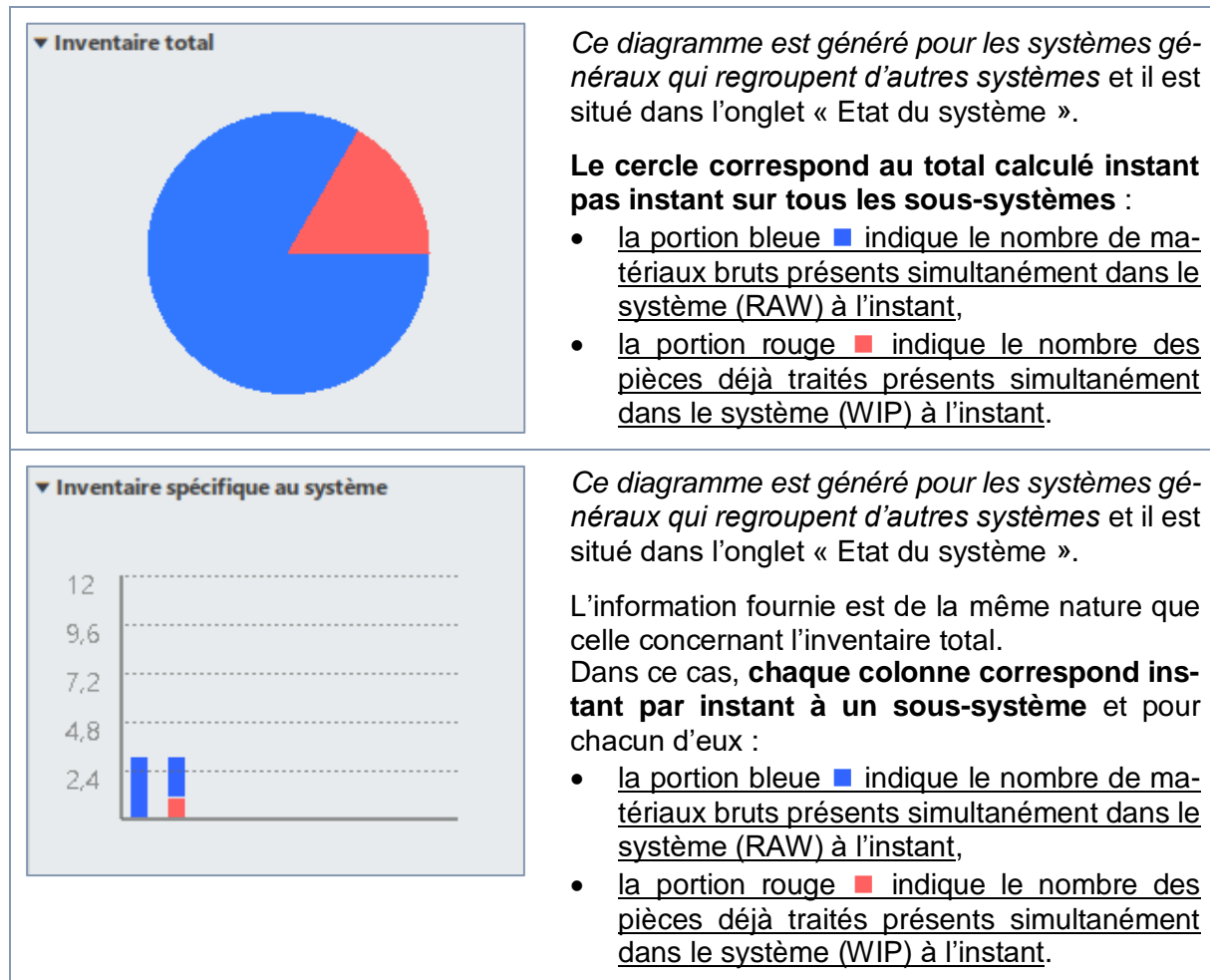
Chaque colonne correspond à un sous-système et pour chacun d'eux :

- la portion bleue ■ indique le nombre moyen de matériaux bruts présents simultanément dans le système (RAW) pendant le cycle courant et ceux passés,
- la portion rouge ■ indique le nombre moyen des pièces déjà traitées présents simultanément dans le système (WIP) pendant le cycle courant et ceux passés.



Ce diagramme est généré pour les systèmes généraux qui regroupent d'autres systèmes et il est situé dans l'onglet « Statistiques ».

Chaque sous-système est représenté par une colonne indiquant le nombre de cycles et leur temps moyen.



## 4.5 Analyse du problème avec la création des Portées

### 4.5.1 ENCADREMENT DU PROBLEME

Nous avons décidé de consacrer un sous-chapitre entier au problème des portées puisqu'il s'est révélé assez complexe et la recherche d'une solution a nécessité un travail minutieux, bien qu'il n'ait pas abouti à un résultat satisfaisant.

Comme indiqué plus haut, le problème en question est rencontré dans les applications *Process Planning* et *Process Flow Simulation* lorsqu'on essaie d'affecter les sous-assemblages intermédiaires aux opérations.

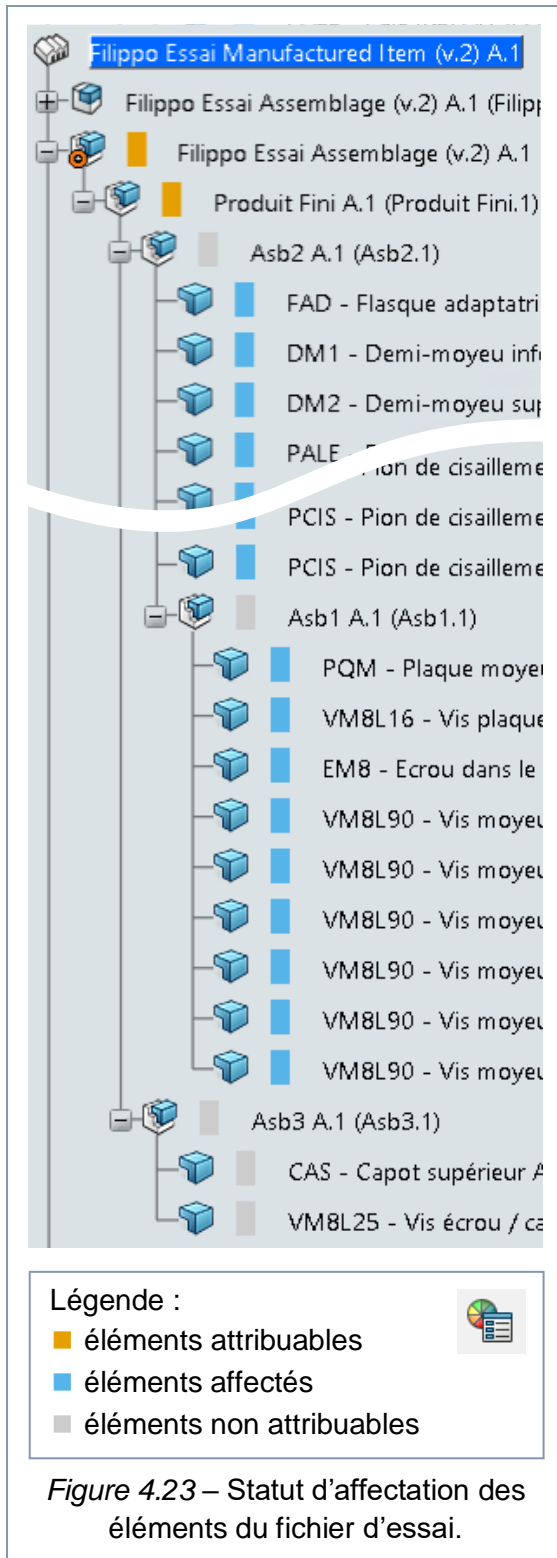
Tout le travail de recherche documenté ci-après a été effectué sur le fichier de test déjà introduit au *paragraphe 4.4.4*, dont la maquette est montrée à la *figure 4.19*.

En premier lieu, il sera traité le cas déjà introduit au *paragraphe 4.3.4* : création d'une seule portée entre le système général et l'assemblage de fabrication global.

En vérifiant le statut d'affectation des produits par la fonction « B.I. Essentials », on observe à nouveau que les sous-assemblages ne sont pas attribuables. La *figure 4.23* montre en particulier que les assemblages *Asb2*, *Asb1*, *Asb3* et les parties filles de ce dernier sont marquée comme *non attribuables*.

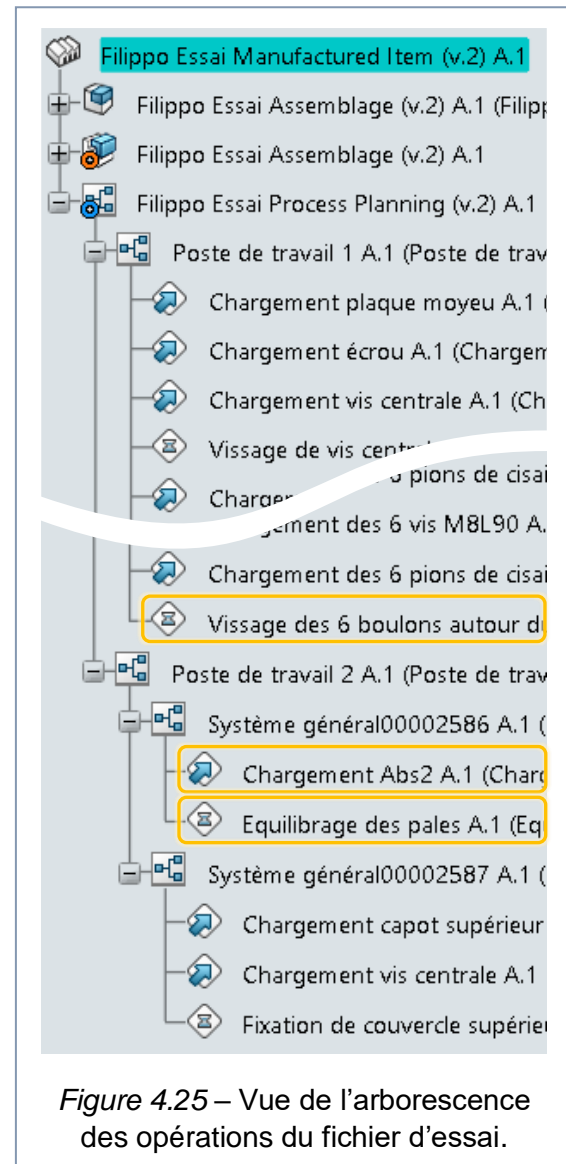
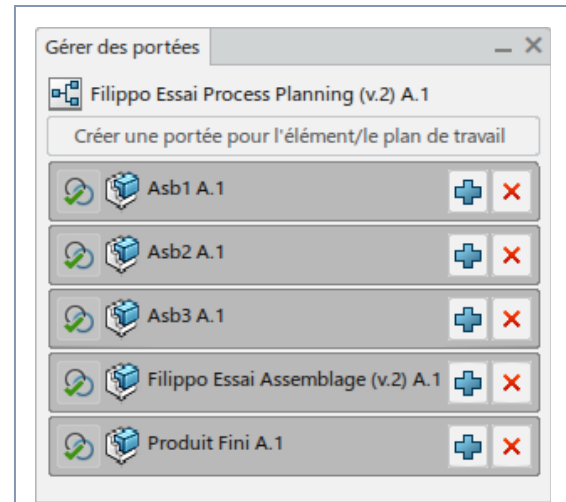
### 4.5.2 CREATION DE PLUSIEURS PORTEES DEDIEES

Parmi les plusieurs tentées, la solution la plus prometteuse envisageait la création d'une portée dédiée pour chacun des sous-



assemblages (comme le montre la *figure 4.24*).

Toutefois, il a été constaté par la suite qu'avec cette solution tous les sous-assemblages intermédiaires ne peuvent être affectés qu'une fois.



Cette limitation rend impossible l'implémentation de notre montage dans la simulation, car comme montré à la *figure 4.25*, certaines étapes de la ligne telles que l'*équilibrage des pales* nécessitent forcément qu'un même sous-assemblage soit affecté à plusieurs opérations.

#### 4.5.3 COMPARAISON AVEC LE FICHIER D'EXEMPLE

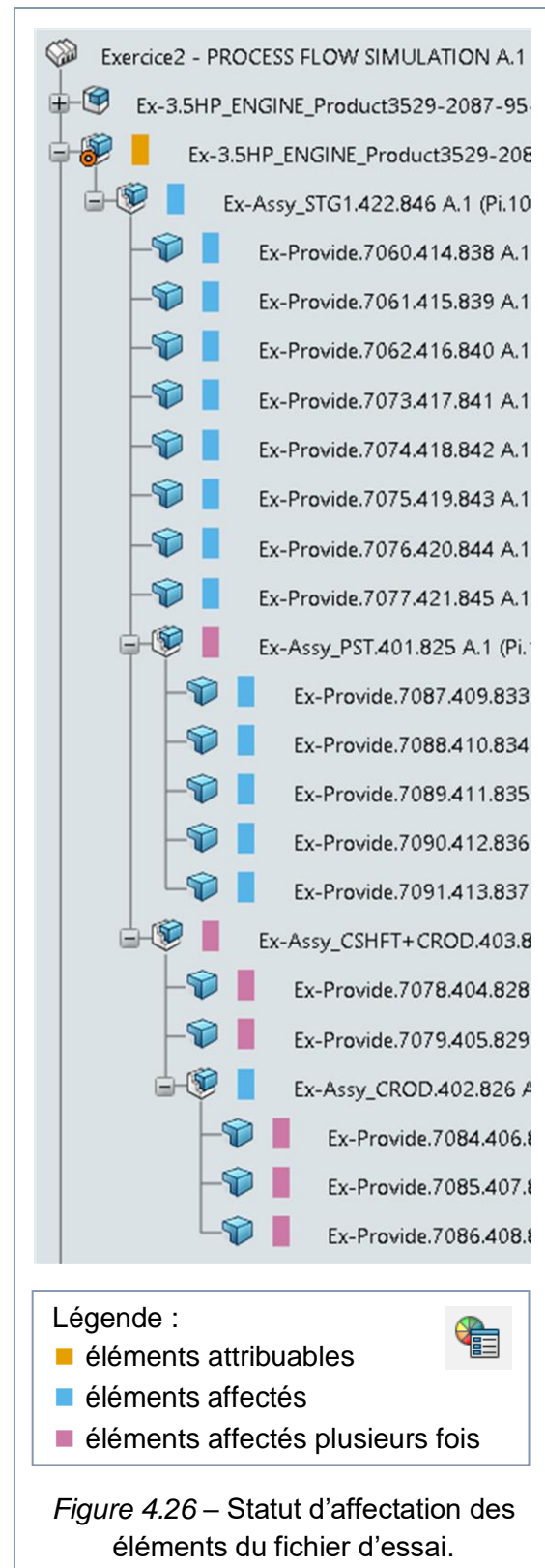
Le fichier d'exemple introduit au *paragraphe 4.4.3* (téléchargés depuis le tutoriel « *DELMIA Process Flow Simulation Essentials* ») ne présente pas les problèmes énumérés ci-dessus.

En effet, bien que la seule portée soit celle entre le système général et l'assemblage de fabrication global, les éléments de fabrication sont tous attribuables plusieurs fois (comme le montre la *figure 4.26*).

Afin de trouver une possible solution, nous avons mené une étude comparative entre le fichier réalisé par nous et le fichier d'exemple. Néanmoins, nous n'avons pu trouver aucune différence significative entre les deux fichiers :

- les deux MBOM sont construits avec les mêmes éléments et la même logique de conception ;
- il n'y a aucune différence au niveau des préférences des applications (celles générales, auxquelles on accède depuis la barre supérieure de la fenêtre de la 3Dexp);
- aucun changement n'a été parvenu par la réorganisation de l'assemblage (avec l'app *Assembly Design*) de façon à avoir tous les sous-assemblages intermédiaires sous forme de produits physiques.

En conclusion, nous pouvons supposer que le problème est interne au logiciel et qu'il n'est pas possible de le résoudre avec les moyens dont nous disposons.



## Chapitre 5

### CONCEPTION DE L'ATELIER NUMERIQUE

#### 5.1 Plant Layout Design

##### 5.1.1 OBJECTIF DE L'APP ET RESULTATS ATTENDUS

Grâce à l'application *Plant Layout Design*, il est possible d'arriver à concevoir une usine de fabrication virtuelle ou tout autre type d'installation numérique.

Un avant-projet ou un projet conceptuel d'une usine peut être rapidement réalisé afin de l'examiner et de le valider à partir des catalogues existant dans DELMIA et des machines spéciales déjà créées dans l'espace collaboratif. La conception peut ensuite être étendue, développée et modifiée au fur et à mesure de la conception de l'usine.


Les étapes fondamentales pour concevoir une usine sont les suivantes :


- Tout d'abord, il faut créer une empreinte (plan 2D) détaillée de l'usine à l'échelle réelle en utilisant l'app CATIA 2D *Layout for 3D Design*.
- Une fois cela fait, on passe à l'app DELMIA *Plant Layout Design* pour insérer et paramétrer toutes les ressources de l'atelier dans leurs zones prédéfinies sur l'empreinte. En particulier, on va ajouter les machines, les éléments de stockage, les opérateurs, les moyens de transfert, etc.
- Donc on peut insérer toutes les pièces mécaniques à utiliser dans l'usine ainsi que l'outillage nécessaire.


- Enfin, on peut examiner et valider l'usine construite, puis passer à la simulation de celle-ci à l'aide des autres modules de DELMIA.

##### 5.1.2 FONCTIONS PRINCIPALES

La *figure 5.1* montre les deux barres principales de l'app *Plant Layout Design* qui contiennent ses fonctions les plus importantes. Voici d'abord quelques fonctions de la barre « Création des ressources » :

 **Créer / Éditer l'empreinte :**  
Cette fonction permet de créer, éditer et supprimer l'empreinte (le plan 2D) de l'usine.

 **Insérer une ressource ou un produit existant :**  
Cette fonction permet d'insérer les ressources ou les produits dans l'usine à partir de l'espace collaboratif.

 **Paramètre de ressource :**  
Au moyen de cette fonction il est possible de modifier les paramètres d'une ressource standard, telles que les bancs et les étagères, à condition qu'elles soient équipées de grandeurs paramétriques (dimensions, élévation, nombre d'étages, etc.). Voir la *figure 5.2* à titre d'exemple.

