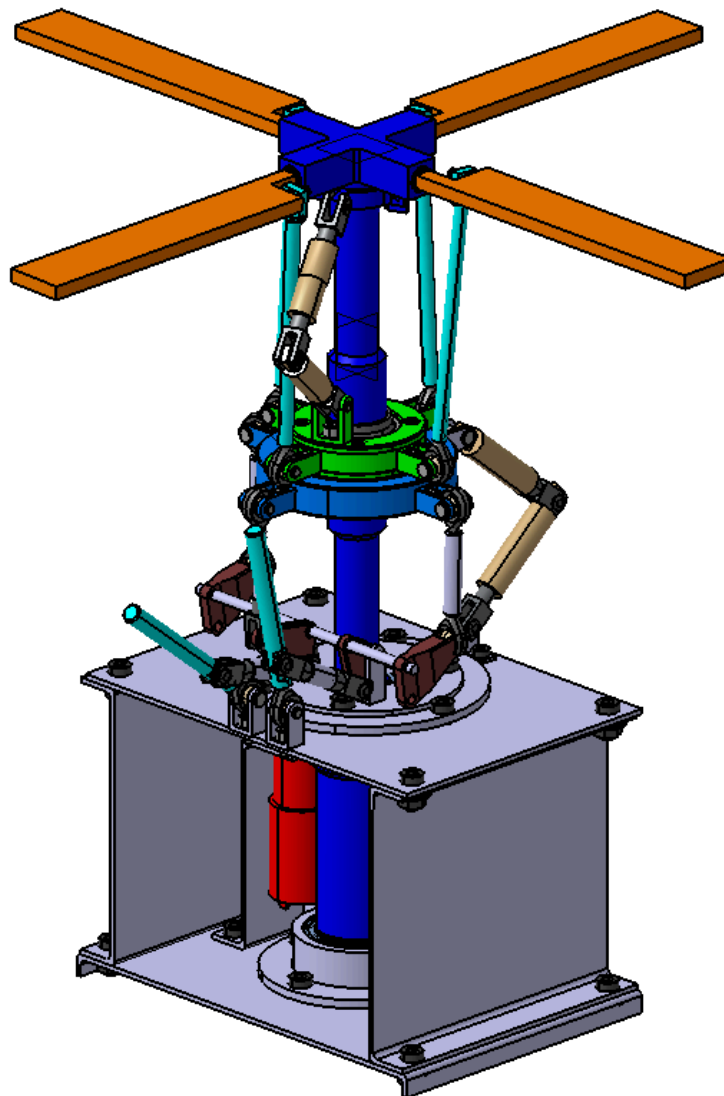


Parcours : Innovation pour l'industrie

Rapport de projet - Maquette de rotor d'hélicoptère



SOMMAIRE

Partie 1 - Introduction	2
1.1 - Contexte global	2
1.2 - Contexte technique	2
1.2.1 - Analyse fonctionnelle	2
1.2.2 - Cahier des charges	3
1.3 - Etat de l'art	4
Partie 2 - Développement solution technique	8
2.1 - Gestion de projet	8
2.2 - Méthodes utilisées	8
2.1.1 - Analyse cinématique	9
2.1.2 - Conception CAO	10
2.1.3 - Dimensionnement	13
Partie 3 - Résultats obtenus	15
3.1 - Simulation loi entrée/sortie	15
3.2 - Présentation du système CAO	16
Partie 4 - Retour critique sur le projet	18
4.1 - Retour sur le cahier des charges	18
4.2 - Choix effectués et leurs conséquences	19
4.3 - Perspectives	20
Partie 5 - Conclusion	20
ANNEXES	21
Annexe 1 - Cahier des charges précédent	21
Annexe 2 - Extrait des Gammes d'usinage du plateau tournant	22
Annexe 3 - Schéma d'un engrenage avec moyeu	23

Partie 1 - Introduction

1.1 - Contexte global

CT Engineering est une entreprise internationale de conseil en ingénierie proposant des services d'expertise technique, notamment dans le secteur aéronautique. Elle intervient en tant que sous-traitant pour *Airbus Helicopters* et travaille sur des systèmes complexes d'hélicoptères, tels que les mécanismes du rotor et de transmission.

Cependant, l'intégration de nouveaux employés, en particulier ceux n'ayant jamais travaillé dans le domaine aéronautique, met en évidence une difficulté : comprendre rapidement le fonctionnement du système moteur et du rotor d'un hélicoptère. La formation à ces systèmes complexes nécessite du temps et peut s'avérer difficile uniquement à partir de documents techniques. Il devient donc pertinent de disposer de supports pédagogiques permettant de visualiser et de manipuler ces mécanismes afin d'en faciliter la compréhension.

C'est dans ce contexte que notre groupe de projet de l'IUT GMP d'Aix-Marseille a été missionné. L'objectif étant de finaliser la conception et de réaliser une maquette fonctionnelle du rotor principal d'un hélicoptère. Cette maquette doit mettre en évidence les principaux systèmes mécaniques et illustrer la cinématique du rotor tout en proposant une version simplifiée du mécanisme réel, dépourvue des aspects aérodynamiques, afin de se concentrer sur la compréhension des mouvements et des liaisons mécaniques, ce qui soulève la problématique suivante :

Comment concevoir une maquette pédagogique permettant de représenter la cinématique du rotor principal d'un hélicoptère ?

1.2 - Contexte technique

1.2.1 - Analyse fonctionnelle

La figure présentée ci-dessous provient du travail réalisé par le groupe projet précédent. Elle présente une analyse fonctionnelle du système attendu, mettant en évidence les principales interactions entre la maquette, l'utilisateur et l'environnement. Elle permet notamment d'identifier les fonctions attendues du système ainsi que les différents éléments intervenant dans son utilisation.

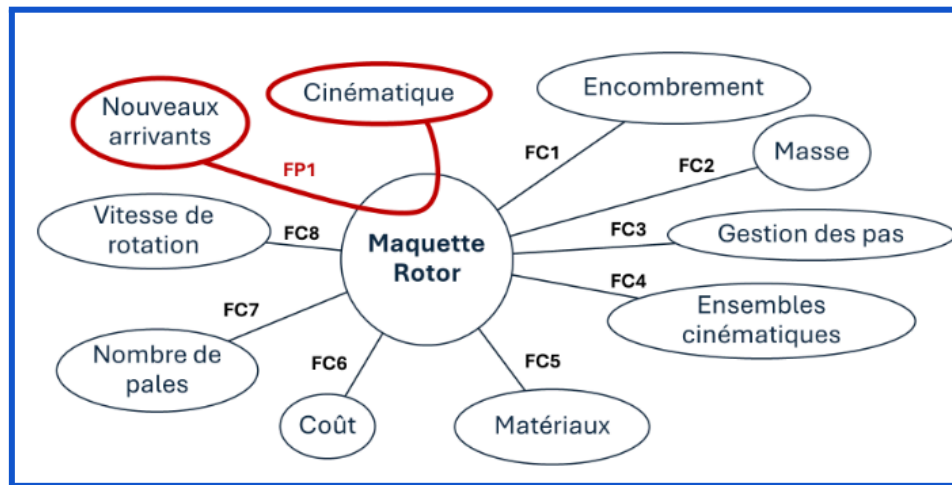


Figure 1 : Diagramme des milieux extérieurs de la maquette rotor

Cette représentation nous a servi de support de compréhension afin de mieux visualiser les objectifs du projet ainsi que ses contraintes.

1.2.2 - Cahier des charges

Le cahier des charges permet de définir des exigences et des contraintes précises liées au développement du produit, ici, celui de la maquette rotor. Il sert de référence tout au long du projet afin d'assurer que les solutions adoptées répondent aux besoins identifiés.

Le cahier des charges final présenté ci-dessous a été élaboré en collaboration avec *CT Engineering*. Il reprend les éléments essentiels à la conception et à la réalisation d'une maquette manipulable et pédagogique, permettant de visualiser la cinématique du rotor.

