

## Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Présentation des équipes.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Gestion du Projet.....</b>	<b>3</b>
2.2- Contexte.....	3
2.3- Déroulement du projet:.....	4
2.3- Répartition des tâches.....	6
2.4- Diagramme de GANTT.....	6
<b>3. Processus d'ingénierie du système.....</b>	<b>7</b>
3.1- Présentation du bras.....	7
3.2- Caractéristiques principales.....	8
3.3- Bête à corne.....	8
<b>4. Contexte Utilisation.....</b>	<b>9</b>
4.1- Diagramme de pieuvre.....	9
4.2- Fonctions.....	10
4.3- Contraintes opérationnelles.....	10
<b>5. Analyse Opérationnelle.....</b>	<b>11</b>
5.1- Diagramme des cas d'utilisation (DCU).....	11
5.2- Diagramme de contexte du système (DSC).....	11
<b>6. Validation arbre monobloc.....</b>	<b>12</b>
6.1- Matériau utilisé.....	12
6.2- Choix des dimensions.....	13
6.3- Paramétrage de la pièce.....	14
6.4- Validations.....	15
6.4.1 Famille 1 (2995N - 2725N - 2225N).....	15
6.4.2 Famille 2 (1280N).....	17
6.4.3 Famille 3 (570N).....	19
6.5 Tableau récapitulatif.....	21
<b>7. Recherche d'une solution avec l'arbre assemblé.....</b>	<b>21</b>
7.1 Dimensionnement des goupilles:.....	21
7.2 Dimensionnement des vis:.....	21
7.3 Solution pour la famille 1:.....	22
7.4 Solution pour la famille 2:.....	22
7.5 Solution pour la famille 3:.....	23
<b>8. Comparaison des deux arbres.....</b>	<b>23</b>
<b>9. Cahier des charges.....</b>	<b>25</b>
<b>10. Validation du cahier des charges:.....</b>	<b>27</b>
<b>11. Difficultés rencontrées.....</b>	<b>30</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>30</b>

## Introduction

Ce projet a pour objectif la conception de vérins rotatifs destinés à équiper un bras mécanisé. Ce bras doit être polyvalent, capable de supporter différents outils, et suffisamment robuste pour fonctionner dans des environnements exigeants, que ce soit en surface ou en milieu subaquatique.

La démarche de conception s'appuiera sur une approche d'ingénierie système. Pour y parvenir, nous utiliserons le logiciel CATIA pour la modélisation 3D précise de tous les composants.

La présentation finale synthétisera l'ensemble de ce travail. Elle détaillera le cahier des charges initial, les résultats des simulations, les choix de dimensionnement et l'évaluation globale du projet. Un accent particulier sera mis sur les défis techniques rencontrés et les solutions apportées pour les résoudre.



FIGURE 2.1 – Logo CEA



FIGURE 2.2 – Logo CYBERNETIX

## 1. Présentation des équipes

La team 5 du groupe B afin de réaliser le projet est composé de

Romain LHEPT, Pierre TOUET-SI-ABDELHADI, Mathis PAULY, Jérémie HUGUES, Martin GOULET et Maksimilien DEUTSCH.

## 2. Gestion du Projet

### 2.2- Contexte

Ce projet vise à concevoir des vérins rotatifs pour un bras mécanisé, en se focalisant sur trois exigences clés du client CYBERNETIX : la fiabilité, la rentabilité et l'adaptabilité. L'équipement final devra ainsi fonctionner de manière robuste dans des environnements contraignants, comme en surface ou sous l'eau, et pouvoir s'interfacer avec différents outils selon les besoins opérationnels.

Pour y parvenir, une démarche d'ingénierie systémique a été adoptée, débutant par une analyse approfondie des besoins afin d'établir un cahier des charges précis. Puis on utilisera le logiciel CATIA, pour la modélisation 3D détaillée des composants critiques, tels que l'arbre et les palettes. La robustesse de ces conceptions est ensuite validée par des analyses sur le logiciel, garantissant ainsi leur tenue aux contraintes mécaniques.

La phase de conception démarre par la création d'une maquette numérique paramétrique du bras et de ses vérins rotatifs sur CATIA V5. Sur la base des résultats de dimensions des pièces critiques (arbres, vis, goupilles, etc.), sont définies et validées par des analyses et calculs sur EXCEL, assurant leur tenue mécanique.

Le fonctionnement global du système est ensuite éprouvé par une série de simulations de plus en plus réalistes. Les performances sont d'abord évaluées avec un modèle simplifié à base de ressorts-amortisseurs, avant d'intégrer progressivement les moteurs hydrauliques pour se rapprocher des conditions d'exploitation réelles. Ces étapes permettent de vérifier la conformité du bras avec les exigences du cahier des charges, en particulier en matière de couple, d'efforts et de fiabilité.

Enfin, la restitution du projet présentera de manière structurée l'ensemble de la démarche : du cahier des charges initial aux modélisations CATIA, en passant par le dimensionnement validé des composants. Elle se conclura par une évaluation de l'adéquation aux attentes du client et un retour sur les principaux défis techniques rencontrés, ainsi que sur les solutions retenues pour les résoudre.

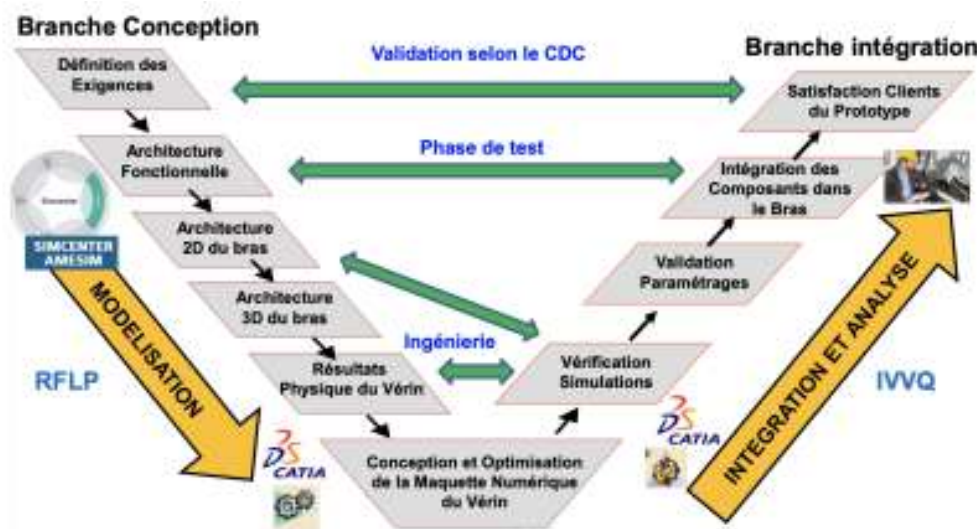
### 2.3- Déroulement du projet:

Premièrement, nous menons la conception préliminaire du bras et des vérins rotatifs, en développant une maquette numérique paramétrique sous CATIA. Une fois les calculs réalisés, les dimensions des composants critiques tels que les arbres, vis et goupilles sont déterminées et validées par analyse par éléments finis. Des simulations supplémentaires sont ensuite conduites pour vérifier le fonctionnement global du système.

Les performances du bras mécanisé sont évaluées en deux étapes. D'abord, avec un système ressort-amortisseur afin de simplifier les analyses initiales puis, en intégrant des moteurs hydrauliques dans les modèles pour se rapprocher des conditions réelles.

Ces simulations permettent de s'assurer que le bras satisfait aux exigences du cahier des charges, notamment en matière de couple, d'efforts et de fiabilité.

Enfin, la présentation du projet retrace la démarche adoptée, en partant du cahier des charges et des attentes client, puis en détaillant les étapes de modélisation et de simulation réalisées sous AMESIM et CATIA, ainsi que le dimensionnement des éléments critiques. La conclusion évaluera la conformité du système aux spécifications du client et abordera les principaux défis techniques rencontrés, ainsi que les solutions mises en œuvre pour les résoudre.



Le schéma ci-dessus illustre de manière synthétique les étapes structurées du projet, organisé en deux phases majeures : la conception ou la modélisation et l'intégration & l'analyse.

La phase de conception est initiée par une analyse approfondie des besoins et exigences du client, CYBERNETIX. Il est essentiel d'intégrer ces attentes dès le début pour assurer l'adéquation du produit final aux spécifications fonctionnelles. Une collaboration étroite avec le client permet d'établir un référentiel exhaustif, servant de socle à l'ensemble de la démarche de conception.

Sur cette base, la structure mécanique du bras est développée et modélisée à l'aide du logiciel CATIA. Cette étape inclut la création d'une maquette numérique, qui permet de visualiser, d'analyser et d'optimiser la conception avant son approfondissement.

Pour garantir des choix techniques optimaux, nous réalisons des calculs par éléments finis. Ces analyses permettent de déterminer précisément les dimensions des composants critiques du système, tels que l'arbre, le nombre de goupilles et les vis. Ces calculs tiennent compte des forces et des couples appliqués sur le bras pour s'assurer de sa robustesse et de sa durabilité. Une fois ces paramètres définis, ils servent de base pour développer une maquette CATIA paramétrée, facilitant ainsi des ajustements rapides et efficaces en cas de modifications nécessaires.

Parallèlement, nous développons un modèle fonctionnel du bras mécanique afin de simuler ses mouvements, notamment sa capacité à saisir et relâcher un objet. Dans un premier temps, et afin de simplifier l'analyse, les actionneurs sont modélisés par un système équivalent ressort-amortisseur. Cette approche permet de se concentrer sur les comportements mécaniques fondamentaux avant d'introduire des éléments plus complexes, comme les moteurs hydrauliques.

Une fois la phase de conception aboutie, nous entrons dans la phase d'intégration et d'analyse. Cette étape vise à valider les résultats obtenus et à vérifier que la solution proposée répond aux exigences initiales du client. La première tâche consiste à remplacer les modèles simplifiés par des actionneurs hydrauliques dans les simulations, permettant ainsi d'étudier le comportement dynamique réel du bras dans des conditions proches de son utilisation finale. Cette étape est cruciale pour garantir que le bras exécute les mouvements requis avec précision et efficacité.

Par la suite, une série de simulations permet de valider le bon fonctionnement global du système et sa conformité aux spécifications définies. Ces tests évaluent la robustesse et les performances du bras dans divers scénarios d'utilisation, permettant d'identifier et de corriger d'éventuelles anomalies avant une éventuelle phase de production.