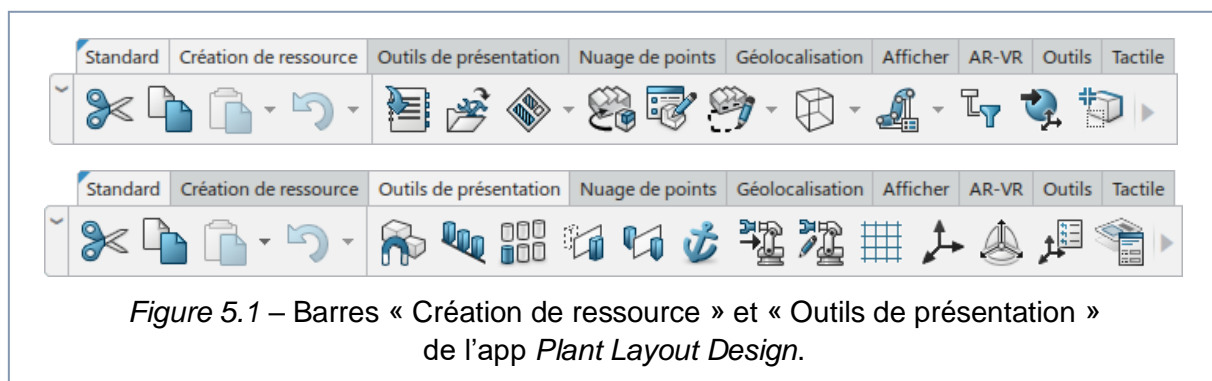


Figure 5.1 – Barres « Création de ressource » et « Outils de présentation » de l'app *Plant Layout Design*.



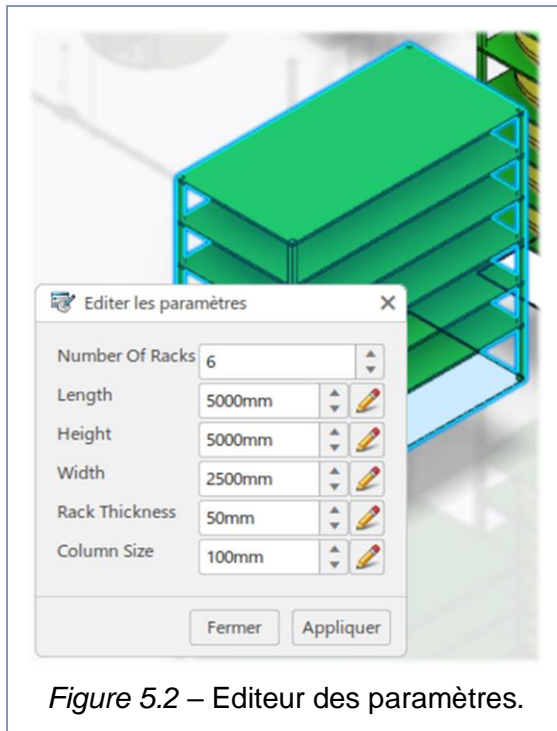


Figure 5.2 – Editeur des paramètres.



### Ouvrir le navigateur de catalogues :

Les catalogues sont des collections de modèles CAO de différents genres très utiles à l'utilisateur pour compléter son usine. Saisissez « ctg: \*ressource\* » dans la barre de recherche pour trouver tous les catalogues de ressources de la base de données.

En ce qui concerne la barre « Outils de présentation », on peut lister les principales fonctions suivantes :



### Aimant une ressource :

La fonction *aimant* permet d'attacher un élément sélectionné à une autre ressource de l'atelier.



### Aligner et distribuer :

Cette fonction permet d'aligner, pivoter et distribuer une ressource par rapport aux caractéristiques géométriques d'une autre ressource.

La distribution d'une ressource permet d'en aligner un certain nombre à intervalles prédéfinis.



### Créer un motif :

Avec cette fonction, il est possible de créer un motif d'une certaine ressource,

c'est-à-dire une répétition spatiale de cette dernière le long d'un axe sélectionné.



### Créer un attachement :

Cette fonction permet d'attacher une ressource à une autre, de sorte que les deux puissent être déplacés comme un seul élément.

Pour pouvoir utiliser cette fonction, il faut que les deux ressources, par exemple un outil et un utilisateur mécanique, soient aménagés à cet effet. À la suite d'un attachement l'élément attaché deviendra un fils du nœud de l'utilisateur.



### Fixer dans l'espace :

Cette fonction permet de créer une contrainte de fixation dans l'espace de l'atelier.

## 5.1.3 CREATION DU PLAN 2D DE L'ATELIER

En premier lieu, il a été nécessaire de dessiner le plan 2D de l'atelier en estimant l'espace occupé par chacun des postes de travail, des machines et des stocks.

Le choix de la disposition de tous ces éléments est entièrement basé sur la recherche de l'optimisation fonctionnelle des espaces, laquelle a été acquise pas à pas pendant tout le développement de l'atelier. Par exemple, on pourra remarquer par la suite que les postes de travail sont disposés linéairement le long de l'axe de déplacement du treuil. Cet élément de l'atelier sert au déplacement du semi-assemblé d'un poste au suivant. Grâce à l'alignement de ceux-ci, il suffira d'habiliter la translation sur un seul axe et la modélisation du treuil sera donc facilitée.

De même, on verra que l'organisation du troisième poste a été faite de façon à optimiser le parcours du chariot élévateur, ainsi que à rendre l'atelier aussi sécurisé que possible pour les opérateurs.

La *figure 5.3* montre le plan 2D de l'atelier ; les zones de couleur sont celles où les produits sont traités et assemblés par les opérateurs.



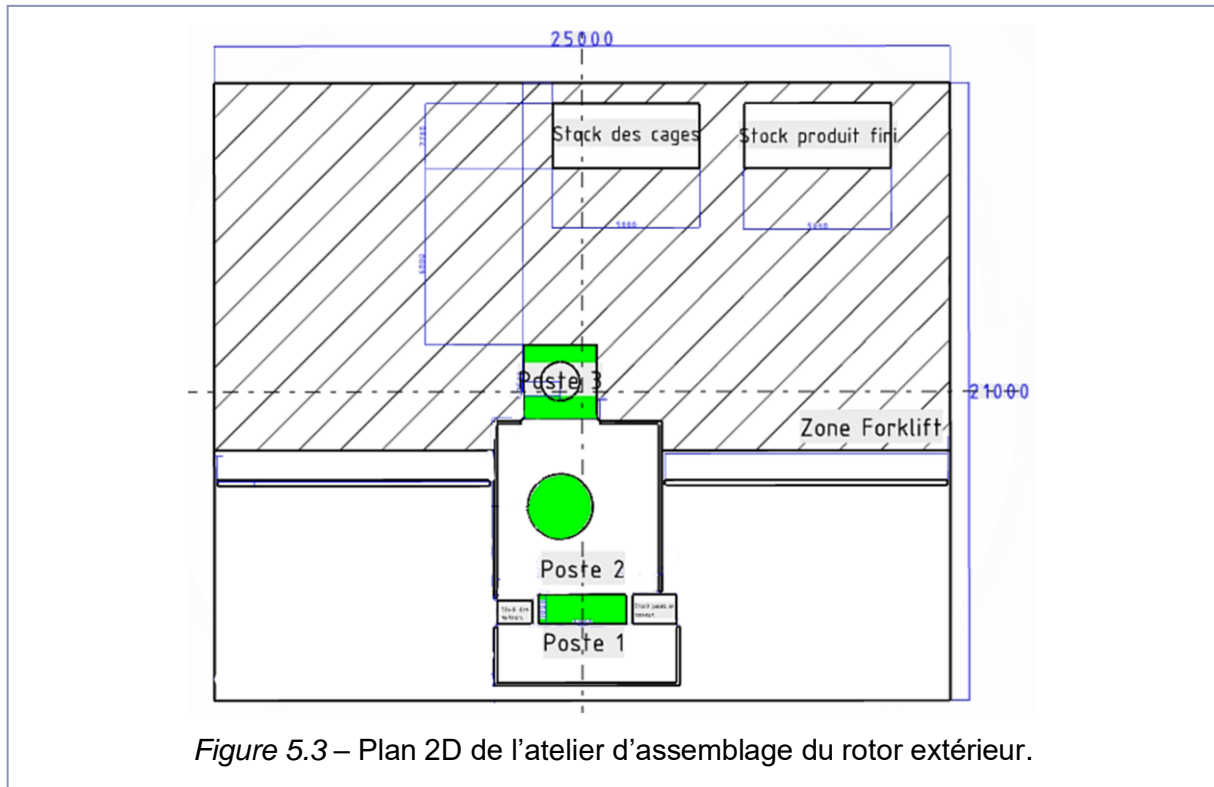


Figure 5.3 – Plan 2D de l'atelier d'assemblage du rotor extérieur.

#### 5.1.4 IMPLANTATION DE L'ATELIER DANS L'ENVIRONNEMENT 3D

Après avoir finalisé le plan 2D de l'atelier on est passé à l'implantation 3D de tous les éléments nécessaires à la modélisation des postes de travail. A ce stade on est donc passé de l'application *2D Layout for 3D Design* à l'application *Plant Layout Design*.

Dans un premier temps, ils ont été ajoutés dans l'atelier quelques éléments fondamentaux, à savoir le banc de travail partagé entre le premier et le second opérateur, quelques bancs de stockage, le support au troisième poste, le chariot élévateur et, enfin, les trois opérateurs chacun à sa place. Cette premier aménagement est montré et décrit dans la *figure 5.4*.

Ensuite, il a été nécessaire d'équiper l'atelier avec des éléments plus complexes. Bon nombre d'entre eux ont été téléchargés per le web (*grabcad.com*) et adaptés à nos besoins, tandis que d'autres ayant des conditions plus spécifiques ont été créés au moyen des applications CATIA.

Dans les paragraphes qui suivent, les différentes zones de l'atelier ainsi que les éléments

et les outils qu'elles contiennent seront décrites en détails.

#### 5.1.5 LA PREMIERE ZONE

La première zone de l'atelier est constituée d'un banc de travail de dimensions 3x1 m partagé entre le premier et le deuxième opérateur. Le bloc moteur et le bloc hélice sont assemblés dans cette zone et, comme le montre la *figure 5.5*, elle a été munie des éléments suivants :

- Un support pivotant pour loger l'assemblage flasque-pales-moyeu (*figure 5.6*). Ce support permet d'assembler, d'équilibrer et enfin de transférer l'assemblage du premier au deuxième poste de travail. En outre, grâce à sa duplicité, le support permet au second opérateur de serrer les vis d'un assemblage alors que de l'autre côté le premier est en train de loger les pièces de l'assemblage suivant. Une fois que les deux ont terminé, il suffira de tourner le support pour que le second opérateur se retrouve devant l'assemblage à serrer alors que le premier dispose du support vide prêt à être chargé.

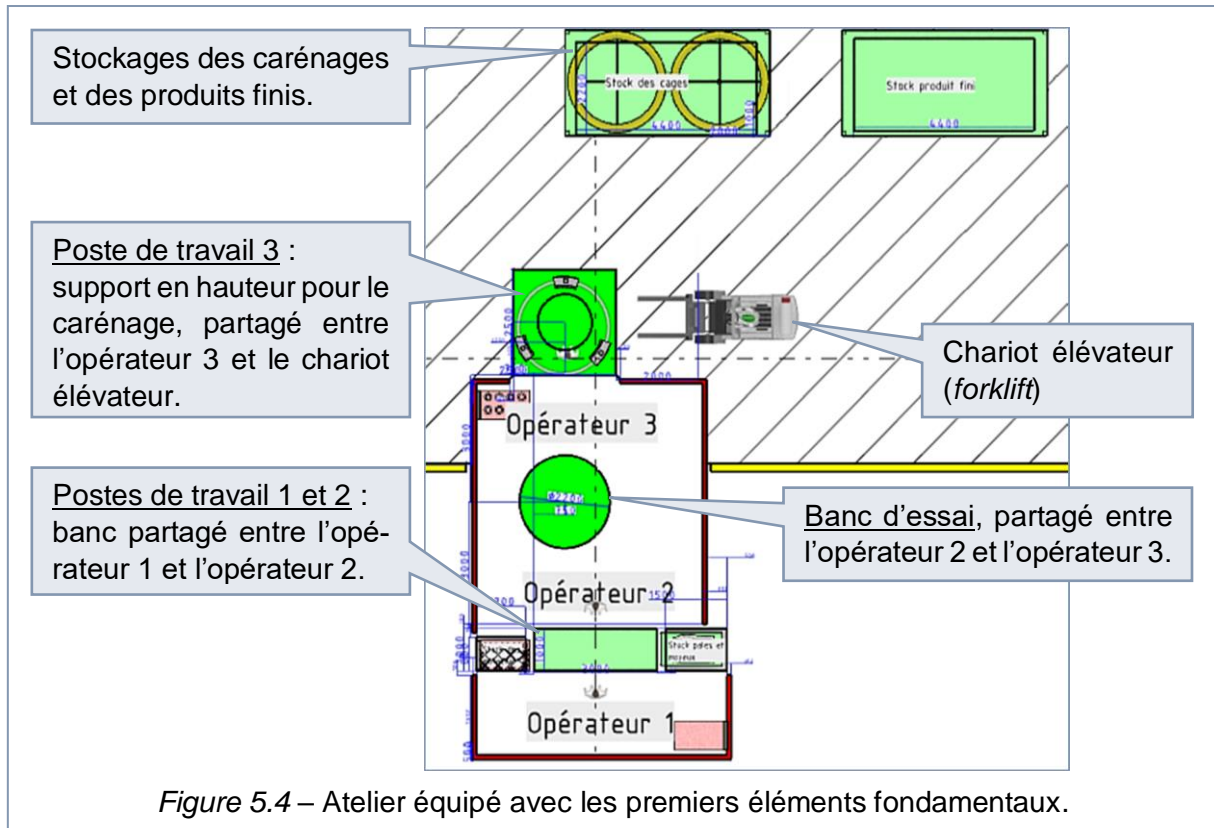


Figure 5.4 – Atelier équipé avec les premiers éléments fondamentaux.

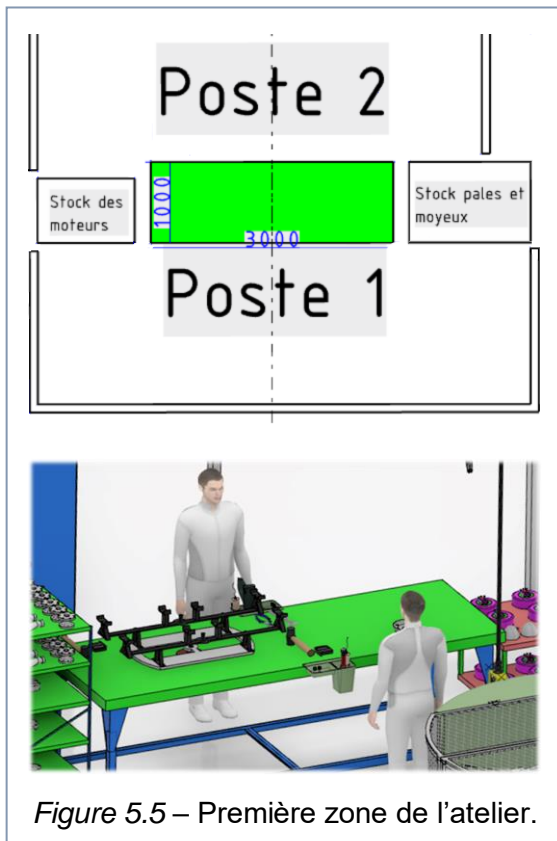


Figure 5.5 – Première zone de l'atelier.

- Un support pour le moteur de manière à pouvoir monter facilement le bloc hélice sur l'EMRAX 188 (figure 5.7). Ce support est nécessaire car la partie inférieure du moteur n'est pas une bonne surface d'appui en raison de la présence des câbles et de l'encodeur.
- Chariots de stockage pour les pièces à assembler.
- Deux inclinomètres: un inclinomètre est un capteur qui permet de mesurer un angle par rapport à la ligne de l'horizon. Il est utilisé par l'opérateur 1 pendant l'équilibrage des pales.
- Autre outillage :
  - trois clés à fourches,
  - clé dynamométrique,
  - pistolet à air chaud,
  - deux visseuses,
  - pince multiprise,
  - pince coupante,
  - deux maillets.

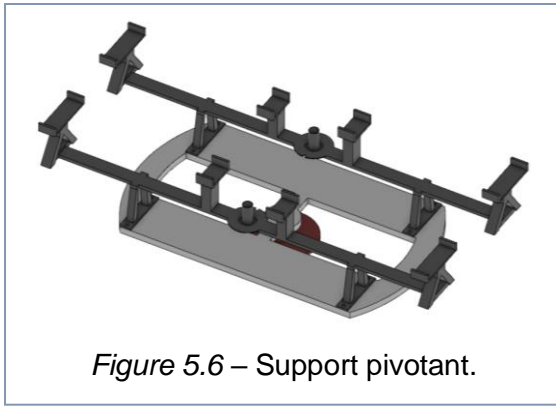


Figure 5.6 – Support pivotant.

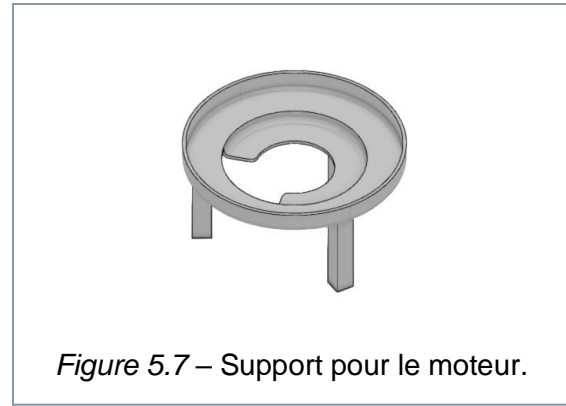


Figure 5.7 – Support pour le moteur.

### 5.1.6 LA ZONE CIRCULAIRE

La zone circulaire correspond à celle dans laquelle l'équilibrage de l'hélice est testé à l'intérieur d'un banc d'essai spécialement conçu à cet effet.

Les inévitables défauts de fabrication et de montage qui découlent des limites de précision des machines outil peuvent générer des problèmes vibratoires importants. L'un des plus importants est dû aux déséquilibres massiques qui peuvent conduire à des vibrations dangereuses pour la tenue des vis ainsi que la propagation des microfissures.

Ce banc d'essai a donc pour objectif de mesurer la vitesse et l'amplitude de ces vibrations afin de s'assurer de ne pas dépasser les niveaux de sécurité, et pour cela, il faut que les pales soient bien équilibrées.

Le déroulement est simple : l'opérateur fixe l'ensemble moteur-pale sur le banc et connecte les câbles d'alimentation et contrôle ; puis le calculateur du banc anime le moteur

à différentes vitesses et, à partir des mesures capturées, il fournit le résultat à l'opérateur.

Comme le montrent les figures 5.8 et 5.9, le banc d'essai a été équipé de portes de sécurité, de grilles pour faire entrer et sortir l'air pendant l'essai, et enfin d'un panneau de contrôle d'où sortent les câbles d'alimentation et des capteurs.

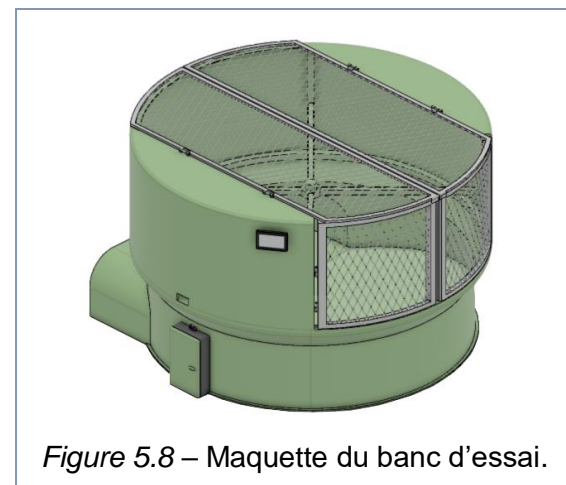


Figure 5.8 – Maquette du banc d'essai.