Un cahier des charges initial avait été établi par le groupe projet précédent (Cf. [Annexe 1 - Cahier des charges précédent](#)) et a servi de support de réflexion pour structurer et clarifier les besoins. Le document final a toutefois été adapté pour répondre aux exigences réelles de l'entreprise.

La fonction principale retenue est : "La maquette est une représentation simplifiée et réduite d'un plateau cyclique". En effet, l'accent du projet a été porté sur la représentation fidèle des mouvements du plateau cyclique, et en particulier sur la transmission de ces mouvements.

Contrairement au cahier des charges précédent, qui proposait l'utilisation de vérins, cette fonction doit être réalisée à l'aide d'un combinateur mécanique, ce changement ayant une importance majeure pour la suite du projet.

Cahier des charges

Réalisation d'une maquette pédagogique d'un rotor d'hélicoptère

Fonction	Critère	Niveau de performance	Flexibilité
FP1 : La maquette est une représentation simplifiée et réduite d'un plateau cyclique	<ul style="list-style-type: none"> Mécanismes observables. Maquette dynamique, manipulable. Nombre d'hélices. Mouvements plateau cyclique. Influence pas cyclique et collectif. 	<ul style="list-style-type: none"> Pas cyclique induit par des manivelles/joysticks 4 hélices Inclinaison des pâles de $\pm 30^\circ$ Mouvements synchronisées des pâles et dissymétriques 	F0
FC1 : La maquette doit être transportable	<ul style="list-style-type: none"> Poids maximum. Encombrement maximum. 	<ul style="list-style-type: none"> Mmax = 5 ± 1 kg Hmax = 500 ± 50 mm \varnothingmax = 500 ± 50 mm 	F1
FC2 : La production de la maquette doit respecter un coût maximal	<ul style="list-style-type: none"> Matière. Coût. 	<ul style="list-style-type: none"> 60% de composants métalliques (seulement les éléments fonctionnels) <500 € 	F1
FC3 : La maquette doit être motorisé	<ul style="list-style-type: none"> Vitesse moteur. 	<ul style="list-style-type: none"> Nm = 60 ± 10 tr/min 	F2
FC4 : La maquette doit respecter le système de transmission de la direction	<ul style="list-style-type: none"> Type d'actionneur. 	<ul style="list-style-type: none"> Actionneur mécanique --> Système de transmission par tringlerie 	F1

F0 : Les critères doivent être strictement respectés.
 F1 : Les critères peuvent légèrement varier sous conditions.
 F2 : Les critères sont négociables.
 F3 : Les critères peuvent être modifiés selon les besoins.

Figure 2 : Cahier des charges revisité avec l'entreprise

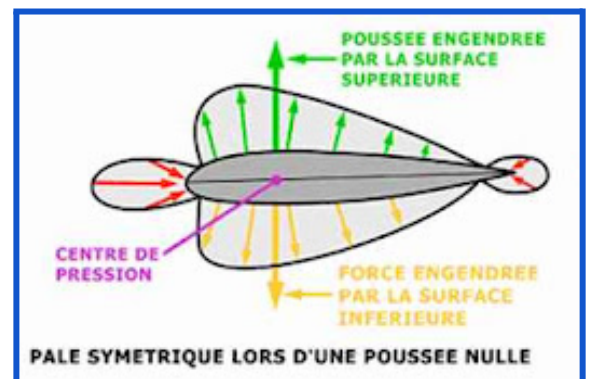
1.3 - Etat de l'art

Après réalisation du cahier des charges, nous avons cherché à comprendre la cinématique et le fonctionnement global d'un rotor d'hélicoptère.

La portance est la force qui permet à l'hélicoptère de décoller et de se maintenir en l'air. Pour que l'hélicoptère puisse s'élever, cette force doit compenser son poids, c'est-à-dire la force qui l'attire vers le sol. Le poids est une force due à l'attraction terrestre. Il dépend de deux éléments : la masse de l'hélicoptère et l'accélération de la pesanteur.

La portance d'un hélicoptère est produite de la même façon qu'un avion. Il s'agit d'une aile qui traverse l'air, la différence de vitesse entre l'air passant dessus et dessous la pale crée une zone de basse pression « aspirant » l'hélicoptère vers le haut.

Figure 3 : Schéma effet physique sur une pale d'hélicoptère



La vitesse de rotation du rotor est fixée à environ 1 600 tr/min. Pour contrôler un hélicoptère, il est nécessaire d'agir sur l'angle des pales en rotation, ce qui permet de modifier la portance et la direction de l'appareil.

Le rotor est ainsi équipé d'un plateau cyclique, qui permet de transmettre et de moduler ces variations d'angle. Ce plateau est associé à deux leviers de commande, permettant de contrôler l'instance des pâles :

- Le levier de pas collectif, qui agit sur l'ensemble des vérins de façon synchronisée, et permet d'assurer la montée ou la descente de l'appareil.
- Le manche de pas cyclique, qui permet de modifier indépendamment l'actionnement de chaque vérin, assurant les translations horizontales de l'appareil. En effet, l'augmentation de l'incidence d'une pale entraîne une portance du côté opposé, dirigeant ainsi l'hélicoptère dans la direction souhaitée.

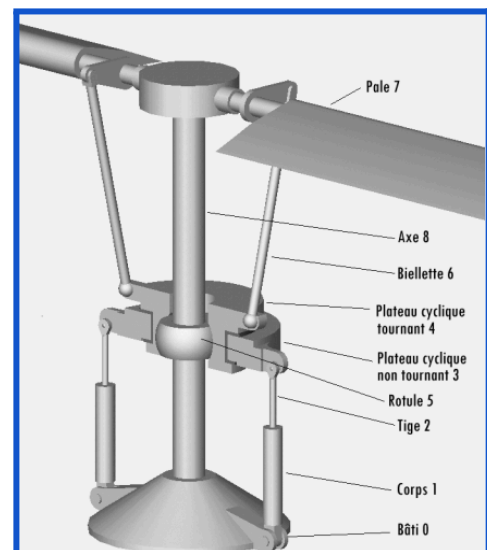


Figure 4 : Illustration de différentes incidences de pale

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la cinématique du système et avons étudié les documents fournis par *CT Engineering* sur le fonctionnement d'un rotor, afin de mieux comprendre les mécanismes impliqués et le fonctionnement global du système.

Sur le schéma, les commandes partent du **bâti (0)** et sont transmises par les **tiges (2)** vers le **plateau cyclique non tournant (3)**, qui peut s'incliner mais ne tourne pas avec le rotor. Grâce aux **rotules (5)**, ce plateau transmet son mouvement au **plateau cyclique tournant (4)**, solidaire du mât et tournant avec le rotor. Les **bielles (6)** relient ensuite ce plateau aux **pales (7)** en passant par l'**axe (8)**. Lorsque le plateau s'incline, l'angle d'attaque des pales varie au cours de la rotation, modifiant ainsi la portance de chaque pale et permettant de diriger l'hélicoptère vers l'avant, l'arrière ou les côtés.

Figure 5 : Schéma 3D simplifié d'un rotor



Attention : sur le schéma, les compas permettant de fixer en rotation le plateau non tournant au bâti et le plateau tournant au mât rotor ne sont pas représentés.

Cette rencontre avec les équipes de *CT Engineering* a permis de préciser certaines exigences du cahier des charges final et d'adapter la maquette aux attentes de l'entreprise.

Parmi les principales modifications, il a été demandé de remplacer le système initial à vérins par un mécanisme entièrement mécanique, utilisant un combinateur et des leviers, afin de mieux illustrer la cinématique du plateau cyclique.

Un combinateur est un mécanisme permettant de regrouper plusieurs entrées en une ou plusieurs sorties combinées. Dans notre cas, il sert à réunir les commandes de **pas cyclique** et de **pas collectif** agissant sur le plateau fixe. Le manche de pas cyclique permet de translater séparément les biellettes de roulis et de tangage, tandis que le levier de pas collectif provoque la translation simultanée de l'ensemble des biellettes.