Enfin, une vérification finale confirme que toutes les exigences du client CYBERNETIX ont été respectées, marquant ainsi l'achèvement de la phase de validation et la maturité du projet pour une potentielle industrialisation.

En résumé, ce processus structuré en deux grandes phases – conception puis intégration et validation – nous permet de mener à bien le projet en répondant aux attentes du client tout en assurant une conception robuste et performante.

## 2.3- Répartition des tâches

Voici un tableau résumant les différentes tâches du projet et les répartitions de celle-ci :

Tâches à réaliser	Membre de la TEAM
Désignation du Chef d'équipe	Martin GOULET
TP CAO	Totalité de la Team
TP EF	Totalité de la Team
Réalisation pièce et simulations CATIA	Maksimilien DEUTSCH Jérémie HUGUES
Dimensionnement support vérin	Jérémie HUGUES Romain LHEPT

Dimensionnement arbre monobloc et assemblé	Maksimilien DEUTSCH Pierre TOUET-SI-ABDELHADI
Dimensionnement vis et goupilles	Mathis PAULY Romain LHEPT
Validation arbre monobloc sur CATIA	Martin GOULET
Validation arbre assemblé sur CATIA	Martin GOULET
Rapport	Mathis PAULY Pierre TOUET-SI-ABDELHADI
Soutenance	Totalité de la Team

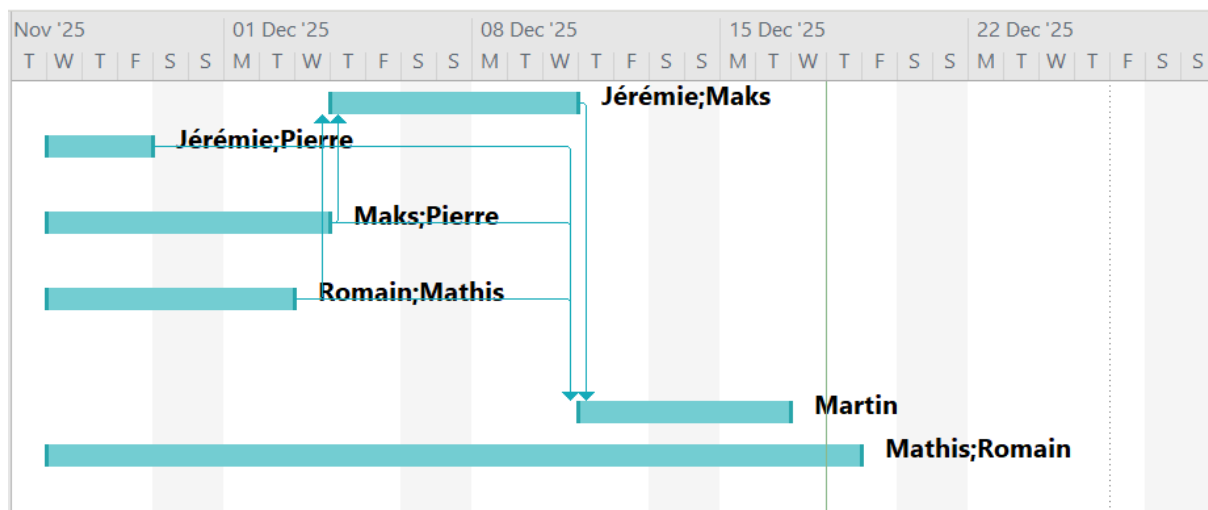
## 2.4- Diagramme de GANTT

Le Projet a été structuré de la manière suivante : Maksimilien DEUTSCH a été désigné chef d'équipe. Les travaux pratiques de CAO et d'éléments finis (TP CAO et TP EF) ont été réalisés par l'ensemble de l'équipe.

Concernant la conception et la simulation, la réalisation des pièces ainsi que les simulations sous CATIA ont été prises en charge par Maksimilien Deutsch et Jérémie Hugues. Le dimensionnement du support de vérin a été confié à Jérémie Hugues et Pierre Touet-Si-Abdelhadi. Pour ce qui est des éléments mécaniques, le dimensionnement de l'arbre (en version monobloc et assemblée) a été effectué par Maksimilien Deutsch et Pierre Touet-Si-Abdelhadi. Celui des vis, des goupilles et des roulements a été réalisé par Mathis Pauly et Romain Lhept.

Les validations sur CATIA ont été assurées par Martin Goulet, aussi bien pour l'arbre monobloc que pour l'arbre assemblé. Enfin, la rédaction du rapport a été confiée à Mathis Pauly, Romain LHEPT tandis que la préparation et la présentation de la soutenance ont mobilisé la totalité des membres de l'équipe.

	Task Name	Duration	Start	Finish	Predecessors
1	simulations sous CATIA	5 days	Thu 04/12/25	Wed 10/12/25	2;3;4
2	dimensionnement du support de vérin	3 days	Wed 26/11/25	Fri 28/11/25	
3	le dimensionnement de l'arbre	6 days	Wed 26/11/25	Wed 03/12/25	
4	dimensionnement des vis, des goupilles et des roulements	5 days	Wed 26/11/25	Tue 02/12/25	
5	validations CATIA	4 days	Thu 11/12/25	Tue 16/12/25	1;2;3;4
6	rédaction du rapport	17 days	Wed 26/11/25	Thu 18/12/25	



### 3. Processus d'ingénierie du système

#### 3.1- Présentation du bras

Le système MAESTRO, fruit d'une collaboration entre le CEA et Cybernetix, constitue une innovation significative dans le domaine de la robotique pour interventions en milieux extrêmes. Conçu spécifiquement pour les chantiers de démantèlement nucléaire, ce robot téléopéré allie robustesse, précision et modularité afin d'assurer à la fois la sécurité des opérations et leur efficacité.

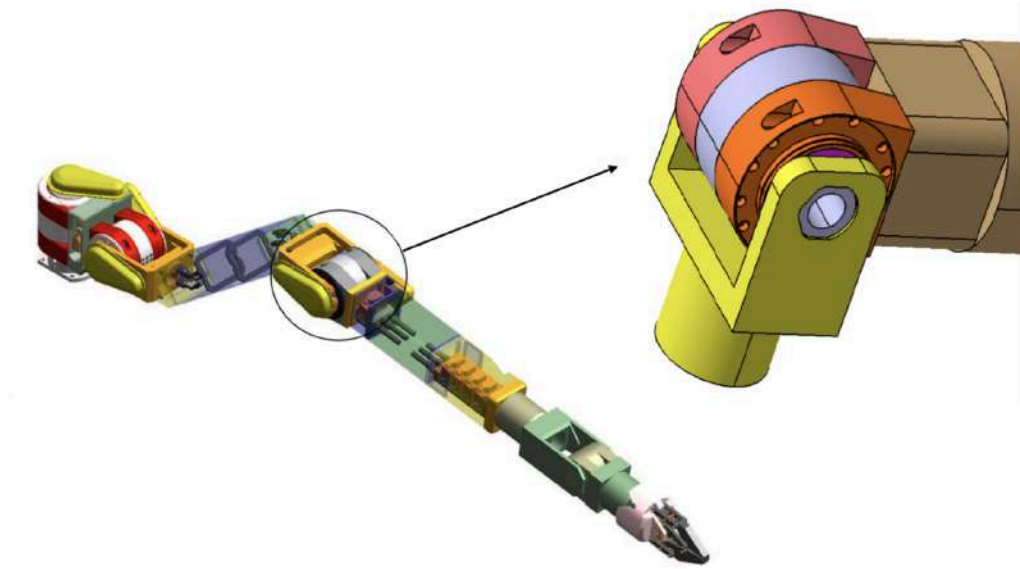


FIGURE 2.4 – Position du vérin hydraulique dans le bras MAESTRO

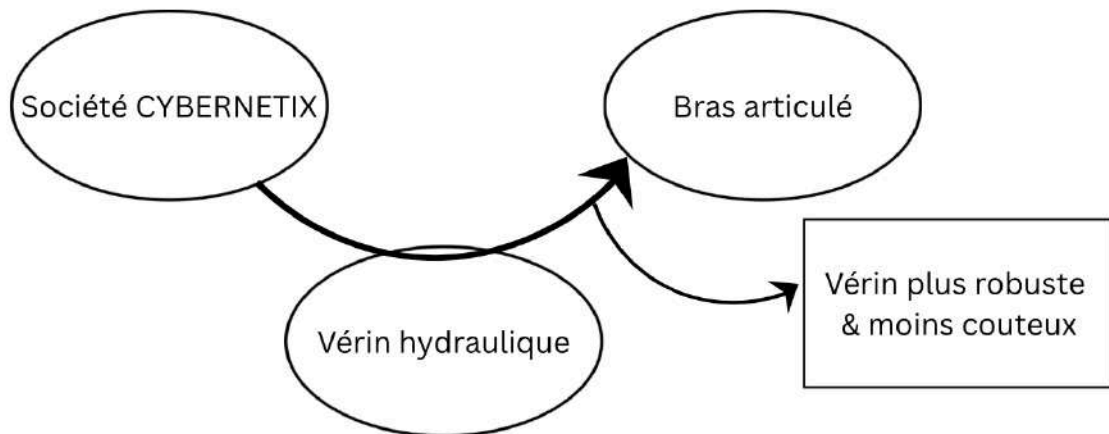
## 3.2- Caractéristiques principales

Ce système se caractérise par des spécifications techniques qui le destinent aux environnements les plus exigeants :

- Une fiabilité élevée, avec un MTBF (temps moyen entre pannes) dépassant 1 000 heures.
- Une résistance aux radiations lui permettant d'opérer dans des environnements hautement irradiés (jusqu'à  $10^4$  Gray).
- Une conception amphibie, adaptée à une utilisation en surface ou en immersion, associée à un système de décontamination intégré.
- Une capacité opérationnelle permettant de manœuvrer des charges allant jusqu'à 100 kg sur une portée maximale de 2,20 mètres.
- Un changeur d'outils automatique offrant une grande polyvalence grâce à sa compatibilité avec une large gamme d'équipements spécialisés.