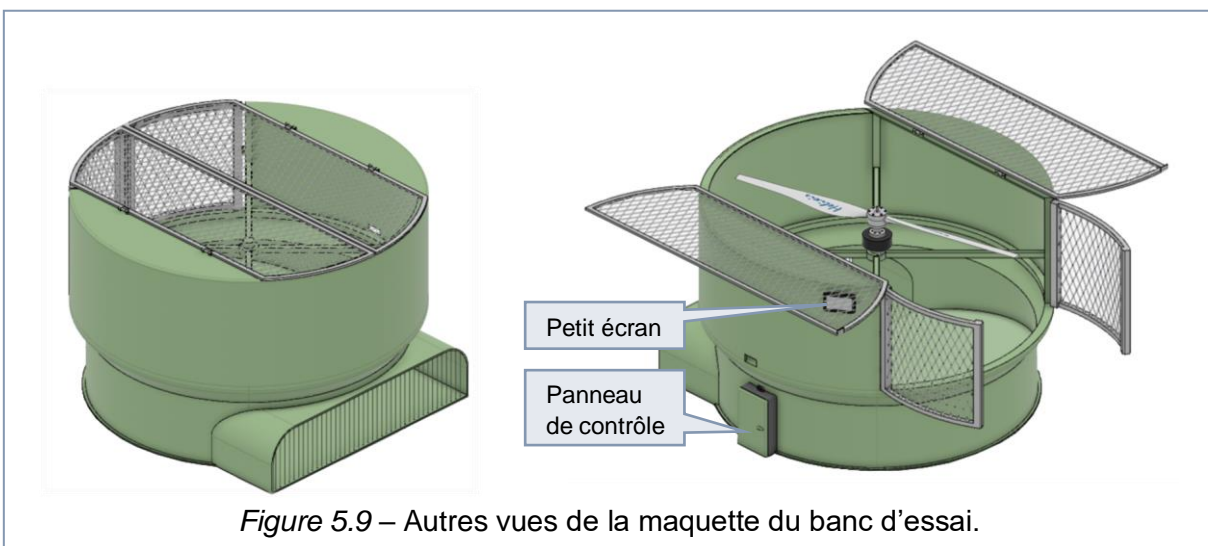


Figure 5.9 – Autres vues de la maquette du banc d'essai.

### 5.1.7 LA TROISIEME ZONE

Dans la troisième zone on trouve le support surélevé du carénage, où l'assemblage moteur-pale est monté sur le troisième bloc grâce à l'aide du treuil. Ce dernier élément est essentiel, car il permet de maintenir suspendu le bloc moteur-hélice le temps nécessaire pour faire passer les câbles du moteur à l'intérieur du carénage.

En plus, c'est sur ce support que l'opérateur vérifie l'étanchéité de la cage de protection des fils électriques en injectant de l'air comprimé à son intérieur et en évaluant la perte de pression.

Le support est montré à la *figure 5.10*. On remarque qu'un des côtés du support est dépourvu du lien annulaire afin de permettre au chariot élévateur de charger et de prélever les pièces en toute sécurité, sans risque de collision avec le support.

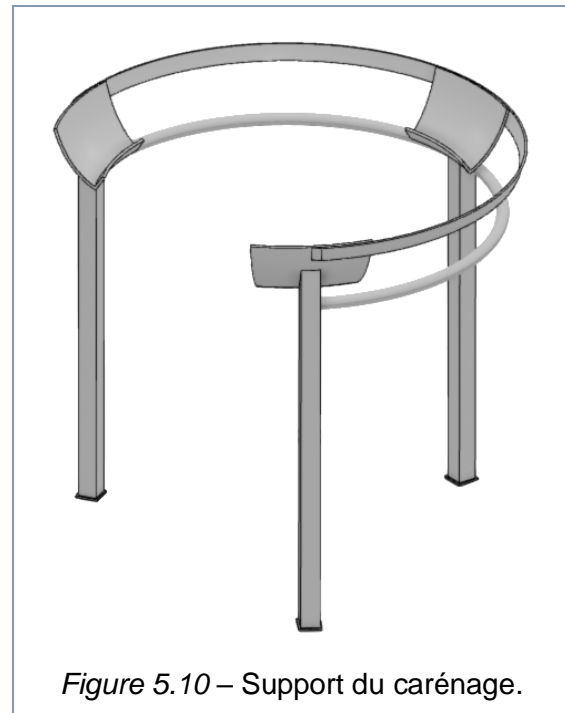


Figure 5.10 – Support du carénage.

En plus de ce qui vient d'être décrit, dans la troisième zone on peut trouver :

- L'escalier représenté à la *figure 5.11* (ou en alternative le *step* au-dessous) pour permettre à l'opérateur de travailler plus confortablement pendant le tirage des câbles.
- Un chariot de stockage pour les pièces à assembler.
- Une petite table pour ranger les outils :
  - pistolet à air avec capteur de pression,
  - visseuse,
  - maillet,
  - tire-fil.
- Le chariot élévateur pour charger les carénages, décharger les rotors complets, ainsi que pour transférer les deux du/au stockage.

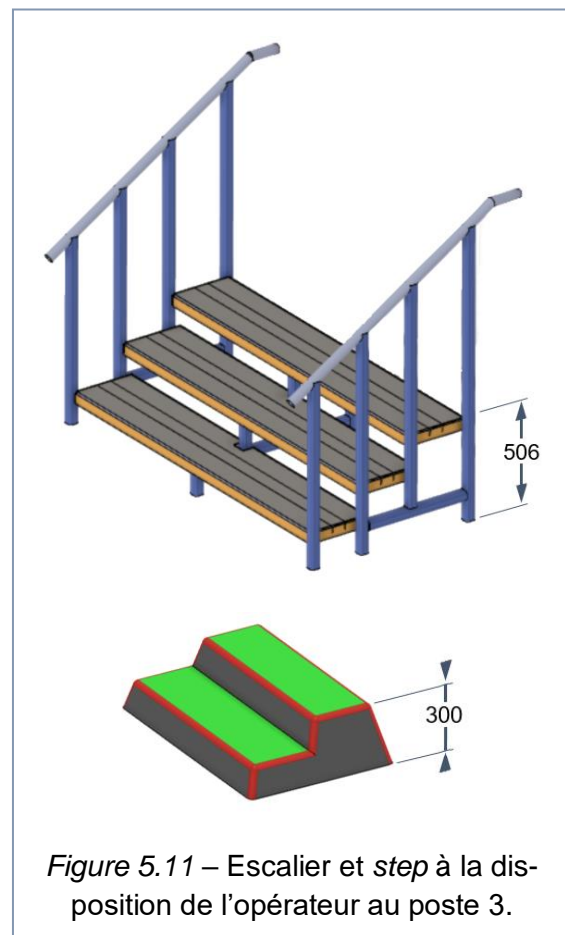


Figure 5.11 – Escalier et *step* à la disposition de l'opérateur au poste 3.

### 5.1.8 LE PONT A TREUIL

Le treuil et son pont (sa structure) permettent le transfert des semi-assemblés d'une zone de l'atelier à la suivante. Le modèle CAO adopté est représenté à la *figure 5.12*, il se déplace le long d'un seul axe et est muni d'une boîte à boutons qui, au lieu de

celle montré, peut être soit sans fil (télécommande) soit centralisée (panneau de contrôle à côté de la ligne).



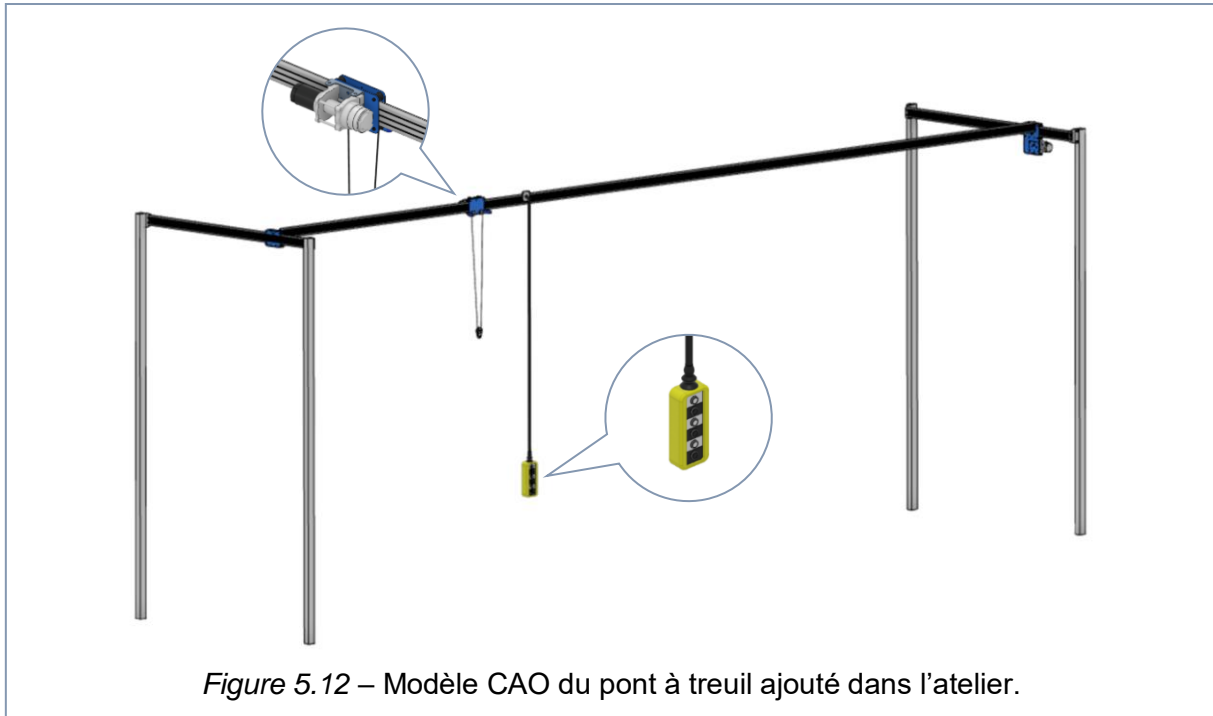


Figure 5.12 – Modèle CAO du pont à treuil ajouté dans l'atelier.

*Remarque :* l'idée d'installer le treuil a été concrétisée après l'écriture des opérations et la mise en œuvre de la méthode d'optimisation RPW. En effet, le résultat fourni par ce dernier ne tient pas compte de la disponibilité du treuil au long du cycle d'assemblage, et il peut arriver que les opérateurs 2 et 3 aient besoin du treuil au même temps.

Dans ce cas, une solution possible pourrait être d'installer deux treuils indépendants sur le même pont.

La figure 5.13 montre une vue de dessus du pont à treuil (en turquoise) où l'on peut

observer l'alignement des trois points sur lesquels le treuil remplit sa fonction, tandis que la figure 5.14 montre l'atelier dans sa version finale, complété par de conteneurs porte-outils fixés au banc, ainsi que des éléments cosmétiques tels que le mobilier et les murs.

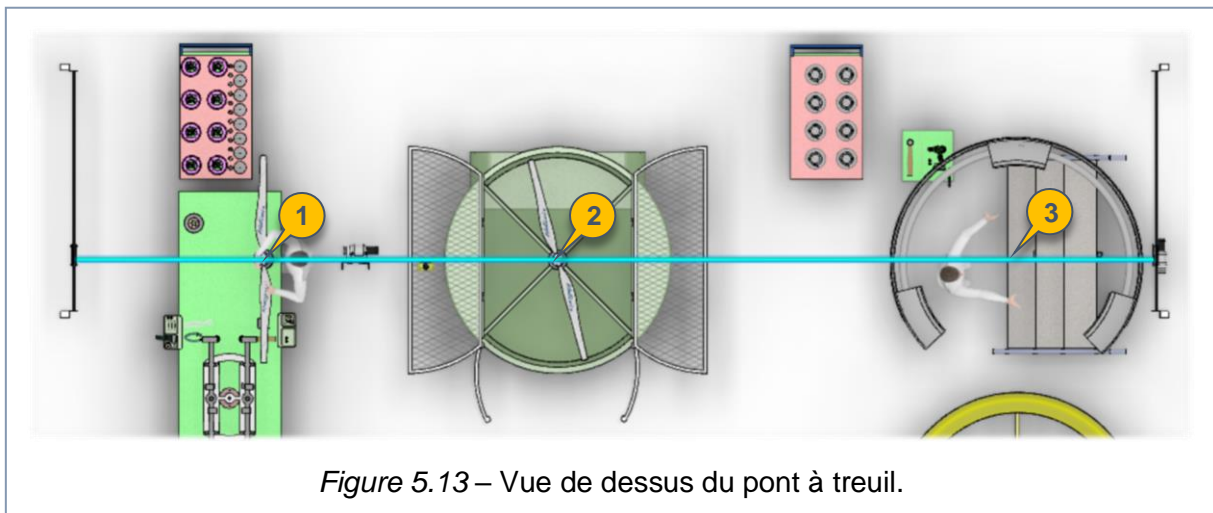


Figure 5.13 – Vue de dessus du pont à treuil.

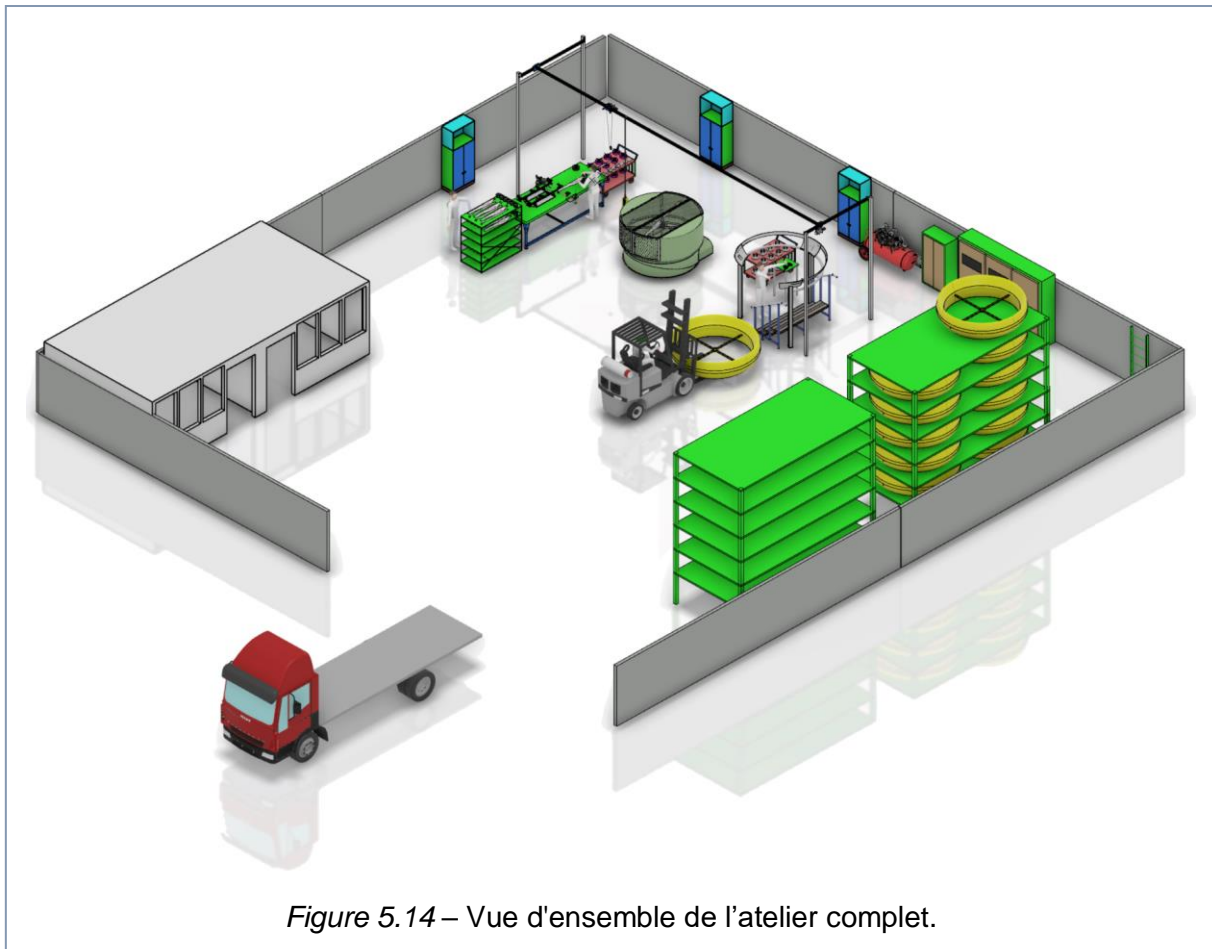


Figure 5.14 – Vue d'ensemble de l'atelier complet.

## 5.2 Les différentes activités dans l'Atelier

### 5.2.1 QUELQUES DEFINITIONS

L'activité est la source de transformation du flux ; elle est composée par l'ensemble des tâches élémentaires organisées au sein d'un processus, réalisées par un opérateur au moyen d'une ressource bien définie.

Ces tâches élémentaires permettent de produire des éléments de sortie à partir des éléments d'entrée, et leur temps se divise entre cinq types : temps de passage, temps de déplacement, temps d'activité à valeur ajoutée **VA**, temps d'activité à non-valeur ajoutée, et temps de non-activité.

L'activité à valeur ajoutée transforme la matière (ou parfois l'information) en entrée de manière à produire de la valeur pour le client. De fait, l'activité à valeur ajoutée est celle qui transforme les éléments entrants en des éléments sortants différents.

Dans la suite, on va détailler toutes les tâches élémentaires nécessaires afin d'obtenir notre assemblage final des rotors latéraux.

*N.B.* : Dans la suite on va indiquer les activités à valeur ajoutées par le sigle **VA**.