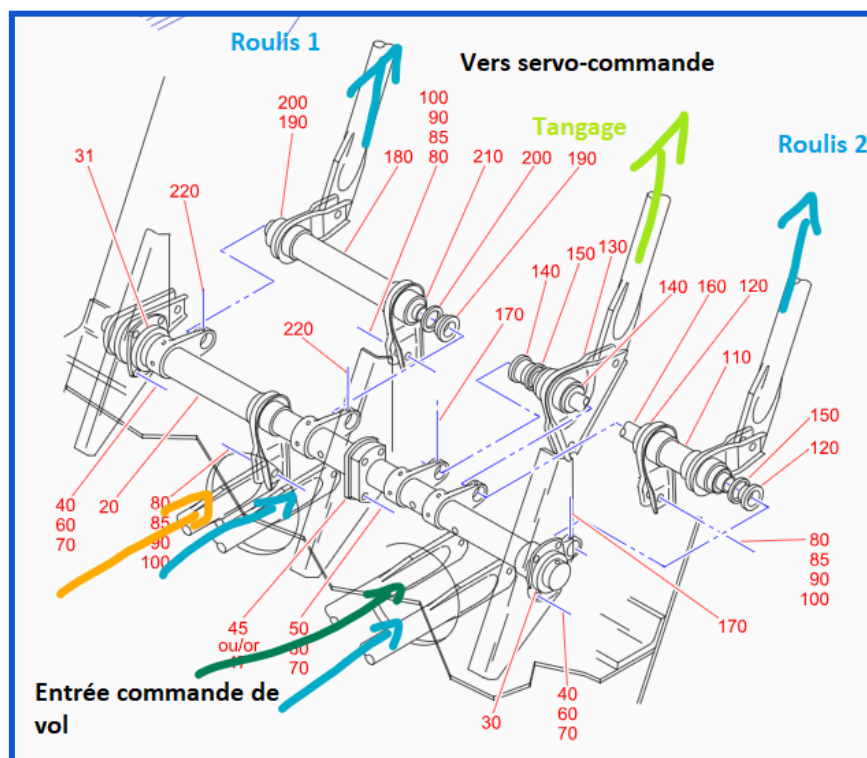


Figure 6 : Schéma fonctionnel d'un combinateur fournis par CT Engineering

Nous avons choisi de présenter directement les modèles en 3D à l'aide du logiciel CATIA afin d'offrir une représentation plus claire et plus précise des différents systèmes étudiés en collaboration avec *CT Engineering*. Deux modèles distincts ont ainsi été analysés :

Le premier est inspiré du système présent sur l'hélicoptère *Aérospatiale Gazelle*. Dans cette configuration, le mécanisme a été adapté afin de modifier le déplacement selon un seul axe, soit le roulis, soit le tangage. Le second modèle, plus fidèle aux schémas techniques fournis par *CT Engineering*, est basé sur l'hélicoptère *Eurocopter AS350 Écureuil*. Celui-ci permet de reproduire un déplacement combiné sur les deux axes, le roulis et le tangage, ce qui correspond davantage au fonctionnement réel du système.

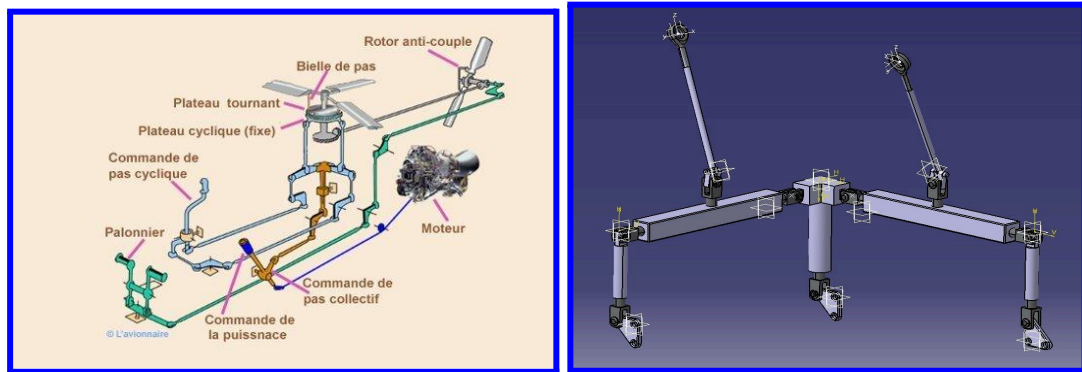


Figure 7 : Schéma et modélisation 3D combineur gazelle

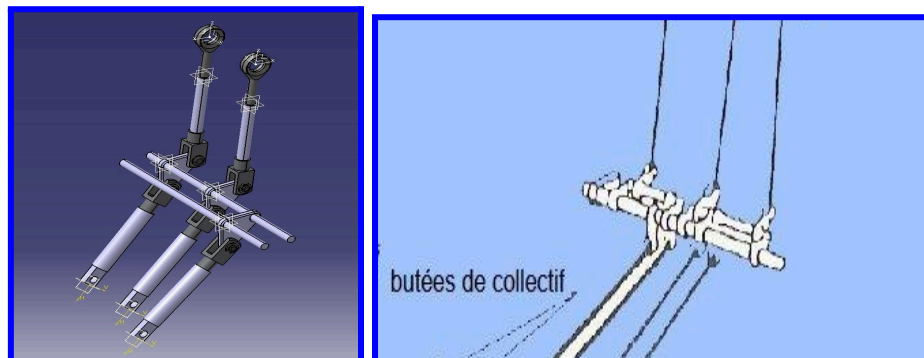


Figure 8 : Schéma et modélisation 3D combineur AS350

Il nous a finalement été recommandé de privilégier le modèle inspiré de l'AS350, car il correspond au type de mécanisme sur lequel travaille habituellement *CT Engineering* et qu'ils maîtrisent le mieux. Ce choix est donc particulièrement pertinent pour la réalisation d'une maquette destinée à être présentée et étudiée avec eux.

Partie 2 - Développement solution technique

2.1 - Gestion de projet

Afin d'organiser le travail en fonction du temps et entre les différents membres du groupe, un diagramme GANTT a été réalisé :

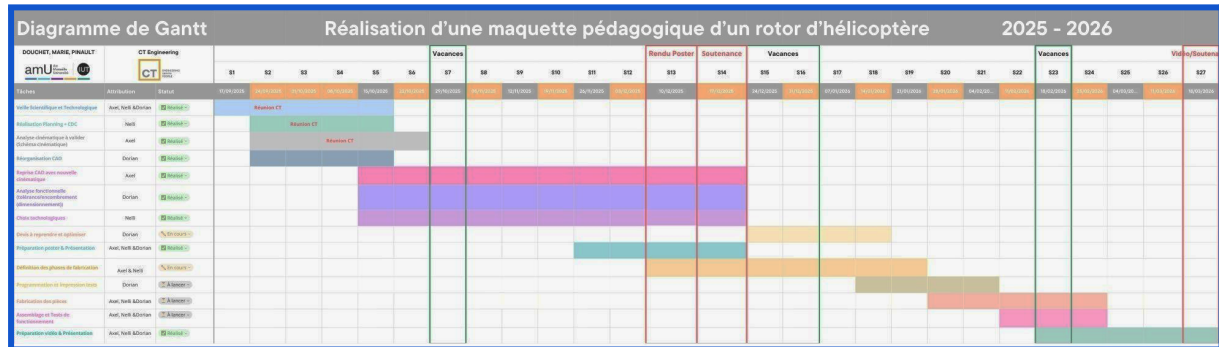


Figure 9 : Diagramme GANTT prévisionnel du projet

Les tâches ont été dispersées en fonction des aptitudes et forces de chaque membre, et de manière équitable pour pouvoir être efficace dans l'avancée du projet.

Cependant, ces temps sont des estimations et ne reflètent pas bien la réalité. Il y a eu des modifications de planning en fonction des besoins.