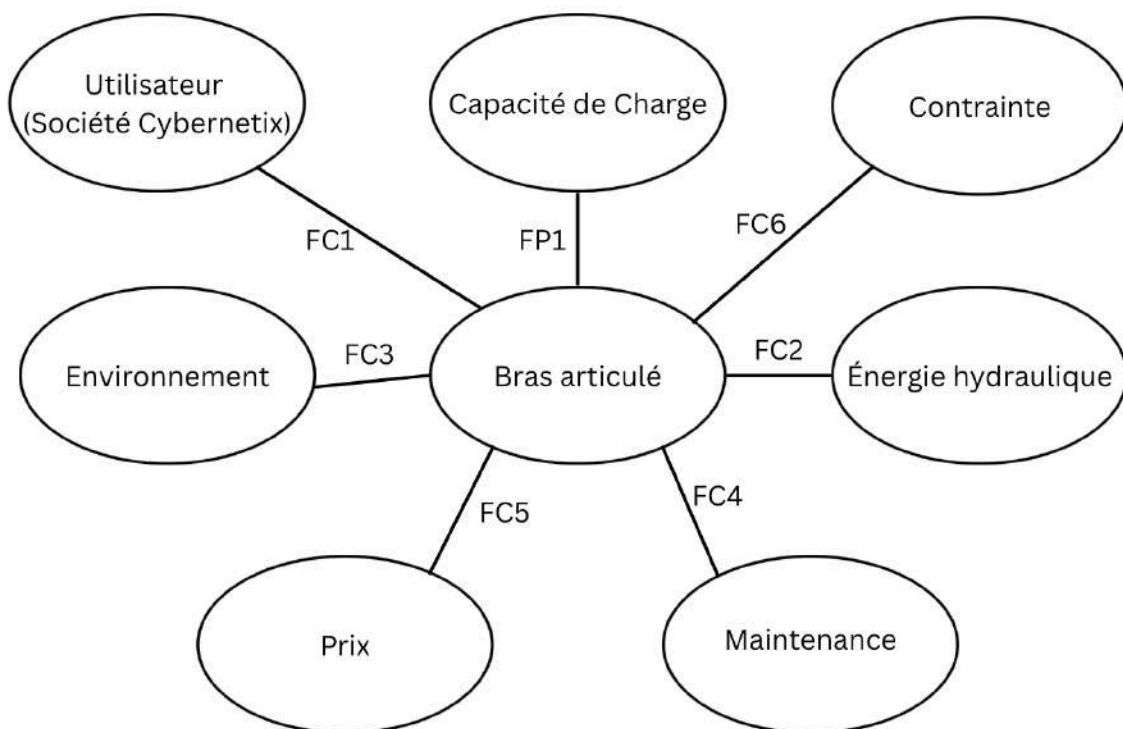
## 3.3- Bête à corne

Une bête à cornes est un outil graphique structurant qui hiérarchise les relations entre les exigences principales, les besoins spécifiques du projet et les solutions envisagées. Cette représentation permet de retracer de manière logique la déclinaison de chaque besoin à partir des fonctions clés du système, clarifiant ainsi les liens de causalité et facilitant l'analyse fonctionnelle.



## 4. Contexte Utilisation

### 4.1- Diagramme de pieuvre



## 4.2- Fonctions

Fonction	Description des Fonctions
FP1	Assure la manipulation et le contrôle de charges variées
FC1	Permet la manipulation par un opérateur
FC2	Utilise cet apport énergétique pour son fonctionnement
FC3	Permet d'être opérationnel dans les milieux différents
FC4	Permet de contrôler le bon état de marche du bras
FC5	Doit respecter différents critères budgétaires
FC6	Permet de respecter le cahier des charges

## 4.3- Contraintes opérationnelles

Conformément au cahier des charges, le robot télé-opéré MAESTRO se définit par les caractéristiques techniques suivantes :

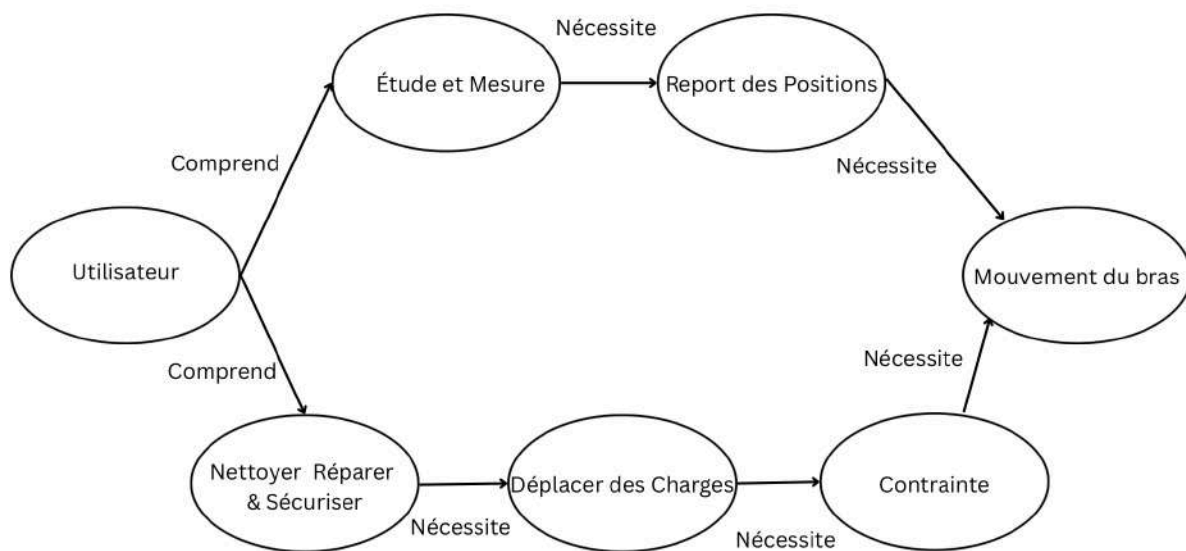
Contraintes	Données chiffrées
Nombre d'axes	5
Temps moyen de fonctionnement avant maintenance	MTBF > 1000 H
Quantité de radiation supportée	$10^4$ Gray
Capacité de charge maximale	100 kg
Portée maximale	2,20 mètres
Matériau	Titane
Opérations en surface ou immersion	Surface et Immersion / Décontamination intégrée
Changeur d'outils	Large choix

## 5. Analyse Opérationnelle

Sur la base des spécifications du cahier des charges, nous pouvons définir la mission de notre système : un bras manipulateur hydraulique conçu pour réaliser des opérations d'usinage sur des pièces, dans des environnements aux conditions extrêmes.

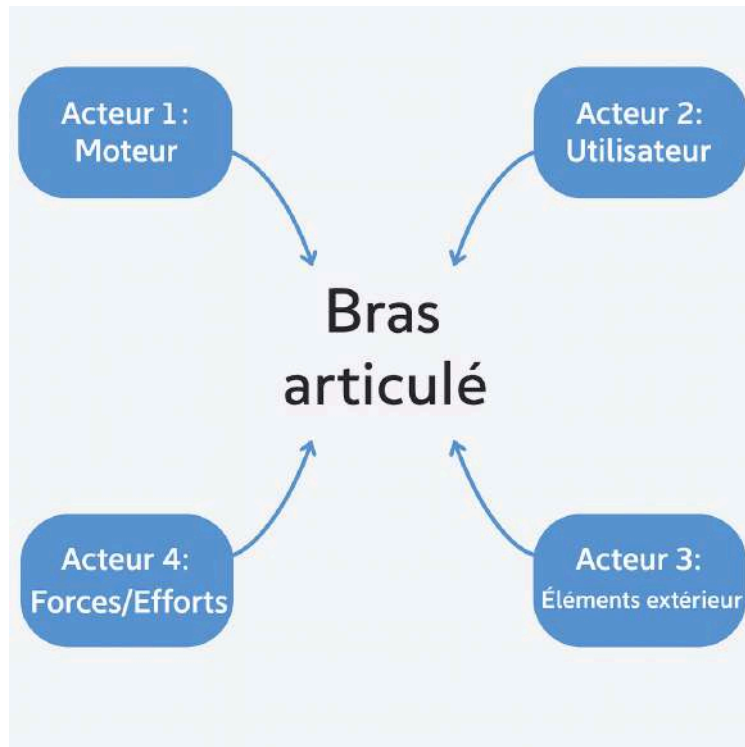
### 5.1- Diagramme des cas d'utilisation (DCU)

Le diagramme de commande d'utilisation est un outil de modélisation qui représente l'interaction entre un opérateur et un système. Il cartographie les actions disponibles pour l'utilisateur et illustre comment chacune déclenche des transitions entre les différents états de fonctionnement du système. Ce diagramme visualise ainsi l'enchaînement des commandes et l'autorité de l'opérateur sur le cycle de vie du système.



### 5.2- Diagramme de contexte du système (DSC)

Ce diagramme apporte une vision synthétique des limites du système et facilite la compréhension de son fonctionnement global. Il constitue une étape essentielle de l'analyse fonctionnelle, car il permet de structurer la réflexion en amont de la définition des fonctions, des contraintes et des choix techniques retenus pour la conception du bras articulé.



## 6. Validation arbre monobloc

### 6.1- Matériau utilisé

Le choix de l'acier **ASTM A514** pour la conception de notre pièce repose sur les propriétés mécaniques exceptionnelles et la polyvalence de ce matériau de haute technologie.

Dans un premier temps, l'ASTM A514 est un acier allié à haute résistance, ayant subi un traitement thermique de trempe et de revenu. Ce procédé d'élaboration spécifique lui confère une structure métallurgique extrêmement homogène et une grande ténacité, même à basse température.

Dans un second temps, l'acier ASTM A514 allie idéalement légèreté et robustesse, ce qui permet d'optimiser le design de la pièce en réduisant son épaisseur sans compromettre sa sécurité structurelle. En effet, ce matériau présente une limite élastique remarquable d'environ 690 MPa (100 ksi), soit près de trois fois celle d'un acier de construction conventionnel. Cette caractéristique signifie que la pièce peut supporter des contraintes très élevées avant de subir la moindre déformation plastique. Cette capacité de résistance est particulièrement adaptée aux applications soumises à des charges lourdes et à des sollicitations cycliques, garantissant ainsi l'intégrité de la structure sous l'effet de forces de traction ou de flexion importantes.

Dans un dernier temps, l'ASTM A514 est reconnu pour sa durabilité et sa résistance à l'abrasion, tout en conservant une bonne aptitude au soudage et à l'usinage par rapport à

d'autres aciers de sa catégorie. Cette polyvalence facilite la fabrication de composants complexes, tels que des châssis, des flèches de levage ou des structures porteuses, exigeant un haut niveau de fiabilité et de finition.

