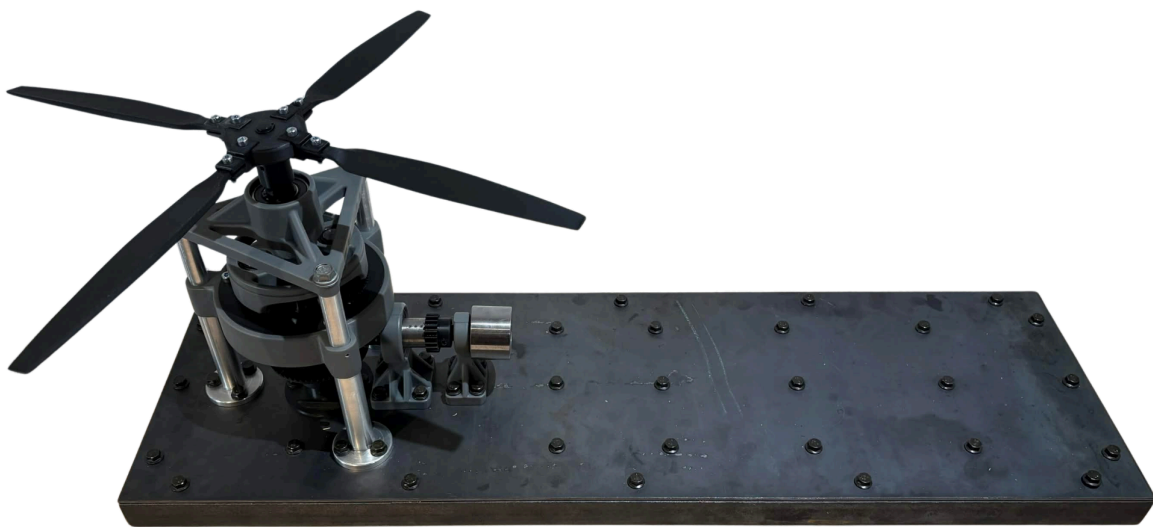

Rapport de projet BUT 3ème année

Réalisé par : *Julien MASSON, Nicolas BROUILLET*

et Carl GUASTAPAGLIA

Maquette pédagogique d'une chaîne de transmission d'hélicoptère
pour CT Engineering



BUT , Génie Mécanique et Productique

413 Av. Gaston Berger, 13100 Aix-en-Provence

2025/2026

Table des matières

💡 Table interactive, cliquez sur les titres pour être redirigé vers le bon chapitre

Table des matières.....	2
1. Introduction.....	6
1.1 Présentation du projet.....	6
1.2 Contexte.....	6
1.2 Objectif du projet.....	6
1.3 Problématique.....	6
2. État de l'Art et Solutions Existantes.....	7
2.1 Qu'est-ce qu'un hélicoptère?.....	7
2.2 Principe de transmission.....	7
2.3 Principe de rotor anticouple.....	8
2.4 Evolution de l'hélicoptère.....	9
2.5 Les maquettes existantes.....	10
3. Analyse Fonctionnelle.....	11
3.1 Diagramme des milieux extérieurs.....	11
3.2 Analyse des fonctions (CDC).....	11
4. Planification.....	12
4.1 Diagramme Gantt.....	12
4.2 Stratégie d'organisation.....	12
5. Solutions technologiques.....	13
5.1 Schéma technologique.....	13
6. Dimensionnement.....	14
6.1 Dimensionnement du train épicycloïdal.....	14
6.2 Dimensionnement du motoréducteur.....	17
6.3 Etude de sensibilité du dimensionnement.....	17
6.4 Choix du moteur.....	19
6.5 Etude des engrenages.....	19
6.6 Arbres et goupilles.....	23
7. Conception.....	24
7.1 Objectifs.....	24
7.2 Etats des lieux.....	24
7.3 Transmission.....	24
7.4 Sécurité.....	27

7.5 Robustesse.....	27
7.6 CAO pour le montage.....	28
7.7 Bloc Porte satellite.....	30
7.8 Devis et dépenses.....	30
8. Fabrication.....	31
8.1 Usinage.....	31
8.2 Logistique de fabrication.....	33
8.3 Bâti.....	33
9. Assemblage.....	38
10. Test de conformité au CDC.....	39
11. Conclusion.....	40
11.1 Compétences développées et approfondies :.....	40
11.2 Limites du projet.....	40
11.4 Retour d'expérience.....	40
11. Annexes.....	41
Annexe 1.....	41
Annexe 2.....	42
Annexe 3.....	43
Annexe 4.....	44
Annexe 5.....	45
12. Bibliographie.....	46

Table des illustrations

Figure n°1 : Localisation CT Ingénierie.....	5
Figure n°2 : Principe de transmission.....	7
Figure n°3 : Rotor anticouple.....	8
Figure n°4: Evolution de l'hélicoptère.....	9
Figure n°5 : Maquette de Tallard.....	10
Figure n°6 : Diagramme des milieux extérieurs.....	10
Figure n°7 : Tableau des fonctions.....	11
Figure n°8 : Diagramme Gantt.....	12
Figure n°9 : Stratégie d'organisation.....	12
Figure n°10 : Schéma technologique.....	13
Figure n°11 : Schéma technologique numéroté.....	15
Figure n°12 : Dents des engrenages.....	15
Figure n°14 : Histogramme de sensibilité du dimensionnement du motoréducteur.....	18
Figure n°15 : Moteur.....	19
Figure n°16 : Stratégie pour déterminer le module de taillage.....	19
Figure n°17 : Plan partie 1/2.....	21
Figure n°18 : Plan partie 3/4.....	21
Figure n°19 : Plan partie 5/6.....	22
Figure n°20 : Plan partie 7/9.....	22
Figure n°21 : Les objectifs de conception.....	24
Figure n°22 : Maquette de l'ancien groupe.....	24
Figure n°23 : Les montages des roulements.....	25
Figure n°24 : Montage spécifique 1.....	25
Figure n°25 : Montage spécifique 2.....	26
Figure n°26 : Transmission moteur 1.....	26
Figure n°27 : Transmission moteur 2.....	26
Figure n°28 : Sécurité.....	27
Figure n°29 : Tableau des diamètres livré fabricant.....	28
Figure n°30 : Tableau des diamètres tolérancés pour l'usinage.....	29
Figure n°31 : Réglages.....	30
Figure n°32 : Tableau des devis et dépenses.....	30
Figure n°33 : Tableau des pièces usinées.....	32
Figure n°34 : Logistique de fabrication.....	33
Figure n°35 : SLA VS SLS.....	33
Figure n°36 : Fonctionnement SLA.....	34
Figure n°37 : Gamme de mesure.....	35
Figure n°38 : Montage métrologique.....	36
Figure n°39 : Résultats métrologiques.....	36
Figure n°40 : Assemblage.....	38
Figure n°41 : Conformité CDC.....	39

1. Introduction

1.1 Présentation du projet

CT Ingénierie Sud Est (CEI), basée à Vitrolles, est une société d'ingénierie et d'études techniques. Elle accompagne ses clients sur des projets industriels en apportant un support en conception et développement (CAO, dimensionnement, industrialisation et suivi technique), notamment dans des domaines exigeants comme l'aéronautique et les voilures tournantes, la défense et le spatial.

CT Ingenierie souhaite disposer d'une maquette pédagogique afin d'expliquer le fonctionnement de la transmission d'un hélicoptère pour ses collaborateurs.



Figure n°1 : Localisation CT Ingénierie

1.2 Contexte

Ce travail a commencé l'année dernière par un groupe d'étudiants de troisième année qui a pu fournir une CAO avec le principe de fonctionnement.

1.2 Objectif du projet

Reconcevoir cette maquette afin de la rendre fonctionnelle, fabricable, puis en assurer la réalisation.

1.3 Problématique

Comment représenter le principe de transmission d'un hélicoptère dans un objectif pédagogique ?

2. État de l'Art et Solutions Existantes

2.1 Qu'est-ce qu'un hélicoptère?

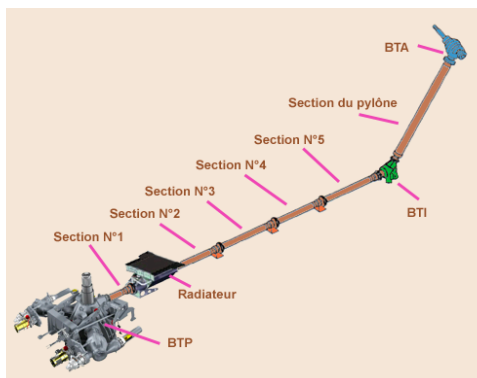
Un hélicoptère est un aéronef dont la sustentation et la propulsion sont assurées par une voilure tournante, couramment appelée rotor, et entraînée par un ou plusieurs moteurs.

La majorité des hélicoptères utilise un seul rotor de sustentation et un rotor ou autre dispositif anticouple, les autres solutions sont bi-rotors contrarotatifs placés sur le même axe ou sur deux axes.

Un hélicoptère peut être décomposé en un nombre limité de sous-ensembles :

- La cellule est constituée du fuselage et du train d'atterrissage.
- La voilure est constituée, dans la configuration la plus courante, d'un rotor sustentateur unique et d'un rotor anticouple situé à l'extrémité d'une poutre à l'arrière du fuselage. La voilure prend aussi parfois la forme de rotors sustentateurs uniquement, en nombre pair pour éliminer le besoin d'un moyen anticouple. La voilure peut prendre également des configurations plus rares: aile fixe ou un seul rotor sustentateur, la fonction anticouple étant réalisée par d'autres moyens (Eurocopter X3).
- Le groupe motopropulseur est constitué d'un moteur à pistons ou d'une ou plusieurs turbines entraînant les rotors.
- Les commandes de vol comprennent des leviers et des pédales disposés à l'intérieur du poste de pilotage. Ces éléments sont le plus souvent doublés, pour le pilote et le copilote.
- L'avionique : instruments de bord, instruments de navigation, système de communication, etc.
- Les servitudes de bord : circuit carburant, circuit électrique, circuit d'air conditionné, etc.

2.2 Principe de transmission



- Transmettre la puissance du moteur vers le rotor principal et le rotor anticouple.
- Adapter la vitesse et le couple pour assurer la portance et le contrôle de l'appareil.

Figure n°2 : Principe de transmission

2.3 Principe de rotor anticouple

ROTOR DE QUEUE CLASSIQUE À 2 PALES	ROTOR DE QUEUE CLASSIQUE INTÉGRÉ À L'EMPENNAGE
<p>Compense le couple du rotor principal. Permet aussi de contrôler le lacet.</p>  <p>Source Wikimedia Commons <i>Robinson R44</i></p>	<p>Rotor placé sur une dérive de l'empennage. Améliore l'intégration à la structure arrière.</p>  <p>Source : Wikimedia Commons <i>Airbus Helicopters EC-145</i></p>
ROTOR DE QUEUE CLASSIQUE À 4 PALES	FENESTRON
<p>Même rôle qu'un rotor classique. Les 4 pales améliorent la répartition des efforts.</p>  <p>Source : Wikimedia Commons / auteur Tvabutzku 1234 <i>Westland Lynx</i></p>	<p>Rotor anticouple caréné intégré dans la dérive. Plus sûr et plus silencieux qu'un rotor classique.</p>  <p><i>Gazelle SA 340, EC-135, Dauphin</i></p>

ABSENCE DE ROTOR ANTICOUPLE :
ROTORS TANDEM OU COAXIAUX

DJINN : PROPULSION PAR RÉACTION
EN BOUT DE PALES

Le couple est compensé par deux rotors principaux. Pas besoin de rotor de queue.



Chinook

Le rotor est entraîné par des gaz éjectés en bout de pale. Cela supprime l'effet de couple.



Djinn

NOTAR

Un flux d'air remplace le rotor de queue. Il compense le couple et réduit le bruit.

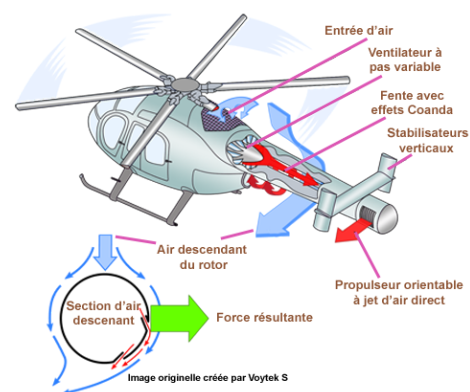


Figure n°3 : Rotor anticouple

2.4 Evolution de l'hélicoptère

DATE	ÉVÉNEMENT
1907	Le Gyroplane Breguet-Richet décolle (envols assistés), et Paul Cornu réalise l'un des tout premiers vols libres très courts d'un appareil à rotors. Brevet : US 1,590,497 [1] (cf. Annexe n°1)
1907	Juan de la Cierva fait franchir un cap avec l'Autogiro : rotor articulé/autorotation : énorme pas vers la stabilité et la sécurité du rotor.
1936	Focke-Wulf Fw 61 : souvent considéré comme le premier hélicoptère réellement pratique et contrôlable.
1939	Sikorsky VS-300 : configuration devenue "classique" (rotor principal + rotor anticouple de queue) et démonstration de la voie moderne de l'hélico. Brevet : US 1,994,488 [2]

1942	Sikorsky XR-4 / R-4 : premier hélicoptère produit à grande échelle, entrée dans l'ère industrielle et opérationnelle.
1946	Bell 47 : premier hélicoptère certifié pour un usage civil (certification), diffusion massive ensuite. Brevet : US 2,457,206 [3]
1955	Alouette II : bascule majeure avec la turbine (premiers hélicos de série à turbine / performance altitude), symbole de la modernisation des motorisations.
1961	CH-47 Chinook : étape clé "transport lourd" avec la configuration tandem (gros gain d'emport, robustesse, rôle logistique)
2013	Eurocopter X3 : démonstration "hélico hybride/compound" à très haute vitesse (472 km/h en palier), qui montre la direction des concepts rapides modernes.

Figure n°4: Evolution de l'hélicoptère

2.5 Les maquettes existantes

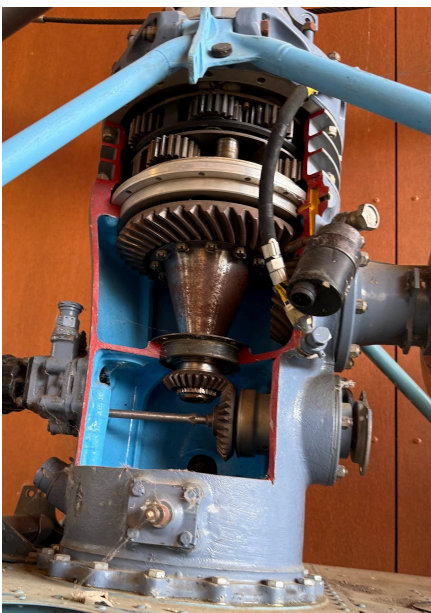
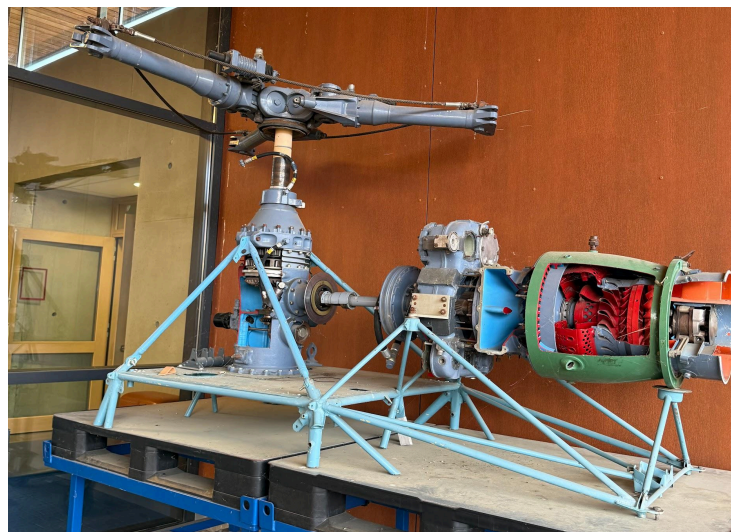


Figure n°5 : Maquette de Tallard



Cette maquette, issue du site de Tallard, représente la transmission d'un hélicoptère, en particulier celle du rotor. Elle permet de voir l'intérieur du système, ce qui apporte un aspect pédagogique.

3. Analyse Fonctionnelle

3.1 Diagramme des milieux extérieurs

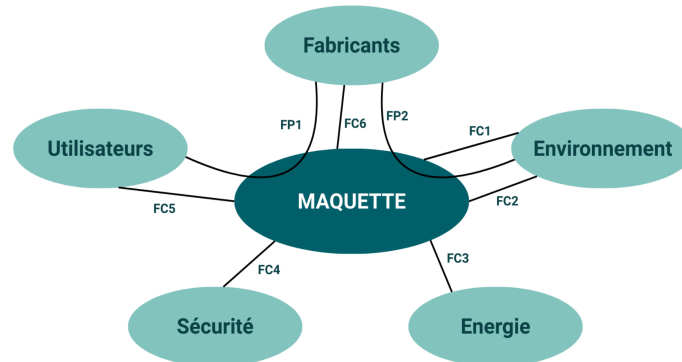


Figure n°6 : Diagramme des milieux extérieurs

3.2 Analyse des fonctions (CDC)

Fonction	Critère de performance	Niveau cible	Tolérance	Vérification / essai
FP1 : Assurer une réduction conforme	Rapports de réduction conformes	21 pour le rotor principal, 3 pour le rotor de queue	+/- 0.30	Mesure des vitesses de rotation en entrée et en sortie de maquette
FC1 : Être peu encombrant	Longueur mesurée	<1 mètre	stricte	Mesure au mètre ruban
FC2 : Être léger	Masse mesurée	<15 kg	+/- 1 kg	Pesée sur balance
FC3 : Être motorisée	Vitesse de rotation contrôlée	Entre 60 et 100 tr/min	stricte	
FC4 : Assurer la sécurité de l'utilisateur	Protéger l'utilisateur	Sécurité assurée	stricte	Essai manuel de blocage rotor
FC5 : Offrir une visibilité claire des mécanismes internes	Transparence / visibilité	Visibilité claire des mécanismes	stricte	Observation visuelle
FC6 : Respecter les contraintes de dimensionnement	Dimensionnement conforme	Respect des côtes prévues	stricte	

Figure n°7 : Tableau des fonctions

4. Planification

4.1 Diagramme Gantt

Aperçu du Gantt réalisé au début du projet (cf. Annexe n°2).

	Durée	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mar
Analyse fonctionnelle	3							
Dimensionnement	3							
CAO	8							
Fabrication	7							
Assemblage	4							

Figure n°8 : Diagramme Gantt

4.2 Stratégie d'organisation

ORGANISATION	RÉPARTITION DES RÔLES	ANTICIPATION
Nous avons d'abord identifié les grands axes de travail, puis les avons décomposés en tâches plus précises afin de structurer le projet et n'oublier aucune tâche.	Une fois les tâches définies, nous avons réalisé un diagramme Gantt puis réparti les tâches selon les compétences et les préférences de chacun afin d'optimiser l'efficacité du groupe.	Les dépendances entre les tâches ont été identifiées afin d'éviter les blocages. Lorsqu'une tâche était bloquée, il était possible d'avancer sur une autre tâche ne nécessitant pas d'antécédent.
TRAÇABILITÉ	COMMUNICATION	RÉACTIVITÉ
Un dossier Drive collaboratif structuré a été mis en place afin de centraliser les documents et faciliter le partage du travail.	La CAO était sur le cloud de l'IUT et nous communiquions entre nous pour savoir qui travaillait dessus et éviter les conflits d'enregistrement.	Des appels réguliers sur Discord ainsi que des réunions toutes les deux semaines avec l'équipe de CT permettaient de suivre l'avancement du projet.

Figure n°9 : Stratégie d'organisation

6. Dimensionnement

Lors de la réception de ce projet, nous nous sommes rendus compte que nous n'avions aucune trace des calculs du dimensionnement réalisé par nos prédécesseurs de l'an dernier. Ainsi, par mesure de sécurité, nous avons décidé de reprendre presque entièrement le processus de dimensionnement de cette maquette.

6.1 Dimensionnement du train épicycloïdal

Le point le plus critique de notre projet, tant en termes de respect du cahier des charges que de complexité de réalisation, est le train épicycloïdal. En effet, c'est ce dernier qui va permettre de réaliser une réduction satisfaisante de vitesse de rotation des rotors. Cette solution technologique est la plus adéquate, tout d'abord dans un sens d'encombrement, nous permettant de réaliser une réduction suffisante avec un encombrement minime. Puis aussi dans l'idée de représenter avec fidélité la solution réellement mise en place dans la quasi-totalité des hélicoptères, qui utilisent réellement un train épicycloïdal.

Notre train épicycloïdal a donc été conçu en respectant différentes conditions et règles afin d'assurer sa crédibilité dans notre montage :

- La réduction totale entre l'arbre moteur et le rotor principal doit être de $21 \pm 0,3$
- Le train épicycloïdal doit respecter la condition d'entraxe afin de pouvoir être monté : $Z_{\text{couronne}} = Z_{\text{planétaire}} + 2 Z_{\text{satellite}}$
- Le train épicycloïdal doit respecter la condition d'entraxe afin de pouvoir être monté : $\frac{Z_{\text{couronne}} + Z_{\text{planétaire}}}{N_{\text{satellite}}} = \text{nombre entier}$

C'est alors avec toutes ces consignes que nous avons choisi de répartir les nombre de dents de chaque engrenage comme suit (cf. annexe n°? pour repérer les éléments concernés) :

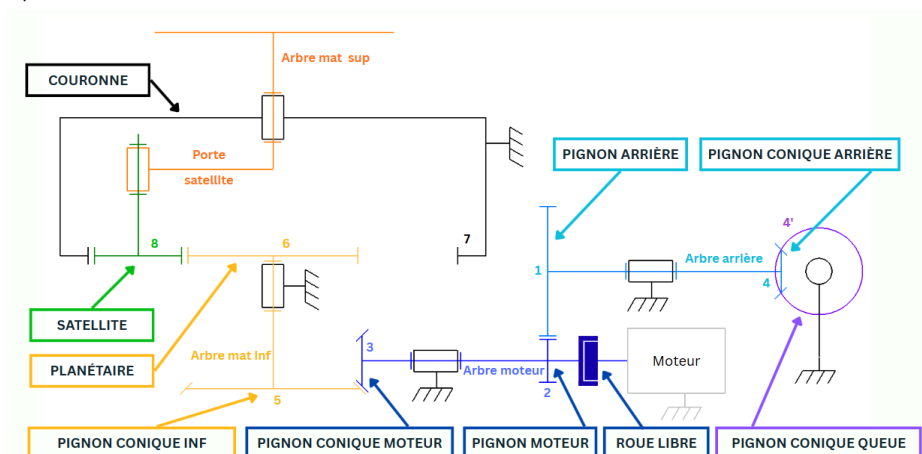


Figure n°11 : Schéma technologique numéroté

PARTIE AVANT / ROTOR PRINCIPAL		PARTIE ARRIÈRE / ROTOR QUEUE	
Engrenage conique moteur (3)	16 dents	Engrenage droit moteur (2)	20 dents
Engrenage conique arbre inférieur (5)	56 dents	Engrenage droit arbre arrière (1)	55 dents
Planétaire (6)	20 dents	Engrenage conique arbre arrière (4)	25 dents
Couronne (7)	100 dents	Engrenage conique rotor anticouple (4')	25 dents
Satellite (8)	40 dents		

Figure n°12 : Dents des engrenages

Cette première étape est primordiale car elle nous permet ensuite de déterminer les rapports de réduction des interactions entre chaque engrenage. Ces derniers représentent des données cruciales afin de pouvoir, par la suite, déterminer les couples et efforts de fonctionnement sur chaque composant mécanique.

Formule pour déterminer les rapports de réductions des trains d'engrenages "classiques" :

$$k_r = - \frac{Z_{menante}}{Z_{menée}}$$

Procédure de détermination des rapports de réduction du train épicycloïdal (cf. annexe n°?) :

- Premier raisonnement "à porte-satellite fixé" :

Rapport de réduction primaire appelé "raison λ du train épicycloïdal" :

$$\lambda = - \frac{Z_6}{Z_8} \times \frac{Z_8}{Z_7} = - \frac{Z_6}{Z_7} = \frac{\omega_{7/10}}{\omega_{6/10}} = \frac{\omega_{7/0} + \omega_{0/10}}{\omega_{6/0} + \omega_{0/10}} = \frac{\omega_{7/0} - \omega_{10/0}}{\omega_{6/0} - \omega_{10/0}}$$

- Nous poursuivrons la démonstration en nous plaçant dans le cas réel de fonctionnement du train épicycloïdal "couronne fixe" :

Dans ce cas, $\omega_{7/0} = 0$; ainsi, $\lambda = - \frac{\omega_{10/0}}{\omega_{6/0} - \omega_{10/0}}$

$$\Leftrightarrow \lambda(\omega_{6/0} - \omega_{10/0}) = \omega_{10/0} \Leftrightarrow \lambda\omega_{6/0} - \lambda\omega_{10/0} = \omega_{10/0}$$

$$\Leftrightarrow \lambda\omega_{6/0} = \lambda\omega_{10/0} - \omega_{10/0}$$

$$\Leftrightarrow \lambda\omega_{6/0} = \omega_{10/0}(\lambda - 1)$$

Donc finalement, voici la loi entrée / sortie de notre train épicycloïdal : $\frac{\omega_{10/0}}{\omega_{6/0}} = \frac{\lambda}{(\lambda-1)}$

PARTIE AVANT / ROTOR PRINCIPAL		PARTIE ARRIÈRE/ ROTOR DE QUEUE	
$K_{r3/5}$	0,29	$K_{r2/1}$	0,36
λ	0,20		
$K_{r8/6}$	0,50	$K_{r4/4'}$	1
$K_{r6/porte-satellite}$	0,17		
RAPPORTS GLOBAUX			
0,05		0,36	

Figure n°13 : Rapport de réduction

6.2 Dimensionnement du motoréducteur

Afin d'entraîner en rotation notre système, nous avons besoin d'un actionneur. Le type d'actionneur se prêtant le plus à notre maquette est du type moteur électrique, en effet, ce dernier permet un couple relativement élevé pour un encombrement et un coût réduit. Cependant, le cahier des charges exigeant une vitesse d'entrée d'environ 60 tr/min, un moteur électrique n'est pas capable de tourner si peu vite en permettant de développer un couple suffisant. Ainsi, nous choisissons un motoréducteur, ce qui permettra d'allier couple élevé et vitesse faible.