2.2 - Méthodes utilisées

Le début du développement de la maquette du rotor démarre par l'étude et l'analyse de l'état de l'art afin de déterminer, à partir du cahier des charges, le bon fonctionnement des solutions qui seront retenues. Ensuite, nous dimensionnons les différentes parties de la maquette en fonction des attentes du cahier des charges (60 tr/min, etc.).

Les dimensions principales à connaître en premier sont celles de l'arbre car elles déterminent les côtes à suivre pour le reste de la maquette. A partir de l'arbre, nous pouvons dimensionner les autres parties de la maquette comme les pièces du plateau, les bielles, la croix tenant les pâles, etc.

Une fois le dimensionnement calculé, nous concevons la maquette dans Catia V5 pour avoir une vision de notre projet, s'assurer de la fonctionnalité des calculs et obtenir à la fin des dessins de définitions qui puissent être utilisés en usinage comme base de travail.

2.1.1 - Analyse cinématique

L'état de l'art nous a permis de comprendre les systèmes sur lesquels nous nous appuyons (plateau cyclique, mat rotor, etc.). Grâce à cela, nous avons pu établir le modèle fonctionnel de la maquette telle que le cahier des charges l'a posé :

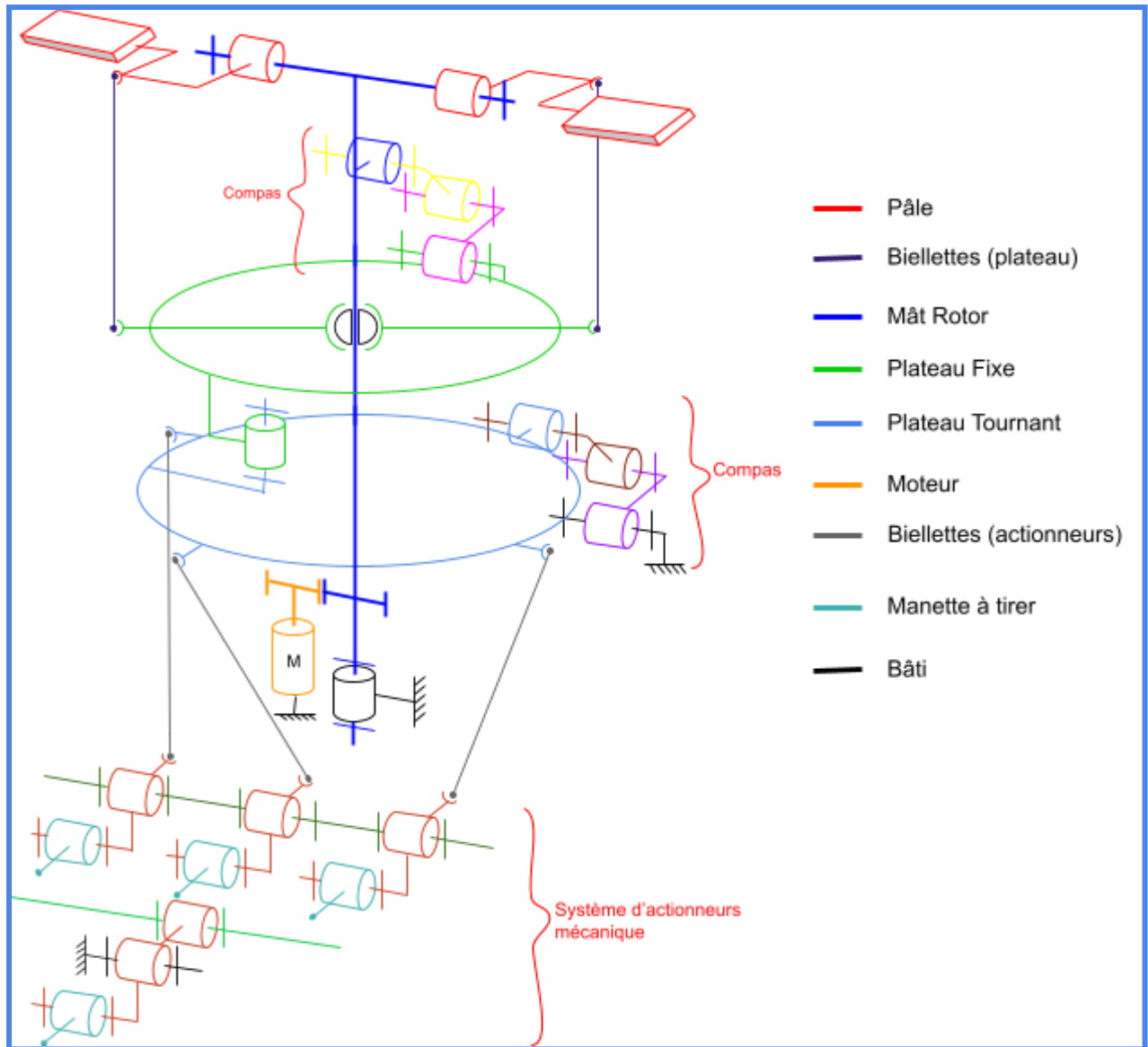


Figure 10: Schéma cinématique du rotor avec système d'actionneurs mécaniques

D'après cette solution, afin d'orienter des pâles, il faut tirer une des manettes connectées directement par une biellette du système d'actionneurs au plateau fixe pour induire le pas cyclique.

Quand nous tirons une des manettes, le système d'actionneurs va tirer sur la biellette fixée au plateau fixe. Celui-ci va donc se pencher, orientant également le plateau tournant. De la même manière, le plateau va tirer sur la biellette des pâles et donc pivoter les pâles dans une seule direction.

2.1.2 - Conception CAO

Nous avons pu reprendre le travail fait partiellement sur la maquette 3D réalisée. Or certaines solutions étaient à revoir. Il fallait les changer et/ou modifier :

Dans un premier temps, le montage des roulements de l'arbre se faisait à l'intérieur de l'arbre imposant ainsi un arbre creux. Or, après vérification, le montage ne peut correspondre à la fabrication : il est complexe d'obtenir les surfaces des roulements coaxiales ensemble avec un montage en portafeu.

Nous avons donc opté pour un montage avec bagues intérieures serrées avec les roulements à l'extérieur de l'arbre.

Ensuite, il fallait déterminer comment maintenir l'arbre. Nous avons choisi de monter les 2 roulements qui maintiendront l'arbre en haut et en bas du bâti, n'appartenant pas aux mêmes pièces du bâti. Cette solution limite la flexion de l'arbre en mouvement et facilite la fabrication dans l'ensemble. En contrepartie, il faudra porter une grande attention au problème de coaxialité entre les 2 portées de roulement.