### 5.2.2 LE PREMIER POSTE DE TRAVAIL

Dans ce poste, l'opérateur 1 est chargé du montage de l'encodeur et de la connexion des câbles électriques au moteur EMRAX 188, ainsi que du montage de l'ensemble flasque-moyeu-pales et de l'équilibrage des pales. Afin d'accomplir ces tâches, il suit la procédure décrite ci-après :

1. Prendre une plaque du moyeu et une vis centrale M8L16 à partir du stock et les positionnées au côté dégagé du banc.
2. Entrer la vis dans la plaque. **VA**



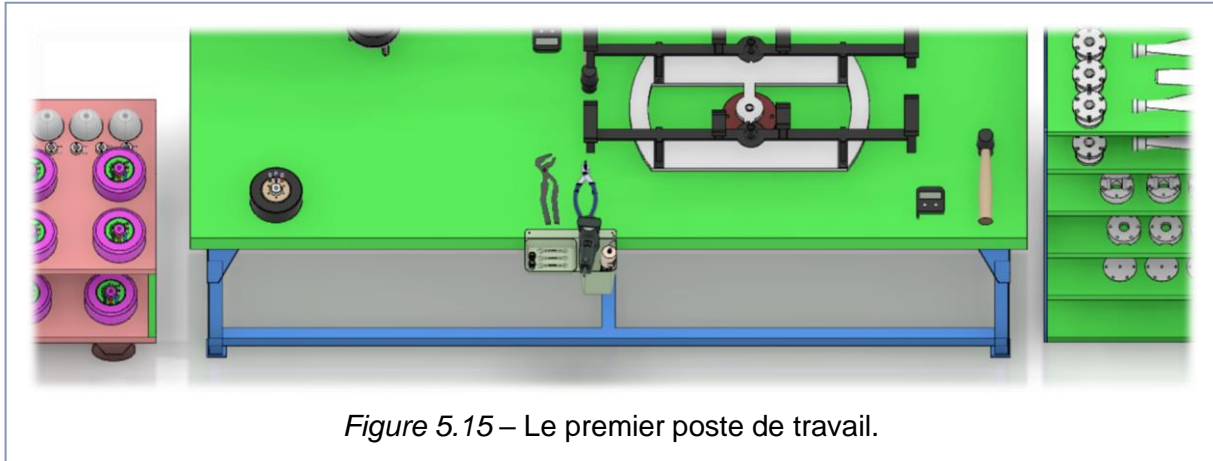
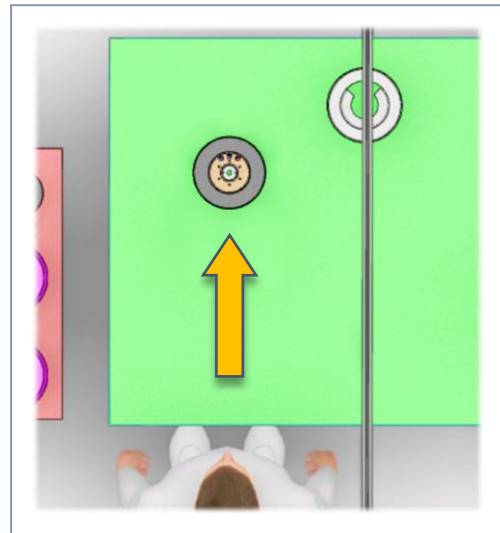


Figure 5.15 – Le premier poste de travail.

3. Prendre une rondelle Nord-Lock et un écrou.
4. Entrer la rondelle puis visser l'écrou.<sup>VA</sup>
5. Prendre les deux clés à fourches à partir du porte-outils.
6. Serrer l'écrou utilisant les deux clés à fourches.<sup>VA</sup>
7. Remettre les clés dans le porte-outils.
8. Laisser l'ensemble plaque-vis-écrou près de la base du support pivotant.
9. Prendre un moteur EMRAX 188 du stock et le mettre au côté dégagé du banc.
10. Prendre un encodeur et ses deux vis D3L28 du stock.
11. Positionner l'encodeur sur le moteur.<sup>VA</sup>
12. Prendre la visseuse du porte-outils.
13. Y monter l'embout à six pans pour les vis D3L28.
14. Visser les deux vis de l'encodeur.<sup>VA</sup>
15. Remettre la visseuse dans le porte-outils.
16. Prendre la pince coupante.
17. Couper trois manchons de la gaine thermo-rétractable et les mettre sur le banc.
18. Remettre la pince coupante et prendre la pince multiprise.
19. Prendre les trois câbles électriques.
20. Insérer les manchons autour des câbles.<sup>VA</sup>
21. Raccorder les câbles aux terminaux électriques de l'EMRAX à l'aide de la pince.<sup>VA</sup>
22. Remettre la pince et prendre la clé.
23. Serrer les câbles dans les terminaux avec la clé.<sup>VA</sup>
24. Remettre la clé.
25. Glisser les manchons vers les terminaux.<sup>VA</sup>
26. Prendre le pistolet à air chaud et chauffer les manchons jusqu'à leur rétrécissement sur les connexions.<sup>VA</sup>
27. Remettre le pistolet à air chaud.
28. Glisser le moteur prêt vers le côté de l'opérateur 2 (comme le montre la figure ci-dessous).



29. Prendre une flasque adaptatrice et la positionner sur le support pivotant.
30. Prendre un demi-moyeu inférieur et le positionner au-dessus de la flasque.<sup>VA</sup>
31. Prendre deux pales et les positionner sur le demi-moyeu inférieur.<sup>VA</sup>

32. Prendre un demi-moyeu supérieur et le positionner sur le demi-moyeu inférieur. **VA**
33. Récupérer l'ensemble plaque-vis-écrou et le positionner sur le moyeu.
34. Prendre 6 vis M8L90, 6 rondelles Nord-Lock et 6 pions de cisaillements.
35. Insérer les vis et les rondelles dans l'assemblage et fixer avec les pions. **VA**
36. Prendre la visseuse du porte-outils.
37. Changer l'embout de la visseuse : monter celui à six pans creux pour les vis M8L90.
38. Visser l'ensemble flasque-moyeu-pales. **VA**
39. Remettre la visseuse et prendre l'inclinomètre et le maillet.
40. Positionner l'inclinomètre sur la première pale.
41. Régler l'angle de la première pale à l'aide du maillet. **VA**
42. Positionner l'inclinomètre sur la deuxième pale.

43. Régler l'angle de la deuxième pale à l'aide du maillet. **VA**
44. Remettre l'inclinomètre et le maillet sur la table.
45. Tourner le support de façon à placer l'assemblage devant l'opérateur 2.

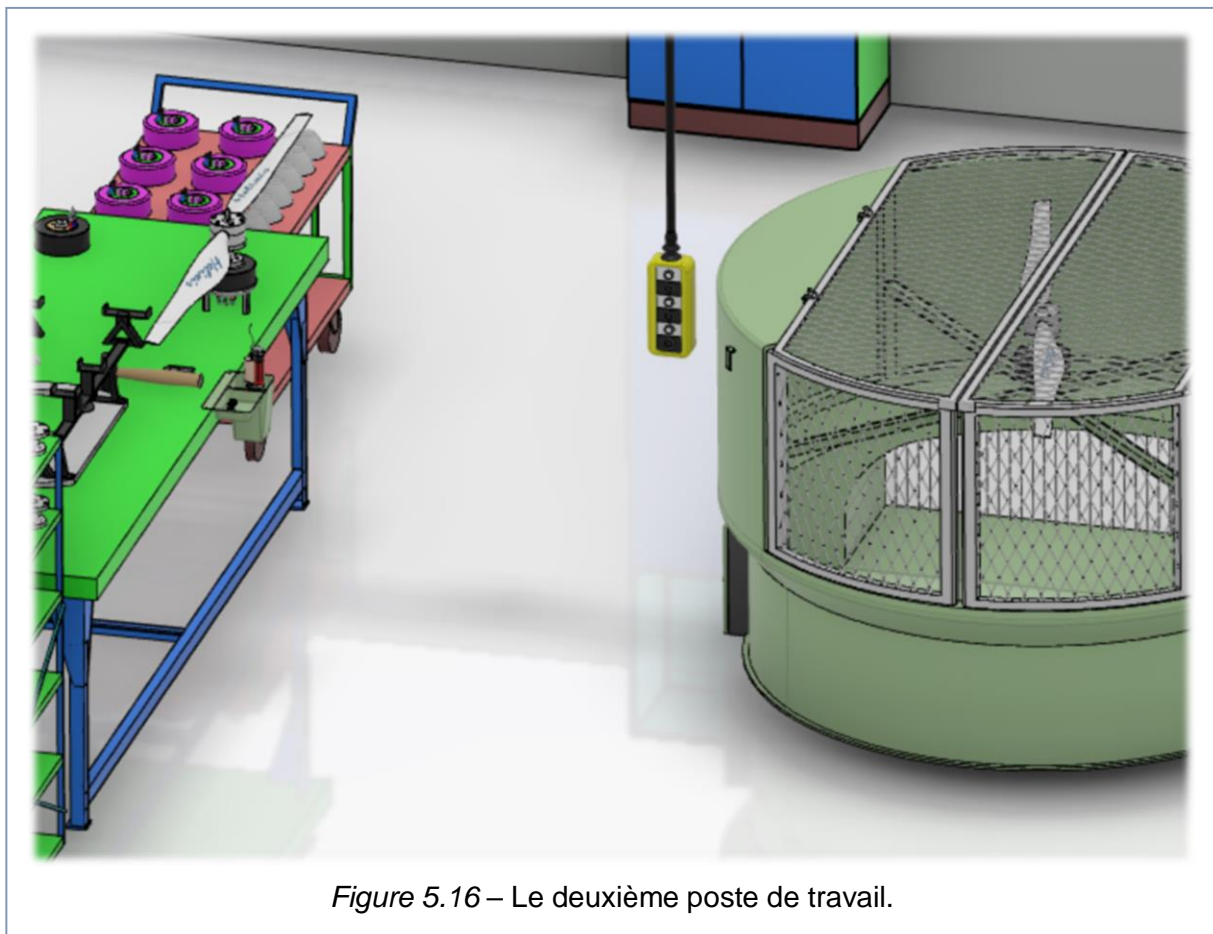
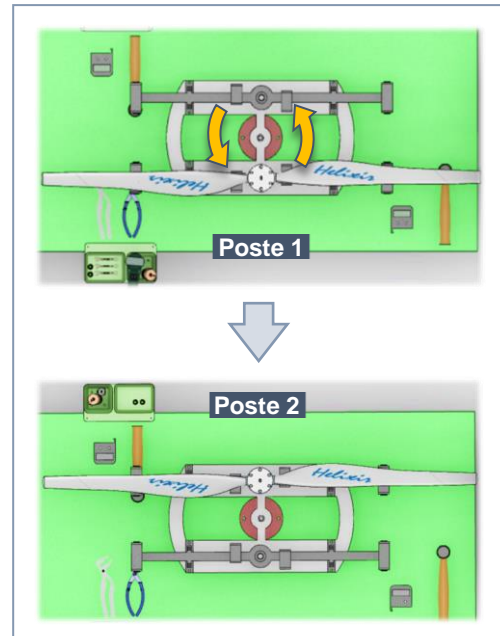


Figure 5.16 – Le deuxième poste de travail.

### 5.2.3 LE DEUXIEME POSTE DE TRAVAIL

Dans ce poste, l'opérateur 2 est chargé du serrage de l'ensemble flasque–moyeu–pales, de son montage au-dessus du moteur, et finalement de la mise en œuvre du test d'équilibrage sur l'ensemble moteur–hélice dans le banc d'essai. Afin d'accomplir ces tâches il suit la procédure décrite ci-après :

1. Prendre le moteur prêt, le tourner et le positionner sur son support. L'encodeur doit être tourné vers le bas.
2. Passer au support pivotant sur lequel l'ensemble flasque–moyeu–pales se trouve.
3. Prendre la clé dynamométrique du porte-outils.
4. Y monter l'embout à six pans creux pour les vis M8L90.
5. Serrer l'ensemble flasque–moyeu–pales avec la clé dynamométrique. **VA**
6. Remettre la clé.
7. Transférer l'ensemble flasque–moyeu–pales sur le moteur. **VA**
8. Prendre 6 vis D7L20 et les visser à la base de la flasque.
9. Prendre la clé dynamométrique.
10. Changer l'embout de la clé : monter celui à six pans creux pour les D7L20.
11. Serrer l'ensemble moteur–hélice. **VA**
12. Remettre la clé.
13. Prendre la commande du treuil.
14. Commander le treuil pour importer le crochet au-dessus de l'ensemble moteur–hélice.
15. Accrocher l'ensemble au crochet au moyen d'un élingage adapté.
16. Commander le treuil pour importer l'ensemble moteur–hélice au-dessus du banc d'essai.
17. Positionner l'ensemble dans le banc et le fixer au moyen des vis préposées à cet effet (voir le détail à la *figure 5.17*).
18. Décrocher l'ensemble moteur–hélice de l'élingage.
19. Fermer les portes du banc.
20. Lancer le contrôle d'équilibrage. **VA**
21. Ouvrir les portes du banc.

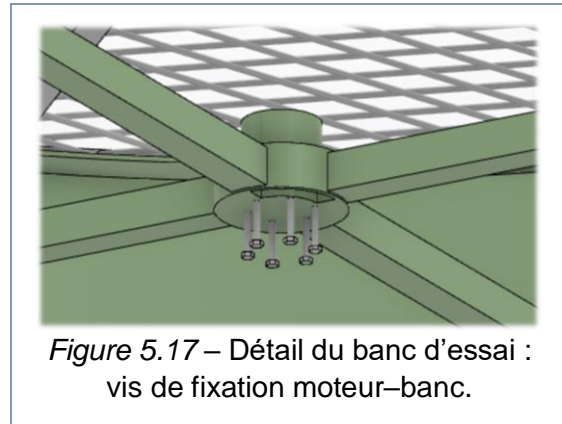


Figure 5.17 – Détail du banc d'essai : vis de fixation moteur–banc.

*Si les vibrations sont en dessous du seuil de sécurité :*

22. Importer un couvercle supérieur avec sa vis M8L25.
23. Prendre la visseuse.
24. Changer l'embout de la visseuse : monter celui à six pans pour la vis M8L25.
25. Positionner le couvercle sur l'hélice. **VA**
26. Serrer la vis. **VA**
27. Remettre la visseuse.
28. Dévisser l'ensemble moteur–hélice du banc d'essai.
29. Accrocher l'ensemble moteur–hélice au crochet du treuil au moyen de l'élingage.

*Dans le cas contraire, si les vibrations sont au-dessus du seuil de sécurité :*

22. Prendre la clé dynamométrique.
23. Changer l'embout de la clé : monter celui à six pans creux pour les M8L90.
24. Dévisser l'ensemble flasque–moyeu–pales à l'aide de la clé.
25. Prendre l'inclinomètre et le maillet.
26. Rééquilibrer les pales avec la procédure décrite précédemment.
27. Serrer l'ensemble flasque–moyeu–pales à l'aide de la clé.
28. Fermer la porte du banc et relancer le contrôle d'équilibrage.

### 5.2.4 LE TROISIEME POSTE DE TRAVAIL

Dans ce poste l'opérateur 3 est chargé du montage de l'ensemble moteur–hélice sur le carénage, ainsi que de conduire le contrôle d'étanchéité sur la cage de protection

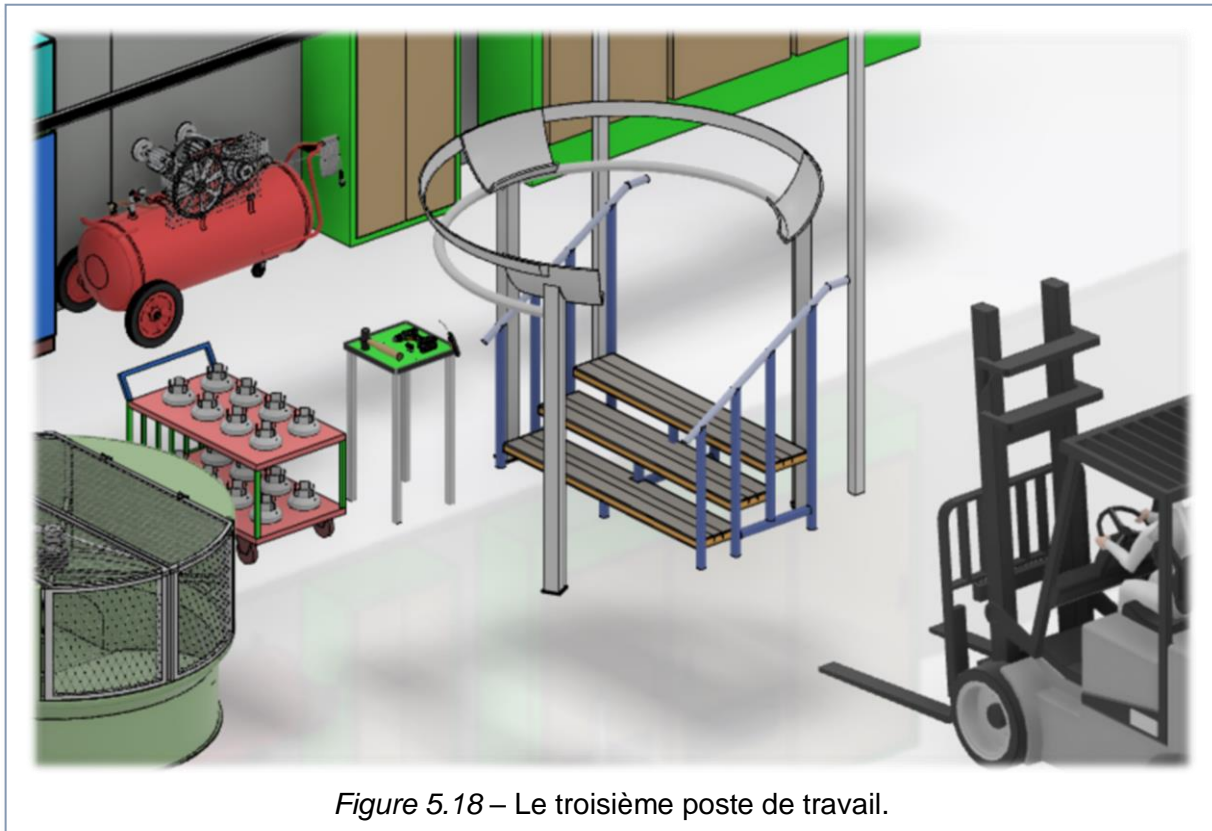


Figure 5.18 – Le troisième poste de travail.

des fils électriques. Afin d'accomplir ces tâches il suit la procédure décrite ci-après :

1. Prendre une cage de protection des câbles électriques du chariot et le maillet sur la petite table.
2. Positionner la cage de protection sur le carénage à l'aide du maillet.<sup>VA</sup>
3. Remettre le maillet.
4. Prendre la commande du treuil.
5. Commander le treuil pour importer l'ensemble moteur-hélice au-dessus du carénage sans le détacher.
6. Prendre le tire-fil sur la table.
7. Monter l'escalier (ou le *step*) pour arriver au niveau du carénage.
8. Accrocher les câbles électriques au tire-fil.
9. Faire passer le tire-fil dans la structure tubulaire du carénage.
10. Tirer le tire-fil afin de faire arriver les câbles électriques jusqu'à l'extérieur du carénage.<sup>VA</sup>
11. Décrocher le tire-fils.
12. Remettre le tire-fils sur la table.
13. Prendre la commande du treuil.
14. Faire descendre le bloc moteur-hélice sur le centre du carénage sans enlever l'élingage.<sup>VA</sup>
15. Importer les 6 vis de fixation D6L90.
16. Prendre la visseuse sur la table et changer l'embout : monter celui à six pans creux pour les D6L90.
17. Serrer le bloc moteur-hélice avec le carénage au moyen de la visseuse.<sup>VA</sup>
18. Importer un couvercle inférieur et ses 4 vis D4L6.
19. Changer l'embout de la visseuse : monter celui à six pans pour les D4L6.
20. Positionner le couvercle inférieur.<sup>VA</sup>
21. Serrer les vis du couvercle.<sup>VA</sup>
22. Remettre la visseuse.
23. Prendre le pistolet d'air.
24. Enlever le bouchon du trou de la cage de protection des câbles électriques.
25. Insérer la sonde du pistolet dans le trou de la cage.
26. Effectuer le contrôle d'étanchéité.<sup>VA</sup>

*Si le contrôle donne un résultat positif :*

27. Enlever la sonde et la remettre à sa place sur la table.



28. Enlever l'élingage du treuil de l'hélice.
29. Remettre le bouchon du trou. **VA**

### 5.2.5 LE CONTROLE D'ETANCHEITE

Le contrôle d'étanchéité a pour but d'assurer que les fils conducteurs du moteur sont bien isolés contre l'infiltration de l'eau qui pourrait conduire à un court-circuit.