Le paramètre critique à déterminer pour dimensionner le motoréducteur est le couple que ce dernier doit fournir, pour ce faire, nous utiliserons le théorème des énergies cinétiques :

$$C_{\text{motoréducteur}} = J_{eq} \times \left(\frac{d\Omega(1/R)}{dt} \right)^2 \times \frac{k_s}{\eta_{\text{global}}}$$

Avec, J_{eq} : L'inertie équivalente de la transmission, rapportée à l'arbre moteur

$\frac{d\Omega(1/R)}{dt}$: L'accélération angulaire décidée pour le moteur

$k_s = 3$: Un coefficient de sécurité arbitrairement défini

$\eta_{\text{global}} = 0,750$: Le rendement global estimé (induit par les liaisons d'engrenages)

Les inerties de chaque élément en rotation ont été calculées grâce à l'outil "inertie" sur CATIA V5. L'accélération angulaire a été déterminée de manière à ce que le moteur atteigne sa vitesse de rotation de "croisière" (60 tr/min) en 1 seconde :

$$\frac{d\Omega(1/R)}{dt} = 6,28 \text{ rad. s}^{-2}$$

Finalement, nous obtenons un couple nécessaire au moteur : $C_{\text{motoréducteur}} = 0,12 \text{ N.m}$

6.3 Etude de sensibilité du dimensionnement

Afin de saisir correctement les enjeux du choix du motoréducteur et de ses caractéristiques, nous avons trouvé intéressant de réaliser une étude de sensibilité de son dimensionnement. Cette étape permet en réalité de “quantifier” l’influence d’un paramètre sur le dimensionnement. Dans notre cas, la valeur affectée est celle du couple en entrée de mécanisme : $P_{\text{motoréducteur}} = f(N, k_s, \eta, t_{\text{accélération}}, J_{eq})$

Cette étape consiste à faire varier chacun de ces paramètres entre 85% et 115% de sa valeur initiale, puis de mesurer le pourcentage d’écart ressenti sur le couple final.

Voici les résultats finaux (cf. annexe n°) :

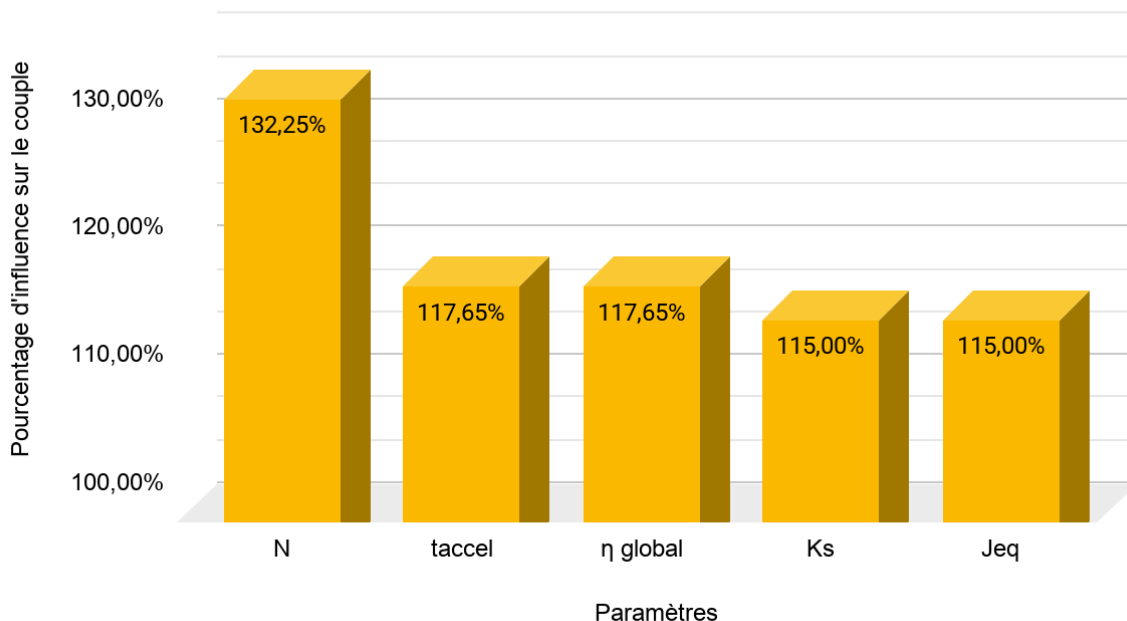


Figure n°14 : Histogramme de sensibilité du dimensionnement du motoréducteur

Nous apercevons alors que le paramètre le plus influent du dimensionnement est la vitesse de rotation de “croisière” que nous fixons en entrée du mécanisme. Malgré le fait que ce paramètre soit exigé dans le cahier des charges, nous l’avons fait intervenir dans cette étude car il s’agissait en réalité d’un sujet de discussions avec CT Ingénierie, en effet, nous négocions quant à la vitesse de rotation que nous pouvions fixer en entrée du système. Ensuite, Le paramètre qui influe le plus sur le couple est le temps fixé pour atteindre la vitesse nominale du moteur.

6.4 Choix du moteur

Nous pouvons dès à présent choisir le motoréducteur qui intégrera notre maquette :

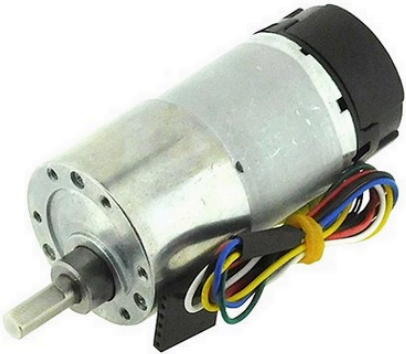
	Vitesse de rotation	100 tr/min
	Couple nominal	0,43 N.m
	Couple maximal	0,6 N.m
	Réduction	1/100

Figure n°15 : Moteur

6.5 Etude des engrenages

On cherche à savoir le module de taillage m_0 de nos engrenages afin de commander des engrenages avec un module résistant aux conditions liées à notre système.

Voici la stratégie en image pour mieux comprendre la demarches :

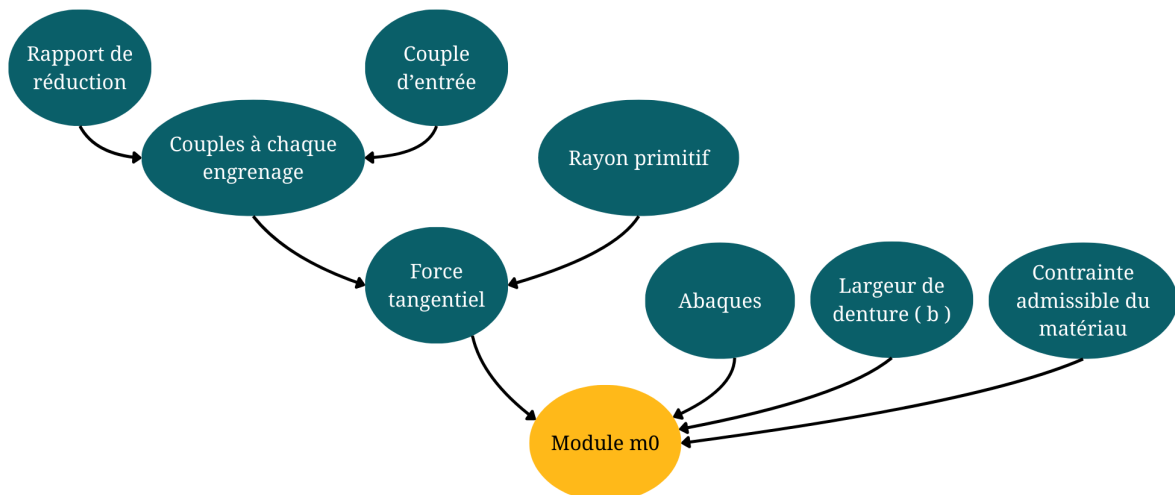


Figure n°16 : Stratégie pour déterminer le module de taillage

a) Formule du module simplifié

Dans le cas d'un engrenage à denture droite et d'un dimensionnement classique (charges modérées, géométrie standard, conditions de fonctionnement simples), il est possible d'utiliser la formule du module simplifié. Cette méthode, permet d'obtenir rapidement un ordre de grandeur du module de taillage m_0

La formule simplifié utilisée s'écrit sous la forme :

$$2.34 \sqrt{\frac{Ft \cdot ks}{b \cdot \sigma_\epsilon}} \leq m_0$$

b) Formule ISO du module

La formule ISO permet de déterminer le module de taillage m_0 de manière plus précise que la formule du module simplifié, car elle ne se limite pas à une estimation globale

La formule ISO utilisée s'écrit sous la forme :

$$\frac{Ft \cdot Y_\epsilon \cdot Y_f \cdot Y_c \cdot Y_\beta \cdot ks}{b \cdot \sigma_\epsilon} \leq m_0$$

<p>Avec :</p> <p>Ft : effort tangentiel (N)</p> <p>b : largeur de denture (mm)</p> <p>m_0 : module de taillage</p> <p>σ_ϵ : Contrainte en flexion au pied de dent (MPa)</p> <p>ks : coefficient de sécurité (1.5)</p>	<p>Les facteurs sont déterminés par abaques et correspondent à :</p> <p>facteur de conduite : Y_ϵ</p> <p>facteur de forme : Y_f</p> <p>facteur de concentration de contraintes : Y_c</p> <p>facteur d'inclinaison des dentures : Y_β</p> <p>(voir Annexe pour Abaques de calcul)</p>
---	---

Nous pouvons, à partir du couple d'entrée, calculer le couple sur chaque engrenage ainsi que la force tangentielle au engrenage

<p>Couple à chaque engrenage :</p> $C_n = (C_{n-1} / k_{n-1/n}) \cdot \eta_{n-1/n}$ <p>Force tangentielle :</p> $Ft_n = C_n / rp_n$	<p>Pour le train épicycloïdal, la force tangentielle est calculée au planétaire, et la force au deux satellites est aussi calculée mais à partir de l'entraxe et non du rayon primitif car la force est calculée sur les deux satellites.</p> <p>Enfin pour la couronne on soustrait ces 2 forces pour avoir la force tangentielle exercée sur la couronne.</p>
---	---

Nous pouvons maintenant, à partir d'engrenages de référence, analyser si le module a besoin d'être changé ou non. Il faut avoir pour 2 engrenages entraînant l'un sur l'autre le même module de taillage.

A - PARTIE 1/2

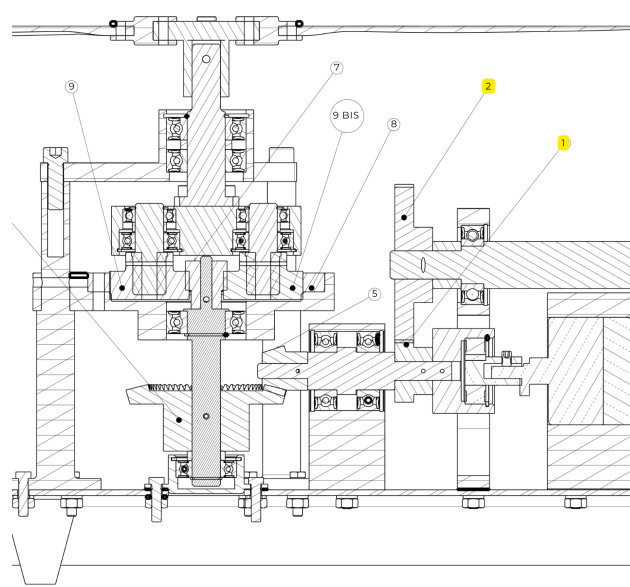


Figure n°17 : Plan partie 1/2

rendement = 0.97 ; $kr_{1/2} = 0.36$
On utilise la formule du module simplifié car on est sur un cas d'engrenage à denture droite

Engrenage 1

Au couple max : $F_t = 40 \text{ N}$

Couple = 0.6 N.m

Engrenage 2

Au couple max : $F_t = 39 \text{ N}$

Couple = 1.6 N.m

Module calculé 0.33 et 0.33

Module de l'engrenage choisi : 1.5

B - PARTIE 3/4

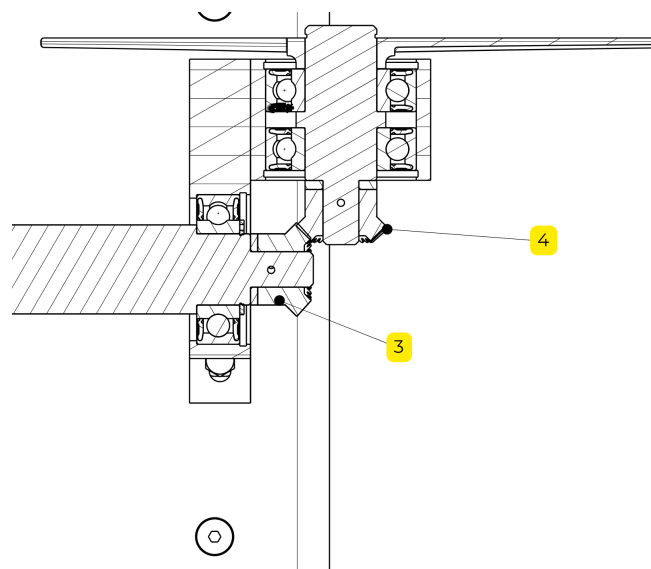


Figure n°18 : Plan partie 3/4

rendement = 0.93 ; $kr_{1/2} = 1$
On utilise la formule ISO du module pour une meilleure précision

$$Y_\varepsilon = 1.11, Y_f = 2.7, Y_c = 1.68, Y_\beta = 1$$

Engrenage 3

Au couple max : $F_t = 129 \text{ N}$

Couple = 1.6 N.m

Engrenage 4

Au couple max : $F_t = 120 \text{ N}$

Couple = 1.5 N.m

Module calculé : 0.54 et 0.50

Module choisi : 1

C - PARTIE 5/6

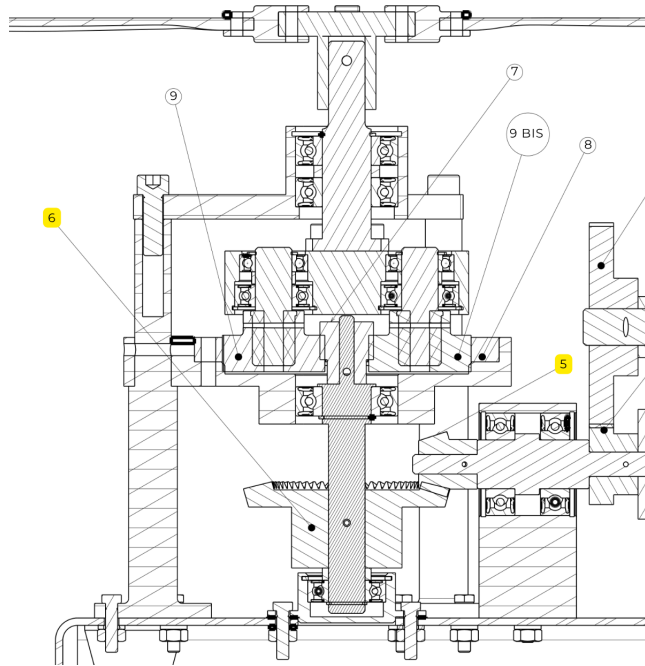


Figure n°19 : Plan partie 5/6

Rendement = 0.93 ; $kr_{1/2} = 0.29$

On utilise la formule ISO du module pour une meilleur précision

Engrenage 5

$$Y_{\varepsilon} = 1.33, Y_f = 3.1, Y_c = 1.58, Y_{\beta} = 1$$

Au couple max : $F_t = 58N$

Couple = 0.6 N.m

Engrenage 6

$$Y_{\varepsilon} = 1.11, Y_f = 2.35, Y_c = 1.82, Y_{\beta} = 1$$

Au couple max : $F_t = 53N$

Couple = 1.92 N.m

Module calculé : 0.36 et 0.35

Module choisis : 1.5

D - PARTIE 7/9

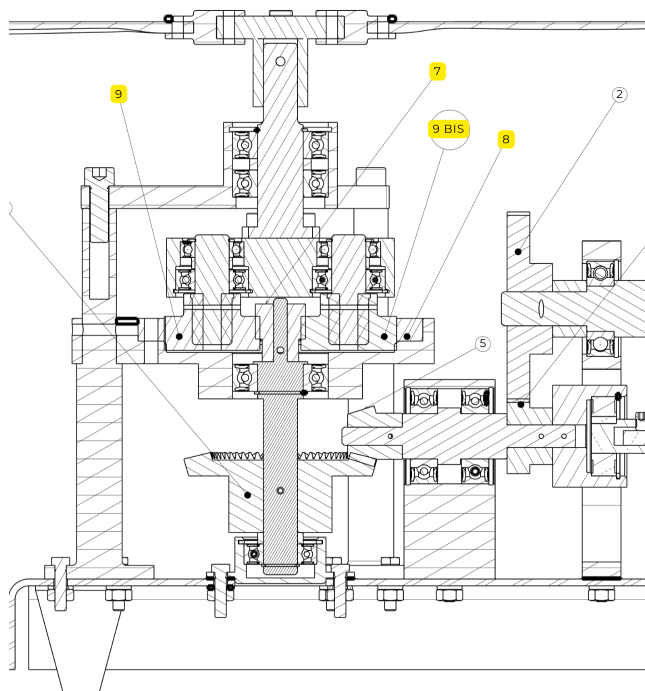


Figure n°20 : Plan partie 7/9

rendement = 0.94 ; $kr_{1/2} = 0.5$

On utilise la formule ISO du module pour une meilleur précision

Engrenage 7

$$Y_{\varepsilon} = 1.25, Y_f = 2.8, Y_c = 1.63, Y_{\beta} = 1$$

Au couple max : $F_t = 96N$

Couple = 1.92 N.m

Engrenage 9

$$Y_{\varepsilon} = 1.11, Y_f = 2.38, Y_c = 1.77, Y_{\beta} = 1$$

Au couple max : $F_t = 120N$

Couple = 3.6 N.m

Module calculé : 0.18 et 0.19

Module choisis 1

Ces calculs ont été réalisés sur un document (Document technique engrenages) qui retrace des calculs plus en détail qui avait été envoyé à CT pour validation.

6.6 Arbres et goupilles

Afin d'avoir une transmission fonctionnelle, il nous reste à déterminer le diamètre minimal de nos arbres en torsion et des goupilles en cisaillement :

Arbres

$$D_{\text{mini}} = \sqrt[3]{\frac{16Ce}{\tau_{\text{adm}} \cdot \pi}}$$

Pour de l'acier au couple de blocage du moteur on obtient $D_{\text{mini}} = 6\text{mm}$.

Goupilles

$$d_{\text{mini}} = \sqrt{\frac{4F}{\tau_{\text{adm}} \text{ cis. } \pi}}$$

Pour de l'acier au couple de blocage du moteur on obtient $d_{\text{mini}} = 1,7\text{ mm}$, on prendra $d = 3\text{ mm}$ ou 4 mm en fonction de la longueur de goupille.

Nous avons utilisé des goupilles car des clavettes ou cannelures auraient été trop compliquées à usiner.

7. Conception

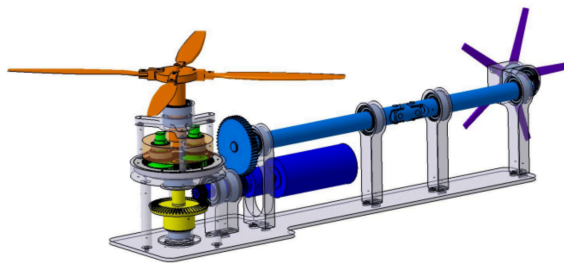
7.1 Objectifs

OBJECTIF 1	OBJECTIF 2	OBJECTIF 3
Assurer la transmission	Assurer la robustesse	Rendre la CAO Fabricable

Figure n°21 : Les objectifs de conception

7.2 Etats des lieux

Nous avons pu récupérer la CAO de l'ancien groupe mais elle comportait de nombreux défauts:



- Elle présentait seulement le principe de fonctionnement
- Les solutions technologiques n'étaient pas optimisées
- Elle était peu exploitable (tout le bâti était dans un seul part)

Figure n°22 : Maquette de l'ancien groupe

Notre première mission était d'assurer le fonctionnement de la maquette. Cela impliquait de vérifier la correspondance des éléments standards de la CAO avec les vrais (engrenages, cardan, roulement...).

L'ancienne CAO était construite avec chaque ensemble cinématique dans un seul objet, ce qui ne permettait pas de les modifier (ou difficilement). Nous avons donc dû remodeler chaque pièce dans des objets différents pour pouvoir les ajuster. (cf. annexe n)

7.3 Transmission

7.3.1 Roulements

Pour que notre transmission marche bien, il fallait réussir à avoir de bons montages de roulements.

Pour tous les roulements, c'est l'arbre qui tourne par rapport à la charge, nous avons donc choisi des montages BI serrées.

Résumé du montage utilisé (Bi serrées)

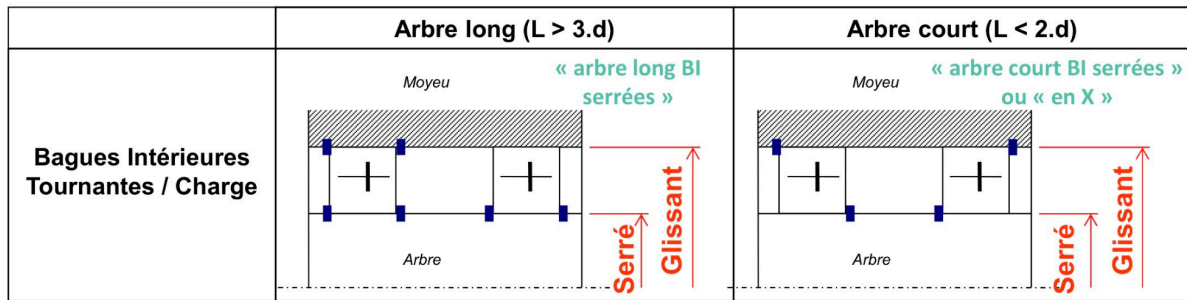
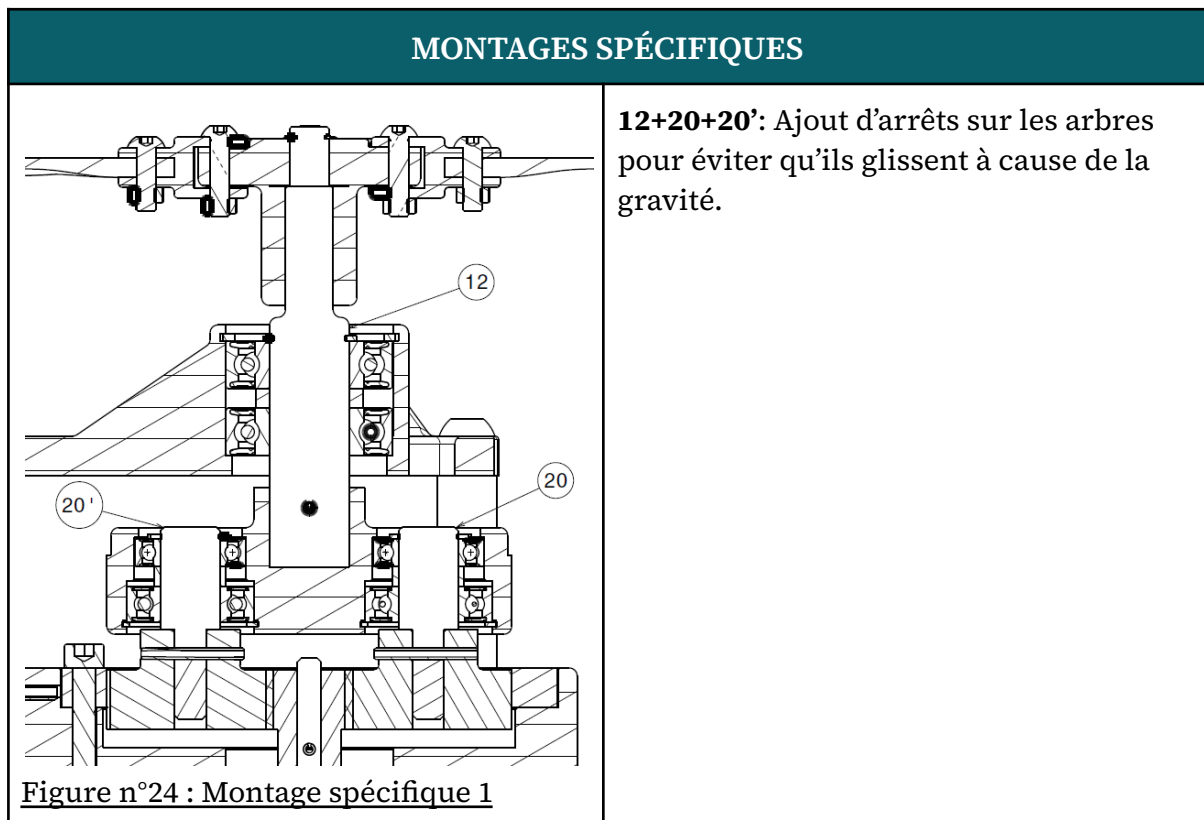


Figure n°23 : Les montages des roulements



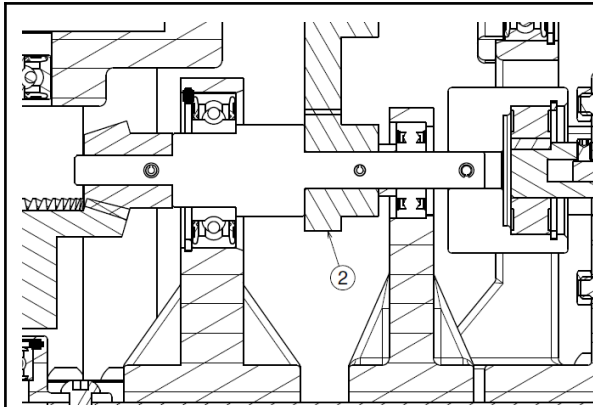


Figure n°25 : Montage spécifique 2

L'ancien groupe avait placé les deux roulements à gauche du pignon (2). Pour éviter le porte-à-faux, nous avons choisi de mettre un roulement de chaque côté du pignon.