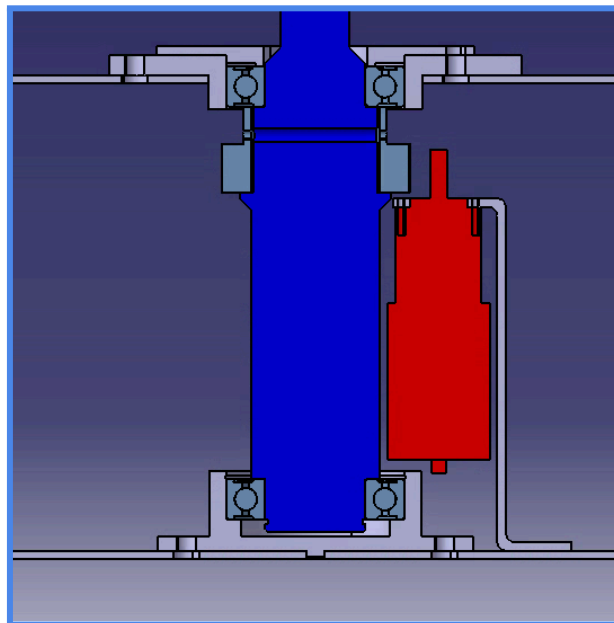


Figure 11: Vue en coupe de la partie "basse" du système après modification

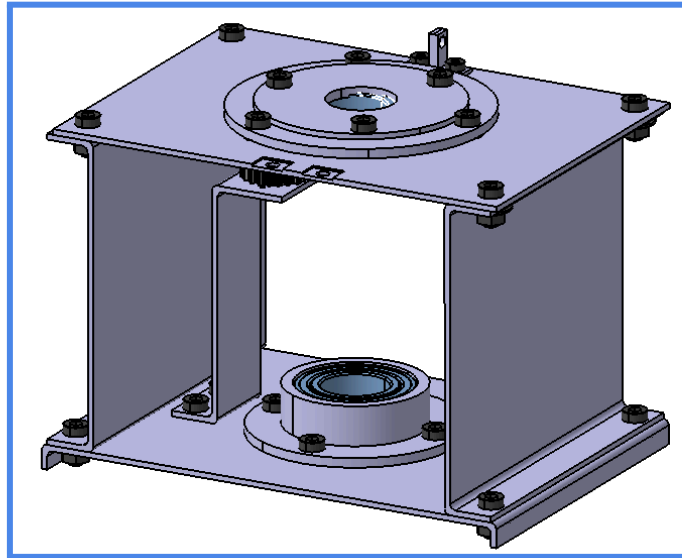


Figure 12: Vue ISO de la partie "basse" du système

- En second lieu, les éléments de fixation des différentes biellettes au niveau des 2 plateaux étaient directement usinés. Or cela implique une géométrie complexe nécessitant beaucoup de moyens.

Nous avons modifié les plateaux afin qu'ils puissent accueillir une pièce intermédiaire entre la rotule ou la pivot et le plateau correspondant. Cela permet de pouvoir usiner en tournage les plateaux. Nous devons prendre en compte dans le devis les pièces intermédiaires.

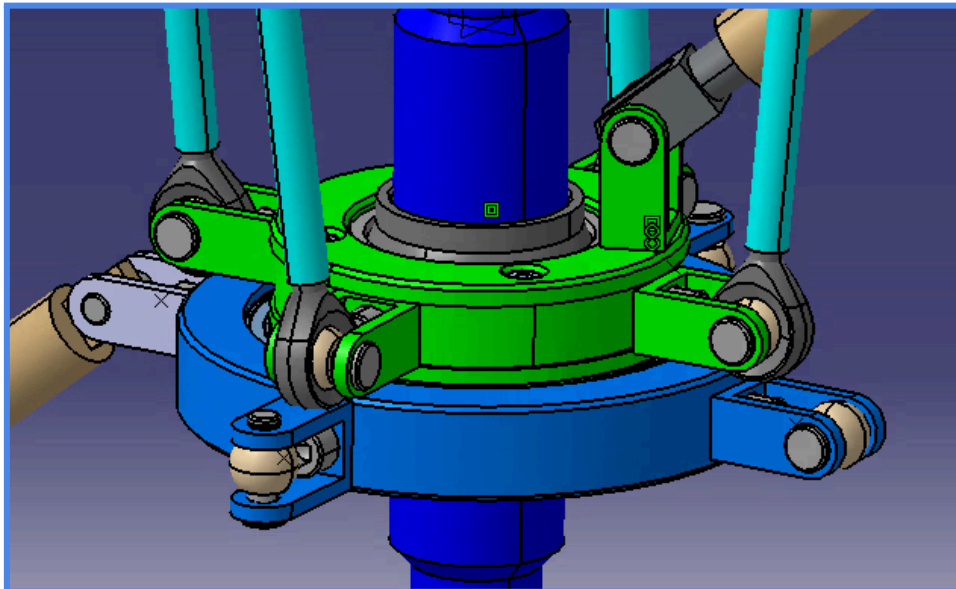


Figure 13: Vue de la partie "plateau" du système après modification et implémentation des pièces intermédiaires

- D'autres éléments ont été modifiés comme le croisillon accueillant les pâles dont la géométrie de la liaison avec l'arbre (carré à rond afin de pouvoir usiner seulement en tournage l'arbre), le changement des éléments de pivot des pâles (roulement à palier lisse) ou encore le changement du bâti.

Une esquisse de la maquette a pu être obtenue en modifiant ces éléments:

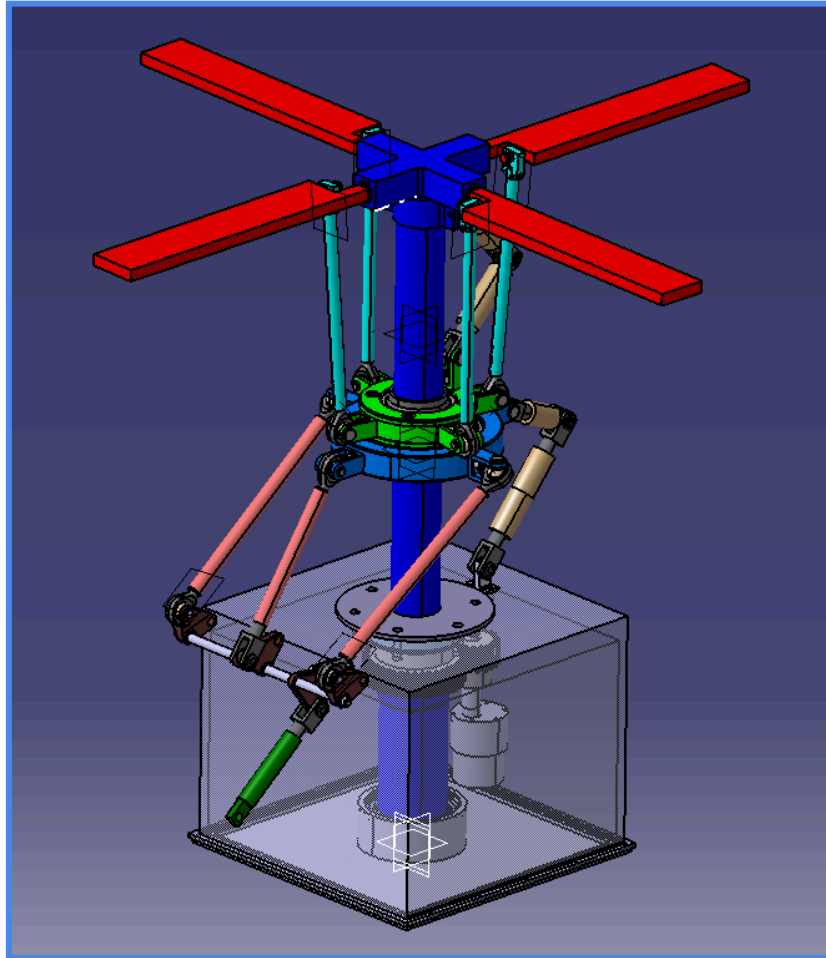


Figure 14: Vue iso de l'esquisse de la maquette

Après revue avec *CT Engineering*, le combinateur n'a pas été accepté au motif qu'il ne permet pas un déplacement linéaire par rapport au mât du rotor. Puisque nous utilisons un système mécanique de tringlerie ne pouvant représenter à 100 % un déplacement linéaire, il nous a été indiqué de réduire notre angle à 10° (ou 10 %) afin de limiter les efforts axiaux sur les chapes.

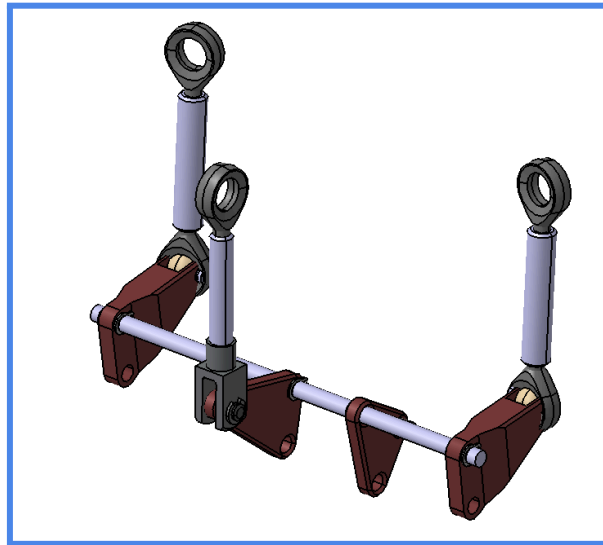


Figure 15: Vue du combinateur

2.1.3 - Dimensionnement

Une fois une idée globale de la maquette, le dimensionnement va permettre de déterminer les pièces à commander et les géométries à réaliser en usinage plus tard.