En somme, le choix de l'acier ASTM A514 résulte d'une combinaison judicieuse de résistance mécanique élevée et d'optimisation de masse, répondant ainsi aux exigences techniques rigoureuses de notre projet, ce que nous validerons par la suite à travers nos analyses par éléments finis.

Nous avons donc appliqué cet acier sur toutes nos palettes en appliquant bien également ses caractéristiques :

Propriétés structurales	
Module de Young	2.05e+011N_m2
Coefficient de Poisson	0.29
Masse volumique	7800kg_m3
Coefficient d'expansion thermique	1.2e-005_Kdeg
Limite élastique	6.9e+008N_m2

## 6.2- Choix des dimensions

Nous avons fait un excel pour déterminer les dimensions des arbres et caractéristiques des vis et goupilles associées pour chaque couple différent:

Matériau	Coefficient k	Limite Élastique Re (Mpa)	Limite Élastique au Cisaillement Reg (Mpa)	Coefficient de Sécurité	Contrainte de Cisaillement tadm (Mpa)	Pression hydraulique P (Mpa)
ASTM A514		690	552	2	276	21
	Re > 600 Mpa		Reg = k.Re		tadm = Reg / S	
Rayon Intérieur Ri (mm)	Rayon Extérieur Re (mm)	Bras de Levier r (mm)	Section Résistante A (mm²)	Force exercée sur la palette F (N)	Surface de Palette S (mm²)	
30,5	62	46,25	78,53981634	64798,73676	3083,655084	
30,5	62	46,25	78,53981634	58914,91892	2805,962906	
30,5	62	46,25	78,53981634	48108,10611	2290,860291	
30,5	49,5	40	63,61725124	32000	1523,805524	
30,5	42,5	36,5	63,61725124	15616,43636	743,6399217	
			A = n . dgoup² / 4	F = C / r	S = F / P	
Diamètre Vis d2 (mm)	h (mm)	Dinf (mm)	Diamètre Goupille dgoup (mm)	Longueur Palette théorique Lt (mm)	Lres (mm)	Épaisseur lmin (mm)
8,5	10	28,5	10	97,89381218	48,02031091	17
8,5	10	28,5	10	89,068605	41,88825285	17
8,5	10	28,5	10	72,72578701	30,53261829	17
8,5	9	26,5	9	80,20050125	45,79805945	17
8,5	9	26,5	9	61,90999548	35,96537719	17
		Dinf = d2 + 2.h		Lt = S / (Re - Ri)	Lres = L - 2.dgoup - nbgoup.dgoup	lmin = 2.d2
Famille	Couple C (N)	Nombre Goupille nbgoup	Nombre vis nbvis	Nombre Goupille nbgoup2	Nombre vis nbvis3	Longueur L (mm)
1	2995	2,987350127	1,68492319	3	2	55,5
1	2725	2,718039705	1,469763009	3	2	55,5
1	2225	2,219310872	1,07131994	3	2	55,5
2	1280	1,622493533	1,728228659	2	2	43,5
3	570	0,88940181	1,357184045	1	2	34,5
		nbgoup = 4.C / tadm . r . A	nbvis = Lres / Dinf			L = nbvis.d2 + nbgoup.dgoup + d2

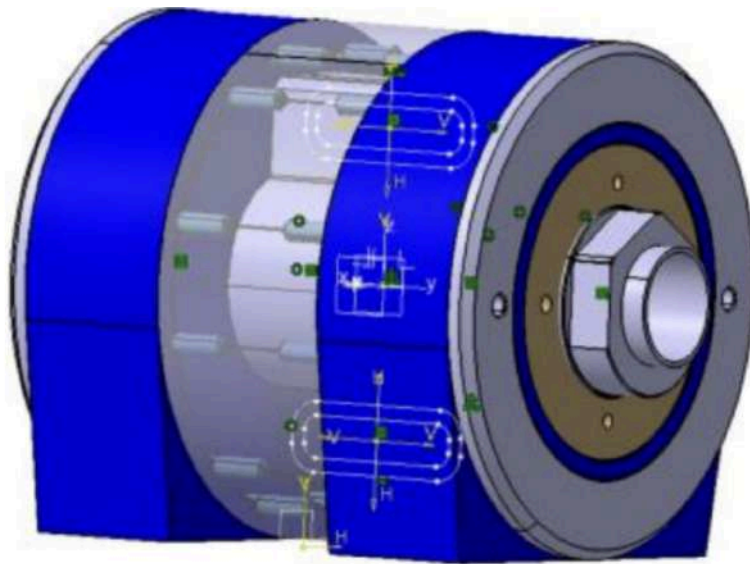
On a alors regroupé chaque couple par famille de même nombre de vis et de goupille pour un rayon extérieur associé soit 62mm pour la famille 1 et 49.5mm pour la famille 2 et 42.5mm pour la famille 3.

Cependant ne parvenant pas à obtenir 2 vis 2 goupilles pour le couple de 570 N nous avons quand même fait le choix de prendre 2 vis 2 goupilles au lieu de 2 vis 1 goupille car les valeurs du nombre de goupilles ne sont pas très éloignées.

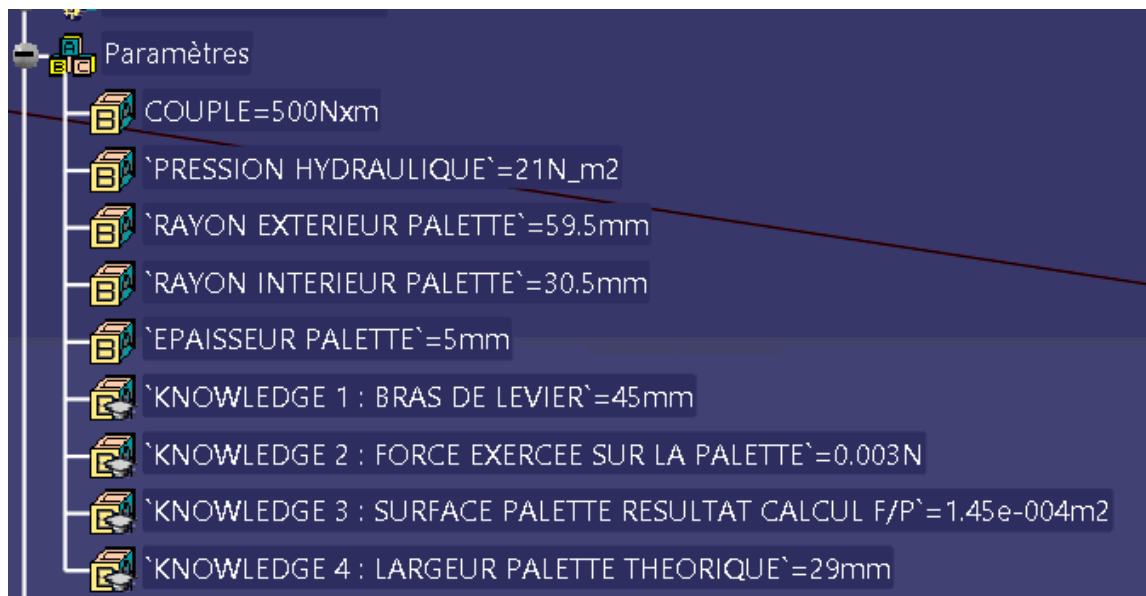
### 6.3- Paramétrage de la pièce

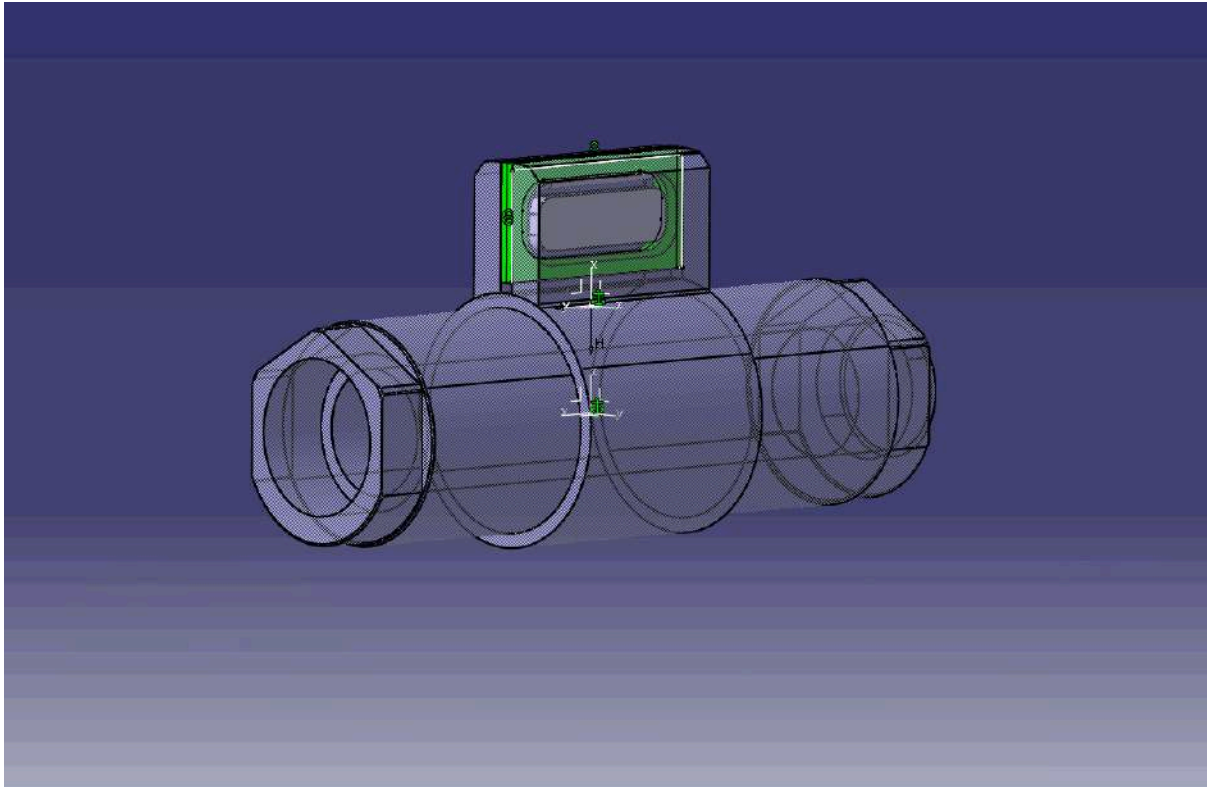
Afin de paramétrer correctement la pièce nous avons créé des paramètres afin de pouvoir les associer à nos contraintes dans les esquisses et ainsi que la pièce puisse se régler automatiquement lorsque l'on change les paramètres associés à un couple.