7.3.2 Transmission moteur

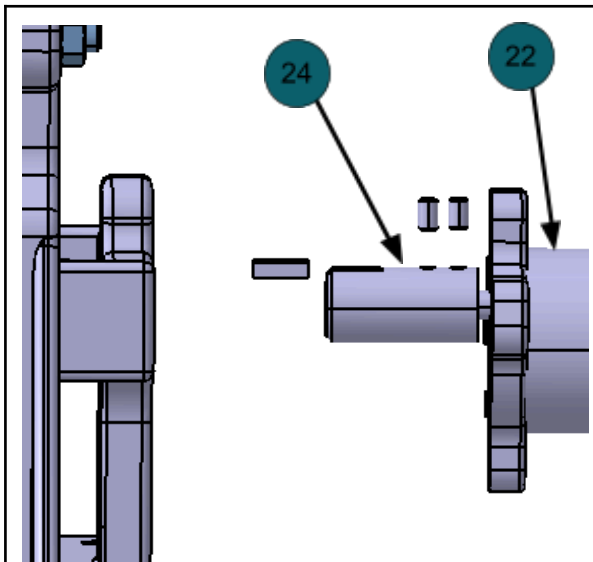


Figure n°26 : Transmission moteur 1

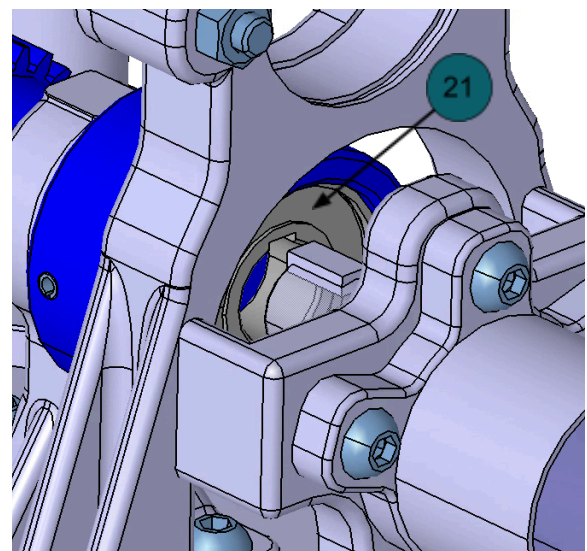


Figure n°27 : Transmission moteur 2

Pour faire la transmission entre le moteur (22) et la roue libre (21), nous avons dû concevoir un arbre supplémentaire (24).

Il est en partie creux et fixé sur l'arbre du moteur grâce à deux vis de pression qui sont serrées sur le méplat du moteur.

La transmission avec la roue libre se fait grâce à une clavette.

7.4 Sécurité

Comme nos pales ont un encombrement conséquent, elles risquent d'être bloquées si elles rencontrent un obstacle ou si quelqu'un de non averti joue avec.

Afin d'assurer la sécurité, il faut éviter que cette situation engendre le blocage du système entier pour ne pas atteindre le couple max du motoréducteur.

Pour cela au niveau du mât supérieur du rotor principal nous installons une vis de pression qui relie le support des pales avec le mas supérieur. Cette vis permet la transmission de puissance par friction en fonctionnement normal mais laisse le mât principal libre de tourner si le couple résistant est trop élevé.

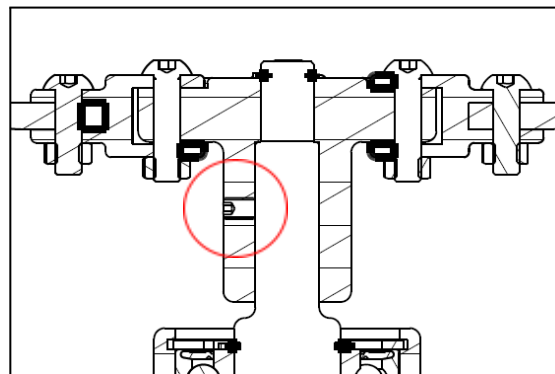


Figure n°28 : Sécurité

Nous avons également prévu d'intégrer dans le code de la carte de contrôle une procédure d'arrêt du mécanisme si une tension trop élevée est détectée.

7.5 Robustesse

7.5.1 Tôle

Le groupe précédent avait choisi d'utiliser une tôle comme base de la maquette. Cette solution pose un gros problème de rigidité. En effet, pour que la maquette fonctionne bien, il faut que toutes les pièces soient bien réglées, mais si le socle se déforme, alors tous les réglages bougent. La rigidité de la base doit donc être très grande.

Pour augmenter la rigidité, nous avons d'abord pensé à plier les bords de la tôle et à souder des renforts transversaux. Cette solution n'a pas été retenue car le soudage aurait pu déformer la tôle ce qu'il fallait absolument éviter.

Nous avons alors décidé de visser des cornières sur la tôle. Cette méthode nous a permis de simplifier la fabrication et d'éviter de chauffer la tôle.

7.5.2 Pieds

Nous avons élargi la base des pieds qui portent les roulements pour les rendre plus stables et nous avons ajouté des raidisseurs pour éviter qu'ils ne fléchissent.

Nous avons essayé d'éviter les pieds mais cela a posé problème lors de l'impression.

En effet, sur le premier pied imprimé (cf. annexe n°5), comme la partie évidée n'était pas exposée aux rayons UV après l'impression en SLA, la résine qui était à l'intérieur n'a pas pu durcir et a coulé sur le plan d'appui du pied, puis durci sur celui-ci.

Nous avons essayé de poncer ce plan sur une toile émeri en prenant appui sur un marbre mais nous n'avons pas réussi à retrouver une surface avec une bonne planéité et surtout à garantir que le défaut d'orientation de la portée de roulement avec le plan soit satisfaisant.

7.6 CAO pour le montage

7.6.1 Notice

Nous avons réalisé une notice de montage pour CT, car l'entreprise aura, un jour ou l'autre, besoin de démonter la maquette, notamment pour des opérations de maintenance. De notre côté, cette notice nous a également permis de vérifier que le montage était correct, de ne rien oublier concernant les pièces à acheter ou à produire, et surtout de pouvoir assembler la maquette facilement en suivant les différentes étapes.

7.6.2 Ajustement et tolérances critiques

Afin d'assurer la montabilité de notre système, mais aussi de garantir les solutions de montages fonctionnels, il est indispensable de mettre en place des ajustements entre les composants mécaniques critiques. Par "critiques", nous entendons les roulements à billes, et les éléments qui viendront s'assembler sur les axes tels que les engrenages, les cales et entretoises, les circlips ou encore le logement de roue libre.

Pour les roulements :

Diamètres livrés par le fabricant (mm)			
Roulements		Roue libre	
$d_{BI} = 15_{-0,007}^{-0}$	$d_{BI} = 15_{-0,007}^{-0}$	$d_{BI} = 15_{-0,008}^{-0}$	$d_{BI} = 15_{-0,008}^{-0}$
$D_{BE} = 28_{-0,008}^{-0}$	$D_{BE} = 32_{-0,009}^{-0}$	$D_{BE} = 42_{-0,009}^{-0}$	$D_{BE} = 35_{-0,008}^{-0}$

Figure n°29 : Tableau des diamètres livrés fabricant

Comme évoqué précédemment, nous avons décidé de monter leurs bagues intérieures serrées sur l'arbre, une valeur standard est l'ajustement en m6, qui permet un assemblage au maillet. Pour leurs bagues extérieures, montées glissantes, nous avons décidé de tolérer leurs logements en H7, il s'agit également d'un ajustement représenté en abondance dans les standards de la mécanique.

Concernant la roue libre, c'est cette dernière qui transmettra la totalité du couple moteur vers son arbre, par l'intermédiaire de son logement. Ainsi, il est crucial de monter sa bague extérieure suffisamment serrée. Nous avons donc choisi une interférence entre 13 et 37 μm .

Cela nous donne alors ces côtes d'usinage :

Diamètres tolérancés pour l'usinage (mm)			
Roulements			Roue libre
$d_{\text{moyeu}} = 15^{+0,018}_{+0,007}$	$d_{\text{moyeu}} = 15^{+0,018}_{+0,007}$	$d_{\text{moyeu}} = 20^{+0,021}_{+0,007}$	
$d_{\text{moyeu}} = 15,012^*$	$d_{\text{moyeu}} = 15,012^*$	$d_{\text{moyeu}} = 20,015^*$	
$D_{\text{logement}} = 28^{+0,021}_{+0}$	$D_{\text{logement}} = 32^{+0,025}_{+0}$	$D_{\text{logement}} = 42^{+0,025}_{+0}$	$D_{\text{logement}} = 35^{-0,021}_{-0,037}$
$D_{\text{logement}} = 28,010^*$	$D_{\text{logement}} = 32,012^*$	$D_{\text{logement}} = 42,012^*$	$D_{\text{logement}} = 34,971^*$

*Diamètre nominal

Figure n°30 : Tableau des diamètres tolérancés pour l'usinage

Concernant les éléments à monter sur les arbres, nous avons besoin d'un jeu pour guidage glissant, nous avons donc décidé de réaliser toutes les parties concernées de nos axes en f6.

7.6.3 Réglages

Nous avons choisi de permettre des réglages sur la plupart des pièces de la maquette. Cette solution rallonge le temps de montage car il faut prendre le temps de régler chaque pièce les unes par rapport aux autres, mais elle permet d'accepter de plus gros intervalles de tolérance sur les pièces usinées et imprimées.

Ces réglages se font grâce à des perçages qui ont diamètre plus grand que les vis (jusqu'à 3mm de plus au diamètre) et à des cales pelables.

Le réglage des engrenages coniques est très important. Pour qu'il reste en place, il a fallu concevoir des chapeaux qui plaquent les roulements contre leurs arrêts pour supprimer le jeu axial des arbres et donc des engrenages coniques.

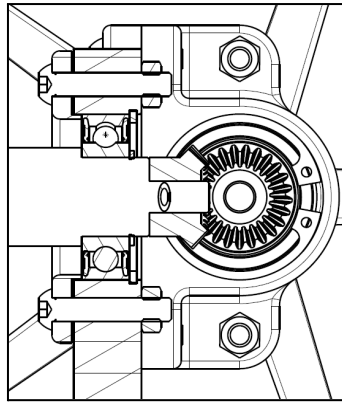


Figure n°31 : Réglages

7.7 Bloc Porte satellite

Le porte satellite était très massif, nous l'avons donc vidé pour réduire sa masse et la quantité de résine utilisée.

Afin de le lier à son axe, nous avons décidé d'utiliser une goupille de diamètre 3 mm. Cependant, pour éviter que cette liaison se fasse par une friction entre métal et plastique, nous avons choisi de faire passer cette goupille à l'intérieur de deux inserts en laiton.

7.8 Devis et dépenses

ORGANISATION	DESCRIPTION	PRIX	SITUATION
GO TRONIC	Motoréducteur + encodeur Alimentation	103.20 euros	Non commandé
123 roulements	Roulements	105.17 euros	Reçu
123 roulements	Roue libre	25.56 euros	Reçu
Nozag	Engrenages	408.84 euros	Non commandé
Norelem	Quincaillerie	223.56 euros	Non commandé
IUT	BRUT	(100 euros)	Disponible à l'IUT
IUT	Résine	(200 euros)	Disponible à l'IUT
Prix total		1166.33 euros	

Figure n°32 : Tableau des devis et dépenses

() = estimation

8. Fabrication

8.1 Usinage

Pour la fabrication, nous devons usiner nos arbres en acier. Le problème qui se pose n'est pas le temps mais la disponibilité des enseignants surveillants pour l'usinage, ce qui nous limite car il faut trouver, entre les cours, des horaires où nous sommes libres pour usiner.

Éléments	Quantité	Matière	Procédé	Remarque
Logement roue libre	x1	Acier	Tournage CN	
Pieds support train épicycloïdal	x3	Alu	Tournage conventionnel	
Satellites	x2	Acier	Tournage CN	Sur CN car 2 pièces à usiner, cela permet un gain de temps car nous n'avons qu'un code pour deux pièces
Arbre rotor inf	x1	Acier	Tournage CN	
Arbre rotor sup	x1	Acier	Tournage CN	
Arbre moteur	x1	Acier	Tournage CN	
Arbre support moteur	x1	Acier	Tournage CN	Non fabriqué car il n'y a plus d'intérêt si nous n'avons pas de moteur.
Arbres principaux	x2	Acier	Tournage CN	Problème de contre pointe non réglée. Nous avons donc obtenu des pièces coniques
Arbre rotor de queue	x1	Acier	Tournage CN	

Figure n°33 : Tableau des pièces usinées

--- Non Fabriqué car éléments de la partie non produite de la maquette

Nous avons initialement prévu de commander tous nos engrenages en acier chez le fournisseur NOZAG. Cependant, à cause d'un retard du passage de commande (début février) par CT Ingénierie couplé à un délai de livraison important (8 semaines), nous n'avons pas pu nous en tenir au plan initial. Ainsi, nous avons possiblement émis l'idée de réaliser les engrenages par le procédé d'électro-érosion, ce qui nous aurait permis d'utiliser ces composants en acier. Néanmoins, ce procédé nous aurait demandé trop de temps de mise en œuvre, en plus du fait qu'il s'agit d'un procédé que nous n'avons jamais pratiqué en TP. Nous nous sommes alors rabattus sur l'impression FDM (Fused Deposition Modeling) en PLA, nous permettant alors de bénéficier d'un temps de production très léger, en faisant l'impasse sur la résistance de l'acier, même si cette dernière est suffisante en sachant que le mécanisme n'est pas censé se bloquer.

La totalité des pièces qui ont été usinées dans le cadre du projet sont les axes de la transmission ainsi que les piliers du support de couronne, il s'agit donc de pièces de révolution que nous avons réalisées en tournage. La forme des piliers en aluminium étant assez simple et ne nécessitant pas des tolérances précises, nous avons usiné ces derniers en tournage conventionnel sur tour RAMO. Cela nous a permis de gagner du temps car la mise en œuvre est plus rapide, libérant alors les tours CN (commande numérique) pour les axes de la transmission. En effet, cette solution permet une meilleure précision lorsque plusieurs pièces sont usinées, en soit, une meilleure répétabilité. La méthode de programmation que nous avons utilisé est le conversationnel, nous programmions donc directement sur la machine les différentes opérations depuis nos documents de fabrication.

Cependant, nous avons eu plusieurs problèmes lors de l'usinage de certaines pièces, certaines d'entre elles, notamment les arbres arrières, ont été usinées en montage en l'air avec la contre pointe à cause de leur longueur élevée. Seulement, les contre pointes des tours de l'atelier ont été endommagées à plusieurs reprises lors de TP d'étudiants, ce qui a créé un décalage entre le mandrin et sa contre pointe. La conséquence de cette défaillance est un défaut de conicité important sur la totalité de la pièce, qui contenait un logement de deux roulements aux extrémités de la pièce.

Défaut de conicité = $\frac{D_{max} - D_{min}}{L_{portée}} = 0.3 \mu\text{m}/\text{mm}$; résultant d'un écart d'environ 0,03 mm de diamètre entre les deux emplacements.

Aussi, d'autres axes plus courts ont présenté un défaut de conicité même sans utilisation de contre pointe, cela pourrait être dû à un défaut au niveau de la glissière de la tourelle d'outils. Pour ces pièces, puisque nous n'avons qu'un emplacement de roulement qui était conforme, nous avons fait en sorte que l'autre soit trop grand pour pouvoir ensuite poncer jusqu'à ce que l'assemblage soit possible.

8.2 Logistique de fabrication



Figure n°34 : Logistique de fabrication

Des dessins d'ensemble et nomenclatures des phases pour aider à la création du programme machine (cf. annexe n°3 et 4)

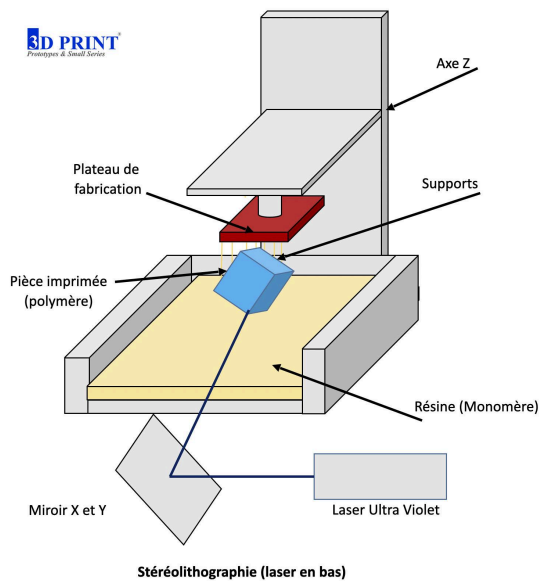
8.3 Bâti

8.3.1 Impression SLS

Nous voulions imprimer nos pièces du bâti en SLS car l'impression SLS permet d'avoir des pièces de meilleure qualité que les imprimantes en FDM, mais la machine a eu des problèmes et n'était donc plus disponible. Il a donc fallu trouver une autre solution et nous nous sommes tournés vers l'impression SLA.

Propriétés mécaniques	SLA (résine photopolymère)	SLS (Nylon PA12)
Résistance à la traction	38 - 65 MPa	42 - 50 MPa
Module de traction (Young)	1.6 - 2.8 GPa	1.6 - 1.85 GPa
Allongement à la rupture	6 - 12 %	15 - 20 %
Module de flexion	≈ 2.2 - 2.8 GPa	≈ 1.5 - 1.7 GPa
Résistance à la flexion	≈ 65 - 103 MPa	≈ 41 - 66 MPa
Résistance aux chocs (Izod)	~25 - 40 J/m	~32 J/m

Figure n°35 : SLA VS SLS

Principe de fonctionnement :**Figure n°36 : Fonctionnement SLA****PROTOCOLE :**

- Paramétrer la pièce sur le logiciel PreForm.
- Lancer l'impression sur l'imprimante SLA.
- Sortir le plateau.
- Mettre des gants.
- Décoller la pièce à l'aide d'une lime.
- Nettoyer le plateau.
- Mettre de l'alcool sur les endroits où il y a les supports.
- Mettre la pièce dans le washer pendant 10 minutes.
- Sortir la pièce.
- La mettre dans la machine UV pendant 1 heure.
- Sortir la pièce.
- Décoller les supports.
- Contrôle de la pièce.

8.3.2 Métrologie

Nos pièces imprimées en SLA avaient des portées de roulement qui devaient avoir un ajustement serré. Pour savoir quelle côte nominale mettre dans notre fichier stl pour avoir le bon ajustement sur la pièce imprimée, nous avons imprimé une pièce de test pour faire un contrôle métrologique.

Dans un premier temps, nous avons évalué le défaut de forme (cf. annexe n°5).

Nous avons ensuite analysé le défaut de forme au niveau du cylindre à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

La gamme de mesure utilisée sur la MMT est présentée ci-dessous.

Département Génie Mécanique & Productique Institut Universitaire de Technologie Aix-Marseille Université	Nom de pièce :	Ref. pièce :
	Réf. Gamme de mesure :	Opérateur :
	Réf. Plan de contrôle :	Date : Page /

<p>Définition du système de palpage</p>	<p>Posage et Représentation des éléments</p>
---	--

Type + n°	P: palpé C: construit T: théorique	Nbr de points	Repère de travail	n° Stylet	Remarques Définition des constructions	Definition SCPI
PL1	P	18	SCP	1	Palper P1	
CE2	P	18	SCP	1	Projeté dans P1	

Figure n°37 : Gamme de mesure

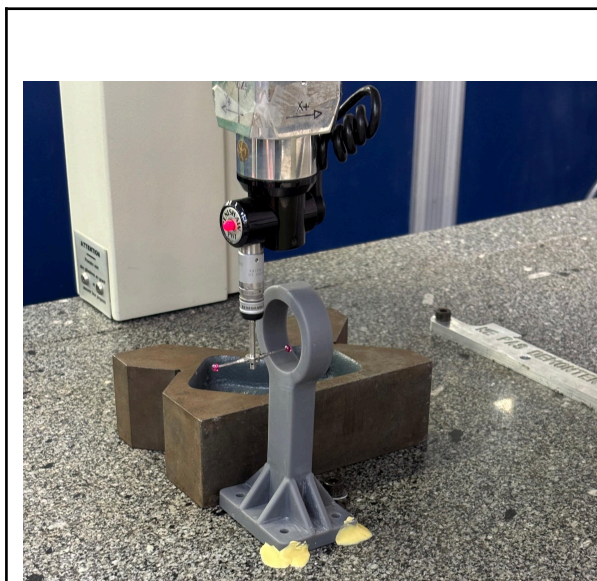


Figure n°38 : Montage métrologique

Lors du montage, la pièce a été immobilisée suivant les axes X et Y, puis maintenue à l'aide d'une vis et de pâte à fixer.

8.3.3 Résultats

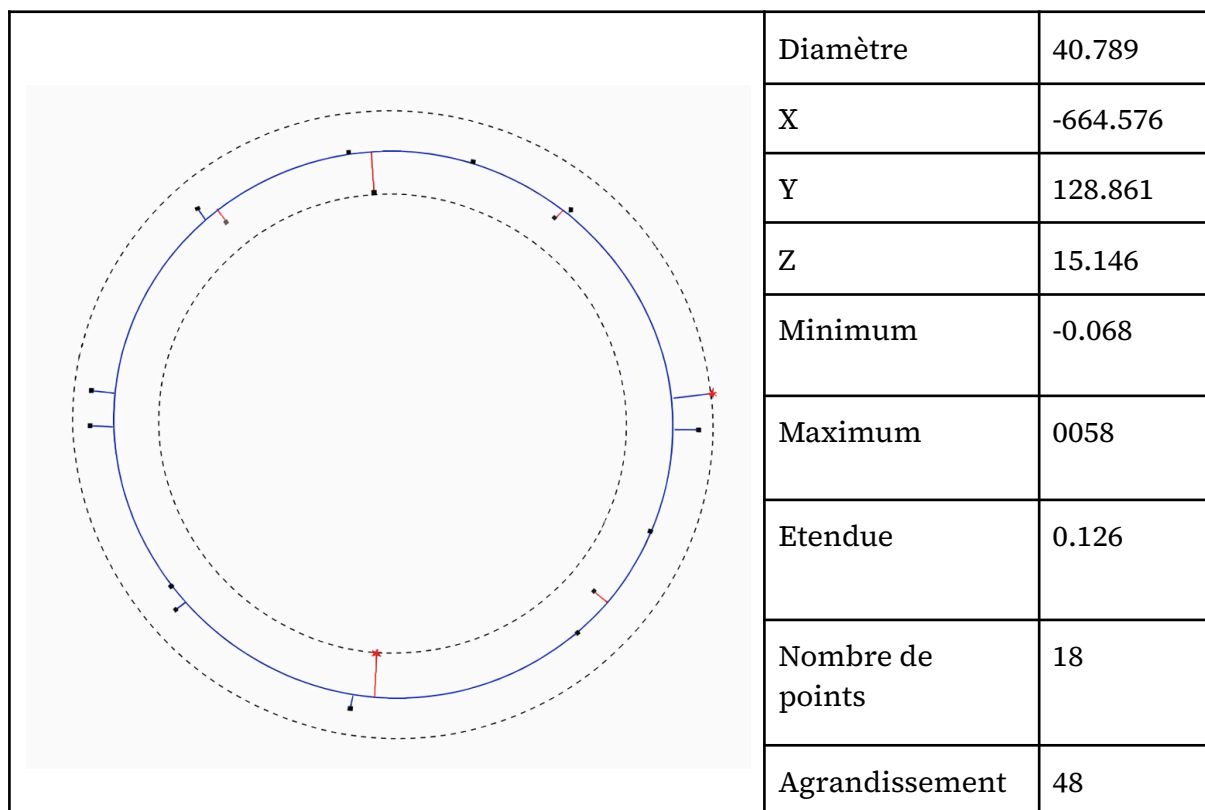


Figure n°39 : Résultats métrologiques

Nous avons remarqué que le cercle palpé sur la portée de roulement était ovale. Pour les portées de roulement accueillant des roulements avec une bague extérieure $\varnothing 42\text{mm}$, nous visions une distance minimale entre bi-points diamétralement opposés de 41,9 mm pour avoir un ajustement serré mais qui puisse être rentré à la main.

Sur la pièce de test, la distance minimale entre bi-points diamétralement opposés était de $40,789 - 0,068 = 40,721\text{mm}$ alors que nous avons mis un $\varnothing 41\text{mm}$ dans le fichier ".stl". Nous avons alors déterminé qu'il nous fallait ajouter 0,289mm sur la CAO pour obtenir la côte souhaitée.

Cette méthode a des limites car les défauts de forme et de dimension des pièces imprimées en SLA dépendent notamment de l'orientation des surfaces spécifiées lors de l'impression.

Nous avons tout de même imprimé toutes nos pièces avec la même correction de diamètre et avons obtenu des ajustements satisfaisants.

9. Assemblage

Comme nous n'avions pas pu recevoir toutes les pièces que nous avons commandé et qu'il nous manquait certaines pièces à usiner, nous n'avons pas pu monter la maquette complète. Nous nous sommes alors concentré sur la partie du rotor principal en utilisant provisoirement de la quincaillerie que nous avons trouvé à l'IUT ou chez nous.

Une fois toutes les pièces de la partie rotor principal réalisées, nous avons pu monter la maquette en suivant les instructions de la notice que nous avons faite.

Comme nous n'avons pas reçu le moteur, il faut tourner l'arbre d'entrée à la main pour faire fonctionner la maquette.