Nous commençons par dimensionner les roulements (plateau et bâti) à utiliser en fonction des efforts. Nous avons choisi des roulements à billes à contact radial pour leur polyvalence (correspondant à la direction des efforts, moments, subi par la maquette) et leur coût.

Pour le plateau, le montage du roulement est en bagues intérieures serrées. Nous sommes partis sur un roulement d70 D90. Nous calculons pour savoir si le roulement peut supporter les efforts :

roulement choisi	90	70	10
ROULEMENT A	symbol	unité	valeur
Charge mini rlt A	C_{minA}	N	317,799219
durée de vie roulement	L_{10h}	h	10000
diamètre intérieur	d_A	mm	70
diamètre extérieur	D_A	mm	90
rapport F_{aA}/F_{rA}	F_{aA}/F_{rA}		20,16754228
coeff e	e		0,19

symbol	unité	valeur		
effort axial	F_{A1}	N	-23,19267	
effort radial	F_{R1}	N	-11,62423	
resultante en A sur X	X_A	N	-11,62423	
resultante en A sur Y	Y_A	N	-23,19267	pour 1 pale
resultante en A sur Z	Z_A	N	0	
effort axial en A	F_{aA}	N	20,16754	
effort radial en A	F_{rA}	N	92,77069	pour 4 Pales
Effort équivalent en A	P_A	N	92,77069	
Effort équivalent en B	P_B	N	0	
X_a+X_b	=		23,19267	
Q_A	=		20,16754	

coefficient de sécurité	k_s		2
Couple sortie	C_s	Nm	4,410256
Longueur mat jusqu'à rotu	L_{mat}	mm	170
alpha	α	°	-90
Theta	θ	°	0 Config 1
charge statique de base	C_0	N	12700
	X	=	0,56
	Y	=	2,3
	e	=	0,19

Figure 16: Extrait des feuilles de calcul Excel pour le dimensionnement du roulement

Ici, le roulement supporte les efforts ($C < C_0$).

De la même manière pour l'arbre, nous montons les roulements en BI serrées arbre long, nous choisissons des roulements d35 D62 et vérifions s'ils supportent les efforts. De même, ils supportent le couple moteur.

Ensuite, nous dimensionnons les engrenages. Nous voulons un alésage intérieur de l'engrenage supérieur à 40mm de diamètre du fait du montage de la rotule et du roulement.

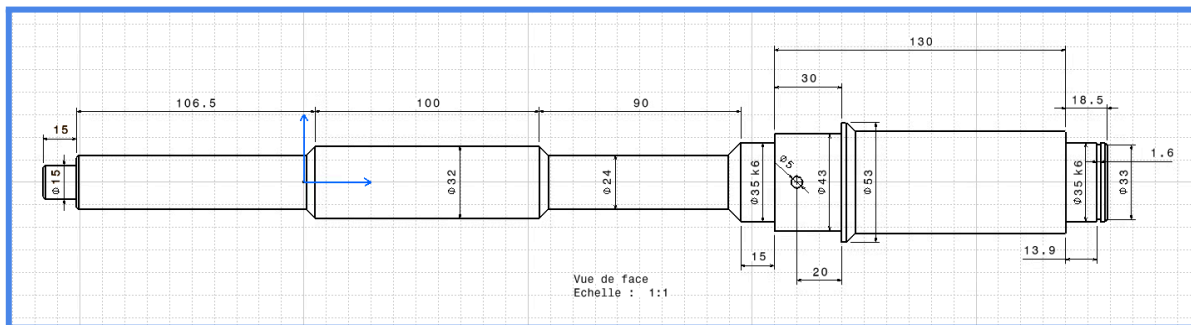


Figure 17: Dessin de définition des côtes de l'arbre

Du fait des engrenages standards, la géométrie contraint un engrenage avec moyeu pour un module 1, moins cher (annexe 3 - schéma engrenage avec moyeu). Nous choisissons un engrenage à denture droite (pour les propriétés de transmission des efforts) $N=61$ et D_3 de 50mm que nous viendrons usiner après pour atteindre la côte voulue. Par les calculs de rapport de réduction ($k=0.4$), l'engrenage du moteur aura $N=25$.

Z1			Engrenage Moteur			Z2			Engrenage Arbre		
angle d'hélice	β	0				angle d'hélice	β	0			
sens d'hélice						sens d'hélice					
module réel	mn	1				module réel	mn	1			
pas réel	pn	3,14159265				pas réel	pn	3,141592654			
module apparent	mt	1				module apparent	mt	1			
pas apparent	pt	3,14159265				pas apparent	pt	3,141592654			
vitesse angulaire	ω	15,2890842				vitesse angulaire	ω	6,283185307			
nombre Tr/min	n	146				nombre Tr/min	n	60			
nombre de dents	Z1	25				nombre de dents	Z2	61			
diamètre primitif	d	25				diamètre primitif	d	61			
entraxe entre 2 roues	a	43				entraxe entre 2 roues	a	43			
saillie	ha	1				saillie	ha	1			
creux	ht	1,25				creux	ht	1,25			
hauteur de dents	h	2,25				hauteur de dents	h	2,25			
diamètre de tête	da	27				diamètre de tête	da	63			
diamètre pied	df	22,5				diamètre pied	dt	58,5			
diamètre de base	db	23,4923155				diamètre de base	db	57,32124987			
angle de pression réel	α_n	0,34906585	20°			angle de pression réel	α_n	0,34906585			
angle de press apparent	α_t	0,34906585				angle de press apparent	α_t	0,34906585			
pas de base réel	pbn	2,95213143				pas de base réel	pbn	2,952131434			
pas de base apparent	pbt	2,95213143				pas de base apparent	pbt	2,952131434			
pas axial	px	#DIV/0!				pas axial	px	#DIV/0!			
pas hélice primitive	pz	#DIV/0!				pas hélice primitive	pz	#DIV/0!			
largeur de dent	b	30				largeur de dent	b	30			
								Rapport de réduction			
								Kt	0,4		

Figure 18: Feuille de calcul Excel du dimensionnement des engrenages

Partie 3 - Résultats obtenus

3.1 - Simulation loi entrée/sortie

Pour confirmer l'isostatisme de la maquette, vérifier les résultats théoriques et trouver la plage de rotation des pales ($\pm 30^\circ$), nous avons réalisé une simulation sur Catia V5.

Tout d'abord, nous avons repris et réutilisé la simulation réalisée par l'équipe précédente. Nous avons ensuite modifié différents angles de pales afin d'observer l'inclinaison du plateau ainsi que son comportement du point de vue de l'isostatisme. Ces essais nous ont permis d'analyser plus précisément la manière dont le système réagit aux variations d'angle et de vérifier la cohérence du mouvement obtenu.

Grâce à ces observations, nous avons pu confirmer que le mécanisme fonctionnait correctement. Cette validation nous a également permis de réduire de manière significative le travail de vérification concernant certains éléments de construction, puisque le bon fonctionnement global du système avait déjà été démontré par la simulation.

Collectif :

0	-30	+30
170,7mm	161,9	179,5

Cyclique (seulement
tangage) :

-30	+30
164,4/	177

Pour simplifier la démarche, nous avons directement mesuré l'incidence des pales sur les équerres du combinateur. Nous avons constaté un déplacement maximal de 8° d'équerre dans notre configuration actuelle, ce que nous considérons comme suffisant compte tenu du débattement des manettes. Nous gardons la possibilité de modifier directement l'incidence des pales en ajustant les dimensions des équerres du combinateur.