Ci dessous une image de notre moteur entièrement assemblé :



Et voici une capture d'écran montrant tous nos paramètres qui peuvent être modifiés afin d'adapter le moteur en fonction de nos besoins :





Et voici une modélisation de notre arbre pour un couple de 2995 N.m.

## 6.4- Validations

Nous avons simulé via catia et l'atelier CatAnalys chaque famille de moteur pour pouvoir valider chaque dimension de palette lié à chaque famille.

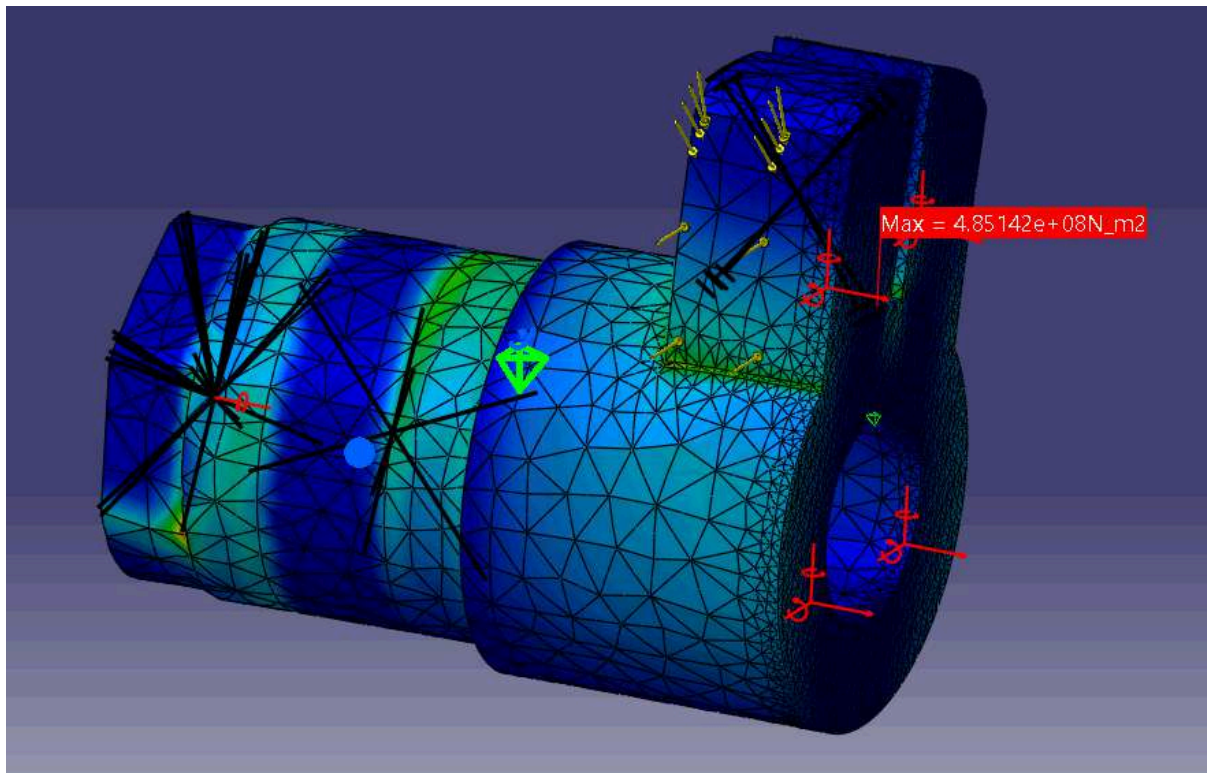
Pour notre validation nous vérifions que le moment récupéré via le capteur sur catia correspond à la valeur désiré issue de notre excel (qui répond au cahier des charges).

Nous analysons également la qualité du maillage pour chaque famille ,nous avons testé différentes tailles de maillage et comparé les valeurs de la contrainte max de Von Mises pour vérifier que ces mesures convergent bien.

Pour valider la contrainte de Von Mises nous comparons la valeur obtenue par  $0.8 \times$  la limite élastique de notre matériau, ici  $0.8 \times 690 = 552$ . Ce coefficient de sécurité permet d'être sûr de ne pas dépasser la limite élastique.

### 6.4.1 Famille 1 (2995N - 2725N - 2225N)

Voici la modélisation de la contrainte de Von Mises appliqué sur le moteur de la famille 1 :

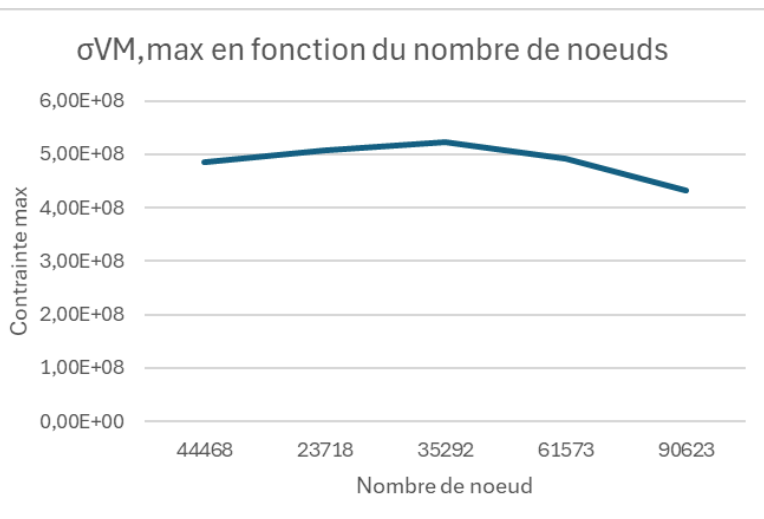


Nous avons réalisé plusieurs mesures de la contraintes de Von Mises en changeant la taille des mailles afin de valider la bonne réalisations du maillage. Nous avons donc fait la moyenne de ces mesures afin d'avoir une valeur de la contrainte de Von Mises. Voici le résultats obtenue :

Moyenne contrainte max (Mpa)	488
écart-type (Mpa)	34,05

Cette valeur est bien inférieure à la limite élastique de notre matériau,  $488 < 552$  MPa. Nous validons donc la contrainte de Von Mises.

Voici donc le tableau et la courbe qui nous permetts de valider la bonne réalisation du maillage :



Famille 1		
nombre de neoud	contrainte max (N_m2)	Taille maillage (mm)
44468	4,85E+08	6,636
23718	5,07E+08	5,636
35292	5,23E+08	4,636
61573	4,92E+08	3,636
90623	4,33E+08	2,636

On remarque bien une convergence des résultats, nous validons la bonne réalisation du maillage.

Enfin nous voulons valider le couple transmis par notre famille, nous récupérons la valeur de notre capteur et la comparons avec la valeur de couple demandée. Dans cette famille qui regroupe plusieurs couples différents nous comparons notre valeur avec la valeur la plus élevée demandée. En effet un moteur qui peut fournir un couple de 2995Nm peut également fournir 2725Nm ou encore 2225Nm de couple.

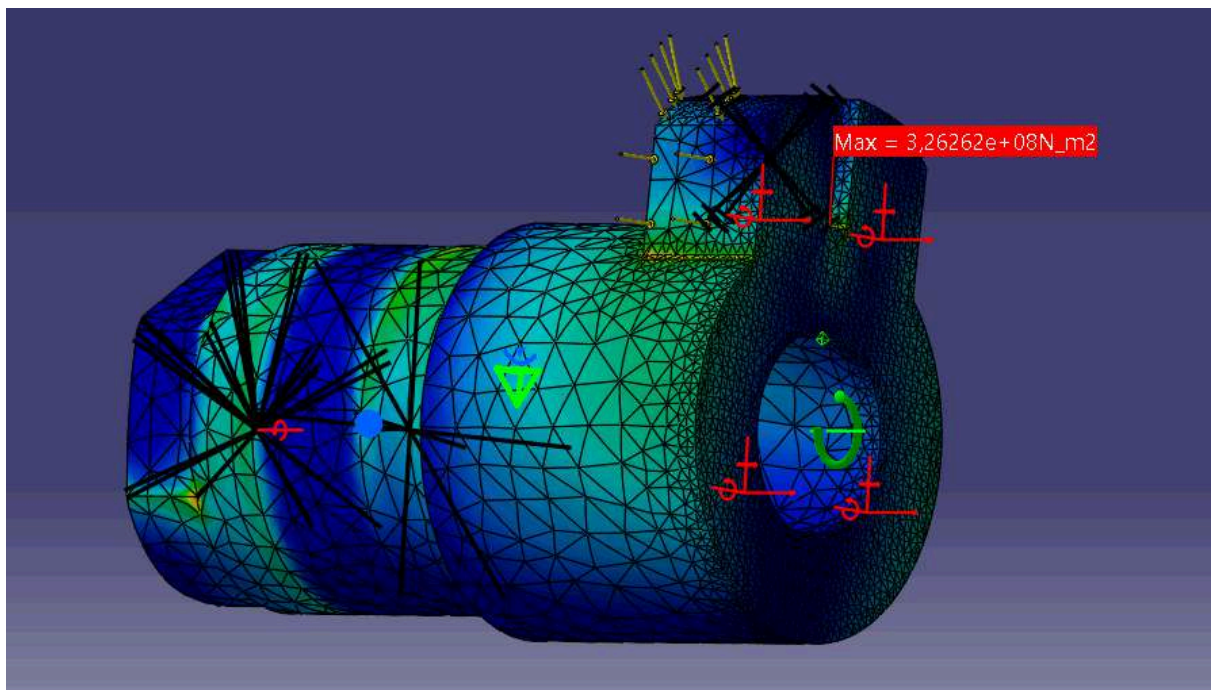
Force	Moment
X	0Nxm
Y	2970.478Nxm
Z	0Nxm
Norme	2970.478Nxm

La valeur de 2970 est très proche de la valeur de couple maximum demandé de cette famille: 2970 Nm  $\approx$  2995 Nm.

Nous validons donc le couple de la famille 1.