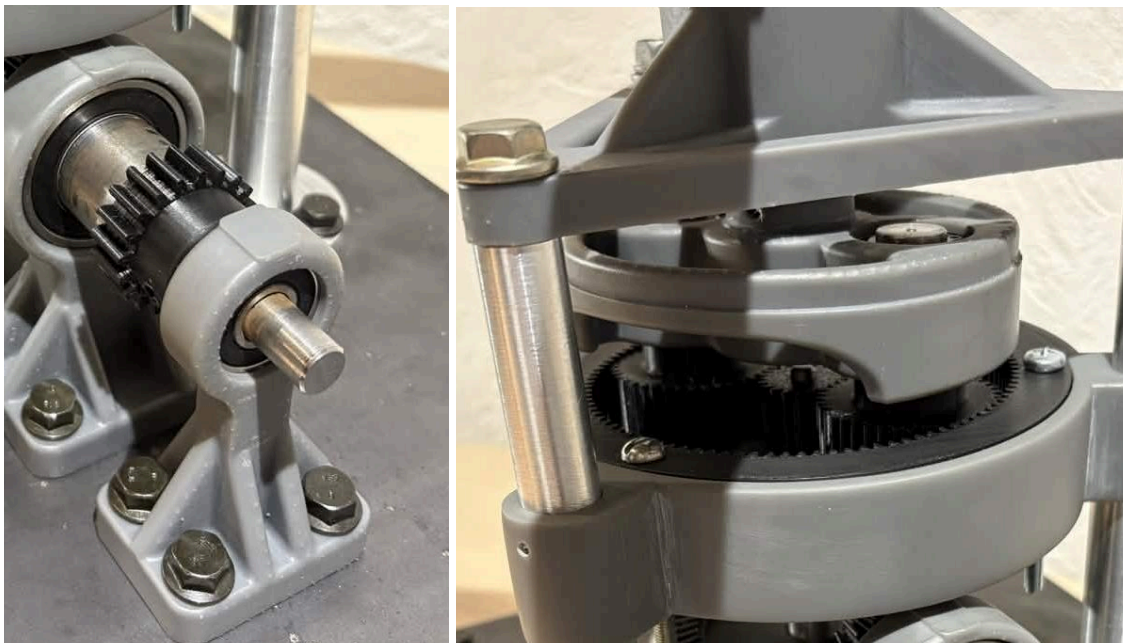


Figure n°40 : Assemblage

10. Test de conformité au CDC

FONCTION	CRITÈRE DE PERFORMANCE	NIVEAU CIBLE	TOLÉRANCE	VÉRIFICATION / ESSAI	VALIDATION
FP1 : Assurer des rapports de réduction conforme	Rapport de réduction conforme	21 pour le rotor principal, 3 pour le rotor de queue	+/- 0.30	Mesure rapport engrenages	OUI 21 pour le rotor principal 2,75 pour le rotor de queue
FC1 : Être peu encombrant	Longueur mesurée	<1 mètres	stricte	Mesure au mètre ruban	OUI - 0.805 mètres
FC2 : Être léger	Masse mesurée	<15 kg	+/- 1 kg	Pesée sur balance	OUI - 11kg
FC3 : Être motorisée	Vitesse de rotation contrôlée	Entre 60 et 100 tr/min	stricte	Test (chronométrage ?)	NON
FC4 : Assurer la sécurité de l'utilisateur	Protéger l'utilisateur	Sécurité assurée	stricte	Essai manuel de blocage rotor	OUI
FC5 : Offrir une visibilité claire des mécanismes internes	Transparence / visibilité	Visibilité claire des mécanismes	stricte	Observation visuelle	OUI
FC6 : Respecter les contraintes de dimensionnement	Dimensionnement conforme	Respect des côtes prévues	stricte	Montage	OUI - Montage correct donc bonnes cotes

Figure n°41 : Conformité CDC

11. Conclusion

11.1 Compétences développées et approfondies :

Conception et analyse technique

- Comprendre le fonctionnement d'un système mécanique (hélicoptère).
- Analyser les différentes pièces et leurs fonctions dans l'assemblage.
- Réfléchir aux solutions techniques pour réaliser la maquette.

Métrologie et contrôle

- Utiliser une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) pour effectuer des mesures.
- Évaluer les défauts de forme et vérifier les dimensions des pièces.
- Interpréter les résultats de mesure.

Fabrication et montage

- Réaliser et assembler les différentes pièces de la maquette.
- Mettre en place un montage correct pour maintenir les pièces.
- Utiliser différents outils et techniques de fabrication.

11.2 Limites du projet

Nous avons été limités pour les éléments standards à cause d'imprévus dans l'entreprise qui n'a pas pu les commander rapidement, ce qui nous a demandé de consacrer du temps supplémentaire pour réfléchir à des alternatives, concevoir une manivelle en remplacement du moteur et imprimer les engrenages.

Pour l'usinage de nos pièces, nous avons également perdu du temps car nous devons à chaque fois trouver un professeur disponible pour nous encadrer

11.4 Retour d'expérience

- Mise en pratique concrète des notions vues en cours
- Développement de l'autonomie dans l'approche de conception.
- Apprentissage du travail en groupe avec un vrai planning et des deadlines.
- Projet très formateur, motivant, et valorisant dans une démarche quasi-industrielle.

11. Annexes

Annexe n°1

June 29 , 1926.

1,590,497

J. DE LA CIERVA

AEROPLANE WITH ROTATING WINGS

Filed March 31, 1923

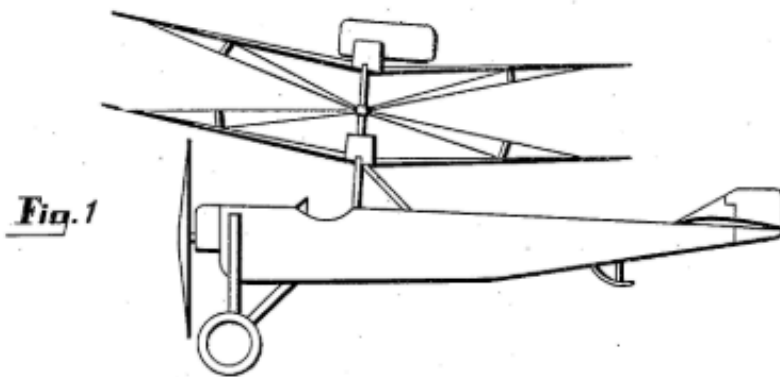


Fig. 1

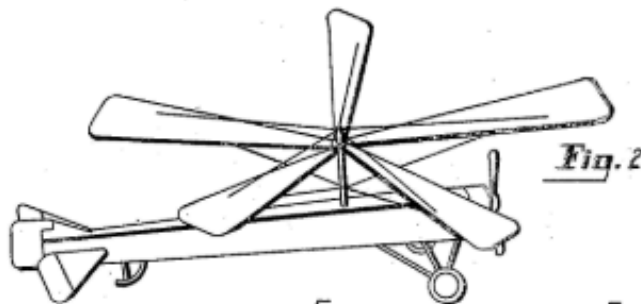


Fig. 2

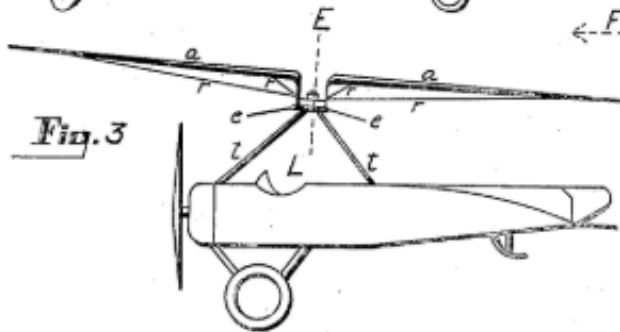


Fig. 3

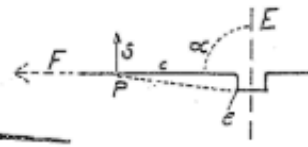


Fig. 4

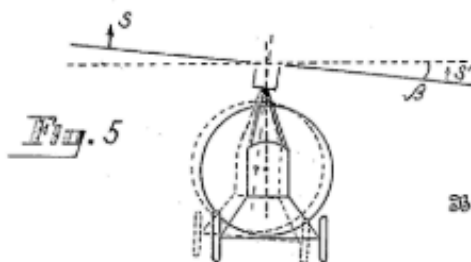


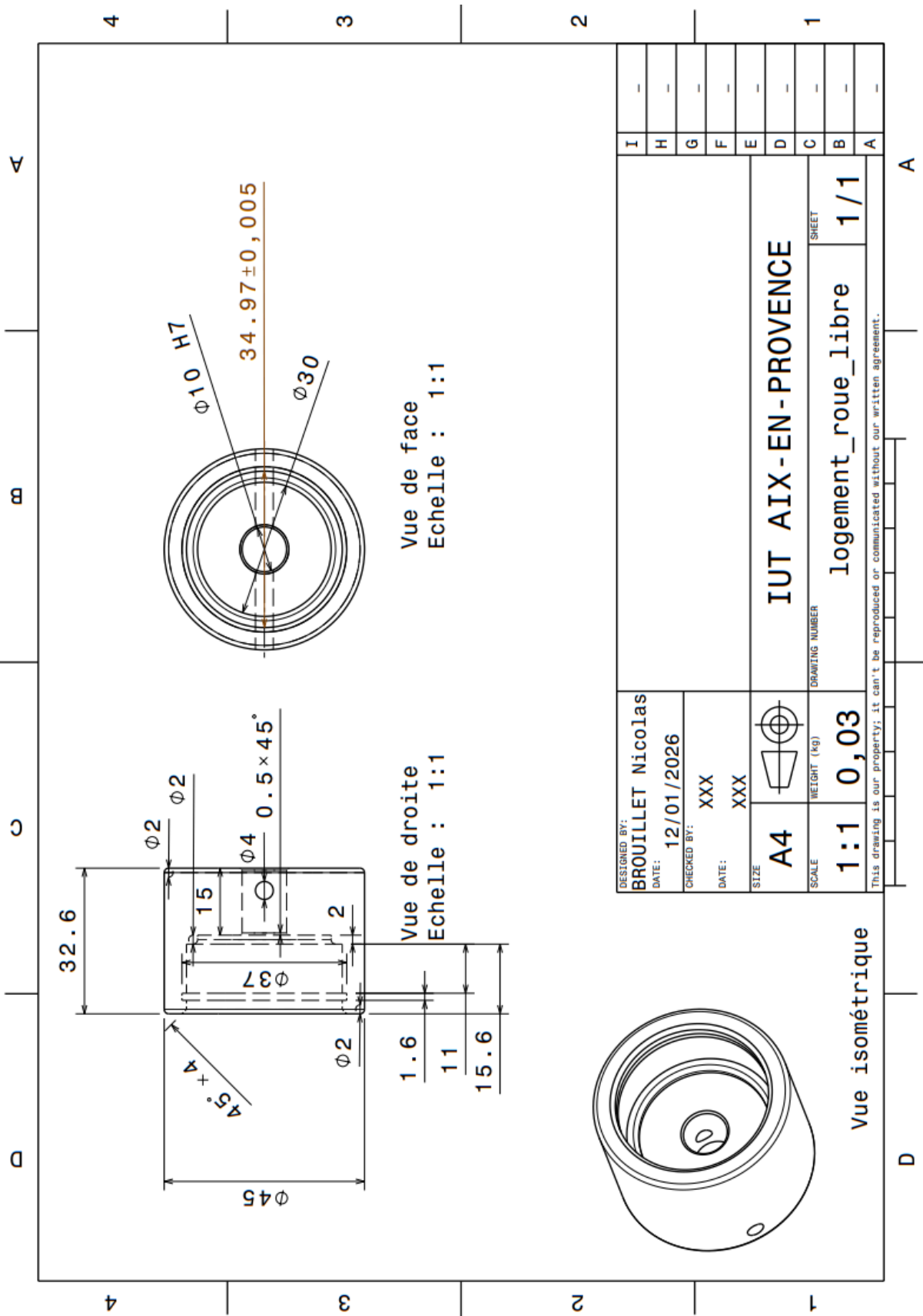
Fig. 5

Inventor
 Juan de la Cierva
 by *Emil Bönnekyche*
 Attorney

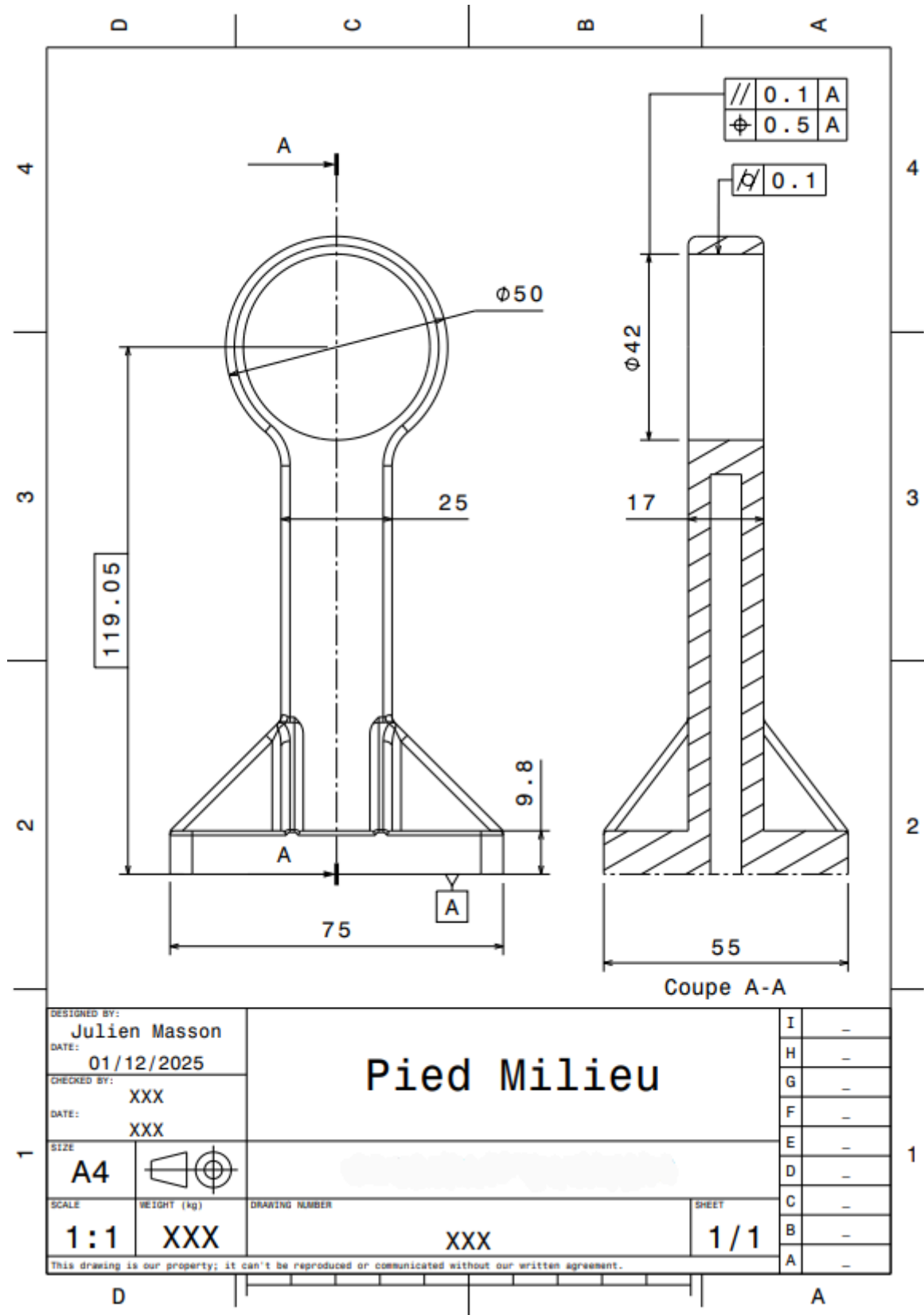
Annexe n°3

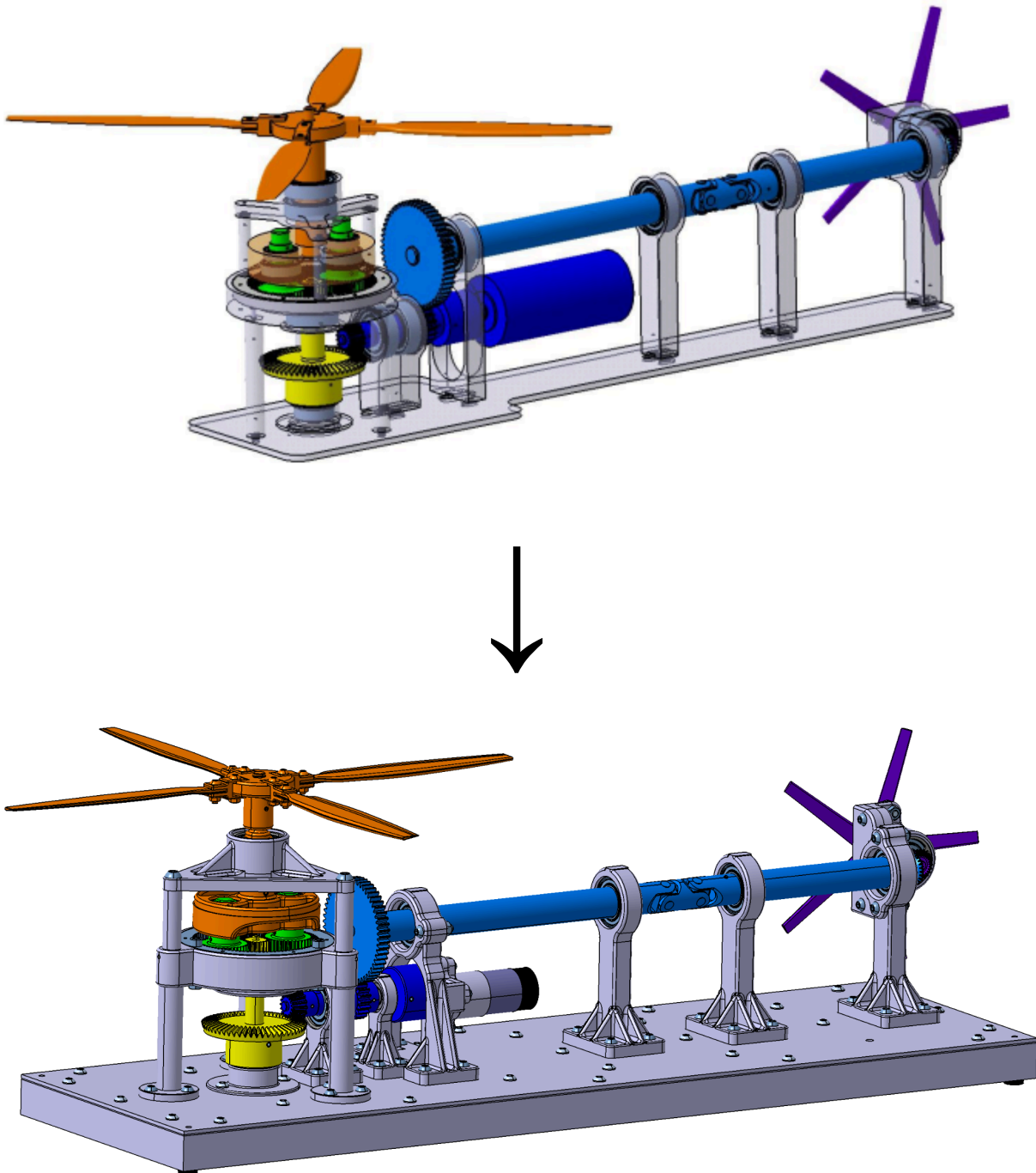
amU Aix Marseille Université		NOMENCLATURE DES PHASES		Equipe Maquette transmission
Etabli par: GUASTAPAGLIA		ELEMENT: roue libre		N°:
Le: 13/01/26		S/Ensemble:		Matière: ACIER
Programme:		Ensemble: MAQUETTE TRANSMISSION		Brut: Ø20 x 52,5
N° de phas	Désignation des opérations	Machine-outils	Observations	
00	OBTENTION DE BRUT Sciage	Scie KASTO		
10	TOURNAGE Dressage Contournage Ebauche Contournage Finition Pointage Perçage Alésage Alésage par contournage intérieur ébauche Alésage par contournage intérieur finition	SOMAB 250 PCLNL PCLNL SVJNL Forêt à pointer Forêt Ø9,8 Alésoir Ø10 H7 Outil à aléser Outil à aléser		
20	OBTENTION DE BRUT Sciage	Scie KASTO	Sur 38 mm de pièce usinée	
30	TOURNAGE Dressage Contournage Ebauche Contournage Finition	SOMAB 250 PCLNL PCLNL SVJNL		
40	TOURNAGE Chanfreinage	Tour RAMO PSSNR		

Annexe n°4



Annexe n°5



Annexe n°6

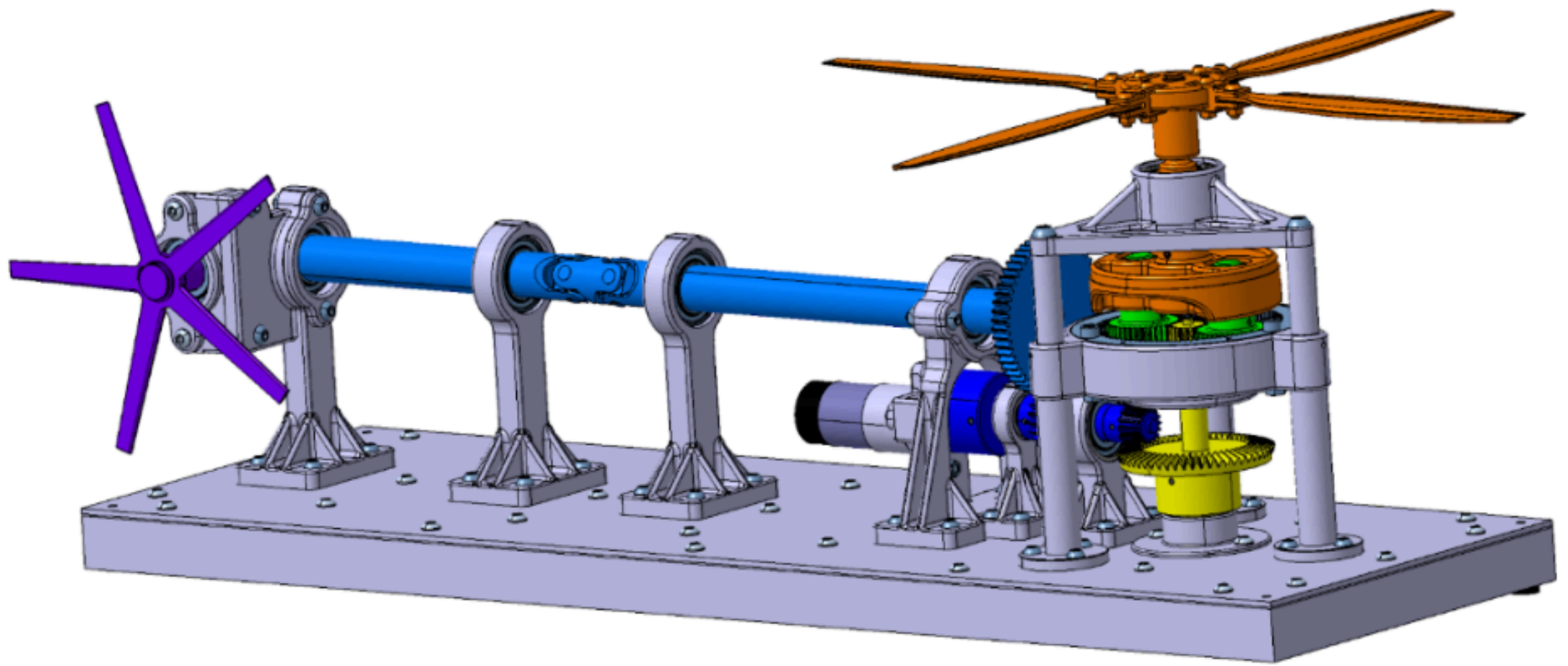
12. Bibliographie

[1] de la Cierva, J. (1926). Autogiro. United States Patent US1590497A.

[2] Sikorsky, I. (1935). Helicopter. United States Patent US1994488A.

[3] Young, A. M. (1948). Control mechanism for helicopters. United States Patent US2457206A.

NOTICE DE MONTAGE



Maquette boite de transmission

Carl GUASTAPAGLIA
Julien MASSON
Nicolas BROUILLET

Général

Produit destiné exclusivement à un usage professionnel.

Toute opération de montage, démontage ou maintenance doit être effectuée par du personnel qualifié.

Le non-respect des instructions peut entraîner :
détérioration du système,
perte de performance,
risques mécaniques (pincement, écrasement, projection).

Lire intégralement cette notice avant toute manipulation.

Tenir hors de portée des enfants.

Avant toute intervention

Lire intégralement la présente notice avant toute manipulation.

Vérifier que le système est hors tension et qu'aucune source d'énergie n'est connectée.

S'assurer de l'arrêt complet de toutes les pièces en rotation.

Travailler sur une surface stable, propre et dégagée.

Utiliser les outils adaptés.

Pendant le fonctionnement

Ne jamais introduire la main, les doigts ou tout objet à proximité des éléments en rotation.

Ne pas toucher les engrenages, arbres ou pièces mobiles lorsque la maquette est en fonctionnement.

Ne pas porter de vêtements amples, bijoux ou cheveux non attachés à proximité du système en rotation.

Maintenir une distance de sécurité pendant les démonstrations.

Ne pas laisser le système fonctionner sans surveillance.

Responsabilité

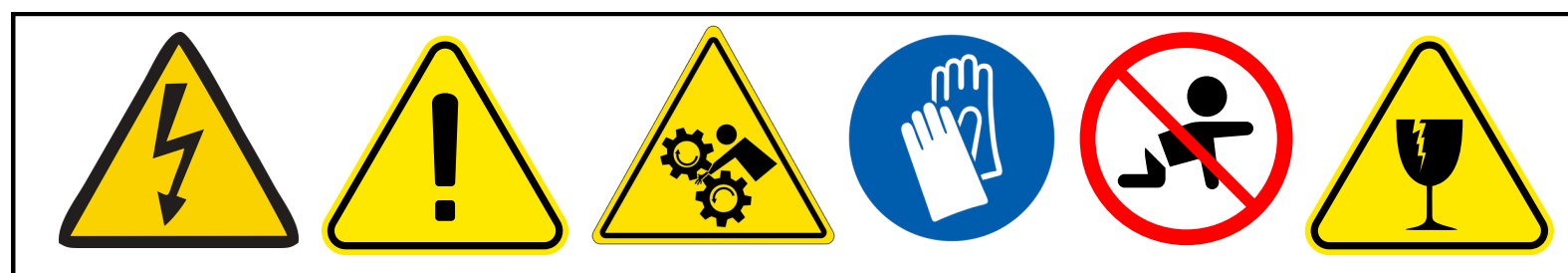
Le fabricant décline toute responsabilité en cas :

de montage non conforme aux instructions,

d'utilisation inappropriée,

de modification non autorisée,

de non-respect des consignes de sécurité.