Pour permettre ce contrôle, il a été nécessaire d'équiper la partie conique de la cage de protection d'un petit trou refermable, comme le montre la *figure 5.19*.

Le contrôle est effectué selon la procédure suivante:

A l'aide du compresseur, l'opérateur augmente la pression à l'intérieur de la cage en injectant de l'air comprimé par le trou latéral. Le pistolet est également équipé d'un capteur qui détecte la perte de pression par rapport au temps écoulé ; si cette valeur

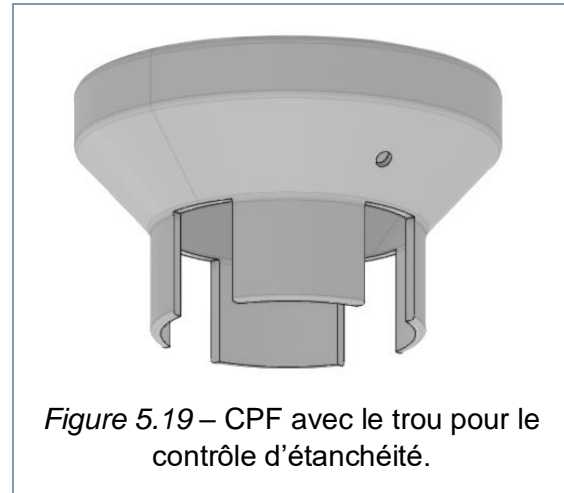


Figure 5.19 – CPF avec le trou pour le contrôle d'étanchéité.

–  $\Delta p/\Delta t$  dépasse un certain seuil, l'étanchéité de la cage n'est pas garantie. L'opérateur peut alors essayer d'ajuster le moteur dans la cage et, si le résultat du test reste négatif, relever le bloc moteur-hélice, retirer les fils et changer la cage.

## 5.3 Equipment Allocation

### 5.3.1 OBJECTIF DE L'APP ET RESULTATS ATTENDUS

L'application *Equipment Allocation* fournit des outils pour relier plusieurs éléments virtuels afin de permettre à l'utilisateur de vérifier l'équilibre entre les opérations, les ressources et le plan de l'usine. Cette étape unit donc trois dimensions de la conception d'atelier.

L'objectif ultime de l'application est de fournir certains graphiques inhérents au processus, ainsi que de simuler le montage du produit dans l'environnement virtuel.

### 5.3.2 FONCTIONS PRINCIPALES

La *figure 5.20* montre la barre « Création » de l'application *Equipment Allocation*, qui contient ses fonctions les plus importantes.



#### Créer un périmètre ressource-système :

Afin d'utiliser correctement ce module, il faut d'abord que les portées qui lient l'assemblage physique, l'assemblage de fabrication et les plans du processus soient bien bâtis, comme le montre la *figure 5.21*.

Dans le cas contraire, ils ne pourront pas être définis les lieux et les produits physiques relatifs aux différentes opérations.



#### Gestionnaire d'affectations :

En utilisant le déjà connu « Gestionnaire d'affectations » il est possible en premier lieu de sélectionner une ressource *non utilisées*, telles qu'un banc, un support, un outil, un stockage, et de lui affecter les opérations qui la concernent.

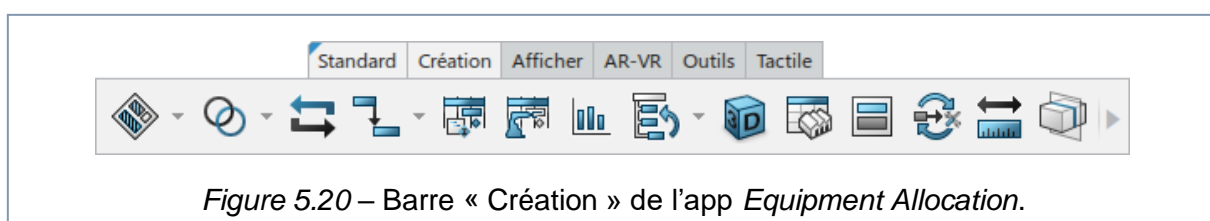


Figure 5.20 – Barre « Création » de l'app *Equipment Allocation*.

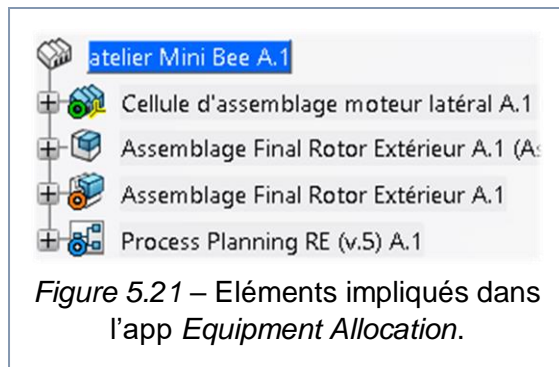


Figure 5.21 – Eléments impliqués dans l'app *Equipment Allocation*.

Ensuite, en utilisant la même procédure il faut également assigner les opérations aux opérateurs qui les mettent en œuvre et toute ressource active (*utilisées*).

L'application affiche automatiquement un avertissement à l'écran dans le cas où il relève des incohérences avec les liens de priorité créés précédemment.

La figure 5.22 montre deux exemples d'affectation dans les deux différents cas décrits ci-avant.

#### Relations :

La fonction « Relations » permet d'afficher les liens entre les éléments afin de s'assurer que toutes les affectations ont abouti.

#### Diagramme de Gantt d'utilisation des ressources :

Cette fonction permet de créer un diagramme de Gantt relatif à la ressource ou à l'opérateur sélectionné. Comme le montre le tableau à la figure 5.23, l'app peut relier les informations qui concernent les opérations, les opérateurs et les ressources.

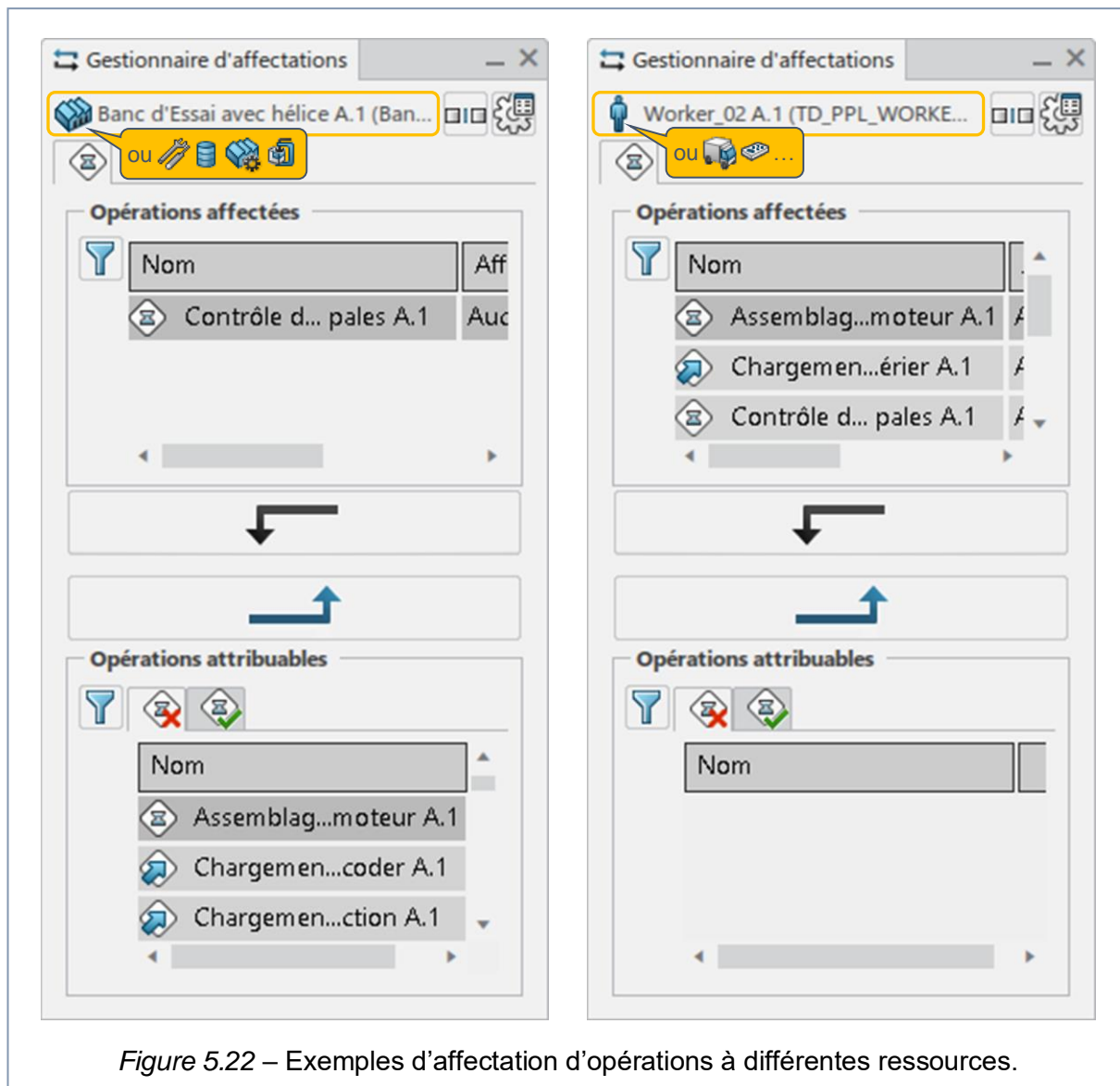


Figure 5.22 – Exemples d'affectation d'opérations à différentes ressources.



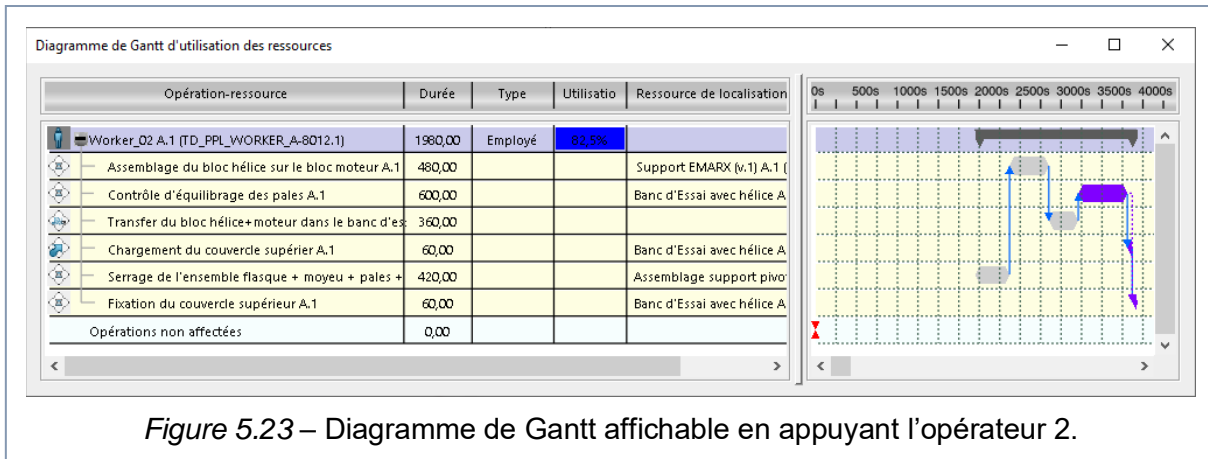


Figure 5.23 – Diagramme de Gantt affichable en appuyant l'opérateur 2.

### Equilibrage des ressources :

Grâce à cette commande, il est possible de contrôler la répartition du travail sur les ressources actives de l'atelier, telles que les opérateurs, le charriot élévateur, le treuil, etc.

En plus des fonctions listées jusqu'ici, la commandes « B.I. Essentials » de la barre « Outils » peut se révéler très utile :

### B.I. Essentials :

Cette fonction permet d'analyser l'état des éléments de l'atelier sous plusieurs points de vue. Par exemple, on peut analyser le pourcentage d'utilisation des ressources codifiée par couleur, ainsi que l'état d'affectation des opérations aux ressources (ce dernier est montré à titre d'exemple dans la figure 5.24).

### 5.3.3 TRAVAIL ACCOMPLI SUR NOTRE ATELIER

Nous avons tout d'abord procédé aux affectations des opérations:

- aux ressources *non utilisées*, c'est-à-dire celles qu'on peut considérer comme passives (outils, éléments de stockage, ressource définie par l'utilisateur, etc.) ;
- aux ressources *utilisées*, qu'on peut considérer comme actives puisqu'elles sont capable de traiter des produits (opérateurs, véhicules, machines, panneau de commande, etc.).

Pour savoir si une ressource est *utilisée* ou *non utilisée*, il suffit de lire la légende qu'on affiche en passant sur la commande avec le curseur.

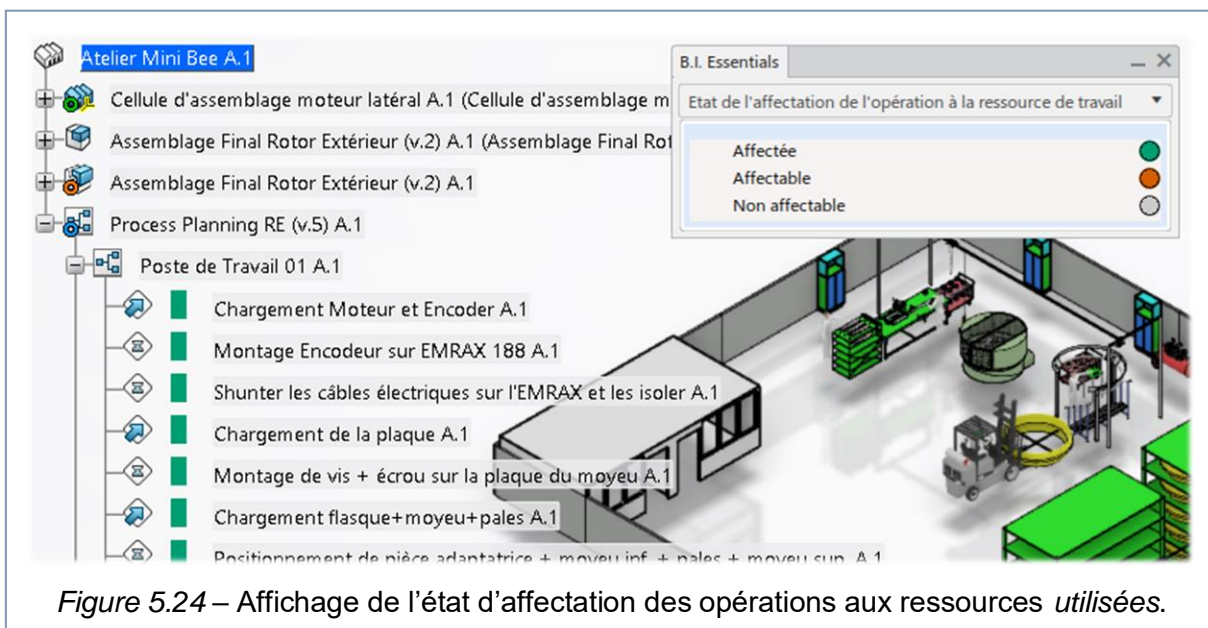


Figure 5.24 – Affichage de l'état d'affectation des opérations aux ressources utilisées.

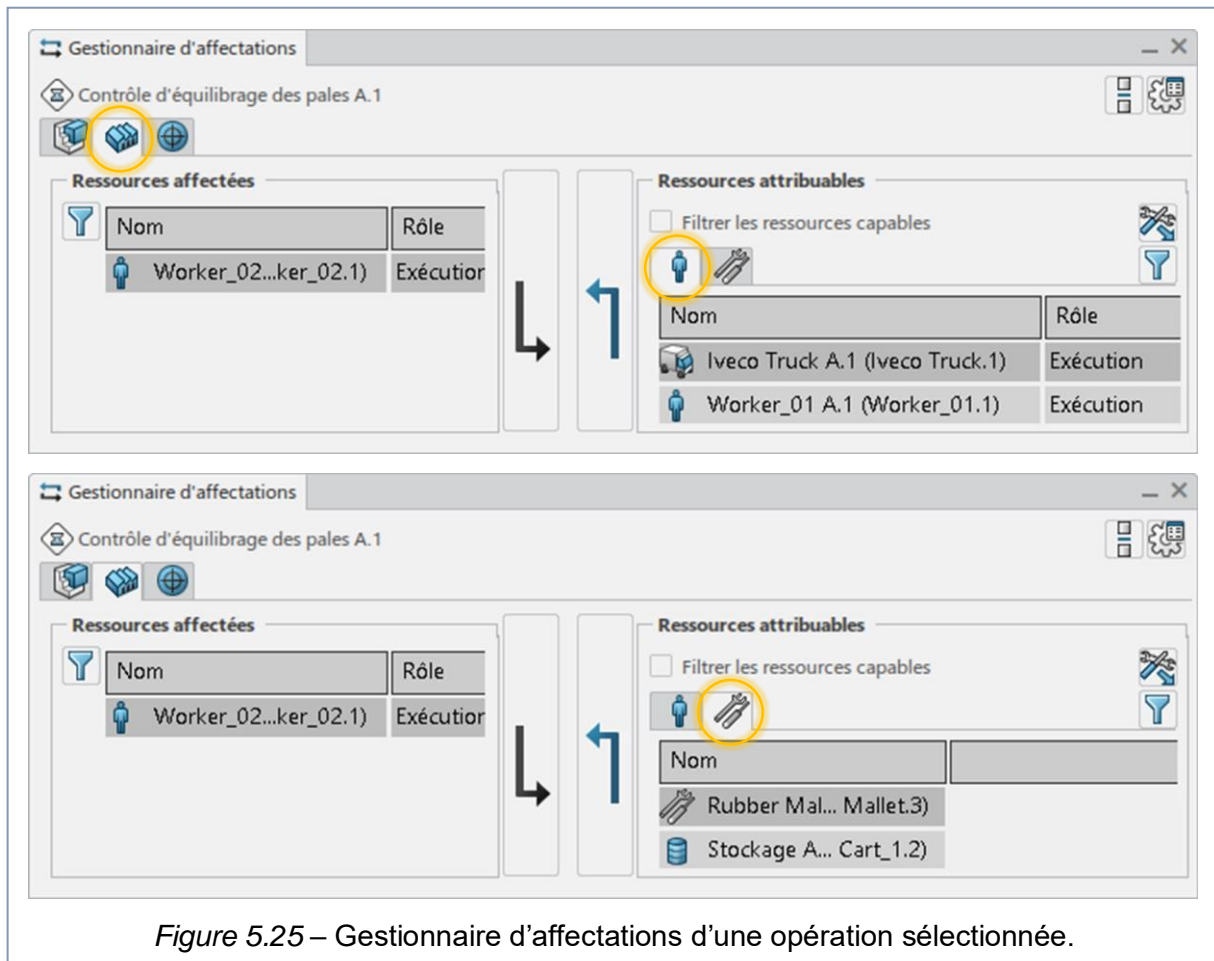


Figure 5.25 – Gestionnaire d'affectations d'une opération sélectionnée.