#### 6.4.2 Famille 2 (1280N)

Voici la modélisation de la contrainte de Von Mises appliqué sur le moteur de la famille 2 :

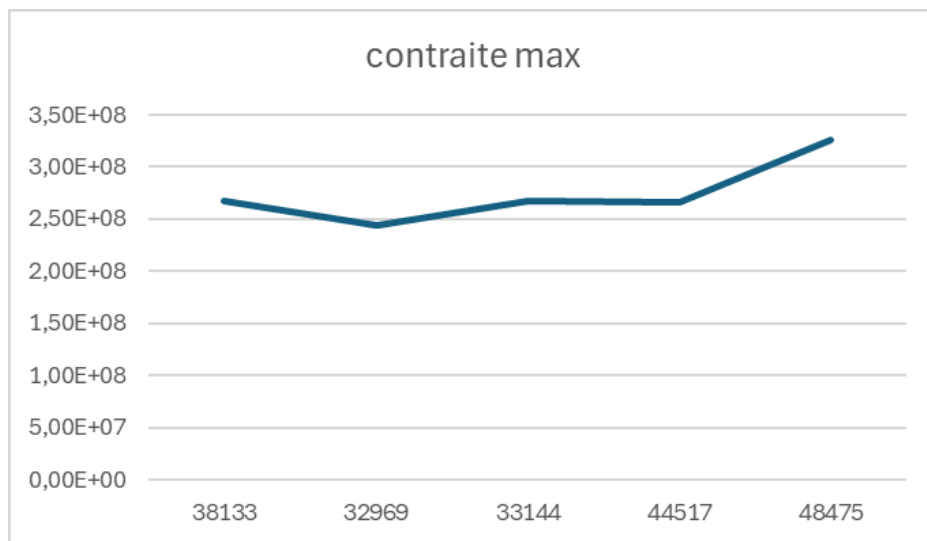


Via notre tableau excel utilisé pour vérifier si le maillage est bien réalisé nous calculons la moyenne des contraintes de Von Mises en fonction de la taille du maillage et nous obtenons ce résultat :

Moyenne contrainte max (Mpa)	274,4
écart-type (Mpa)	30,57

On remarque, après calcul, que la contrainte maximale moyenne est de 274.4MPa et que celle-ci reste inférieure à la limite élastique de notre matériau avec coefficient de sécurité qui est de 552MPa. Nous validons la contrainte de Von Mises.

Nous validons la bonne réalisations du maillage grâce à la courbe ci dessus :



Famille 2			
nombre de noeud	contrainte max (N_m2)	Taille maillage (mm)	
38133	2,68E+08	6,636	
32969	2,44E+08	5,636	
33144	2,68E+08	4,636	
44517	2,66E+08	3,636	
48475	3,26E+08	2,636	

Nous constatons une légère convergence des résultats, nous validons quand même la réalisation du maillage.

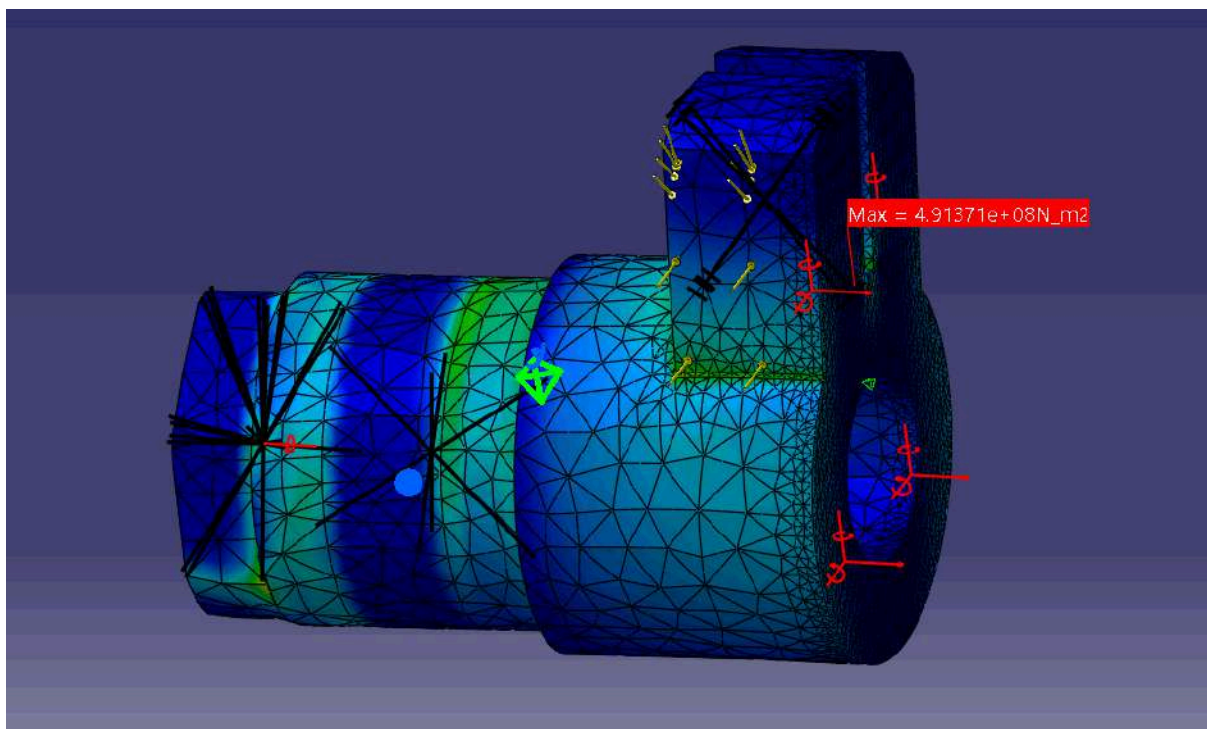
Toujours grâce à notre capteur nous relevons le couple de réaction fournit par notre capteur:

Force	Moment
X	0Nxm
Y	1281,243Nxm
Z	0Nxm
Norme	1281,243Nxm

Le couple de réaction correspond parfaitement au couple voulu, nous validons cette étape.

### 6.4.3 Famille 3 (570N)

Voici la modélisation de la contrainte de Von Mises appliqué sur le moteur de la famille 3 :

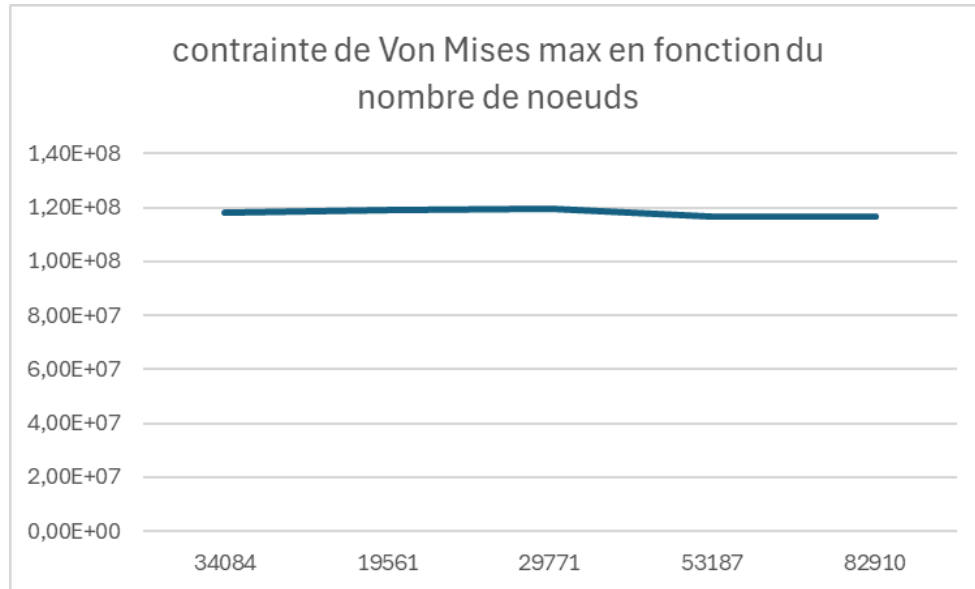


Via notre tableau excel utilisé pour vérifier si le maillage est bien réalisé nous calculons la moyenne des contraintes de Von Mises en fonction de la taille du maillage et nous obtenons ce résultat :

Moyenne contrainte max (Mpa)	118,02
écart-type (Mpa)	1,47

Nous validons la contrainte de Von Mises qui est bien inférieur à la limite élastique de notre matériau utilisé,  $118 < 552\text{Mpa}$ .

Nous validons la bonne réalisations du maillage grâce à la courbe ci dessus :



Famille 3			
nombre de noeud	contrainte max (N_m2)	Taille maillage (mm)	
34084	1,18E+08	6,636	
19561	1,19E+08	5,636	
29771	1,20E+08	4,636	
53187	1,17E+08	3,636	
82910	1,17E+08	2,636	

On remarque une convergence des résultats en fonction du nombre de nœuds donc le maillage est bien réalisé.

Nous validons aussi le couple transmis :

Force	Moment
X 0Nxm	
Y 511.917Nxm	
Z 0Nxm	
Norme	511.917Nxm

Cette valeur est proche du couple voulu qui est de 570 N.m.