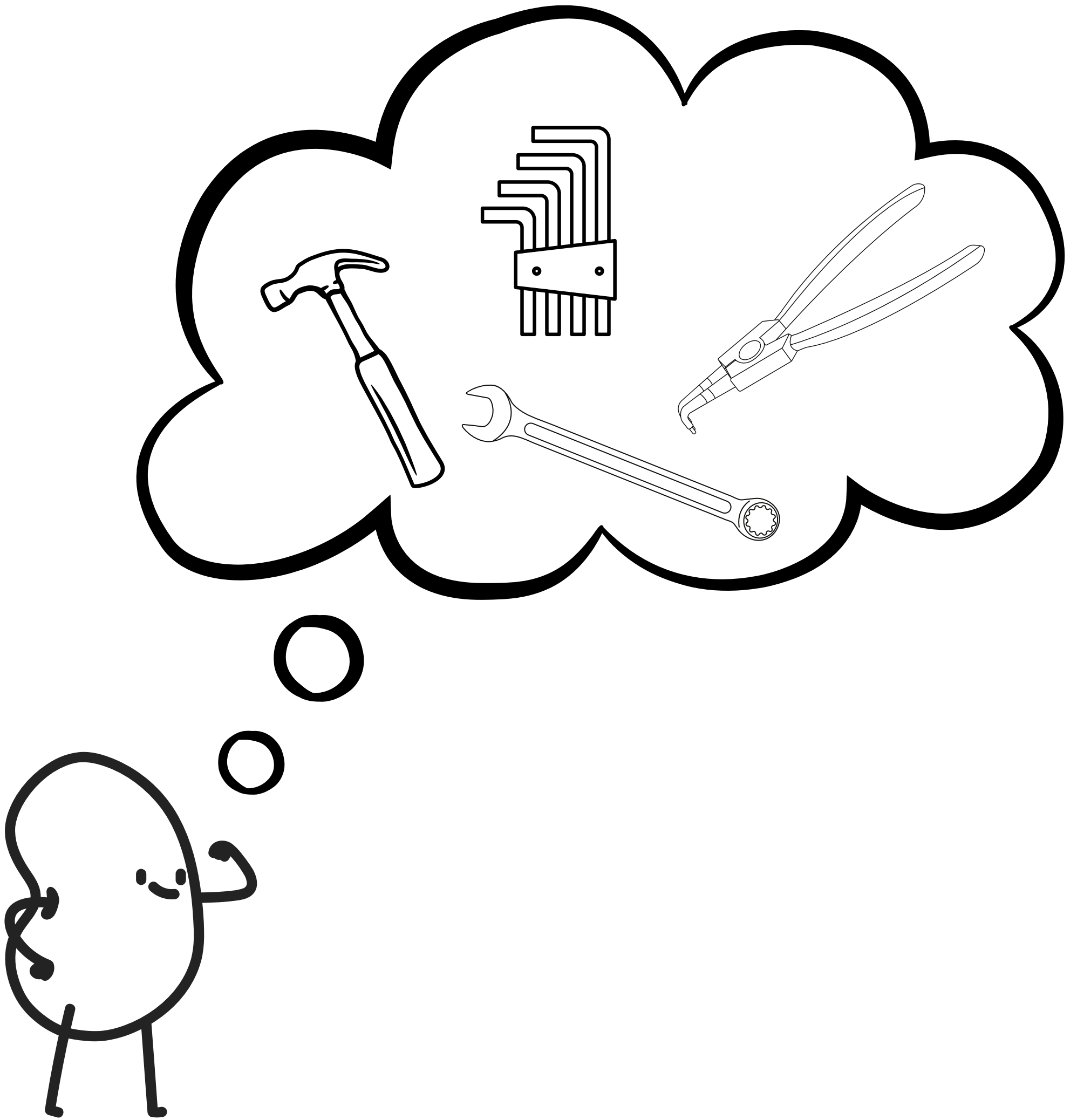


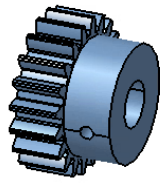
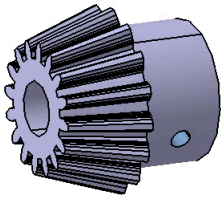
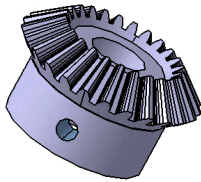
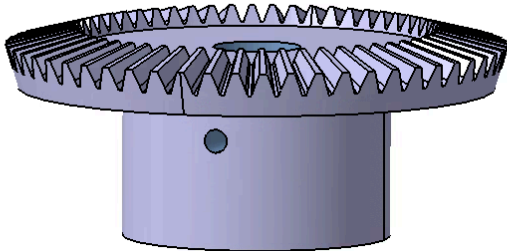
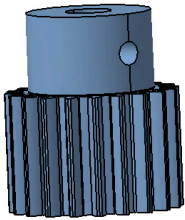
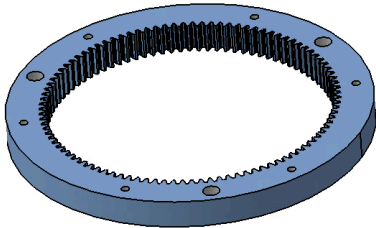
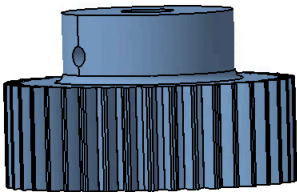
Image	Quantité	note	REF notice
	x 1	SG 1555 N	1
	x 1	SG 1520 N	2
	x 1	4150-3.5	3
	x 2	S 102525	4
	x 1	4150-3.5	5
	x 1	SG 1020 AN	6
	x 1	SG 10100 ZI	7
	x 2	SG 1040 AN	8

Image	Quantité	note	REF notice
	x 1	Fabriqué	9
	x 2	Fabriqué	10
	x 1	Fabriqué	11
	x 1	Fabriqué	12
	x 1	Fabriqué	13
	x 1	Fabriqué	14
	x 1	Fabriqué	15
	x 1	Fabriqué	16



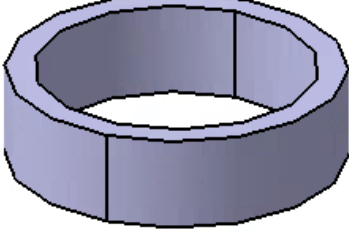
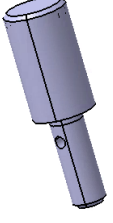
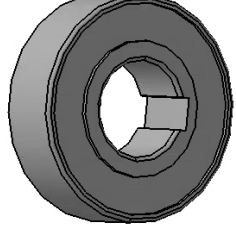
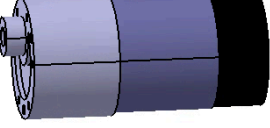
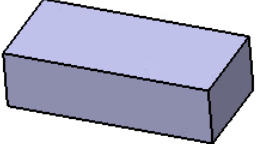
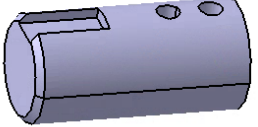
Image	Quantité	note	REF notice
	x 1	Fabriqué	17
	x 1	Fabriqué	18
	x 1	Fabriqué	19
	x 2	Fabriqué	20
	x 1	BB15	21
	x 1	4755	22
	x 1	Fabriqué	23
	x 1	Fabriqué	24

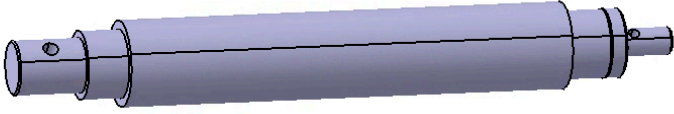
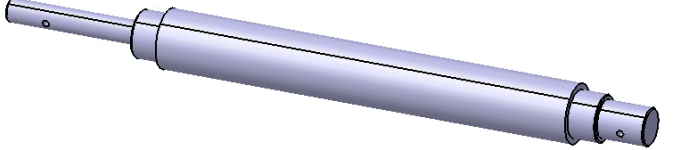
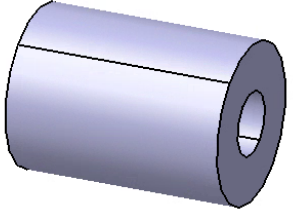
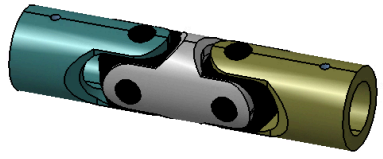
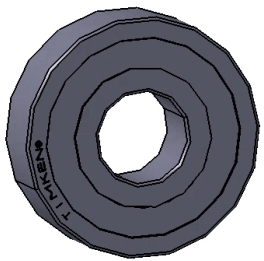
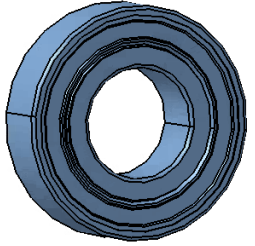
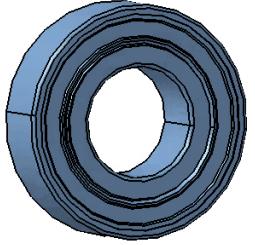
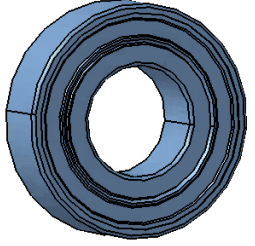
Image	Quantité	note	REF notice
	x 1	Fabriqué	25
	x 1	Fabriqué	26
	x 1	Fabriqué	27
	x 1	23410-16104	28
	x 1	6000-2RS	29
	x 11	6004-2RSH-SKF	30
	x 3	6002-2RSH-SKF	31
	x 2	61902-2RS-SKF	32









Image	Quantité	note	REF notice
	X 6	03315-1030X26	G26D3
	X 4	03315-1030X28	G28D3
	X 2	03315-1030X20	G20D3
	X 1	03315-1030X16	G16D3
	X 2	03315-1040X45	G45D4
	X 1	03315-1030X40	G40D3
	X 46	07210-106	EM6
	X 8	07210-105	EM5

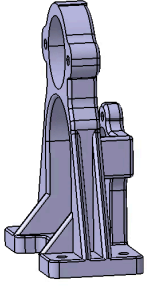
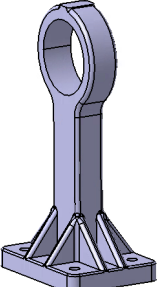
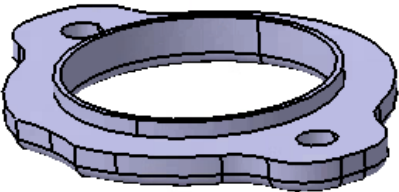
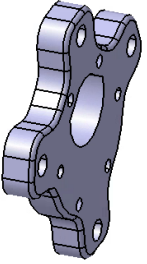
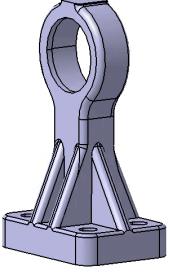
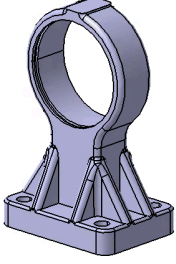

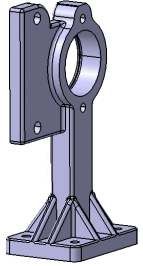
Image	Quantité	note	REF notice
	x 1	Fabriqué	48
	x 2	Fabriqué	49
	x 1	Fabriqué	50
	x 1	Fabriqué	51
	x 1	Fabriqué	52
	x 1	Fabriqué	53
	x 1	Fabriqué	54
	x 1	Fabriqué	55

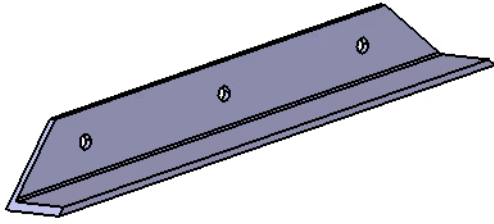
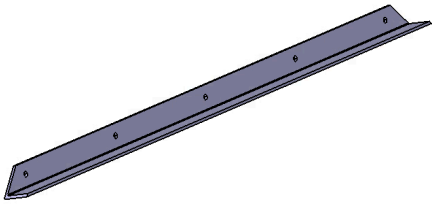
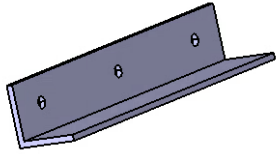
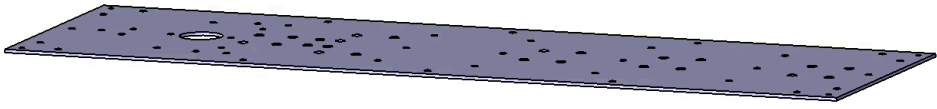
Image	Quantité	note	REF notice
	x2	Fabriqué	68
	x2	Fabriqué	69
	x5	Fabriqué	70
	x 1	Fabriqué	65

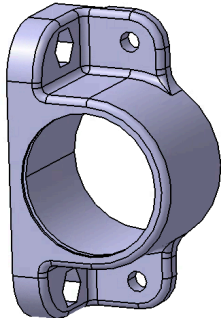
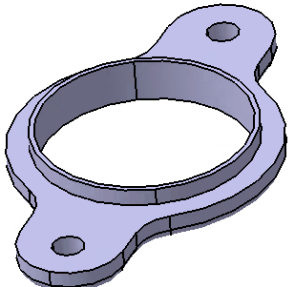
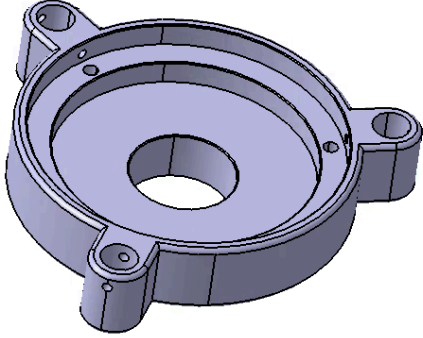

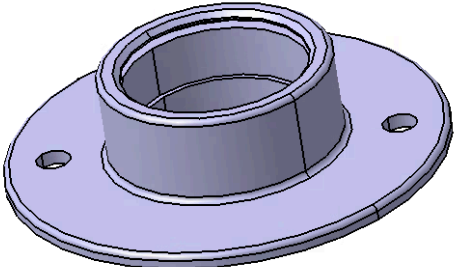
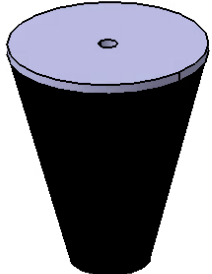
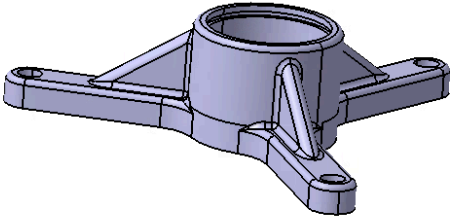
Image	Quantité	note	REF notice
	x 1	Fabriqué	56
	x 1	Fabriqué	57
	x 1	Fabriqué	58
	x 2	Fabriqué	59
	x 1	Fabriqué	60
	x 4		61
	x 1	Fabriqué	62

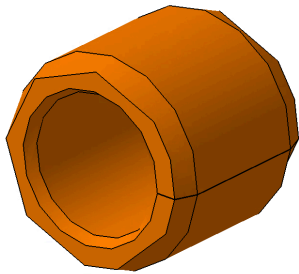
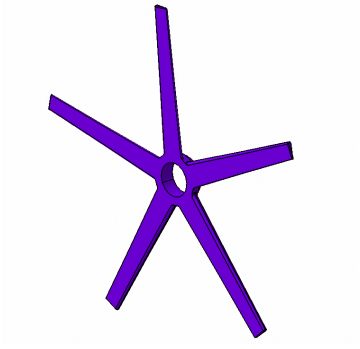
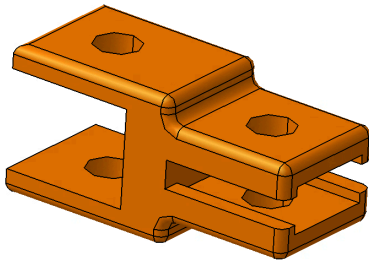
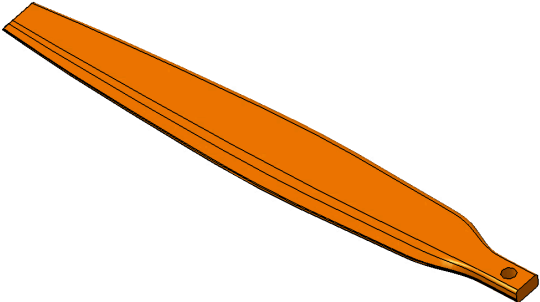

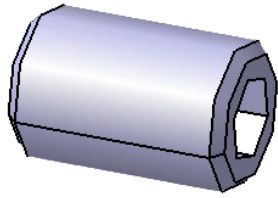

Image	Quantité	note	REF notice
	x 2	23730-00300404	63
	x 1	Fabriqué	64
	x 2	Fabriqué	66
	x 1	Fabriqué	67
	x 4		22XM5
	x 3	07119-041X65	6XM4
	x 6	07160-103X10	10XM3

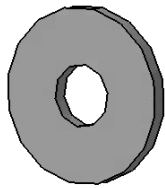
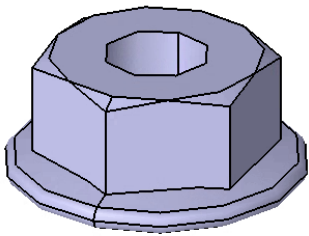














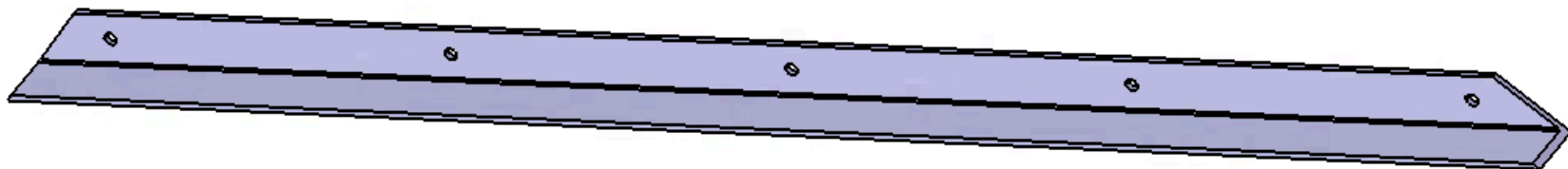
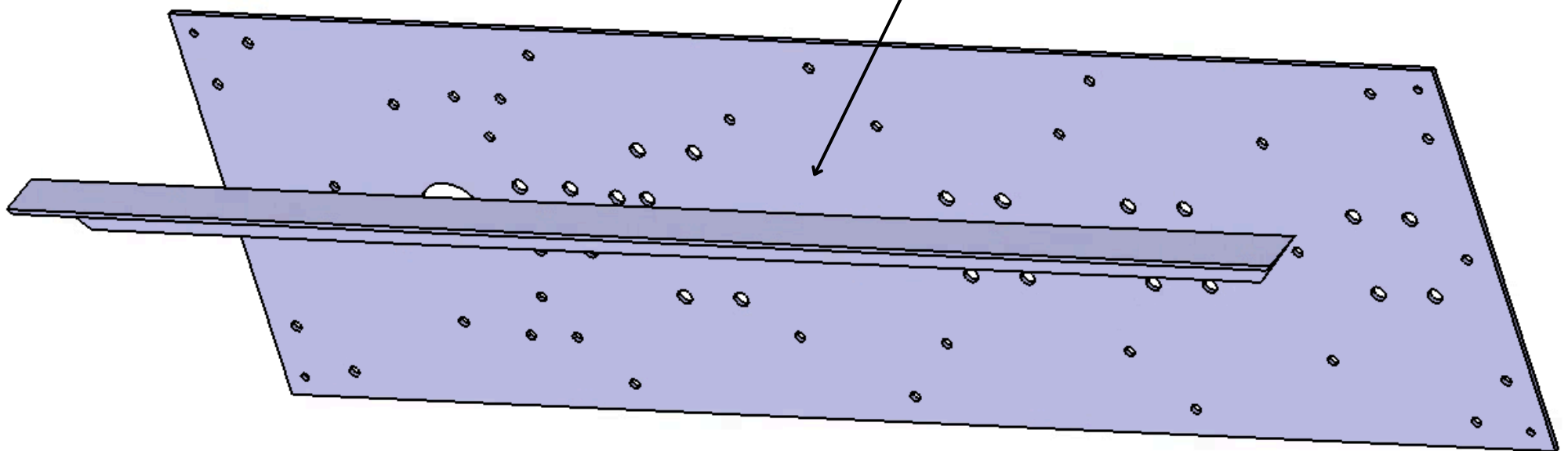
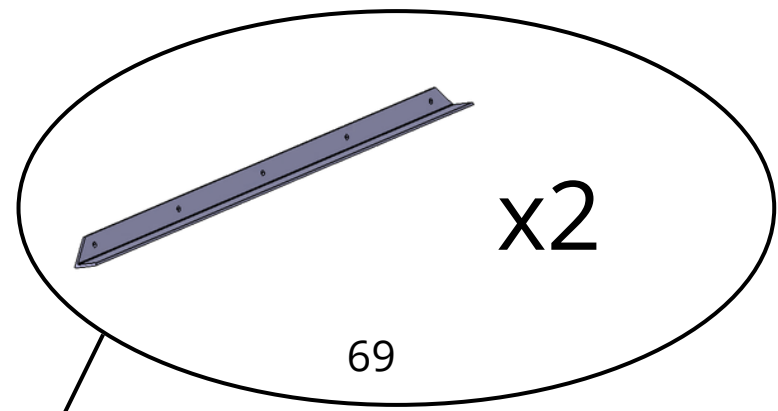
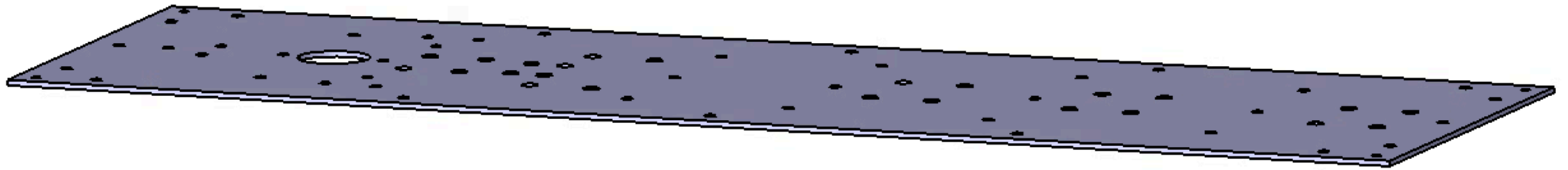
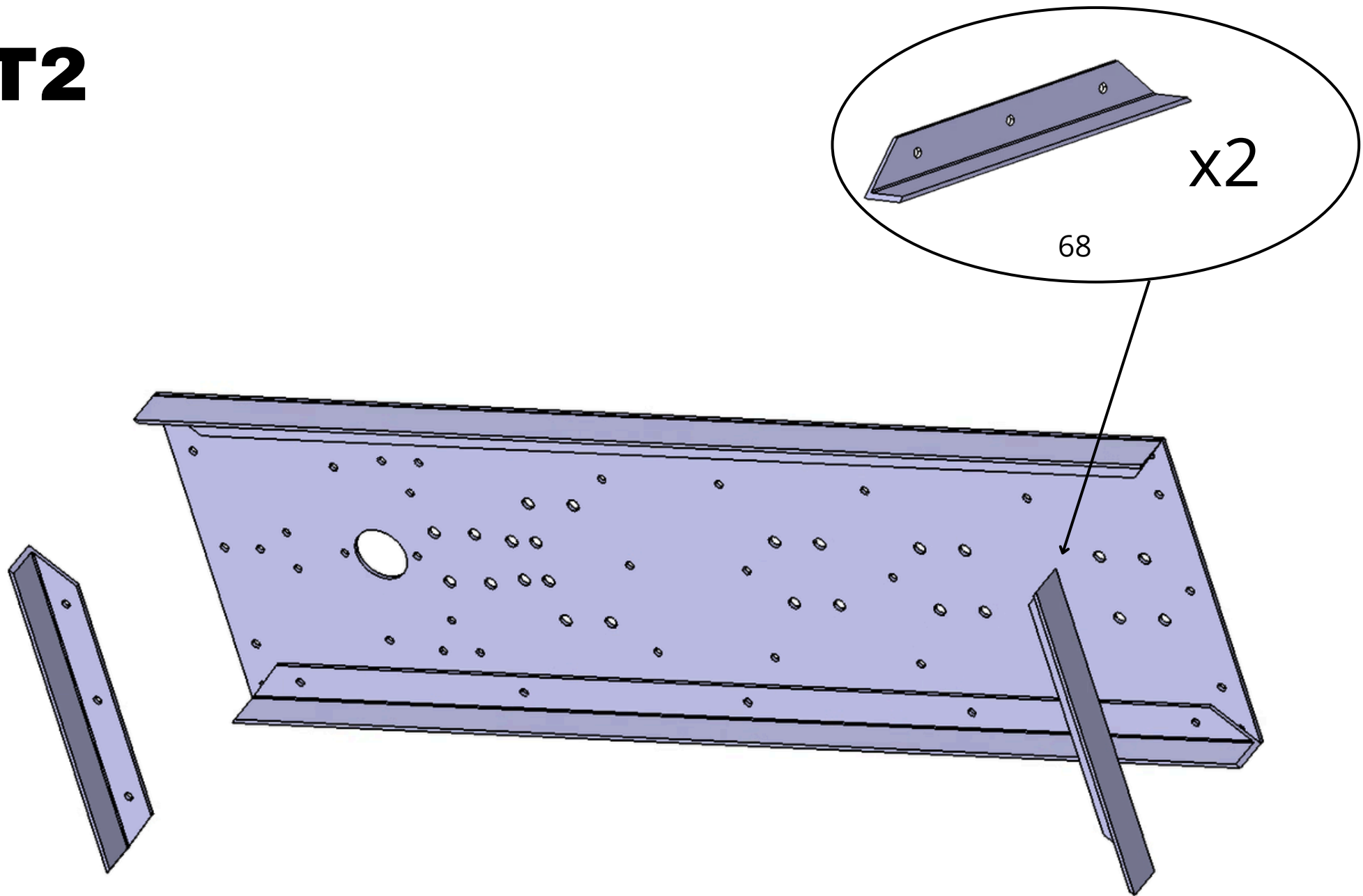
Image	Quantité	note	REF notice
	X 35	07305-106	RM6
	x30	07217-106	EM6D14
	x 5	CIRCLIP-INT-42	CE42
	x 1	CIRCLIP-INT-35	CE35
	x 3	CIRCLIP-INT-32	CE32
	x 3	CIRCLIP-EXT-15	CI15
	x 4	CIRCLIP-EXT-20	CI20
	x 1	CIRCLIP-EXT-10	CI10