Une autre méthode consiste en la procédure inverse, c'est-à-dire l'affectation des ressources aux opérations. Pour ce faire, il suffit de développer l'arborescence du système de production et d'ouvrir le gestionnaire d'affectations sur l'opération souhaitée. Il n'est pas nécessaire de passer à l'application *Process Planning*, cette procédure est bien effectuée par l'application actuelle. Comme le montre la *figure 5.25*, dans le même panneau il est possible d'assigner tant les ressources « utilisées », que les ressources « non utilisées ».

Après avoir affecté toutes les ressources on peut remarquer que le tableau des relations (commande « Relations ») est plus complet. La *figure 5.26* en montre un exemple :

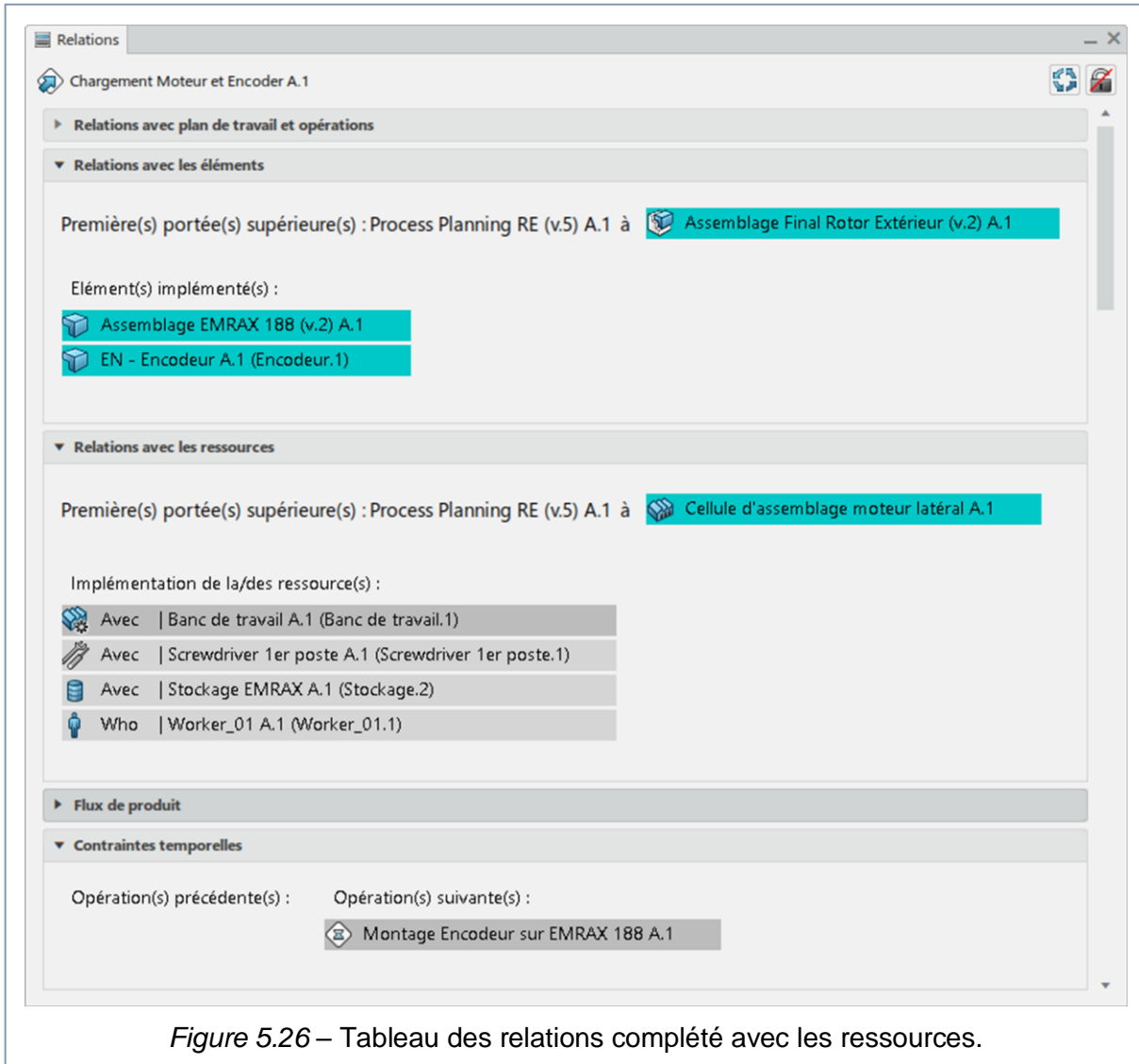
- les éléments de fabrication impliqués sont visibles en haut,
- au milieu on affiche les ressources, classées comme *who* ou *avec*,

- tandis qu'en bas on voit les opérations qui précèdent et qui suivent l'opération sélectionnée.

*N.B.* : les cellules de fabrication, ainsi que les zones, sont des ressources de type *organisationnel*. Par conséquent, elles ne peuvent pas être affectées aux opérations (*figure 5.25*), tandis qu'il est possible de faire le contraire : affecter des opérations à une *ressource organisationnelle* (*figure 5.22*).

*Remarque* : les problèmes rencontrés dans la modélisation du système de production, ainsi que quelques défauts et inexactitudes lors du choix des types des ressources, ont fait que l'attribution exacte de toutes les opérations n'a pas pu être accomplie.






Néanmoins, il est possible d'analyser certaines parties de notre travail afin de démontrer quelques potentialités du logiciel.



### Diagrammes d'utilisation et équilibrage des ressources :

Tout d'abord, la *figure 5.27* montre le diagramme d'utilisation de toutes les ressources actives de l'atelier.

Les trois premières colonnes représentent les trois opérateurs et donnent le même résultat affiché dans la *figure 4.11*. Les autres ressources actives de l'atelier ont été insérées comme *non utilisées* et donc ne figurent pas dans le diagramme d'utilisation. Parmi celles-ci on peut lister :

-  le banc d'essai
-  la commande du banc d'essai
-  le treuil
-  la commande du treuil
-  le chariot élévateur

Une fois que ces éléments sont correctement modélisés, le diagramme d'utilisation les affichera et il permettra ainsi de vérifier que leur niveau d'utilisation est acceptable, ni trop élevé (>100%), ni trop réduit.

### Diagrammes Gantt des ressources :

En sélectionnant les ressources actives, on peut afficher leur diagramme de Gantt grâce à la fonction contextuelle. La *figure 5.23* en donnait un exemple.

En cliquant sur une cellule de fabrication le logiciel affiche un diagramme de Gantt contenant toutes les ressources actives dans cette cellule. Celle-ci est une autre raison valable pour diviser l'atelier en plusieurs cellules de fabrication que, on rappelle, peuvent représenter n'importe quelle sous-unités de l'atelier (un site de production,

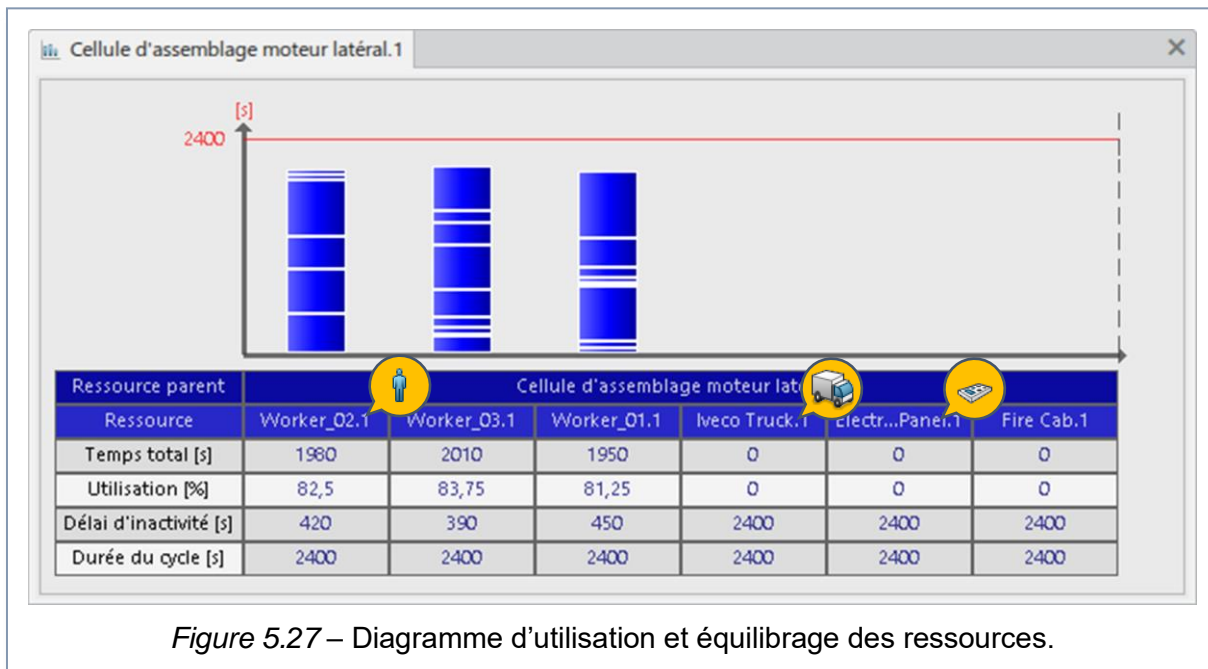


Figure 5.27 – Diagramme d'utilisation et équilibrage des ressources.

une ligne, une zone de l'usine, un poste de travail, etc.).

Comme indiqué plus haut, il est essentiel de trouver une méthode pour importer les ressources en les associant au type approprié, en particulier en termes de ressources *utilisées*, *non utilisées* et *organisationnelles*.

Dans le cas contraire, des situations telles que celle montrée à la figure 5.28 peuvent se produire ; certains outils ont été importés en tant que ressources *organisationnelles* et ne peuvent donc pas être affectés correctement aux opérations.

### 5.3.4 CONCERNANT LA SIMULATION VISUELLE DE L'ATELIER

L'application *Equipment Allocation* permet de lancer une simulation qui consiste théoriquement dans le flux physique de produits au travers de l'atelier. Dans chaque poste de travail il est possible de voir l'assemblage des pièces entrantes et leur sortie vers le poste suivant, tout selon la chronologie établie avec les applications *Manufactured Item Definition* et *Process Planning*. Toutefois, notre simulation ne pouvait pas démarrer si toutes les opérations n'étaient pas liées à un produit physique. L'affecta-

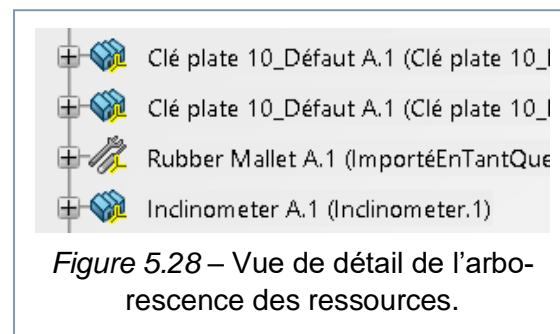


Figure 5.28 – Vue de détail de l'arborescence des ressources.

tion d'éléments tels que les *fixations* et les *transformations* ne suffit pas. Il faut aussi attribuer à toutes les opérations des *assemblages de fabrication* auxquels correspondent des produits physiques.

A ce stade il est donc possible de conclure que la **version 3** de la MBOM avec tous les sous-assemblages explicités et sans *fixations* et *transformations* aurait été mieux afin de poursuivre le travail.

*Remarque importante* : l'application *Equipment Allocation* permet de simuler le flux de produits, ainsi que d'analyser l'équilibrage de la ligne du point de vue de la charge de travail et des ressources employées.

Cependant, pour produire une simulation visuelle envisageant les ressources il faut utiliser les applications d'ergonomie : *Ergonomics at Work* et *Ergonomics Evaluation*.

## Annexe A

### TRAVAIL EFFECTUE AVEC LES MODULES D'ERGONOMIE

#### A.1 Module « Ergonomics at work »

##### A.1.1 INTRODUCTION ET CONCEPTS FONDAMENTAUX

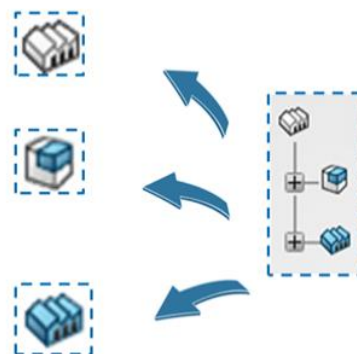
L'application **DELMIA Ergonomics at Work** fournit un ensemble de commandes et d'outils qui vous permettent de créer des comportements et des tâches pour les mannequins dans un environnement de fabrication ou de conception où les humains interagissent.

L'application Ergonomics at Work comprend les fonctions pour **créer des tâches humaines qui peuvent être validées et simulées en conjonction avec d'autres produits**.



Cela vous permet de valider le plan de travail actuel pour l'humain dans le scénario. Si le plan n'est pas valide, vous pouvez tester plusieurs alternatives pour compléter le scénario en utilisant un humain.

**PPR** est une structure qui contient un nœud produit et un nœud ressource :





- Le **produit** est une pièce ou un assemblage physique. Par définition, la fin d'un processus se traduit par la création du produit ou produits.
- La **ressource** est classée en tant qu'entité (telle qu'un mannequin, outil, robot, machine ou installation) utilisé dans le processus pour fabriquer un produit. Avec une ressource, un produit est créé, manipulé ou assemblé.



##### A.1.2 DETAILS DU TABLEAU DE BORD DE L'APPLICATION

Onglet du Tableau de Bord	Description
 <b>Séquencement</b>	<p>Cela fournit une façon simple de visualiser les tâches et les activités courantes associées à un mannequin ou à une autre ressource dans le contexte.</p> <p>Pour les mannequins, les informations sont organisées comme suit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Mannequin <ul style="list-style-type: none"> <li>- tâche humaine</li> <li>- activité humaine</li> </ul> </li> </ul>
 <b>ASO (Active Simulation Object)</b>	<p>Cela montre quel objet est l'objet de simulation active (ASO) et fournit des outils pour sélectionner un objet différent.</p> <p>Tout le travail que vous faites dans les panneaux est fait à l'actif objet de simulation (ASO). Lorsque vous ouvrez une simulation 3D, l'objet que vous avez sélectionné immédiatement avant l'ouverture détermine votre ASO initial.</p>



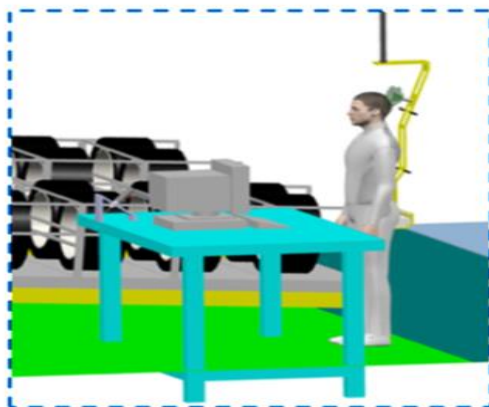
	<p><b>États de simulation</b></p>	<p>Un état est un instantané des propriétés de position et de simulation des objets au point où l'état est créé. Tous les états que vous créez seront stockés dans cet onglet.</p>
	<p><b>Sondes</b></p>	<p>Les sondes sont des éléments qui recueillent des données (comme des mesures) ou qui effectuent une analyse de données (comme l'analyse de choc).</p>
	<p><b>Comportement</b></p>	<p>Cela vous permet de créer de nouvelles tâches ou activités humaines. Il stocke également toutes les tâches ou activités humaines précédemment créées.</p>
	<p><b>Arbre</b></p>	<p>L'arbre ne figure pas dans l'environnement de simulation 3D par défaut. Vous pouvez l'afficher à tout moment en appuyant sur la touche F3. L'arborescence peut être utile pour sélectionner des objets plutôt que dans l'espace de travail.</p>

### A.1.3 LES FONCTIONS DE BASE DE L'APPLICATION

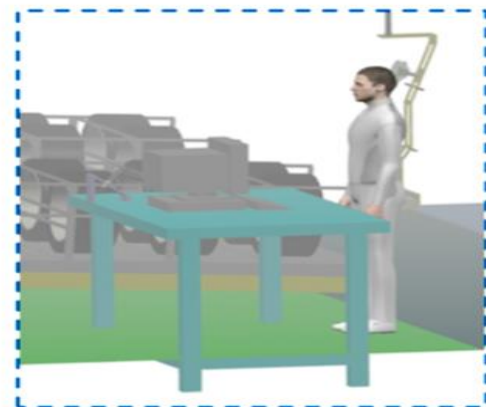
#### Définition du Contexte de Simulation : choisir l'ASO

Le contexte de simulation est défini en choisissant l'Objet de Simulation Active (ASO).

Tous les objets qui ne sont pas des enfants de l'ASO seront montrés en basse lumière pour vous aider à vous concentrer sur le contexte.