## 6.5 Tableau récapitulatif

Famille	Contrainte de Von Mises maximale (MPa)	Contrainte respectée ?	Couple transmis (N.m)	écart avec le couple demandé	Validation de l'arbre monobloc
Famille 1	488	oui	2970	-0.08%	oui
Famille 2	277.4	oui	1281	≈ 0%	oui
Famille 3	118.02	oui	512	-0.1%	oui

## 7. Recherche d'une solution avec l'arbre assemblé

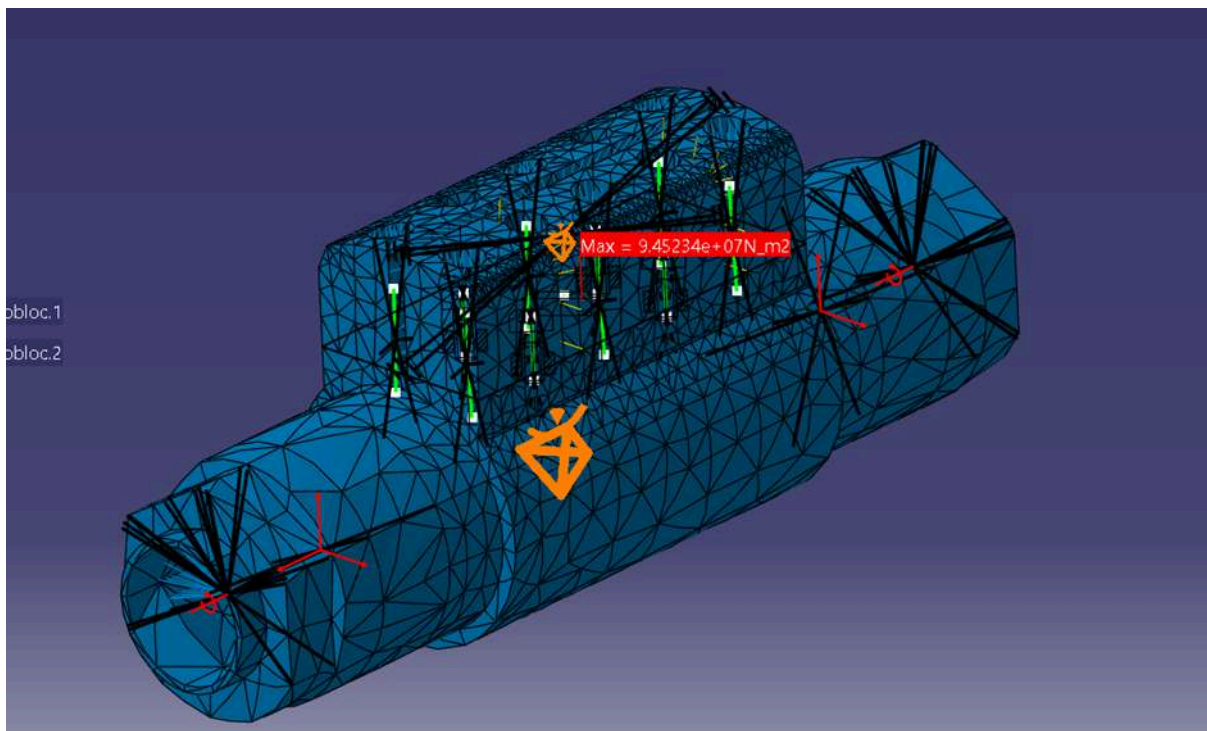
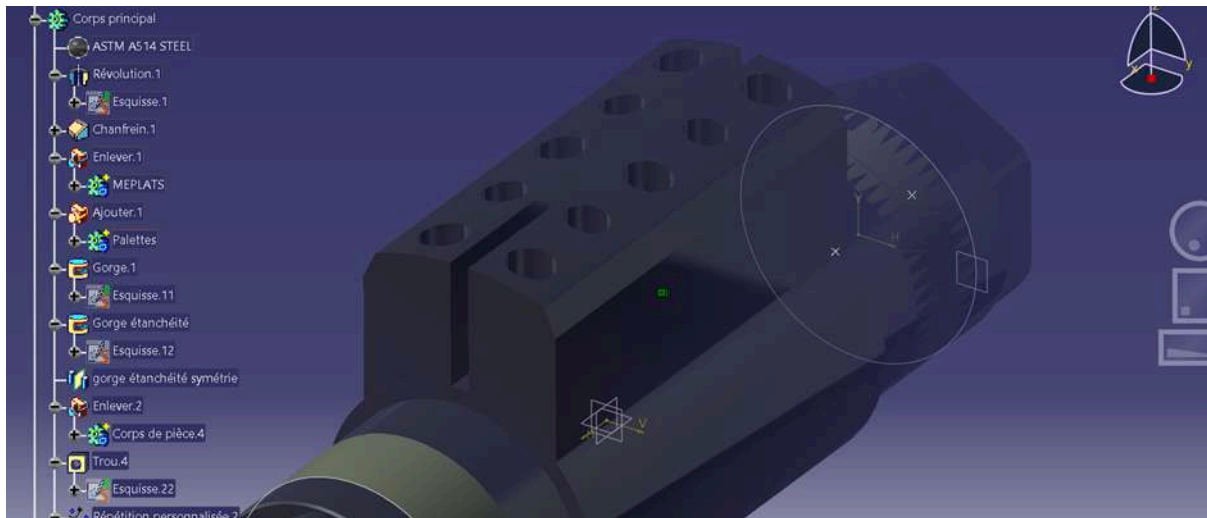
### 7.1 Dimensionnement des goupilles:

Nous avons choisi de fixer un diamètre standard de 10 mm pour les goupilles des familles les plus sollicitées (Famille 1) et de 9 mm pour les autres, car cela garantit que nos clients puissent les acquérir aisément, de manière rapide et sans engendrer de frais supplémentaires liés à l'usinage de goupilles spécifiques.

### 7.2 Dimensionnement des vis:

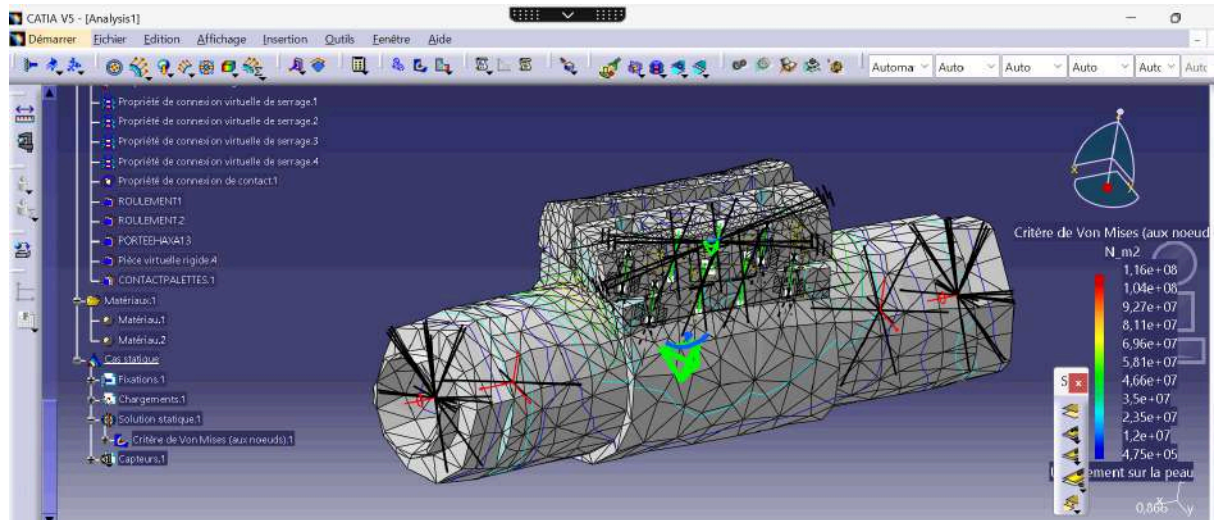
Passons maintenant au dimensionnement des vis de maintien. Comme pour les goupilles, il est primordial d'utiliser des diamètres standards. Nous avons sélectionné des vis M8.5 (diamètre de 8.5 mm). Cela rend la maintenance plus facile et diminue les coûts de production en uniformisant les perçages.

### 7.3 Solution pour la famille 1:

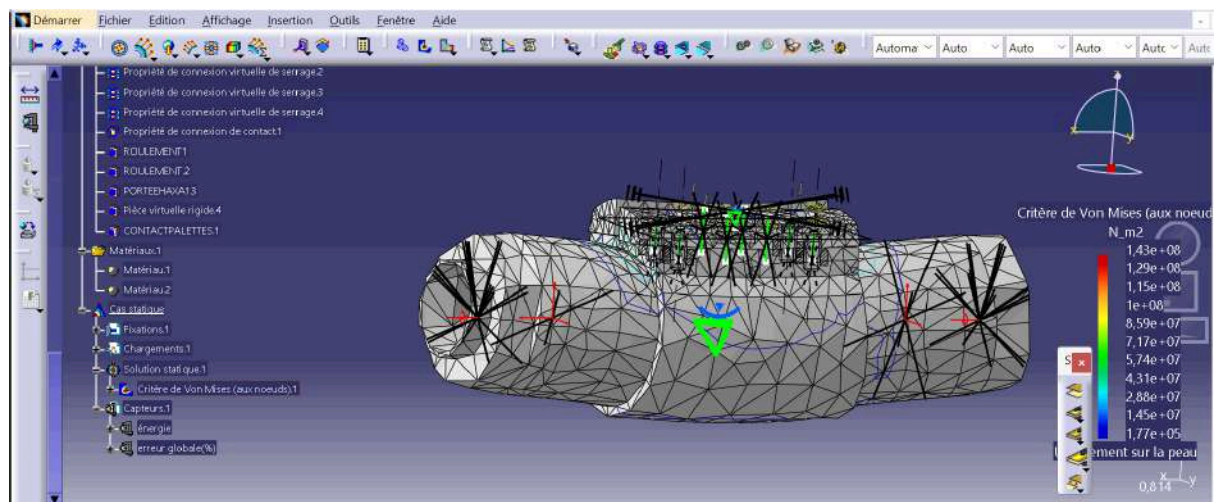


On a une contrainte de Von Mises de 94,5 Mpa, alors que notre matériau à une résistance admissible de 552 MPa, donc notre coefficient de sécurité est de  $552/94,5$  soit 5,8, qui est largement supérieur à 1 donc notre pièce ne risque pas de casser.

### 7.4 Solution pour la famille 2:



## 7.5 Solution pour la famille 3:



## 8. Comparaison des deux arbres

Nous avons choisi de présenter la comparaison entre les deux arbres avec un tableau.

comparaison contrainte max de Von Mises (MPa)	Arbre monobloc	Arbre palette rapporté
Famille 1	488	94,5
Famille 2	274,4	116
Famille 3	118,02	143

Même si la pièce rapportée est plus sûre en termes de contraintes (Von Mises max beaucoup plus faible), il y a plusieurs critères qui peuvent influencer le choix :

#### 1. Rigidité / déformation

Une pièce monobloc est généralement plus rigide, moins de flexion, moins de jeu.

Une pièce rapportée peut introduire des zones de liaison qui se déforment légèrement.

#### 2. Fabrication / coût

La pièce monobloc peut être plus chère ou complexe à utiliser.

La pièce rapportée peut permettre d'assembler plus facilement d'autres palettes.

#### 3. Maintenance / remplacement

Pièce rapportée = possibilité de remplacer juste un composant si usure.

Monobloc = tout le composant doit être remplacé en cas de problème.