Image	Quantité	note	REF notice
	x 24	07174-1106X25	25XM6
	x 11	07174-1106X20	20XM6
	X 3	07174-1106X35	35XM6
	X 4	07174-1106X30	30XM6
	X 34	07174-1106X16	16XM6
	x 3	07174-1108X25	25XM8
	x 8	07174-1105X20	20XM5
	X 8	07174-1105X16	16XM5

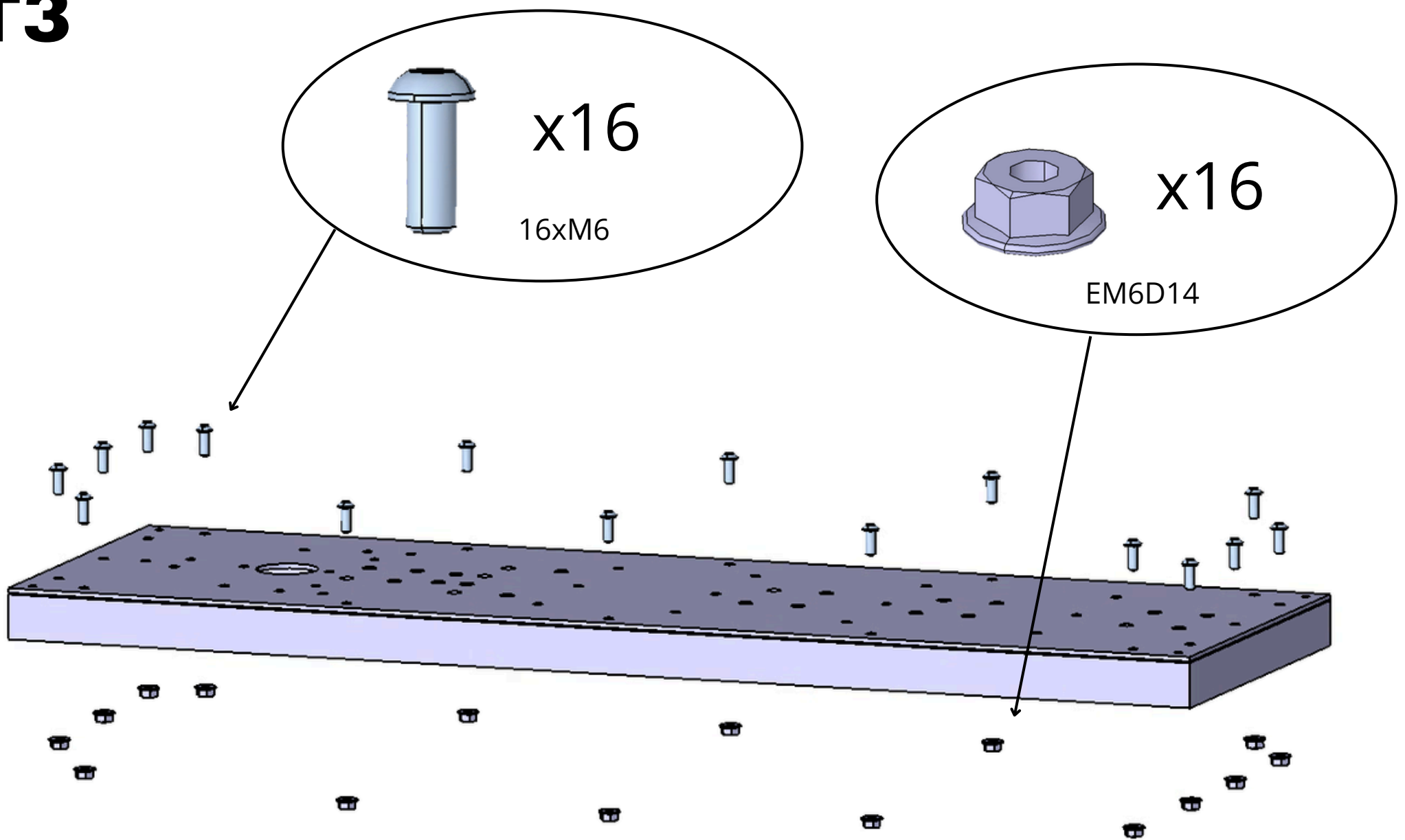
T1

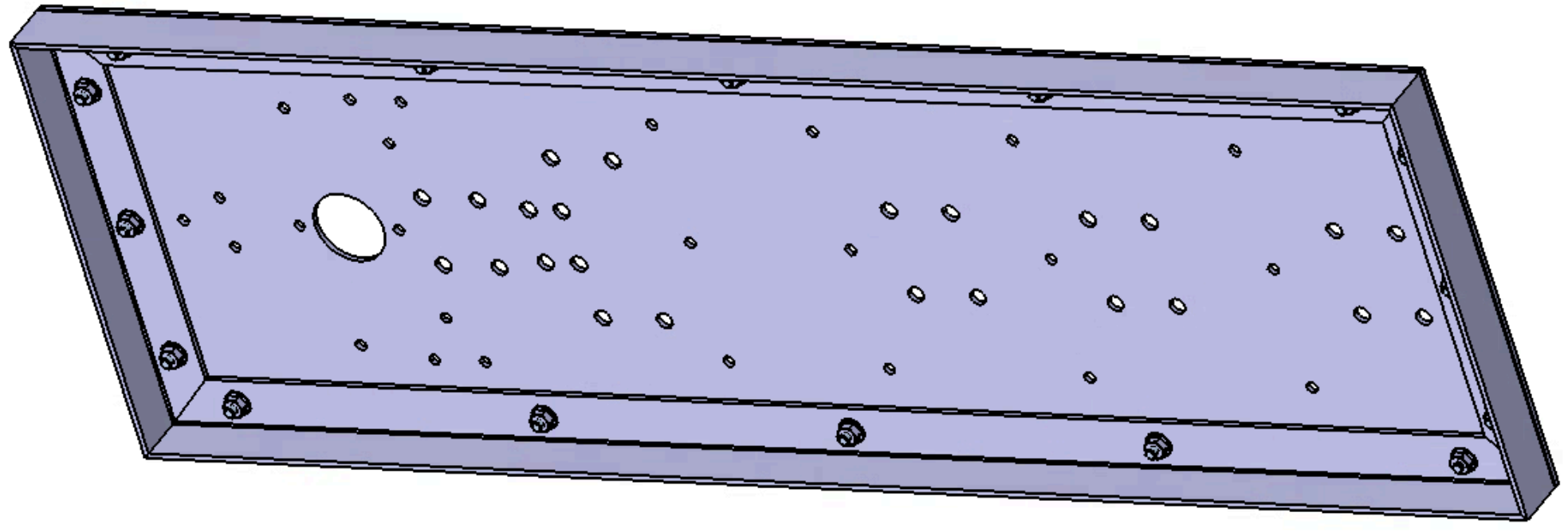


T2

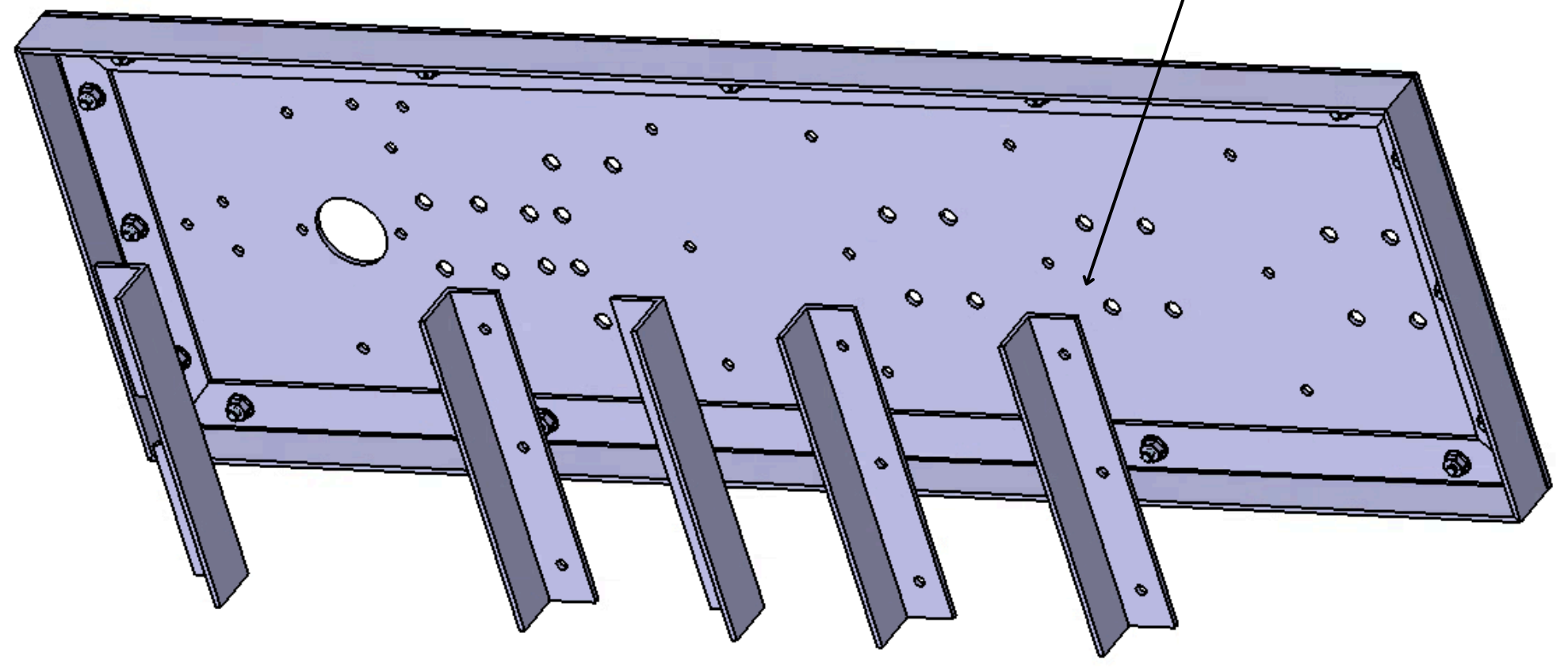
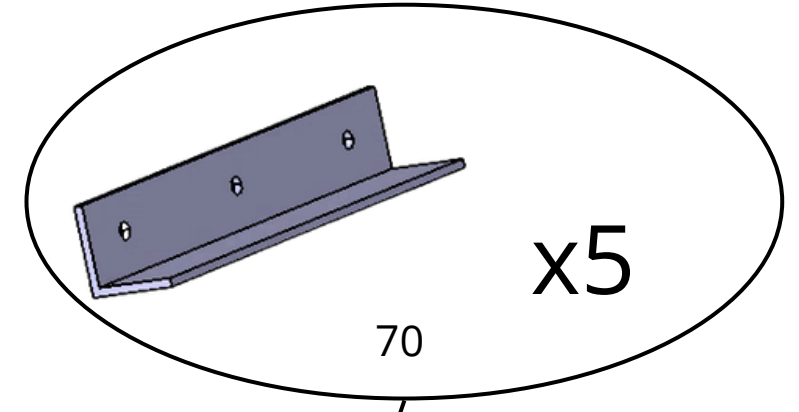


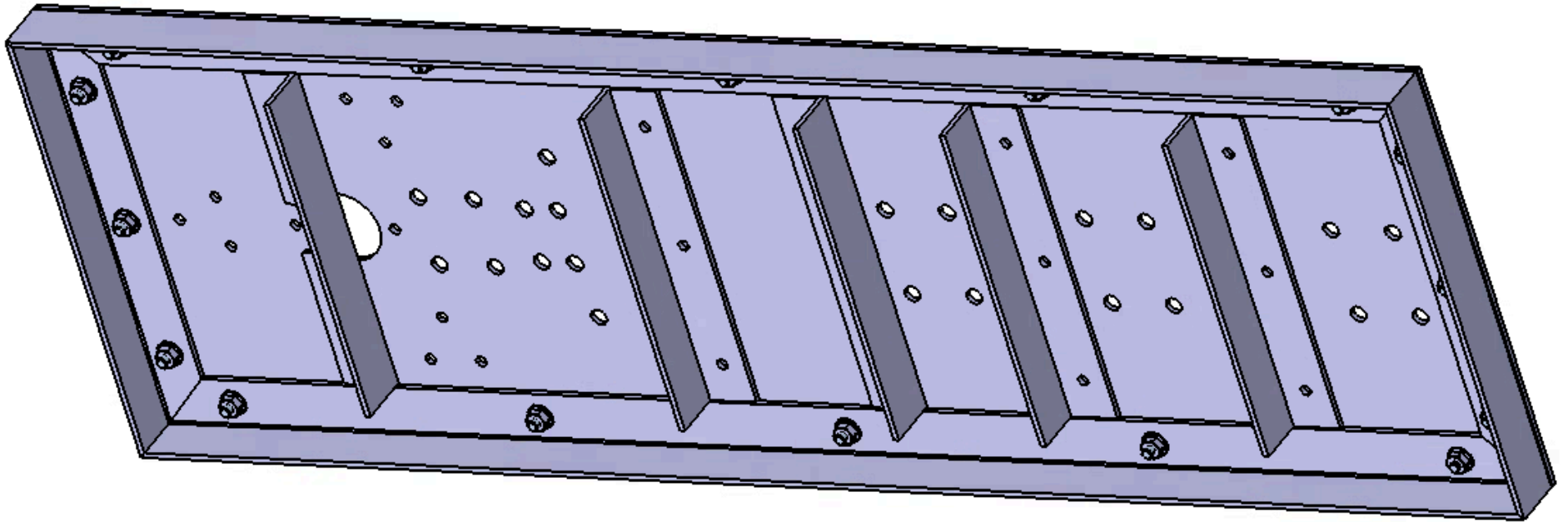
T3



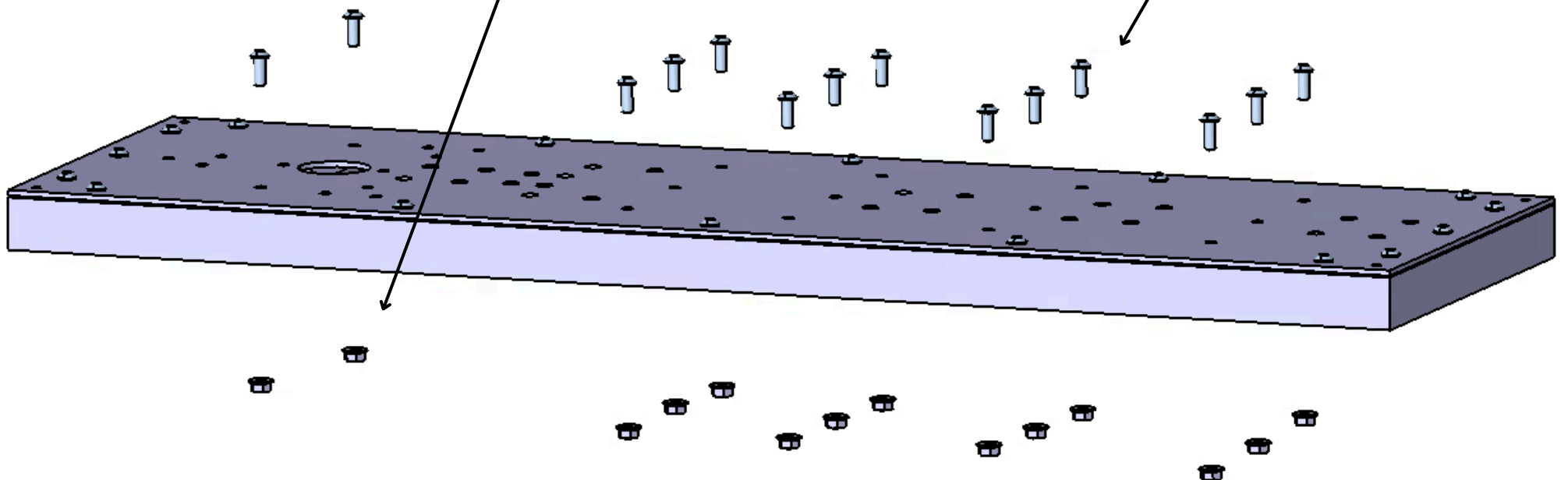
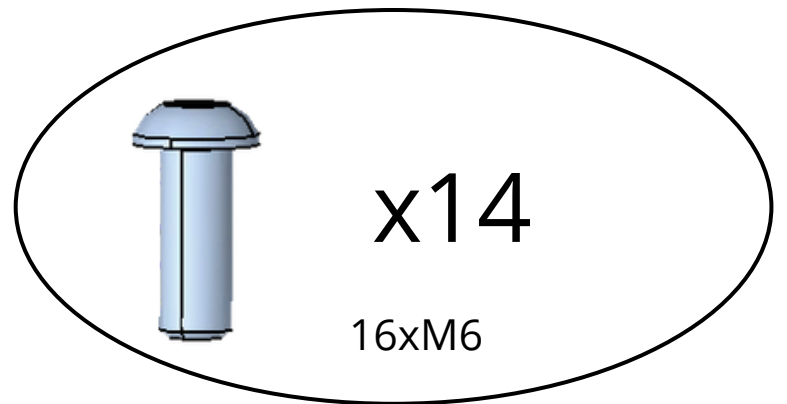
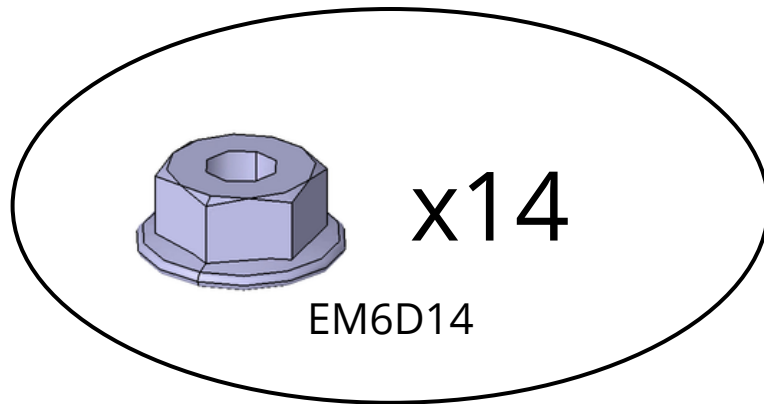


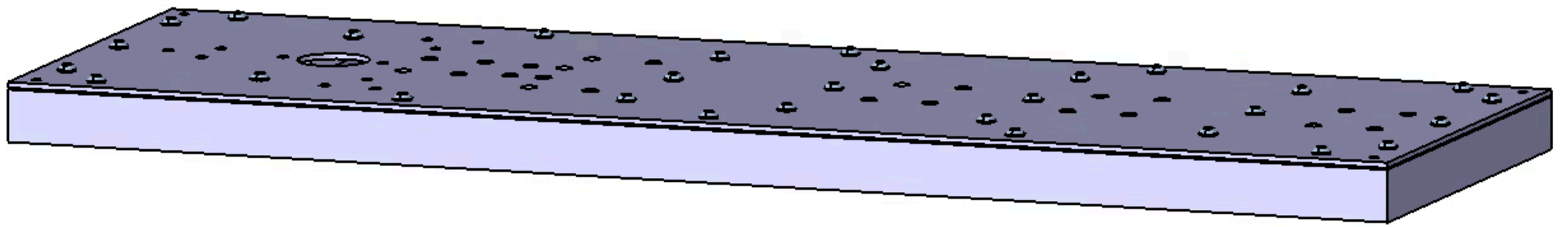
T4



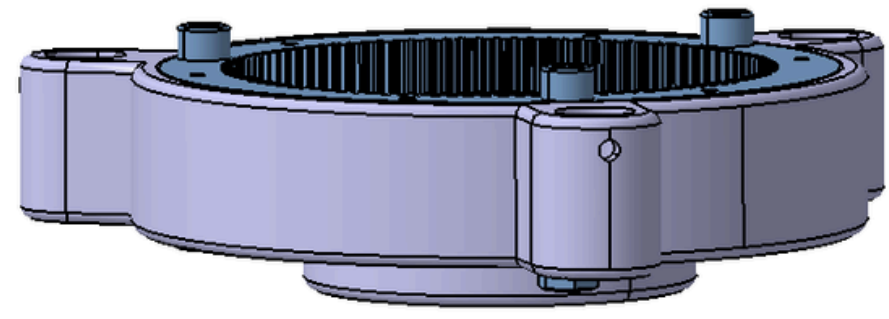
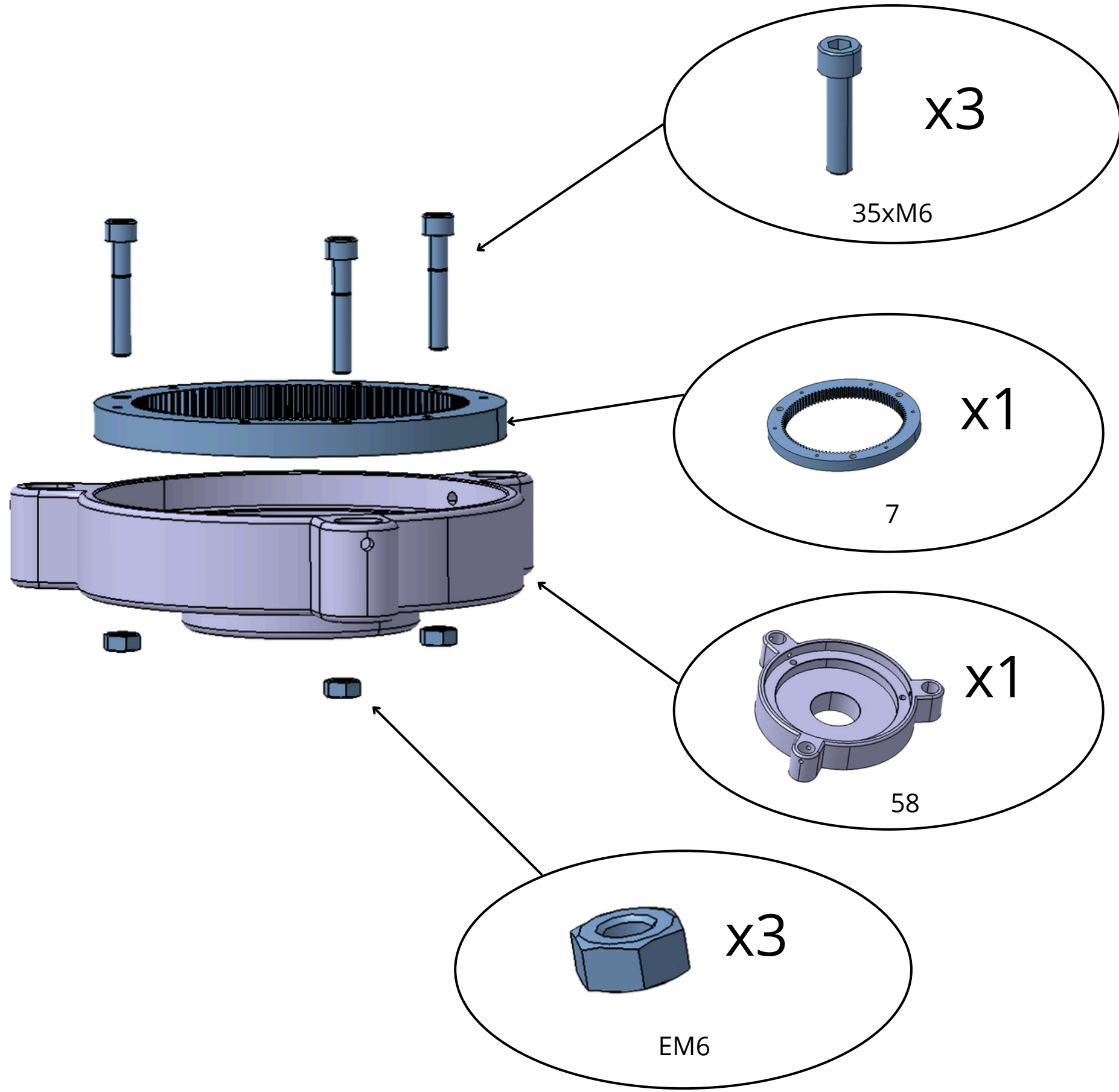