Factory (includes manikin)  
set as ASO



Manikin set as ASO

Il y a deux méthodes pour choisir l'ASO :

1. Clic droit > Affichage > Options de l'App >  Activer l'objet de simulation > cliquez l'ASO souhaité dans l'espace
2. Cliquez sur l'ASO souhaité dans l'espace > cliquez sur la petite icône  Axis M...1506.1




## Définition de différents états des ressources : Etats de Simulation

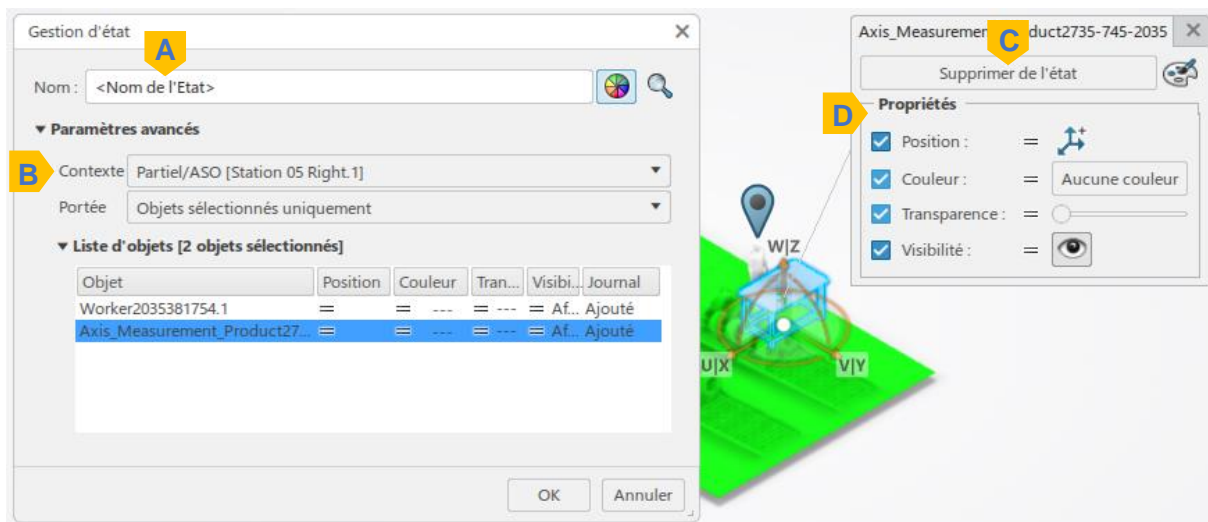
Une fois le contexte de simulation est défini par l'ASO, vous devez également définir l'état initial de tous les produits et ressources qui seront impliqués dans l'activité de simulation (*position, couleurs, visibilité...*).

Une méthode pour capturer l'état initial d'un objet est de créer un **état de simulation**. Cependant, avant de le créer, assurez-vous d'avoir le bon ASO.

Seuls les objets sous l'ASO pourront être capturés dans l'état de simulation.

Les étapes suivantes montrent comment définir un état de simulation :

1. Dans la section *Configuration*, cliquez sur l'icône  *Nouvel état de simulation*.
2. Dans le panneau *Gestion d'état*, vous pouvez choisir :
  - A. le nom de l'état de simulation,
  - B. son contexte (Global ou Partial = ASO),
  - C. quels objets ajouter/supprimer de l'état,
  - D. l'état des objets ajoutés.



L'état de simulation sera enregistré sous l'onglet Etats de Simulation dans le *Tableau de Bord*. (La position de la conception de l'atelier est stockée sous l'état de simulation appelé **Etat Nominal**).

### Recommandations :

- Lorsque vous créez un nouvel état de simulation, il ne contient que l'état des entités appartenant à l'ASO actuelle et de ses enfants. Donc créez l'état au plus haut niveau de la hiérarchie des ressources qui contient toutes les ressources pour lesquelles vous devez sauvegarder des positions.
- En même temps, considérez également les objets que vous ne voulez pas être capturés dans l'état. Pour des scénarios plus complexes, vous pouvez définir l'ASO à un objet de bas niveau dans l'arbre (un mannequin) et créer un état de simulation compo-

site pour ajouter d'autres ressources ou produits au besoin. Cela vous permettra d'appliquer l'état et de restaurer les positions avec un impact minimal sur d'autres objets dans l'espace de travail.

- Si vous devez capturer l'état d'un objet qui ne partage pas un parent commun avec l'ASO actuel, créez un état de simulation composite.

#### A.1.4 CONCERNANT LES MACRO-ACTIVITES

Les tâches et les activités humaines sont des contenants propres à un mannequin, qui peuvent stocker l'information de simulation de ce dernier.

Cependant, il existe une différence importante entre elles :

- les **tâches humaines** peuvent contenir plusieurs macro-activités séquentielles,
- tandis que les **activités humaines** ne peuvent en contenir qu'une seule.

Vous pouvez choisir entre plusieurs types de macro-activités :




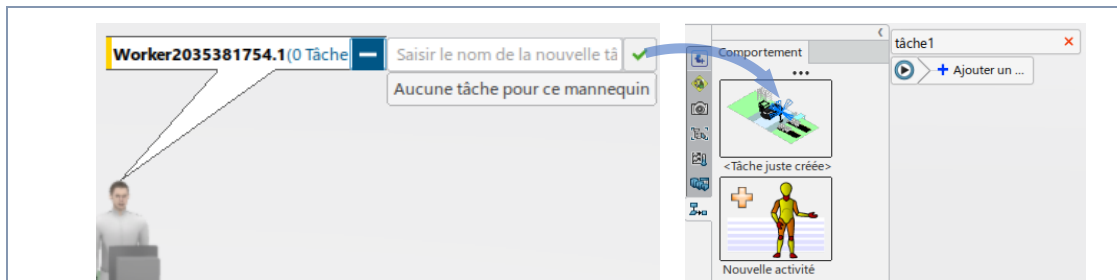
#### Exemple 1 : création d'une macro-activité type « GOTO »

Avant de créer une activité, vérifiez toujours d'avoir choisi le bon ASO et appliqué l'état de simulation approprié afin de garantir que le mannequin et les autres objets soient où vous vous attendez.

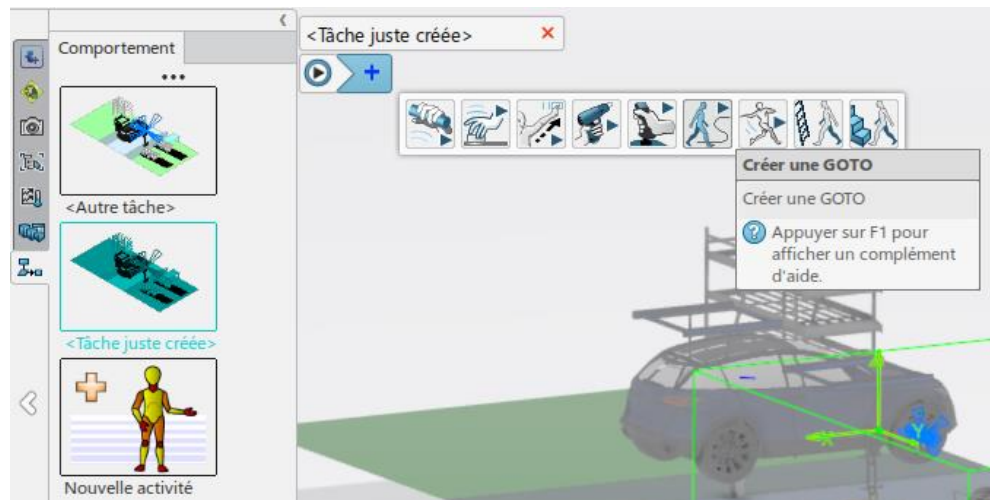
Il y a deux méthodes pour créer une activité GOTO :

1. En dessinant le tracé

- Définissez le mannequin que vous voulez simuler comme ASO.
- Sélectionner l'état de simulation que vous souhaitez utiliser comme position initiale pour le mannequin et cliquez sur « **Définir comme actif** » (à moins que l'état ne soit déjà actif), puis sur « **Appliquer** ».
- Créer une nouvelle tâche : saisissez son nom et confirmez. Elle sera montrée dans l'onglet  **Comportement**.



- Double-cliquez la tâche dans l'onglet *Comportement*.
- Cliquez sur « *Ajouter une activité* » et, après, sur l'icône de GOTO.



- Choisissez les options de l'activité et tracez le chemin du mannequin.
- Confirmez enfin pour créer votre activité.

## 2. En exploitant les emplacements préexistants

Cette méthode suppose qu'un emplacement humain a déjà été créé :

- Sélectionnez la tâche humaine préexistante pour y ajouter la nouvelle activité GOTO.
- Si le mannequin n'est pas en correspondance de l'arrivée du dernier GOTO, double-cliquez sur la dernière activité. Cela vous permettra de tracer le chemin à partir de cet emplacement.
- Cliquez sur « *Ajouter une activité* » et ajoutez un autre GOTO.

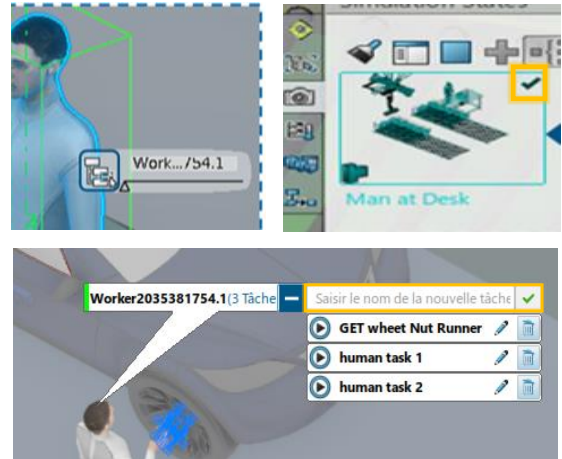
Tous les emplacements humains préexistants apparaîtront dans la zone de travail. Du coup sélectionnez l'emplacement humain vers lequel vous voulez que le mannequin marche et choisissez son chemin.

### **Exemple 2 : création d'une macro-activité type « GESTURE »**

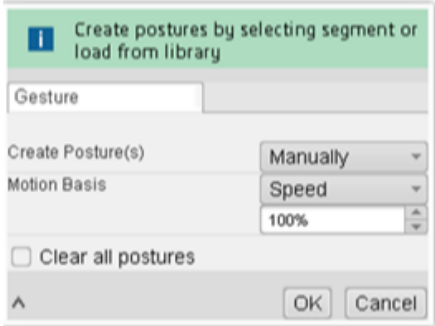


Cette macro-activité nous permet de faire manipuler le mannequin sans qu'il marche. Autrement, il nous permet de faire bouger les différentes articulations (les doigts, poignés, coudes...) du mannequin sauf la marche.

- ✓ Les étapes à suivre pour réussir à créer une GESTURE

- Définir le mannequin que vous voulez simuler comme ASO
- Activer et appliquer l'état de simulation que dans laquelle on va Introduire la macro-activité.
- Créer et renommer une activité
- Créer la macro-activité GESTURE



✓ Les options pour la mise en œuvre d'une GESTURE

<p><i>La boîte de définition de la GESTURE</i></p>	<p>à travers laquelle on peut gérer la vitesse et le mode création</p>	
<p><i>La barre de compétence</i></p>	<p>là où on trouve les commandes d'enregistrement des postures pour obtenir toute une GESTURE</p>	
<p><i>Barre de commande du mannequin</i></p>	<p>dedans on trouve les options pour ajuster le mouvement du mannequin lors de la GESTURE (manipulation de l'angle de liaison, atteinte et saisie ...)</p>	

### Exemple 3 : création d'une macro-activité type « GET »

La macro activité « GET » permet au mannequin de prendre une ressource à la main (ex : visseuse, marteau...).

Toujours à suivre les étapes de création de l'activité.

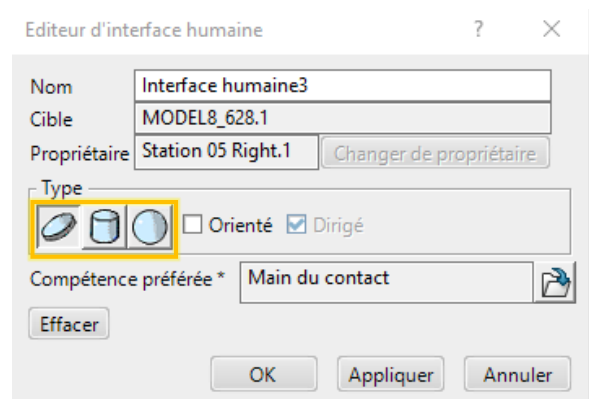
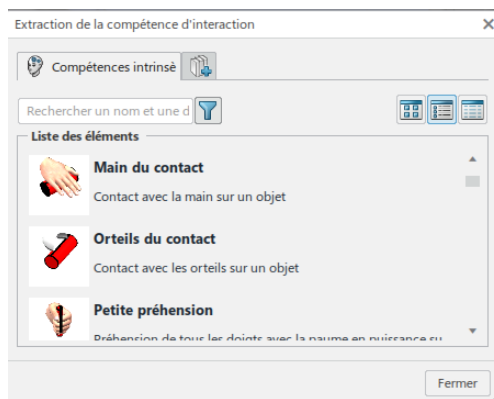
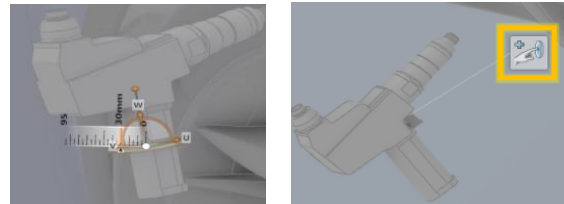
- ✓ Les étapes pour créer une macro-activité de type « GET »

- Définir le mannequin que vous voulez simuler comme ASO
- Activer et appliquer l'état de simulation que dans laquelle on va Introduire la macro-activité.
- Créer et renommer une activité
- Créer la macro-activité GET



✓ Comment paramétrer une macro-activité de type « GET »

- Sélectionner la ressource à prendre dans la main de la part du mannequin
- Pour créer une surface de contact cliquez sur la commande « interface humaine » et puis Positionner le repère qui apparaît sur la surface de contact désiré
- Le logiciel nous permet par suite de choisir le type de surface de contact à l'aide du BOX « éditeur d'interface humaine » :



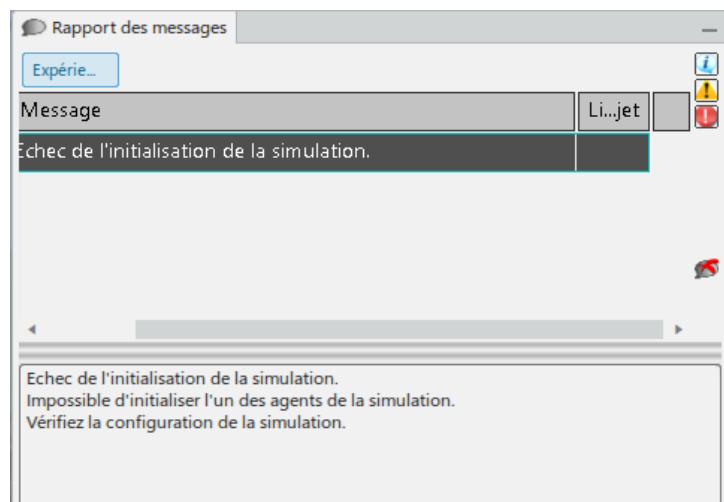
Si on confirme le choix et on le confirme la surface d'interaction se colore en vert.

- Finalement il nous ne reste que de sélectionner la position du mannequin lors de l'opération GET

### A.1.5 LES PROBLEMES RENCONTRE LORS LE LANCEMENT DE LA SIMULATION

Lors de travail des tutoriaux pour le module « Ergonomics at work » et après avoir définir un scénario de simulation il fallait la faire mais une erreur était survenue et on a eu un blocage dans la simulation pourtant qu'on a bien répéter les mêmes étapes faites dans les tutos.

Le problème se présente toujours même lorsqu'on a essayé de simuler une simple tâche



## Les tentatives pour trouver la solution

Après avoir revenir à des anciens rapports dans d'autres projets mais qu'ils sont dans le même contexte de simulation des ateliers à l'aide des modules de Delmia on a remarqué qu'ils ont vécus aussi le même problème d'initialisation et il s'est avéré que c'était dû à l'absence du compilateur C.

Pour être sûr de ce qu'on est en train de faire on a proposé à un collègue, qui sera bientôt chargé pour un PFE chez DASSAULT SYSTEMS, de contacter son tuteur pour nous aider là-dessus.

L'expert nous a confirmé que, effectivement, le compilateur C n'était pas installé sur nos machines

Et l'astuce qu'il faut la respecter, que l'installation de 3DEXperience et du compilateur doit être faite dans un ordre bien précis. Soit d'abord, installer « Visual Studio 2013 Community Edition » et ensuite installer 3DEXperience. Sinon, lors de l'installation du logiciel 3DEXperience, cocher la case « installer l'ensemble du contenu supplémentaire » qui inclut Visual Studio. De ces deux façons, le logiciel fait automatiquement le lien avec le compilateur.

Du coup, on a allé solliciter l'aide du service informatique pour l'installation de ce qu'il nous manque et on a réussi finalement à lancer la simulation normalement.

### A.1.6 LE TRAVAIL D'ERGONOMIE FAIT SUR NOTRE ATELIER

Vu qu'on a resté assez de temps pour aboutir à la solution et puisque on l'a résolu dans les derniers jours On a essayé de simuler une activité qui illustre l'enchaînement des macro-activités pour faire une opération d'assemblage.

Pour faire l'affaire on a choisi l'activité qui montre l'opérateur de la première poste entrain d'assembler l'ensemble « flasque + pales ».

Voici quelques détails pour montrer la logique de choix des macro-activités afin d'obtenir l'activité désirée.

#### Les étapes :

Après avoir prendre un état de simulation bien précis et fixer l'ASO en vigueur on va créer les macro-activités nécessaire pour manipuler l'opérateur qui va prendre la pièce désirée et la mettre dans sa bonne position.

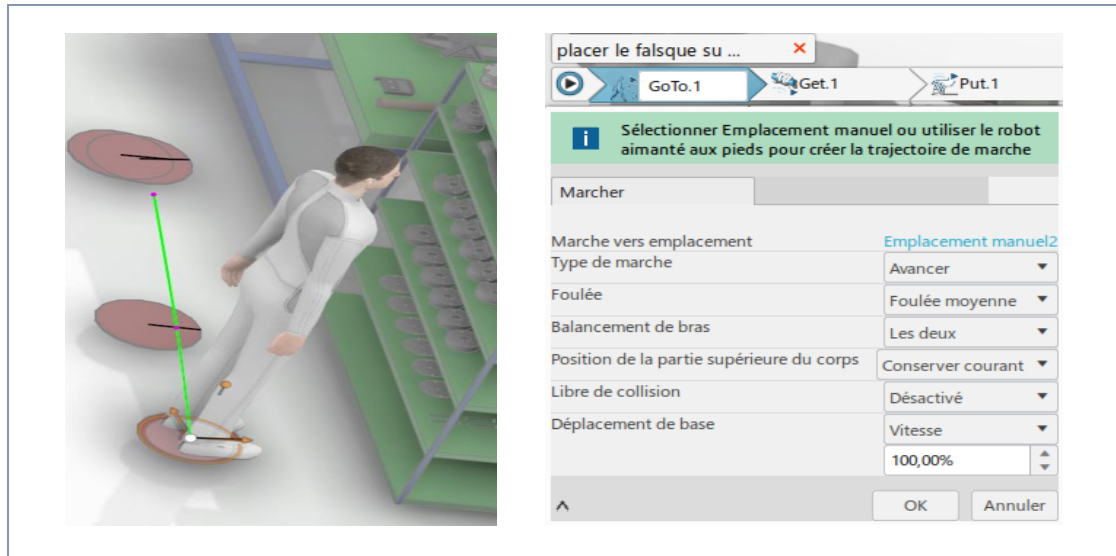
Ces étapes vous montrent la première action du mannequin qui va prendre la flasque et la mettre sur le support dans sa bonne position

1. en première étape on doit créer une « **GOTO** » pour tracer une trajectoire de marche pour le mannequin et lui amener devant la pièce qu'il va la prendre.