Malheureusement, après la conception du levier et de la commande de pas cyclique, nous n'avons pas réussi à faire fonctionner la simulation, celle-ci indiquant que le système est hyperstatique. Malgré un temps considérable consacré au système de tringlerie des commandes cycliques, nous avons choisi de ne pas le représenter dans la présentation CAO afin de privilégier la clarté du modèle global.

3.2 - Présentation du système CAO

Toutes les solutions que nous avons calculé et déterminé vont être incorporé dans le système CAO de catia V5 :

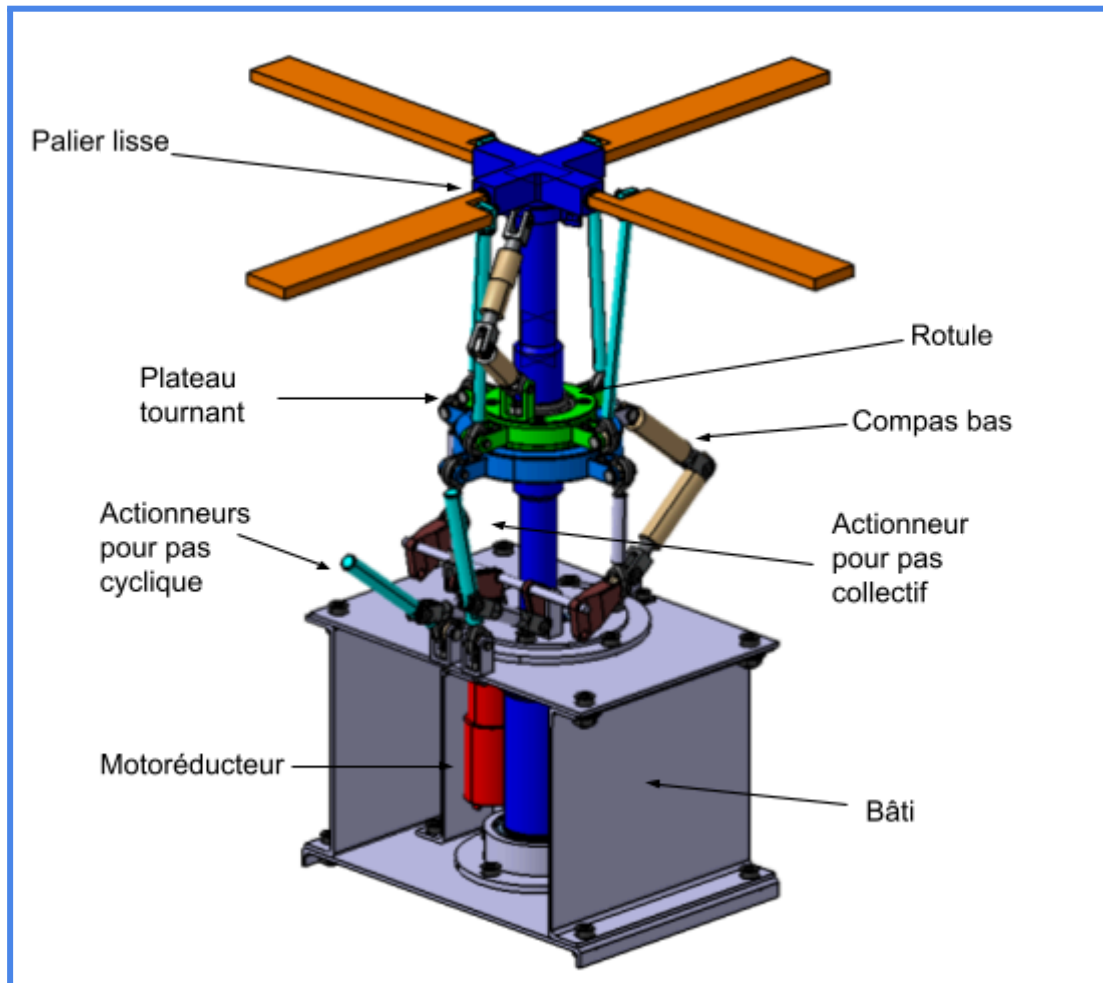


Figure 19: CAO légendée Complète de la maquette

La CAO complète comporte toutes les pièces nécessaire aux besoins du cahier des charges comme :

- Les paliers lisses faisant office de liaison pivot.
- La rotule, montée serrée à l'arbre, pouvant aussi translater le long de l'arbre afin de permettre le pas collectif.
- Le plateau tournant en aluminium usiné en tournage en liaison pivot avec le plateau fixe.
- Le plateau fixe en aluminium usiné en tournage;
- Les actionneurs montés sur le bâti pour mettre manuellement d'orienter les pâles;
- Le motoréducteur entraînant par deux engrenages à denture droite l'arbre;
- Le bâti assemblé avec des tôles de 3mm par des éléments standards (vis, écrous).

Nous avons pu extraire de la CAO des dessins de définition et donc pouvoir faire des gammes d'usinage pour les pièces majeures telles que le plateau ou l'arbre (Cf. [Annexe 2](#)).

Partie 4 - Retour critique sur le projet

4.1 - Retour sur le cahier des charges

Le tableau suivant présente une synthèse des différentes fonctions du cahier des charges ainsi que leur niveau de satisfaction dans le cadre du projet. Il permet de prendre du recul sur les exigences définies initialement et d'évaluer dans quelle mesure elles ont été respectées.

N°	Fonction demandée	Solution retenue	Respect avec le CDC
FP1	La maquette est une représentation simplifiée et réduite d'un plateau cyclique	<p><u>Mécanismes observables</u> : carter transparent pour la transmission + cinématique de chaque pièce visible</p> <p><u>Maquette manipulable</u> : à travers le combinateur et ses leviers</p> <p><u>Nombre d'hélices</u> : 4</p> <p><u>Mouvements plateau cyclique</u> : 3 bielle induisant les variations d'angles des pâles</p>	<p>Pas cyclique induit par des manivelles/joystick : <input checked="" type="checkbox"/> par des leviers</p> <p>4 hélices : <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Inclinaison des pâles de +/- 30° : <input type="checkbox"/> À vérifier</p> <p>Mouvements synchronisés et dissymétriques des pales : <input checked="" type="checkbox"/> 2 leviers indépendants et le 3ème dépendant des 2 autres</p>
FC1	La maquette doit être transportable	<p><u>Poids maximum</u> : vérification du poids de chaque composants</p> <p><u>Encombrement maximum</u> : choix des composants induit par cette exigence</p>	<p>Mmax = 5 +/- 1 kg : <input type="checkbox"/> À vérifier</p> <p>Hmax = 500 +/- 50 mm : <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Lmax = 500 +/- 50 mm : <input checked="" type="checkbox"/></p>
FC2	La production de la maquette doit respecter un coût maximal	<p><u>Matière</u> : favorisation de pièce à usiner plutôt que commandé</p> <p><u>Coût</u> : Réalisation de pièces à l'atelier et minimisation de pièces complexes à commander</p>	<p>60% de composants métalliques : <input checked="" type="checkbox"/> la majeure partie des pièces sont usinées (en acier)</p> <p><500 € : <input type="checkbox"/> À vérifier avec un devis</p>
FC3	La maquette doit être motorisé	<p><u>Vitesse moteur</u> : moteur choisi selon cette exigence</p>	<p>Nm = 60 +/-10 tr/min : <input checked="" type="checkbox"/> avec Nm = 60 tr/min</p>
FC4	La maquette a un système de transmission de la direction	<p><u>Type d'actionneur</u> : levier qui commande le combinateur mécanique</p>	<p>Système de transmission par tringlerie : <input checked="" type="checkbox"/> combinateur mécanique</p>

4.2 - Choix effectués et leurs conséquences

Au cours du projet, plusieurs choix techniques ont été réalisés afin d'adapter la maquette aux contraintes de conception, de fabrication et aux attentes de *CT Engineering*. Ces décisions ont permis d'améliorer certains aspects du système, mais ont également entraîné certaines conséquences ou compromis.