T5



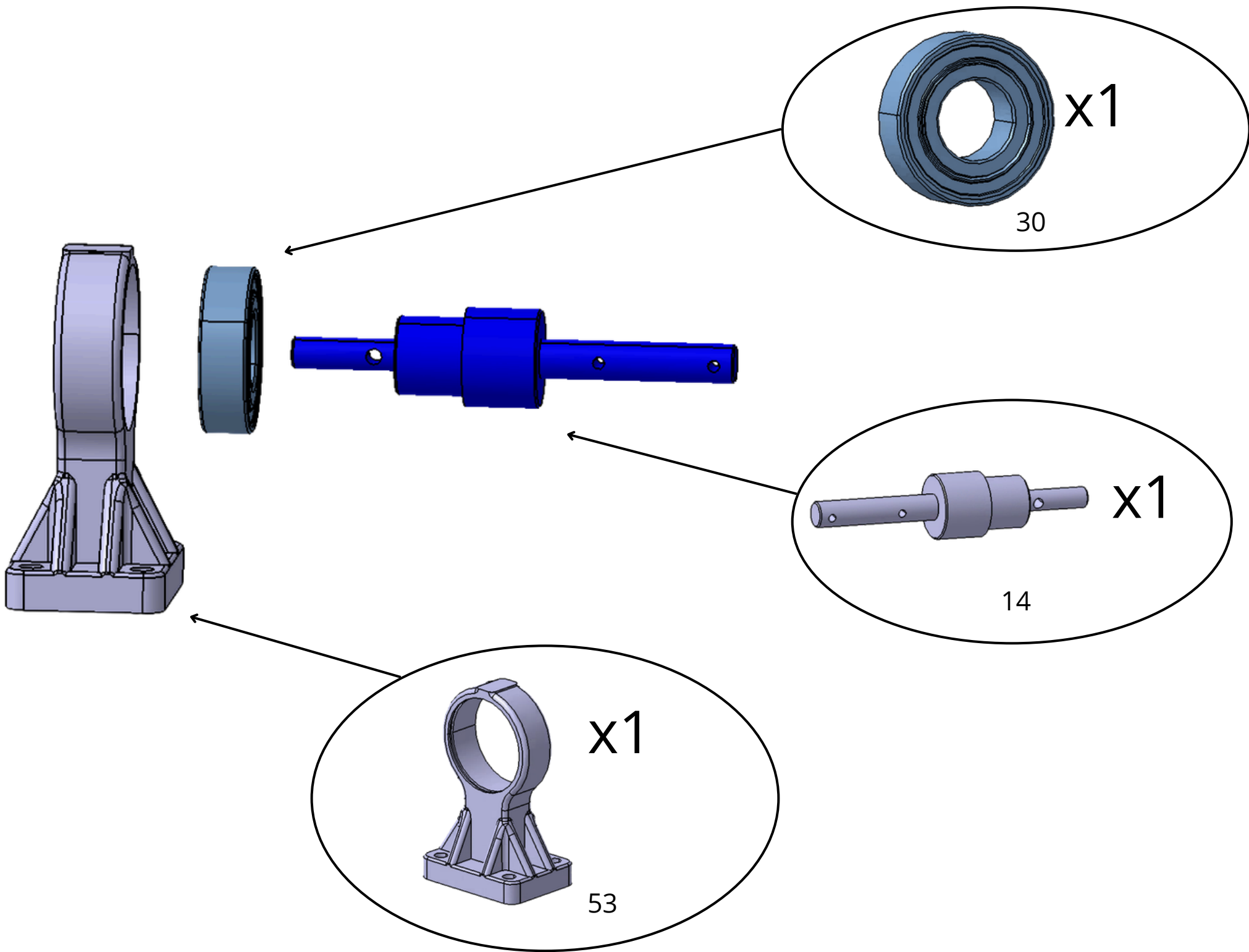


1

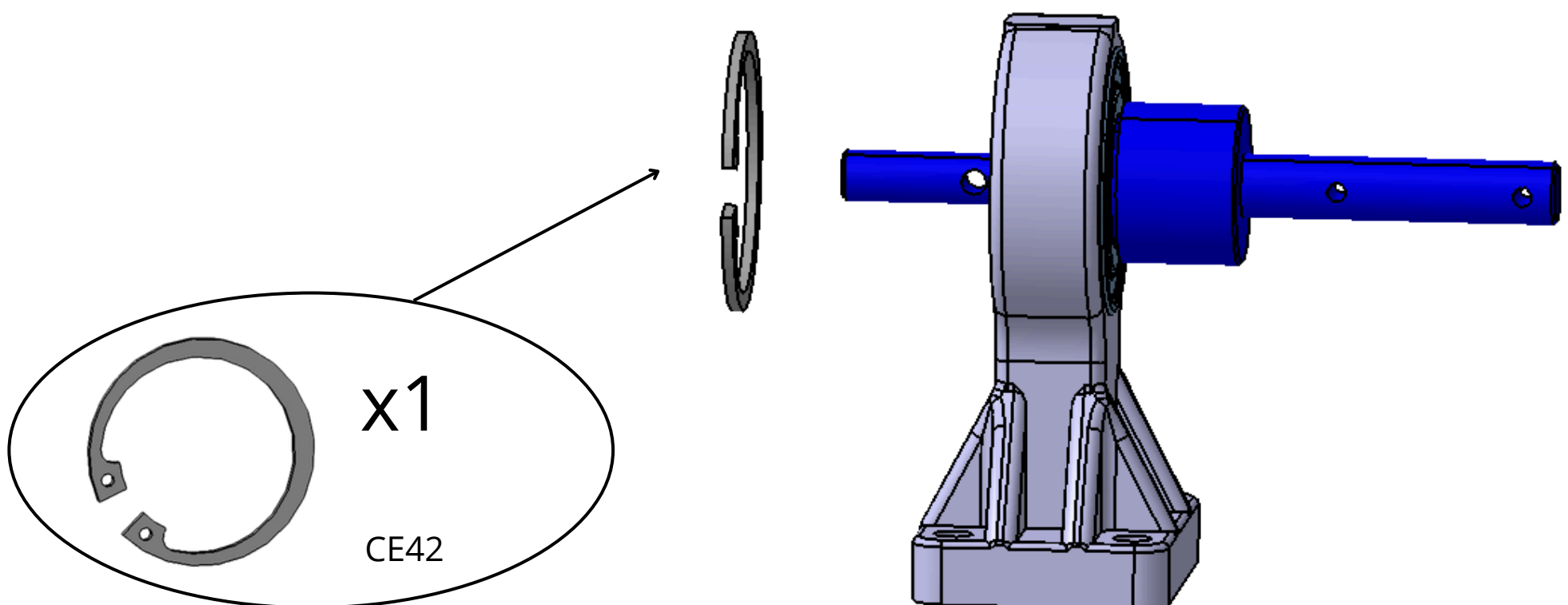


Réf. A

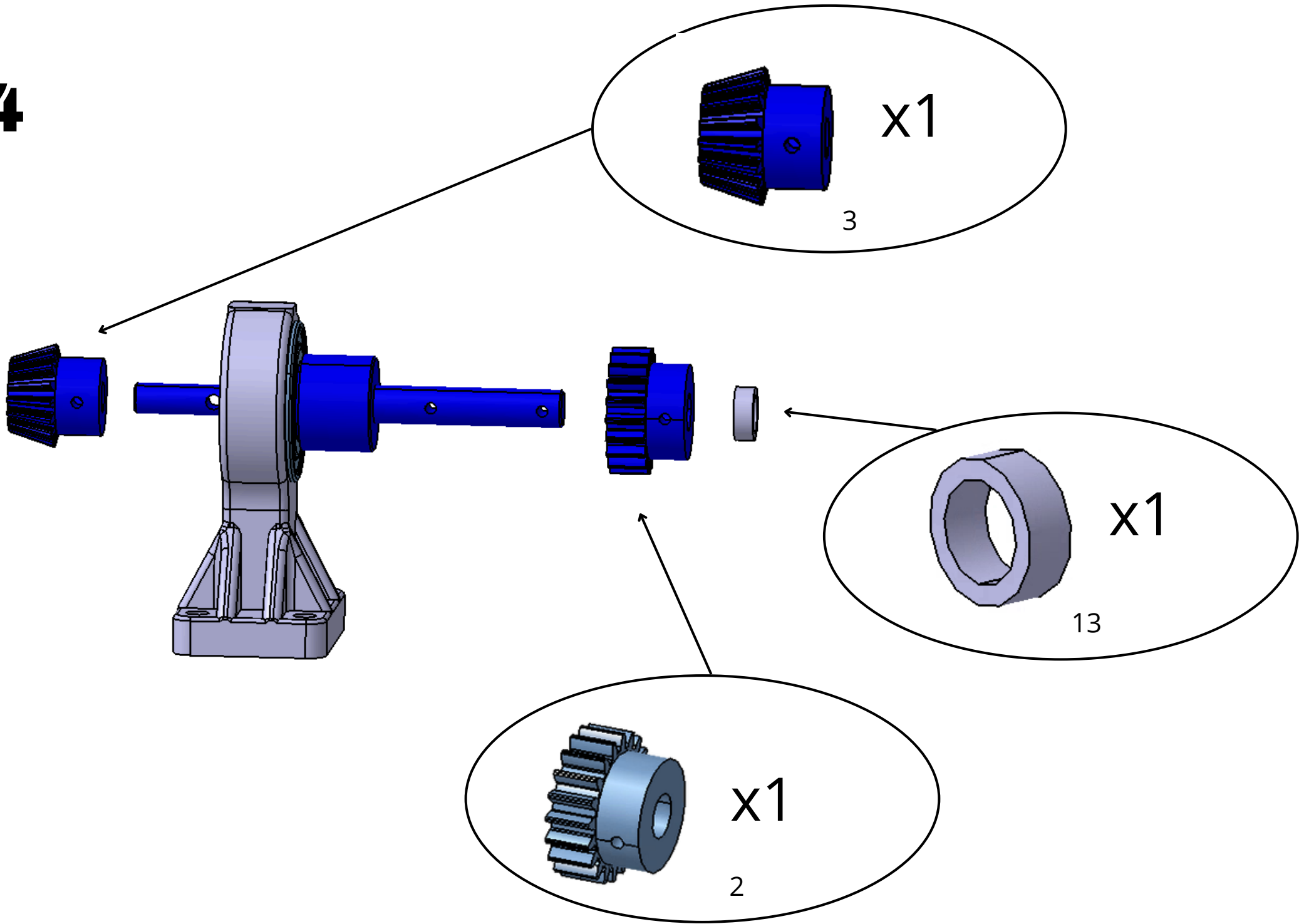
2



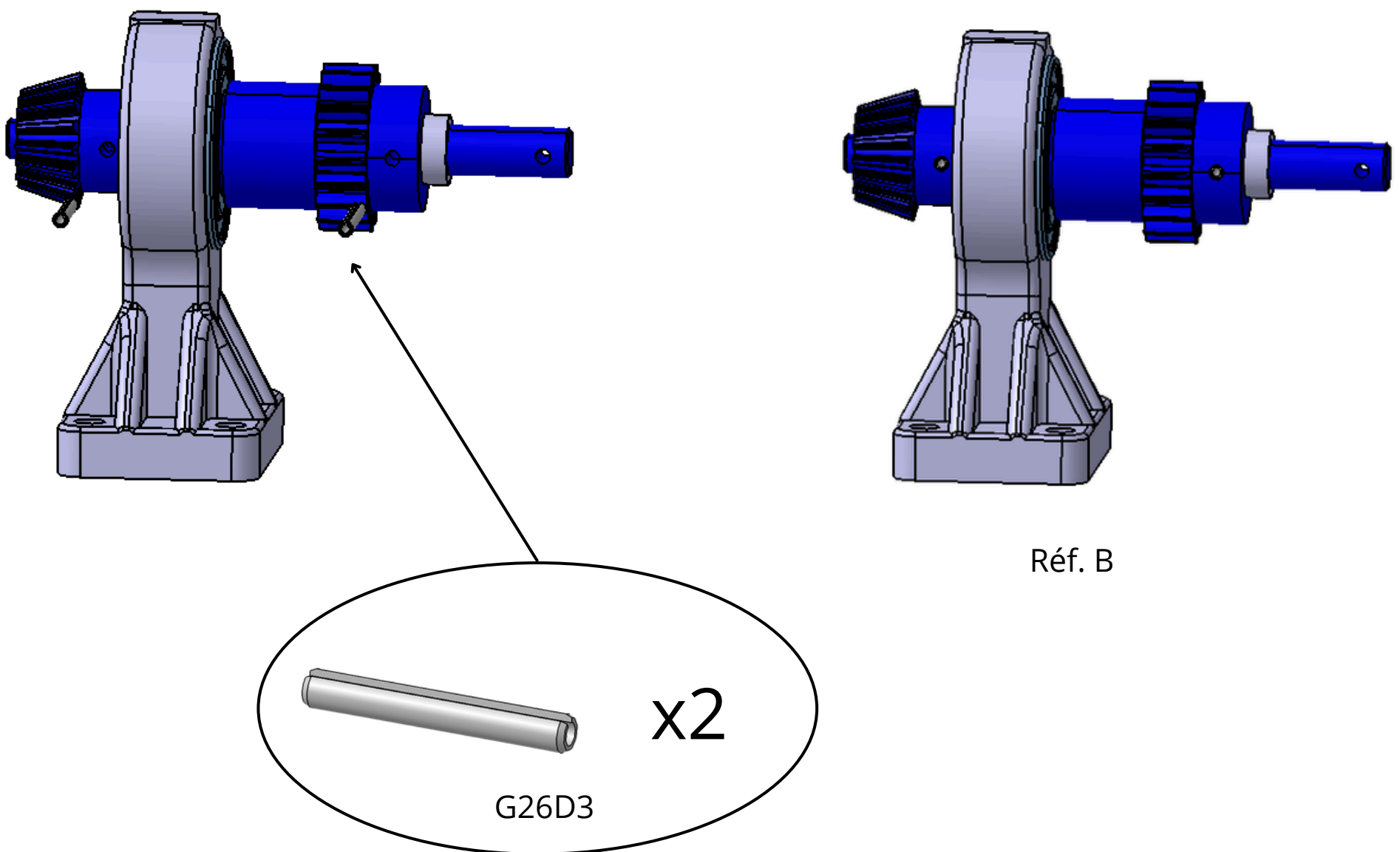
3



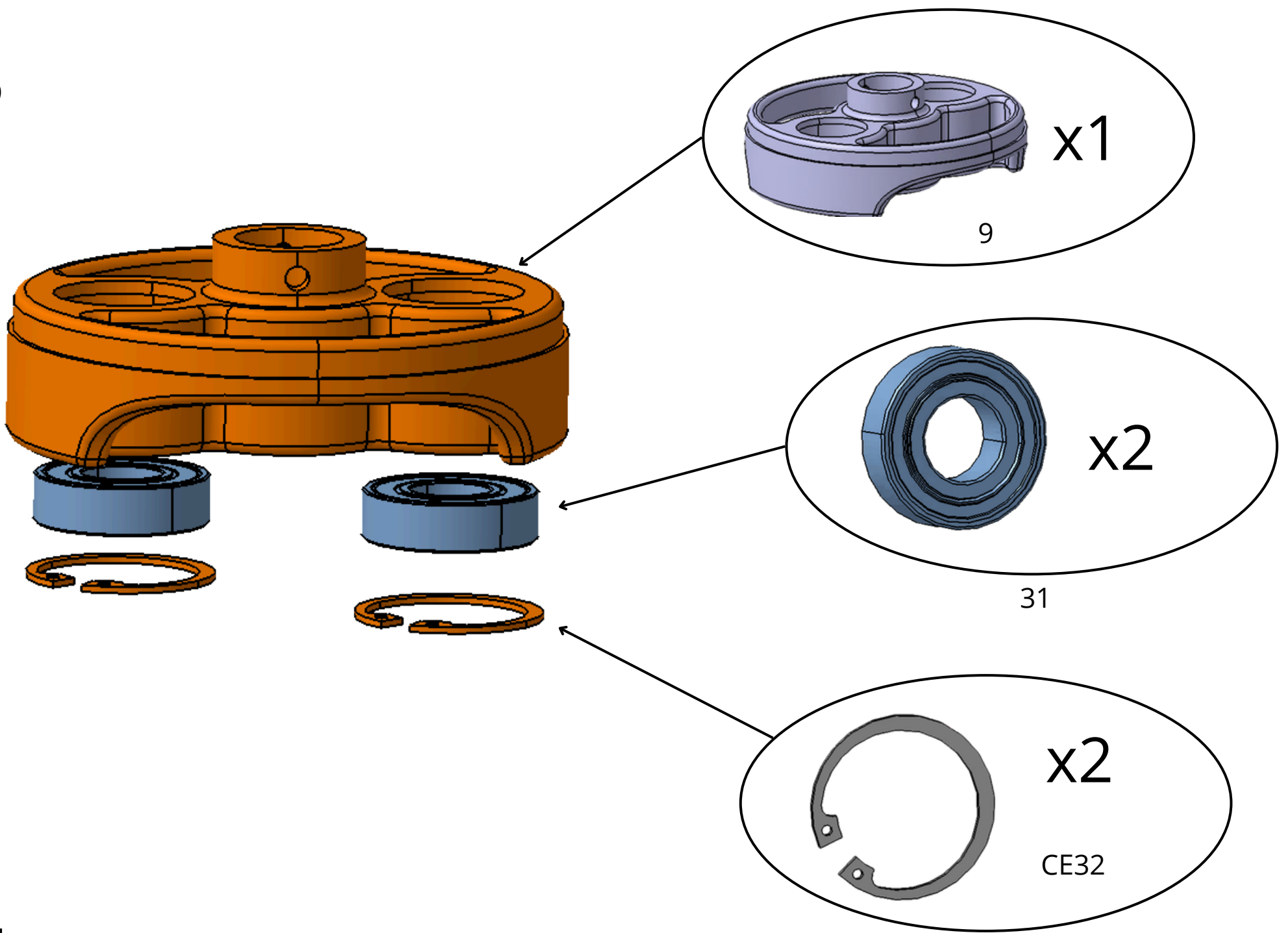
4



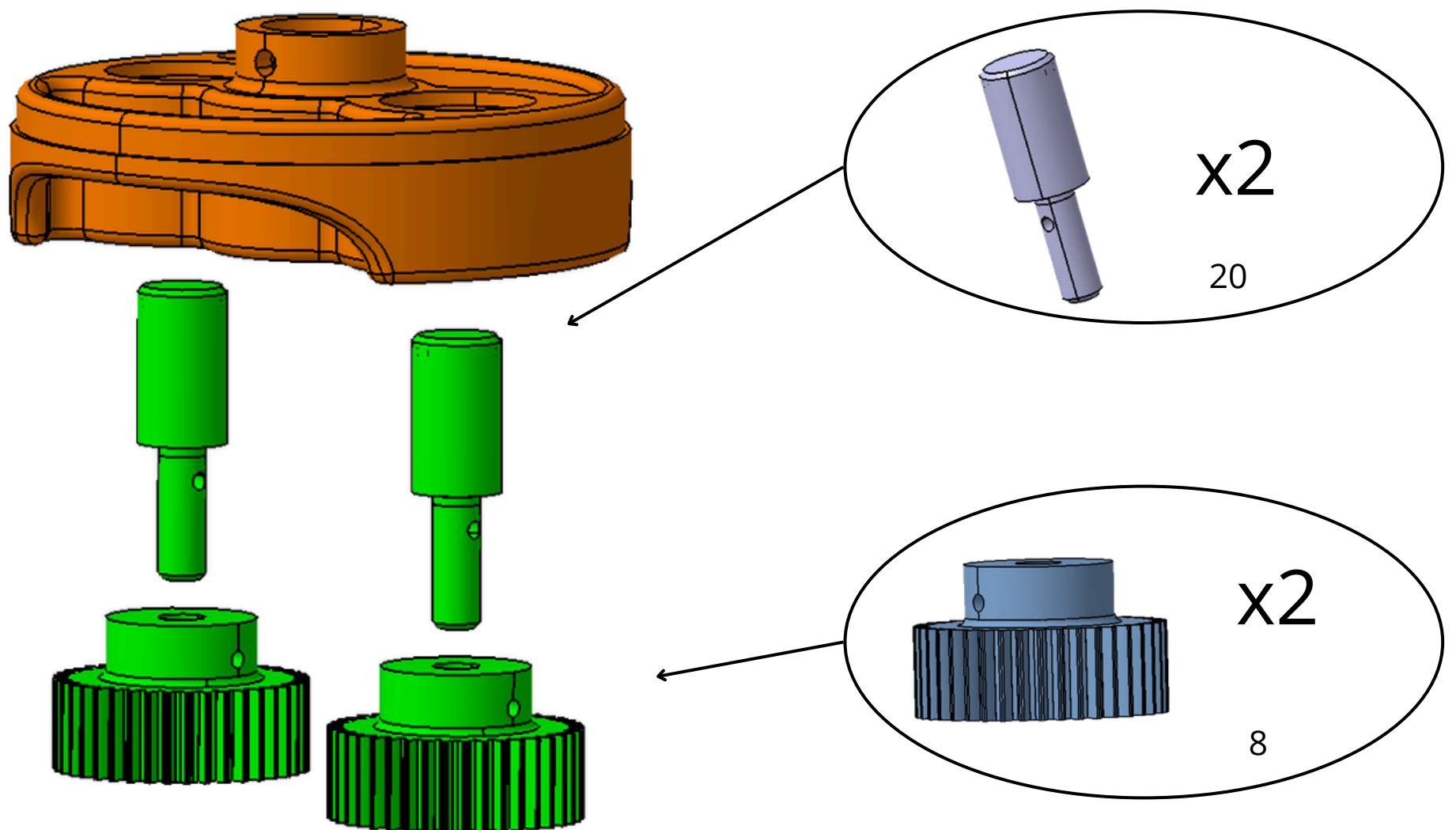
5



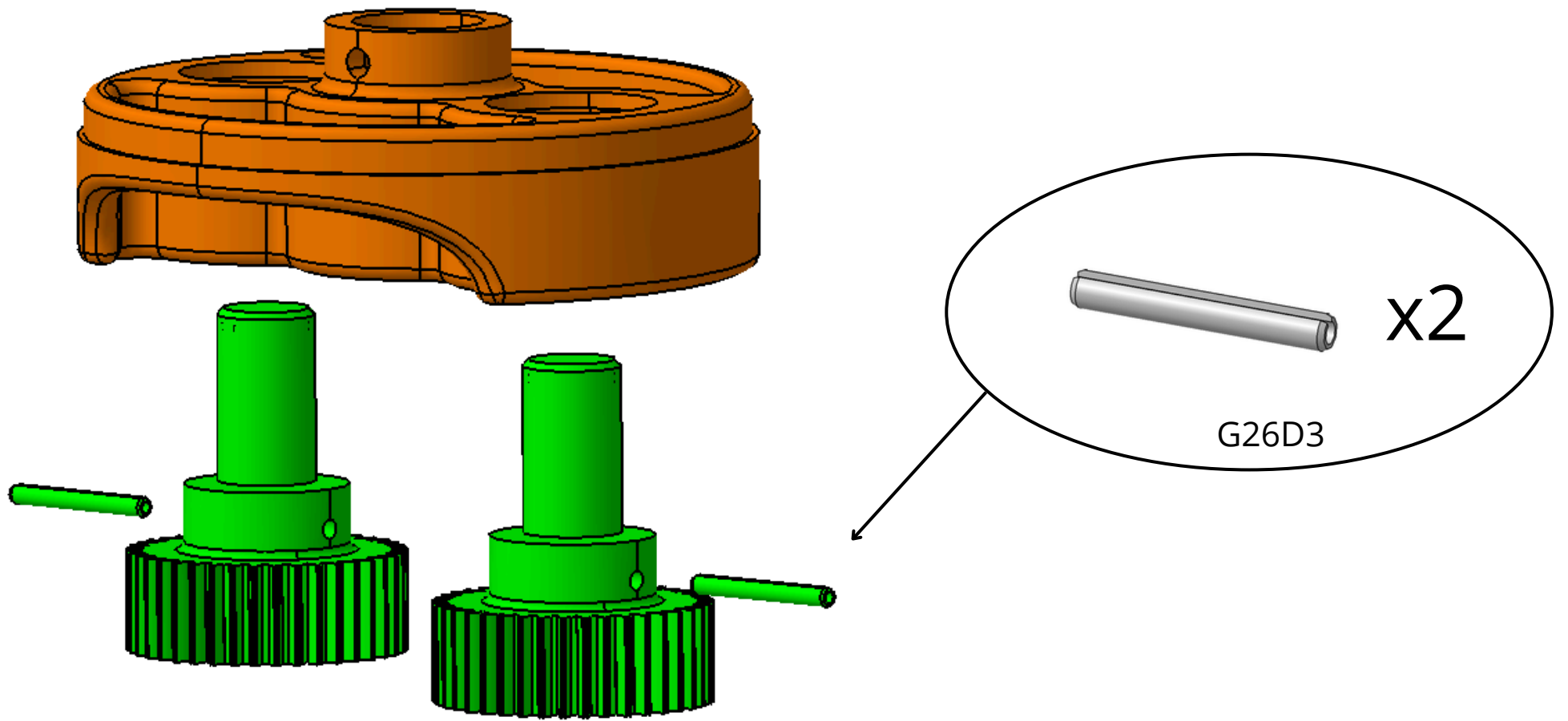
6



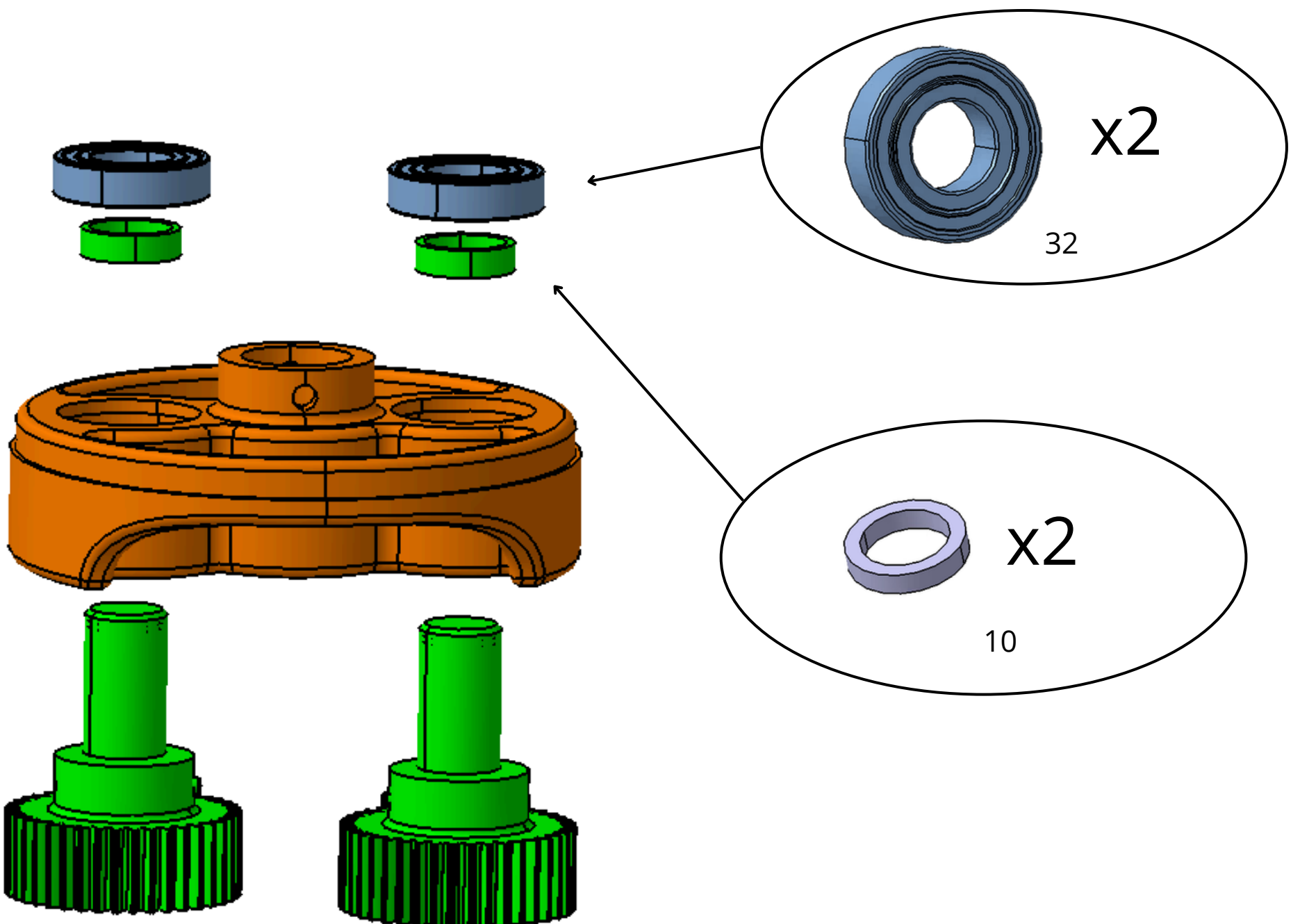
7



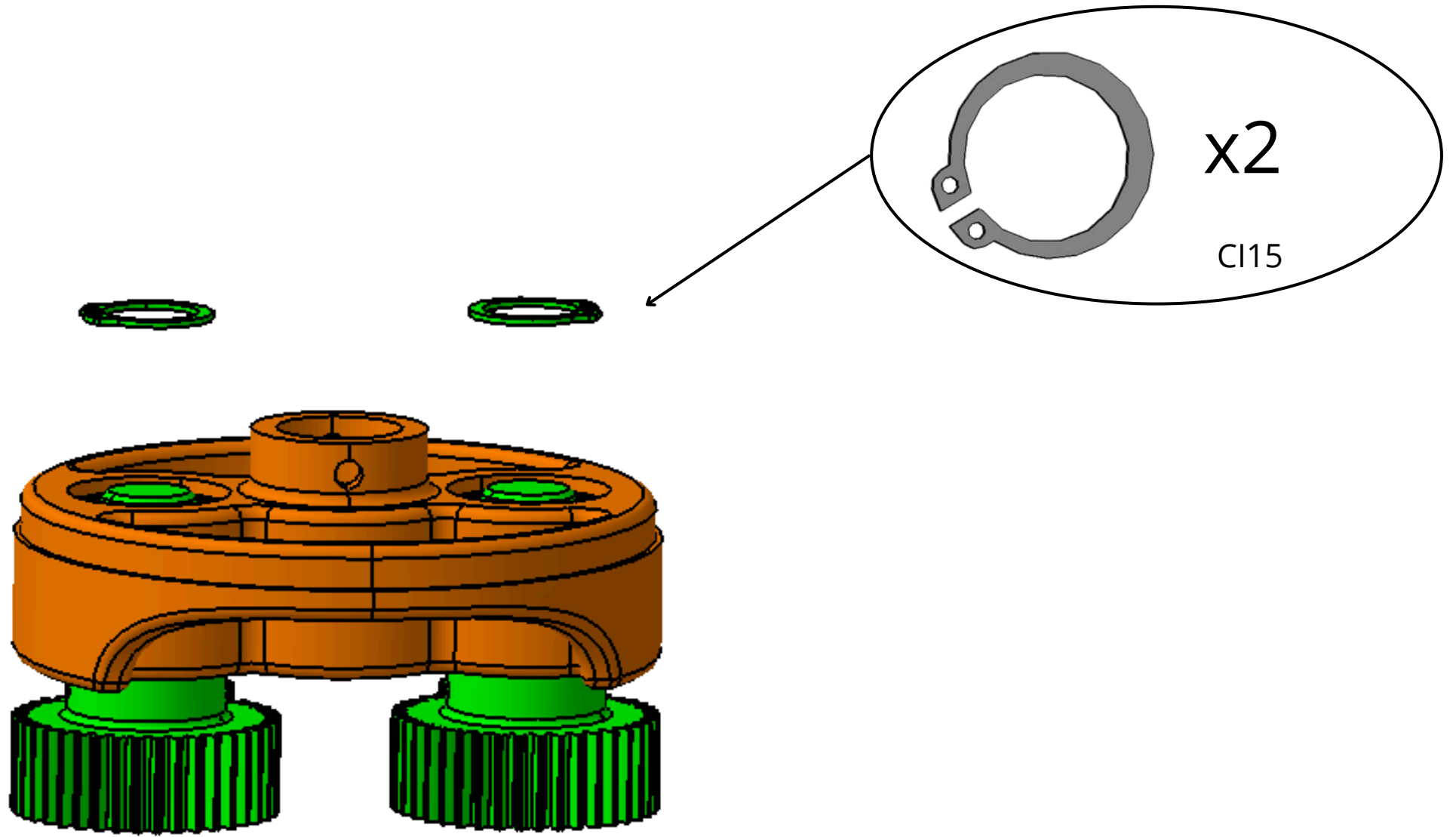
8



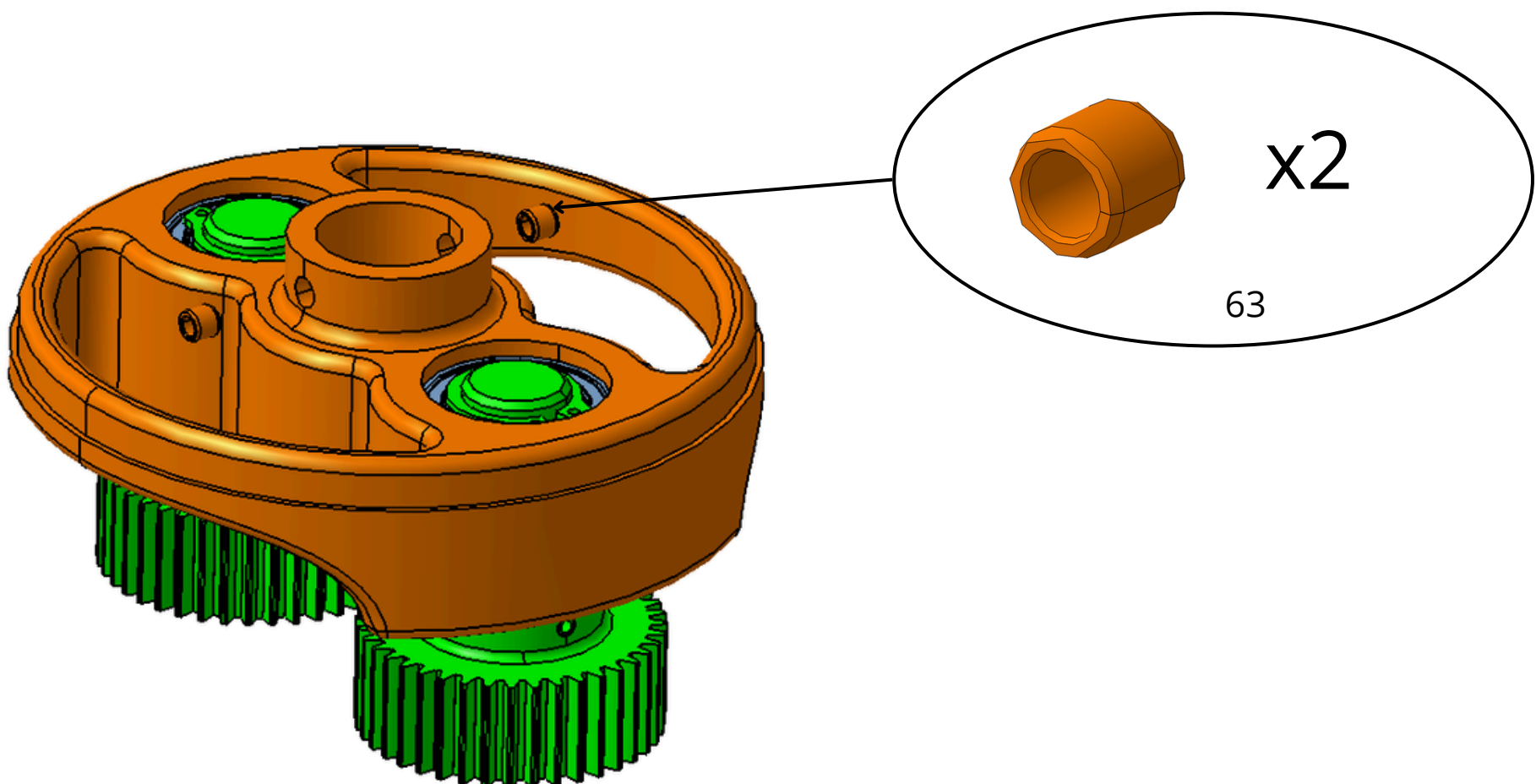