#### 4. Contraintes

Dans notre tableau, la pièce rapportée a des contraintes beaucoup plus faibles sur certaines familles, ce qui peut être un avantage pour la fatigue si la pièce est soumise à des cycles répétés.

## 9. Cahier des charges

La définition des livrables passe par le du cahier des charges soumis à six contraintes distinctes.

Exigences fonctionnelles:

Exigences	Contenu	Critère	Niveau
<b>EFO 01</b>	Le moteur doit transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique.	Type de moteur Durée de vie avant maintenance	Moteur avec <b>1 palette</b> <b>1000 h</b>
<b>EFO 02</b>	Le moteur doit se décliner en plusieurs versions selon les caractéristiques désirées et le coefficient de sécurité. <i>Les valeurs retenues seront celles évaluées dans AMESIM.</i>	Couple transmissible  Tolérance générale	Arm1 – C <sub>1</sub> = (*) Arm2 – C <sub>2</sub> = (*) Arm3 – C <sub>3</sub> = (*) Arm4 – C <sub>4</sub> = (*) Arm5 – C <sub>5</sub> = (*) * Valeurs à déterminer dans AMESIM <b>± 20 Nm</b>
<b>EFO 05</b>	Le moteur doit être alimenté en huile Fluide : Huile (HFDU)	Pression Débit	<b>210 bars</b> <b>15 l à 18 l/min</b>

Exigences de performances:

Exigences	Contenu	Critère	Niveau
<b>EPE 01</b>	Chaque vérin doit effectuer une rotation	Angle maxi Vitesse angulaire maxi	<b>135°</b> <b>90°/s</b>
<b>EPE 02</b>	Chaque vérin doit assurer une répétabilité de la position extrême du bras inférieure à 1 mm	Précision angulaire	<b>2° d'angle</b>

## Exigences d'interfaces:

Exigences	Contenu	Critère	Niveau
<b>EIN 01</b>	Le vérin doit s'adapter sur la partie amont (bras)	Liaison avec le carter extérieur	Encastrement Maintien par vis
<b>EIN 02</b>	Le vérin doit s'adapter sur la partie aval (bras ou pince)	Liaison sur l'arbre	Encastrement Maintien par vis
<b>EIN 03</b>	Le vérin doit se raccorder à la centrale hydraulique	Conduits à prévoir Retour fuites	Haute et basse pression Réservoir
<b>EIN 04</b>	Le vérin doit informer l'armoire de commande, sur sa position angulaire et de sa vitesse angulaire	Capteurs	À prévoir

## Exigences environnementales:

Exigences	Contenu	Critère	Niveau
<b>EEN 01</b>	Chaque vérin doit être décontaminable et recyclable	Matériau principal	Titane ??
<b>EEN 02</b>	Chaque vérin doit ne pas nuire à l'environnement	fuites Bruit	Aucune j 50 dB
<b>EEN 03</b>	Chaque vérin doit s'adapter à l'environnement	Radiation Température Hydrométrie	$10^5$ Gray $-20^{\circ}C < \theta < 80^{\circ}C$ < 70%
<b>EEN 04</b>	Chaque vérin doit pouvoir travailler sous l'eau	Profondeur	< 10 m

## Exigences opérationnelles:

Exigences	Contenu	Critère	Niveau
<b>EOP 01</b>	Chaque vérin doit être modélisé par le groupe	Logiciel	Catia V5
<b>EOP 02</b>	Chaque vérin doit être assemblé avec des composants	Composants industriels	Site internet DirectIndustry
<b>EOP 03</b>	Chaque vérin doit être fabriable	Procédés de fabrication	Moulage, Usinage
<b>EOP 04</b>	Chaque vérin doit avoir un arbre et un corps en trois parties	Liaison	Encastrement démontable
<b>EOP 05</b>	Chaque vérin doit avoir des dimensions cohérentes avec la forme du bras : cylindre ou tube carré	Largeur totale moteur	Inférieure à 120 mm

Exigences de vérification et de validation:

Exigences	Contenu	Critère	Niveau
EV 01	Chaque vérin doit être testé sur un prototype	Performances	Validées
EV 02	Chaque vérin doit être validé par calculs : arbre monobloc ou avec palettes rapportées	Éléments finis RDM	Catia V5 Voir cours
EV 03	Chaque vérin doit avoir des composants dimensionnés	Roulements Goupilles Clavettes ...	Formule durée de vie RDM

## 10. Validation du cahier des charges:

Une fois le cahier des charges établi, nous passons à la vérification et à la validation des exigences.

Exigences fonctionnelles:		
Exigence		Oui/Non
EFO 01	Le moteur doit transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique	OUI
EFO 02	Le moteur doit se décliner en plusieurs versions en fonction des caractéristiques désirées et du coefficient de sécurité. Les valeurs retenues seront celles évaluées dans AMESIM	Oui
EFO 05	Le moteur doit être alimenté en huile Fluide: Huile (HFDU)	NON
Exigences de performances:		
Exigence		Oui/Non
EPE 01	Chaque moteur doit effectuer une rotation	OUI
EPE 02	Chaque moteur doit assurer une répétabilité de la position extrême du bras inférieur à 1 mm	OUI
EPE 03	Chaque vérin doit être fabricable	oui
EOP 04	Chaque vérin doit avoir un arbre et un corps en trois parties	OUI
EOP 05	Chaque vérin doit avoir des dimensions cohérentes avec la forme du bras : cylindre ou tube carré	Oui
Exigences environnementales:		
Exigence		Oui/Non
EEN 01	Chaque vérin doit être décontamiable et recyclable	Oui
EEN 02	Chaque vérin doit ne pas nuire à l'environnement	Oui
EEN 03	Chaque vérin doit s'adapter à l'environnement	Oui
EEN 04	Chaque vérin doit pouvoir travailler sous l'eau	Oui

## Exigences d'interfaces:

Exigence		Oui/Non
EIN 01	Le vérin doit s'adapter sur la partie amont (bras)	Oui
EIN 02	Le vérin doit s'adapter sur la partie aval (bras ou pince)	Oui
EIN 03	Le vérin doit se raccorder à la centrale hydraulique	Oui
EIN 04	Le vérin doit informer l'armoire de commande, sur sa position angulaire et de sa vitesse angulaire.	Non

## Exigences de vérification et de validation:

Exigence		Oui/Non
EVO 01	Chaque vérin doit être tester sur un prototype	Oui
EVO 02	Chaque vérin doit être validé par calculs : arbre monobloc ou avec palettes rapportées	Oui
EVO 03	Chaque vérin doit avoir des composants dimensionnés	Oui

## Exigences opérationnelles:

Exigence		Oui/Non
EOP 01	Chaque vérin doit être modéliser par le groupe	Oui
EOP 02	Chaque vérin doit être assemblé avec des composants	Oui
EOP 03	Chaque vérin doit être fabriquable	Oui
EOP 04	Chaque vérin doit avoir un arbre et un corps en trois parties	Oui
EOP 05	Chaque vérin doit avoir des dimensions cohérentes avec la forme du bras cylindre ou tube carré	Oui

## 11. Difficultés rencontrées

Nous avons rencontré de nombreuses difficultés tout au long de ce projet, touchant aussi bien les aspects techniques que l'organisation du travail en groupe. Par ailleurs, des difficultés importantes sont apparues en début de projet lors de la réalisation du fichier Excel, notamment pour définir des familles de données cohérentes.

Cette étape s'est révélée particulièrement chronophage et a retardé l'avancement global du projet, allant jusqu'à freiner certaines phases essentielles. Ce retard, combiné à la gestion simultanée d'autres projets académiques, a rendu la planification plus complexe et a nécessité des ajustements réguliers dans l'organisation du travail.

Ces difficultés organisationnelles ont néanmoins permis de mettre en évidence l'importance d'une planification rigoureuse, d'une communication efficace et d'une répartition claire des tâches dans le cadre d'un travail en équipe.

Le dimensionnement de l'arbre, des vis et des goupilles a constitué un défi majeur. L'enjeu principal a été de trouver un compromis viable entre la résistance mécanique (imposée par la limite élastique de l'acier ASTM A514) et les contraintes géométriques de l'ensemble. Nous avons dû ajuster précisément le nombre de goupilles (de 1 à 3 selon les familles)

Sur le plan humain, la gestion simultanée de plusieurs projets académiques a rendu la planification complexe. Ces tensions sur le calendrier ont nécessité des ajustements réguliers dans notre organisation. Néanmoins, ces épreuves ont été formatrices : elles ont mis en lumière l'importance d'une répartition claire des tâches et d'une communication constante au sein du groupe. Cette expérience nous a permis de renforcer notre rigueur méthodologique face à des imprévus techniques et temporels.

## Conclusion

Ce projet autour du vérin hydraulique nous a permis d'aborder des problématiques à la fois techniques et stratégiques, tout en intégrant des enjeux liés au développement durable et à la Responsabilité Sociétale des Entreprises. Nous avons suivi une méthodologie de travail

structurée, reposant sur l'analyse des contraintes opérationnelles, l'élaboration puis la validation d'un cahier des charges, ainsi que sur l'utilisation maîtrisée du logiciel CATIA V5 pour la conception et la simulation des composants.

Cette démarche nous a permis d'atteindre plusieurs objectifs majeurs. La standardisation des composants et la définition de familles de pièces ont contribué à optimiser les processus de conception, de production et de maintenance. Par ailleurs, l'introduction de nouvelles palettes rapportées, combinée à une réflexion globale sur la conception, a permis de réduire les coûts de fabrication, de stockage et d'entretien, tout en garantissant le respect des exigences de performance et de qualité. L'utilisation d'outils de conception avancés a également favorisé une modélisation précise et une validation efficace par le calcul, assurant la fiabilité des solutions retenues.

Le projet a également intégré une dimension environnementale et sociétale, notamment à travers la réduction de l'impact carbone lors des opérations de maintenance et l'adoption de solutions plus durables. Enfin, la collaboration avec l'entreprise CYBERNETIX a renforcé la pertinence industrielle du projet, en apportant des résultats concrets et mesurables, tout en ouvrant des perspectives pour de futures améliorations et innovations conjointes.

Pour conclure, ce projet nous a offert une première approche de l'ingénierie avancée, de l'optimisation économique et de la responsabilité sociétale appliquée à un contexte industriel réel. Il constitue une expérience formatrice qui nous prépare à aborder des projets similaires dans un avenir professionnel orienté vers une industrie durable et compétitive.