Il est donc pertinent de revenir sur les principaux choix effectués et d'analyser leurs impacts sur la compréhension du système et la réalisation de la maquette.

Remplacement des vérins par un combineur mécanique

Le système de commande initialement prévu dans la CAO utilisait des vérins pour actionner le plateau cyclique fixe. Suite aux échanges avec *CT Engineering*, ce système a été remplacé par un mécanisme entièrement mécanique utilisant un combineur et des leviers.

Ce choix permet de mieux illustrer la cinématique réelle du système et de rendre la maquette plus fidèle, car les mouvements sont directement visibles et compréhensibles par l'utilisateur. En revanche, cette solution nécessite de reprendre la CAO et de concevoir une nouvelle partie du système, afin d'assurer une transmission des mouvements vers les différentes biellettes.

Simplification du système réel

La maquette représente une version simplifiée d'un rotor d'hélicoptère. Les éléments aérodynamiques n'ont pas été intégrés car ils ne sont pas nécessaires à la compréhension du fonctionnement du système mécanique d'un rotor d'hélicoptère. Ce choix permet de se concentrer sur les mouvements essentiels du plateau cyclique et facilite la compréhension du mécanisme par l'utilisateur.

Réutilisation et modification de la CAO du groupe précédent

Le projet s'inscrit dans la continuité du travail réalisé par le groupe précédent, dont la CAO a servi de base de travail. Cette approche a permis de gagner du temps sur la phase de conception et de se concentrer davantage sur l'amélioration et l'adaptation du système aux nouvelles exigences.

Cependant, l'utilisation d'une conception existante nécessite une phase d'appropriation et de vérification afin de bien comprendre le fonctionnement du système et d'identifier les modifications nécessaires, ce qui peut s'avérer long et fastidieux.

4.3 - Perspectives

À l'issue de cette phase de conception, plusieurs éléments restent à finaliser avant de pouvoir engager la fabrication de la maquette.

Tout d'abord, il est nécessaire d'établir un devis estimatif afin d'évaluer le coût de réalisation et de vérifier sa cohérence avec les contraintes du projet.

Par ailleurs, certains calculs complémentaires doivent être réalisés, notamment concernant la masse totale de la maquette ainsi que ses dimensions finales, afin de s'assurer de sa stabilité et de sa maniabilité dans un cadre pédagogique.

Ensuite, une vérification du dimensionnement de certaines pièces, notamment des biellettes, devra être effectuée. Cette étape permettra de confirmer que la cinématique du mécanisme permet bien d'obtenir une inclinaison des pales pouvant atteindre environ 30°, conformément au fonctionnement attendu du système.

Enfin, il faudra déterminer l'isostatisme de la commande de pas cyclique afin de confirmer la validité de la CAO.

Ces différentes vérifications permettront de sécuriser la conception avant de passer à la phase de fabrication.

Partie 5 - Conclusion

Ce projet avait pour objectif de concevoir et finaliser la modélisation d'une maquette pédagogique du rotor principal d'un hélicoptère, destinée à illustrer le fonctionnement du plateau cyclique et la cinématique associée.

Au cours du projet, nous avons tout d'abord pris connaissance du travail réalisé par l'équipe précédente et étudié la documentation technique fournie par *CT Engineering* afin de mieux comprendre le fonctionnement du système. Nous avons ensuite adapté la conception existante en tenant compte des exigences de l'entreprise.

Ce travail a permis de proposer une conception de maquette simplifiée mais représentative du fonctionnement du rotor, mettant en évidence les principaux mouvements du plateau cyclique et la variation de l'incidence des pales.

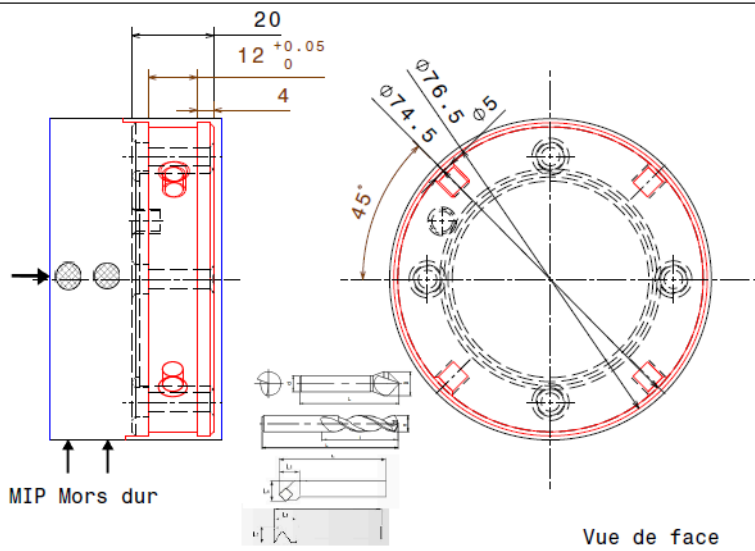
Certaines étapes restent toutefois à finaliser, notamment la validation de certains calculs et l'établissement d'un devis, afin de pouvoir engager la phase de fabrication de la maquette. Une fois réalisée, celle-ci pourra constituer un support pédagogique pertinent pour faciliter la compréhension de ces mécanismes complexes.

ANNEXES

Annexe 1 - Cahier des charges précédent

N°	Fonction	Description	Intervalle de tolérance
FP1	Mettre en évidence les principes d'un plateau cyclique	Doit permettre de mettre en avant les principes cinématiques d'un plateau cyclique aux nouveaux arrivants de chez CT Ingénierie	
FC1	Doit respecter un encombrement maximum	$H_{max} = 50 \text{ cm}$ $\varnothing_{max} = 50 \text{ cm}$ <i>(circonférence pales comprises)</i>	IT (H_{max}) = $\pm 5 \text{ cm}$ IT (\varnothing_{max}) = $\pm 5 \text{ cm}$
FC2	Doit être déplaçable sans effort	Masse _{max} = 5kg	IT (Masse _{max}) = $\pm 1 \text{ kg}$
FC3	Doit pouvoir gérer les pas	Les pas collectifs et cycliques doivent être gérés par plusieurs manettes distinctes	
FC4	Doit représenter les ensembles cinématiques	Les pièces d'un même ensemble cinématique doivent être de la même couleur	
FC5	Doit être fabriqué avec un matériau métallique	La majorité des matériaux utilisés doivent être métalliques afin d'assurer la solidité de la maquette	Taux de pièces métalliques : > 50%
FC6	Doit respecter un coût imposé	Le coût de fabrication de la maquette ne doit pas dépasser 500€	IT (coût) = + 100€
FC7	Doit respecter un nombre de pales imposé	La maquette doit représenter un mat rotor quadruple pâles	
FC8	Doit être entraîné en rotation à une vitesse imposée et variable	$N = 60 \text{ tr/min}$	IT (N) = $\pm 10 \text{ tr/min}$

Annexe 2 - Extrait des Gammes d'usinage du plateau tournant

		PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10	BUREAU DES METHODES		
Etabli par:GMP 3A G1	ELEMENT:Plateau tournant		N°: 1		
Le: 13/12/2025	S/Ensemble:Plateau tournant		Matière:Aluminium		
Programme:	Ensemble:Maquette rotor		Brut:d80 x 40		
Désignation: Tournage CN					
Machine outil:Tour 4 axes					
					
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Ae	f (z)
		m/min	mm	mm	mm/tr (dt)
a	Dressage eb + finition	250	2	1	0,25 0,15
b	Chariotage eb + finition	250	*	*	*
c	Contournage eb + finition	300	2,5 1,5		0,25 0,15
d	Chanfreinage	200	1		0,05
e	Perçage 4 axes	40			0,16

Annexe 3 - Schéma d'un engrenage avec moyeu