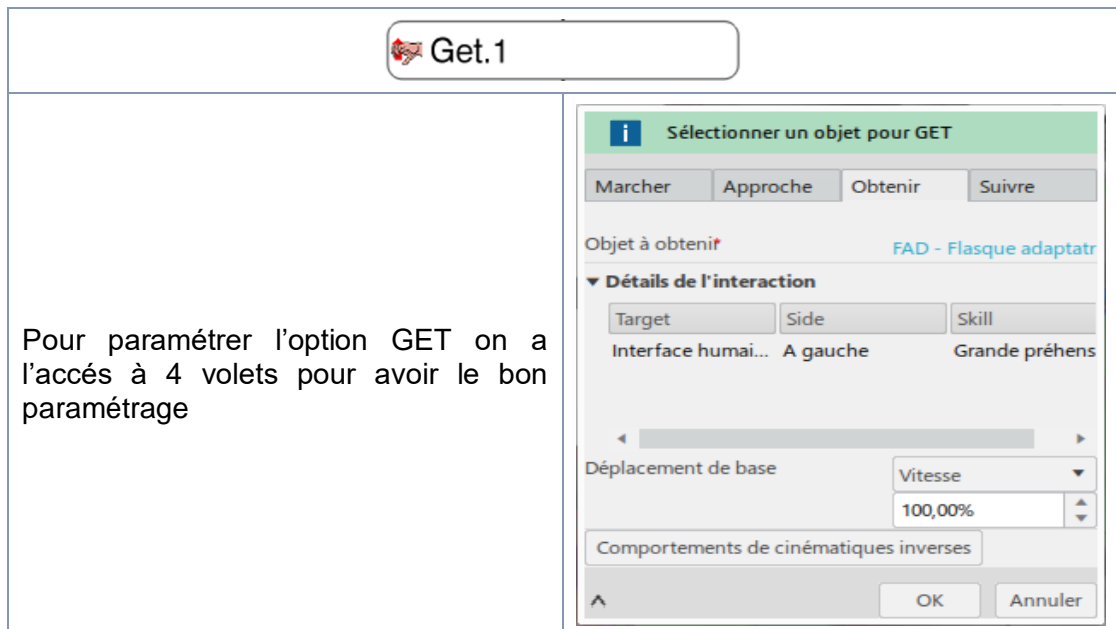


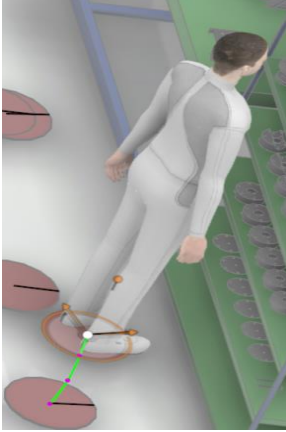


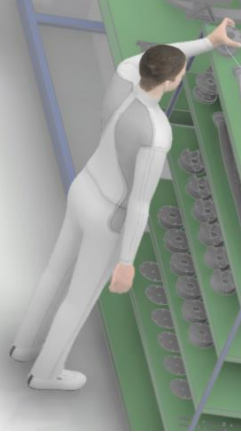
EXPLICATION : à l'aide du BOX qui s'apparait on peut Modifier les paramètres de marche (vitesse, Avance/recule, position des mains lors de la marche...).






2. Après le déplacement du mannequin on a créé une macro-activité « **GET** » qui permet d'obtenir l'objet à positionner :




			
<p><b>MARCHE :</b> ce volet nous permet d'ajouter un tracé pour que le mannequin puisse avoir l'accès à la pièce s'il ne pourrait pas l'atteindre lorsqu'il est dans sa position initiale.</p>	<p><b>APPROCHE :</b> à travers laquelle on peut mettre la main dans sa position prête et appropriée avant de prendre la pièce.</p>	<p><b>OBTENIR :</b> dès qu'on sélectionne l'objet à prendre l'option 'obtenir' nous fait apparaître un repère qui localise la surface de contact désiré.</p>	<p><b>SUIVRE :</b> cette option nous permet de d'enregistrer des postures pour obtenir une position de relâchement avec laquelle il va continuer de marcher après la commande GET.</p>


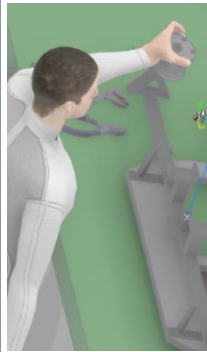
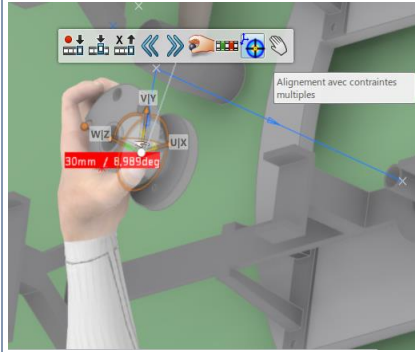

3. Pour mettre la pièce dans sa bonne position on a la macro-activité « PUT » qui fait l'affaire :

 Put.1

Pour paramétrer l'option PUT aussi on a l'accès à 4 volets pour avoir le bon paramétrage.

 Créer des postures manuellement en sélectionnant le segment ou charger à partir de la bibliothèque

Marcher	Approche	Placer	Suivre
Créer des postures	Manuellement ▼		
Déplacement de base	Vitesse ▼		
	100,00% ▲▼		
<input type="checkbox"/> Effacer toutes les postures			
^		OK	Annuler

			
<p><b>MARCHE :</b> ce volet toujours nous permet de faire un tracé pour que le mannequin se positionne devant la place où on va mettre la pièce.</p>	<p><b>APPROCHE :</b> à travers des empilements de postures on peut mettre la main dans sa position prête et appropriée pour placer la pièce dans la position désiré.</p>	<p><b>PLACER :</b> si on déplace la pièce selon le repère on peut aboutir à placer la pièce ... pour avoir une méthode plus précise on peut utiliser la commande « <b>alignements avec contraintes multiples</b> ».</p>	<p><b>SUIVRE :</b> comme celui du GET le 'suivre' nous permet d'enregistrer des postures pour obtenir une position de relâchement avec laquelle il va continuer de marcher après la commande GET Dans notre cas on a choisi la position « décontracté ».</p>

### A.1.7 LES DIFFICULTES AVEC LE MODULES « ERGONOMICS AT WORK »

Bien qu'on ait à la disposition des tutoriaux sur l'aide en ligne du logiciel 3DExperience et le « compagnon » de Dassault Systèmes, on se trouve toujours face à des problèmes qu'ils ne sont pas détaillés dans les tutos. Et donc, on se retrouve devant des questions, auxquelles on n'a pas forcément la réponse.

Pour ce module nos doutes c'étaient :

- Comment faire la simulation de deux activités (et non pas deux macro-activités) successives.
- Comment simuler deux tâches de deux opérateurs au même temps (celui-ci est très importante puisque on compte beaucoup sur la notion du **temps masqué** pour optimiser les taux d'utilisation dans l'atelier)

## A.2 Module « Ergonomics Evaluation »

### A.2.1 OBJECTIF DE L'APP

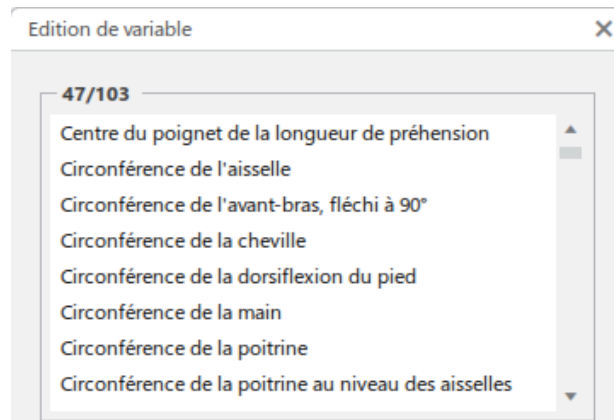
L'évaluation ergonomique est une application qui permet à l'utilisateur d'obtenir des informations sur le matériel humain dans l'atelier, qui n'existe pas encore dans la vie réelle, mais dans un projet numérique.

Il vous permet également de créer des interfaces homme-produit, des interactions, utiliser la cinématique inverse pour manipuler vos modèles, ce qui conduira à des mouvements plus naturels plutôt que robotiques. Avec le *Forward Kinematics*, vous pouvez vérifier les collisions possibles en contrôlant les mouvements prédéfinis du mannequin.

## A.2.2 FONCTIONS PRINCIPALES

### **Anthropométrie** **et analyse de posture**

Il y a deux sections principales pour créer vos travailleurs, Anthropométrie et analyse de la posture. Le premier est celui que vous utilisez pour créer l'humain, avec des options de nationalité, qui est basé dans les 5, 50, 95% pourcentages de 8 populations différentes, vous pouvez également choisir de genre et les postures – debout, atteindre, envergure. Par contre, l'analyse de posture peut vous fournir tous les outils nécessaires pour simuler l'interaction réelle entre les travailleurs et les produits, tels que les gestes des mains, l'amplitude des mouvements dans chaque partie du corps etc.



*Options pour créer l'être humain que vous désirez*

L'analyse pareillement vous fournit des données sur l'exécution des tâches en tenant compte des effets de levage, d'abaissement, de poussée, de traction et de transport, en fournissant suffisamment d'informations pour valider le modèle.

#### **Utilisation du nœud « corps »**

Commençant par des outils vraiment basiques, des paramètres simples peuvent être définis en cliquant droit sur le nœud corps et en sélectionnant les propriétés. L'apparence, les limites d'angle et les angles préférés seront demandés. Vous pouvez également réinitialiser les postures, swap (ce qui a été défini sur la gauche, ira à la droite et vice versa).

Aussi, si vous ne voulez pas perdre de temps à contrôler chaque partie du corps et que vous voulez des postures par défaut, vous pouvez choisir entre quelques positions normalisées pour chaque partie du corps.

#### **Utilisation du nœud « Paramètres »**

Pour vous faciliter la tâche, c'est une bonne idée de choisir un bon référentiel. Le tutoriel propose les options suivantes : par exemple, si vous concevez une voiture, vous utilisez « H-Point » ; pour une ligne de fabrication, vous pouvez sélectionner « Entre les pieds » ; et pour un avion cockpit la norme est d'utiliser « Eye point ».

C'est nécessaire car chaque fois que vous appliquez une posture, elle sera liée au référentiel. Donc si votre référentiel est entre les pieds, et que vous sélectionnez la position assise par

exemple, les pieds resteront près du sol ; sinon, ils iront aux bases du référentiel et des décalages peuvent se produire, ce qui rendra les choses plus compliquées.

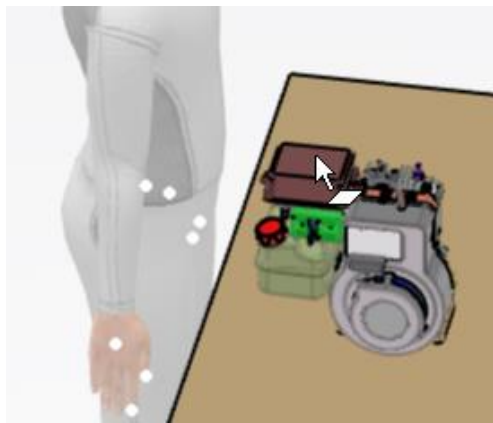
Par contre, si vous choisissez le référentiel pour être un « point-H » et le 0 étant l'emplacement du siège, si vous choisissez la position assise, l'humain sera aligné avec le siège, donc vous devez choisir selon la situation.

### Manipuler

Dans cette fonction, des contraintes dans chaque partie du corps peuvent être créées puis activées sur des segments dédiés. La contrainte pourrait être une fixation géométrique ou la liberté de mouvement d'une certaine manière.

### Atteindre

À l'aide de cet outil, il est possible d'atteindre n'importe quelle courbe ou surface souhaitée, nécessitant quelques ajustements raffinés pour fixer la posture. Seuls certains segments peuvent être sélectionnés, comme le montre la photo ci-dessous.



*Zones possibles pour la sélection du mouvement*

### Créer une interface humaine

Cela est une étape nécessaire pour faire fonctionner d'autres outils dans l'application. D'abord, cliquez sur la commande « Interface humaine », puis le produit ou une interface humaine. La boîte de dialogue demandera « Target », « Propriétaire », « Type » et « Compétence préférée ». Remplissant cela selon votre besoin, maintenant vous avez une interface créée.

### Interagir

Tout d'abord, vous avez besoin d'un mannequin avec des interfaces déjà créées (juste une forme géométrique pour créer une relation entre un segment et un objet) et aussi des compétences définies telles que le contact d'un objet avec cette partie du corps.



*Relation géométrique a été définie entre la canne et la main*

Une tâche temporaire sera affichée à l'écran, en surbrillance par une étoile blanche à côté du « Target ».

### **Autres outils importants**



La barre d'outils lorsqu'un segment est sélectionné montre quelques options assez faciles pour obtenir la configuration souhaitée. Le premier montre 4 formes de détention, qui sont suffisantes pour atteindre presque toutes les configurations. Le deuxième symbole signifie le niveau des mains ouvertes que vous voulez. Le troisième symbole montre deux options sur la façon d'atteindre l'objectif : l'une consiste simplement à considérer la position, tandis que dans le second l'orientation est également prise en compte. Le dernier bouton signifie fixer ou libérer un segment concernant la position ou la tâche précédemment effectuée.

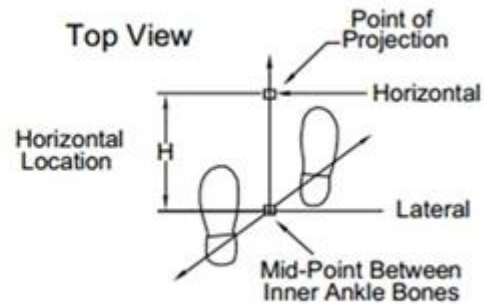
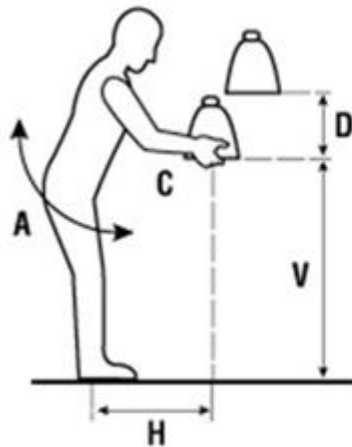
### **A.2.3 ERGONOMIC ANALYSIS**

L'objectif de cette application est l'utilisation de règles normalisées, pour vérifier si un travailleur effectue des charges excessives tout au long de ses heures de travail. Il existe des rapports produits par de multiples options d'analyse, sont-ils : les rapports Lift-Lower, Push-Pull, Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Biomechanics Single Action Analysis, dont le plus important pour nous, compte tenu des efforts des tâches, serait le premier et le dernier.

#### **Lift-Lower analysis**

Cette analyse tient compte de l'équation de levage du NIOSH pour les tâches uniques, qui se compose de nombreux facteurs qui pourraient influencer une charge de travail et entraîner des problèmes pour les travailleurs. La photo ci-dessous montre les paramètres nécessaires.





*Paramètres nécessaires pour utiliser l'équation*

$$RWL = LC (51) * HM * VM * DM * AM * FM * CM$$

Où les différents symboles signifient :

- Le poids de charge transporté par le sujet (RWL)
- Une constante de charge (LC) = 51 livres
- Le multiplicateur horizontal (HM)
- Le multiplicateur vertical (VM)
- Le multiplicateur de distance (DM)
- Le multiplicateur asymétrique (AM)
- Le multiplicateur de fréquence (FM)
- Le multiplicateur de couplage (CM)

### Biomechanics Single Action Analysis

Cet outil ergonomique mesure les données biomécaniques d'un travailleur dans une pose donnée. À partir de la posture actuelle du mannequin, la boîte de dialogue Biomechanics Single Action Analysis calcule une information de sortie. Il peut s'agir des charges lombaires (force abdominale, pression abdominale, mouvements du corps) et des forces et moments sur les articulations du mannequin. Tous les extraits intégrés au modèle sont fondés sur les résultats de recherche et les algorithmes publiés par la communauté scientifique.

Les forces (charges) agissant sur les mains du mannequin sont prises en compte dans l'analyse biomécanique. Ces forces représentent la charge de transport, de poussée, de levage/abaissement ou de traction, selon le scénario, et sont disponibles pour les mains seulement. Les boîtes de dialogue « Load Properties » et « Biomechanics Single Action Analysis » peuvent être ouvertes en même temps. La dernière analyse est mise à jour lorsque le chargement est modifié.

~ Page blanche ~

## Documents annexes

- [08-11-2019 Digital Factory](#)
- [02-10-2019 EMRAX motor - Excerpt of user manual](#)
- [04-10-2019 Hélice NG-D - Excerpt of the user manual](#)
- [29-11-2019 Rapport sur le travail exploratoire effectué avec l'application Process Flow Simulation](#)
- [10-12-2019 Continuation du travail avec l'app Factory Flow Simulation](#)
- [14-01-2020 Problèmes avec les apps de simulation de processus DELMIA](#)

## Sources et autres matériels

### CHAPITRE 1

- [RAPPORT FINAL 2018-19](#)
- [Présentation MiniBee](#)
- [Mini-Bee Wiki](#)
- [Mini-Bee License](#)

### CHAPITRE 2

- [Emrax motors user manual](#)
- [Hélice manual 1](#)
- [Hélice manual 2 \(small\)](#)
- [23-10-2019 Billan des problèmes résolus](#)
- [30-10-2019 Rapport jusqu'au 04-11-2019](#)
- [18-10-2019 Problèmes avec la maquette de l'hélice](#)

### CHAPITRE 3

- [08-10-2019 Use of Ranked Position Weighted method for assembly line balancing](#)
- [05-11-2019 Les opérations d'assemblage](#)
- [08-11-2019 Rapport calculs RPW](#)
- [RPW - simulation Excel/VBA](#)

### CHAPITRE 4

- [Help 3Dexp](#)
- [14-10-2019 Simulation with 3DEXPERIENCE](#)
- [19-11-2019 Recherche sur les concepts d'EBOM, MBOM, CADBOM](#)
- [21-11-2019 Rapport de travail avec l'application Manufactured Item Definition](#)

- [26-11-2019 Analyse étape par étape de la conformité entre le MBOM et la liste des opérations](#)
- [28-11-2019 Opérations d'assemblage avec chargements, déchargement et transfert](#)

## **CHAPITRE 5**

- [18-12-2019 Conception de l'atelier](#)
- [28-01-2019 Rapport Ergonomics Evaluation](#)

## **TUTORIALS**

- [15-10-2019 Tutoriel ENOVIA Collaborative Lifecycle Management](#)
- [20-10-2019 Tutoriel CATIA Drafting](#)
- [11-10-2019 Tutoriel DELMIA Manufactured Item Definition](#)
- [06-12-2019 Tutoriel Ergonomics at Work](#)