9

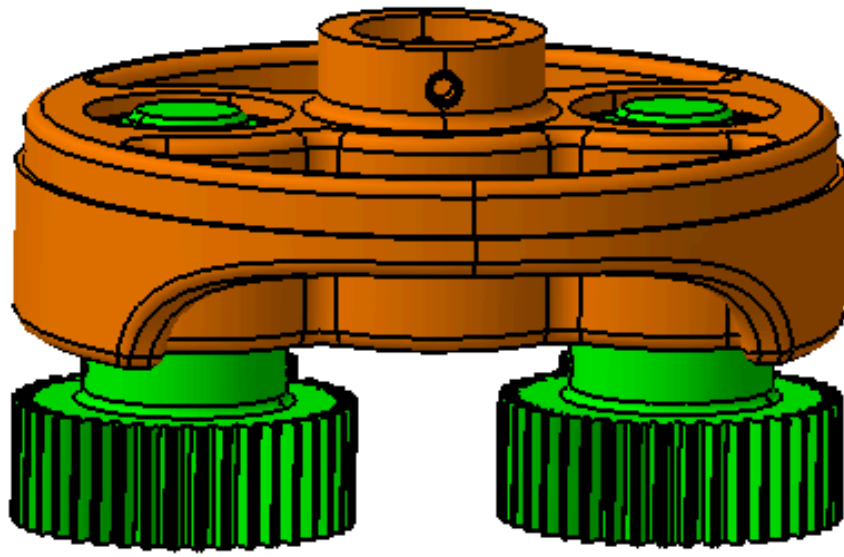


10

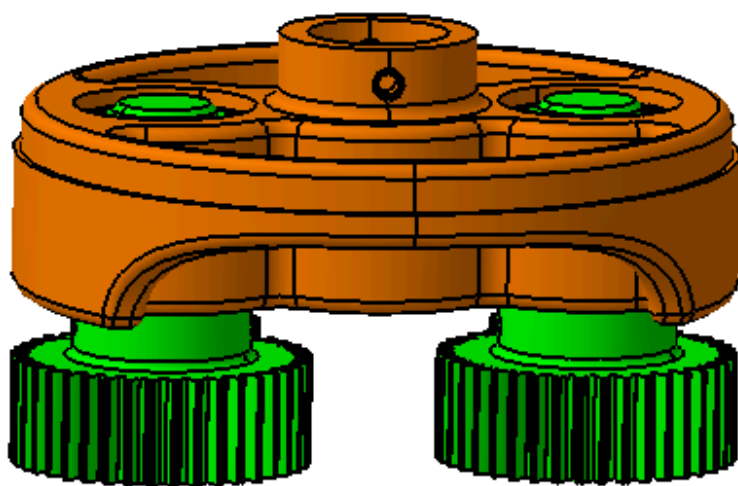
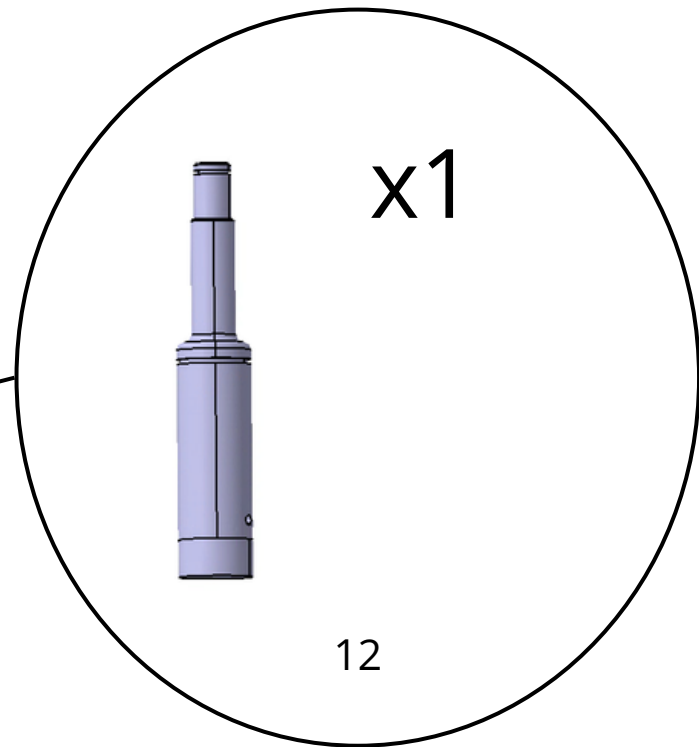


11

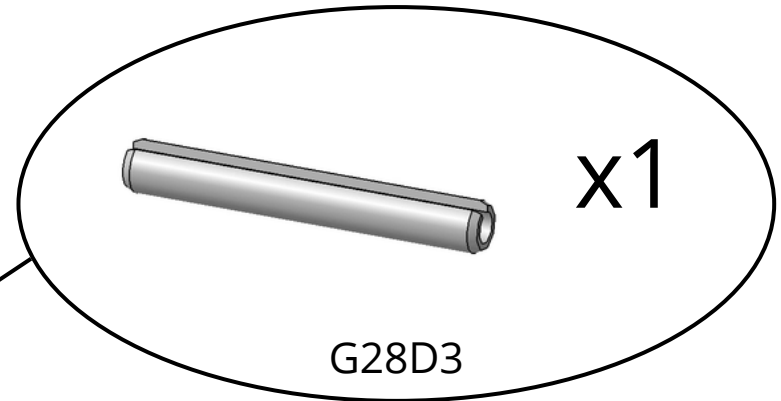
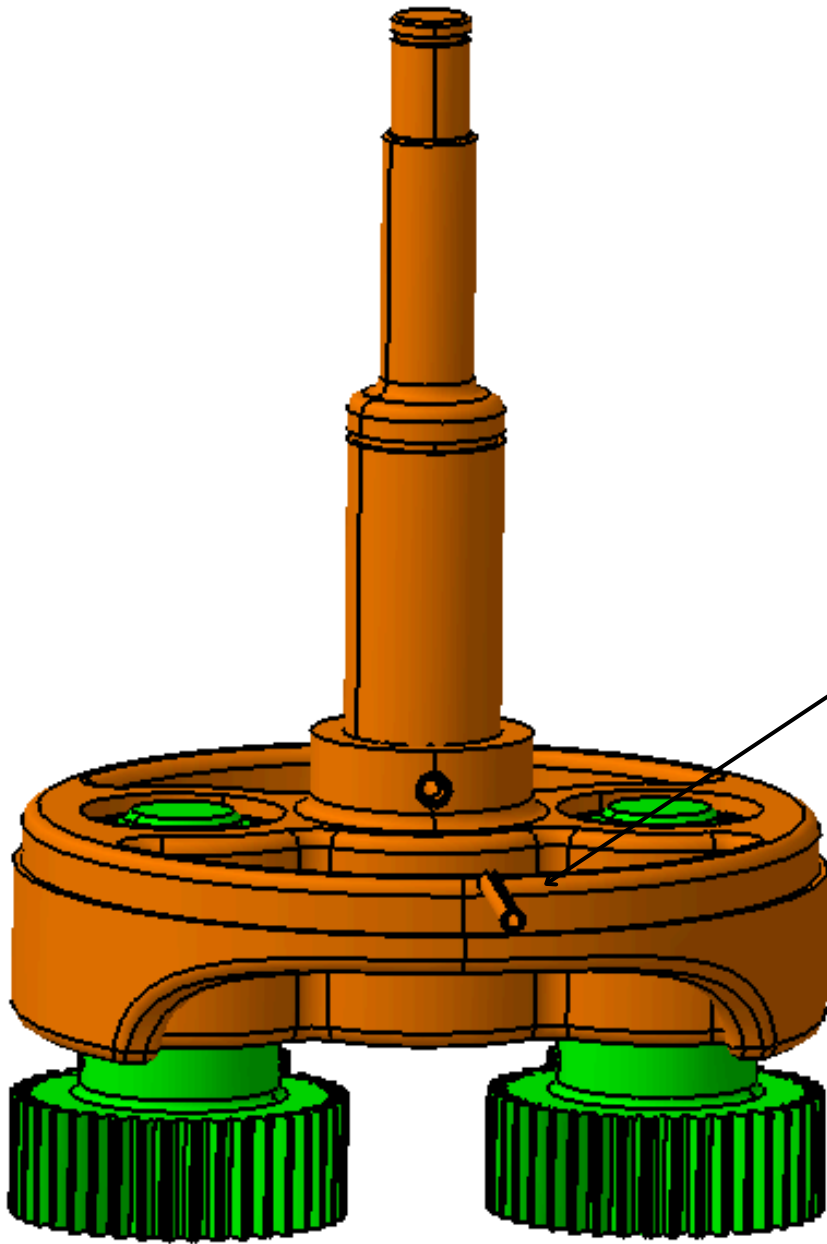




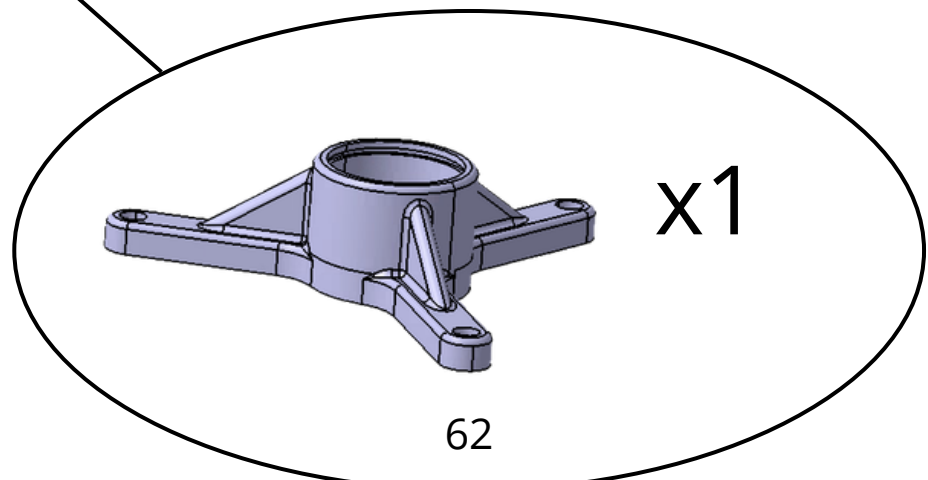
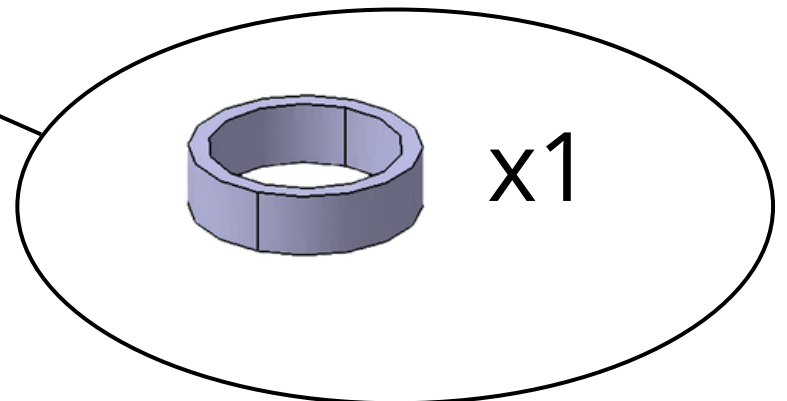
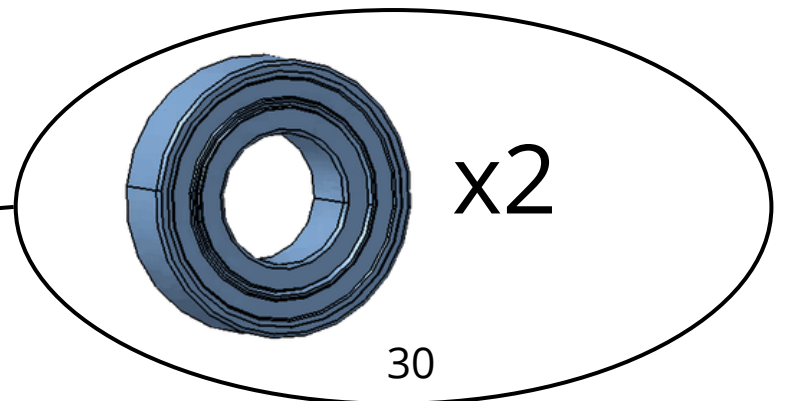
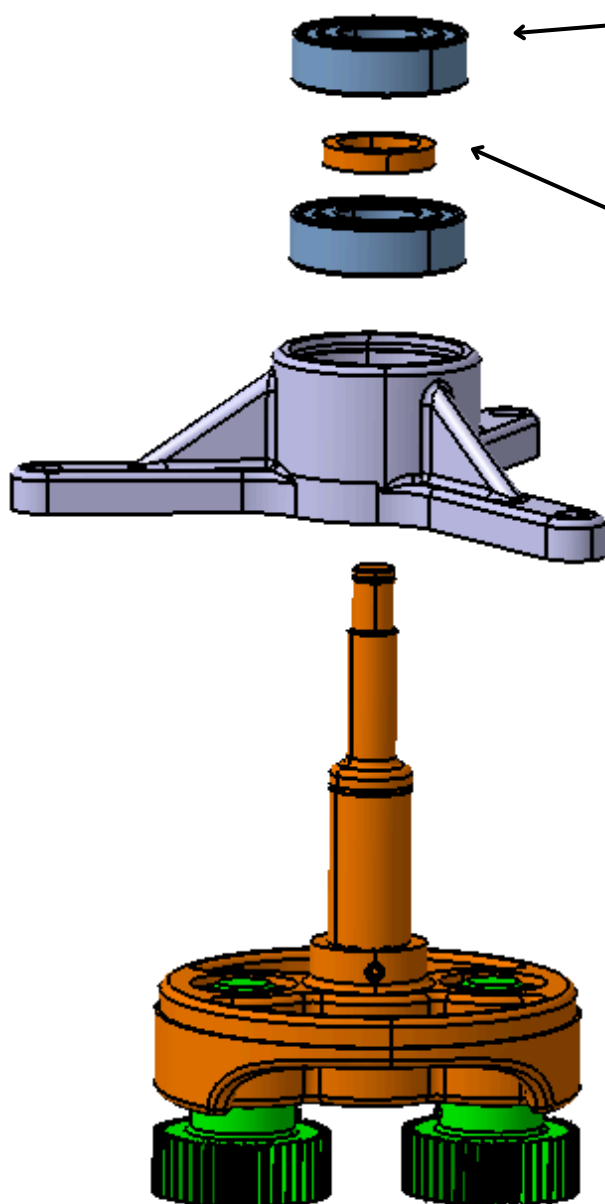
12



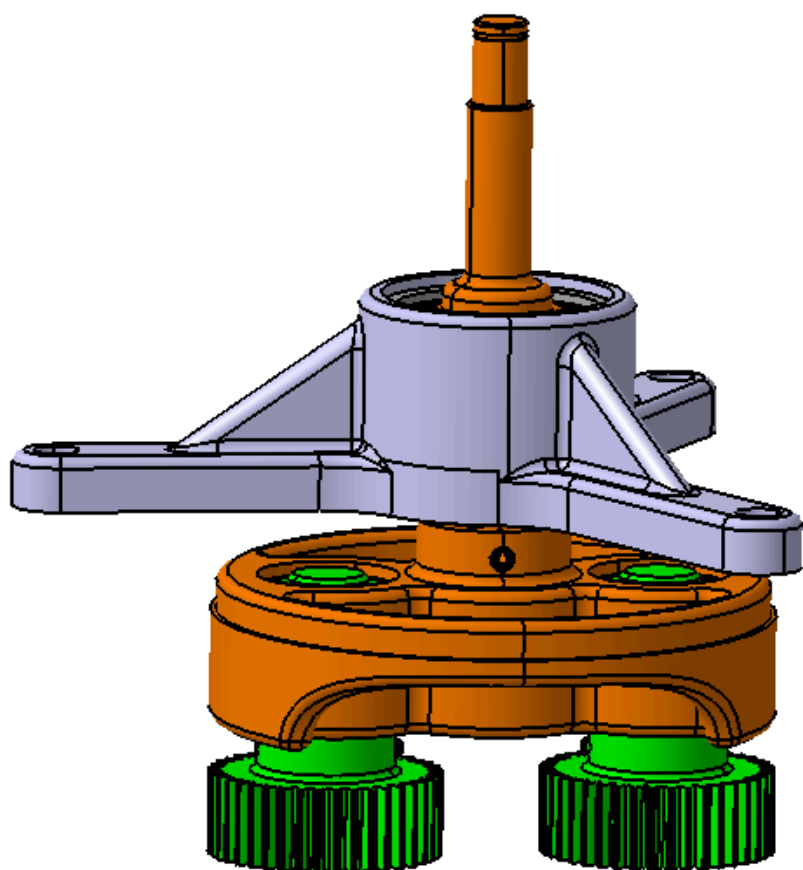
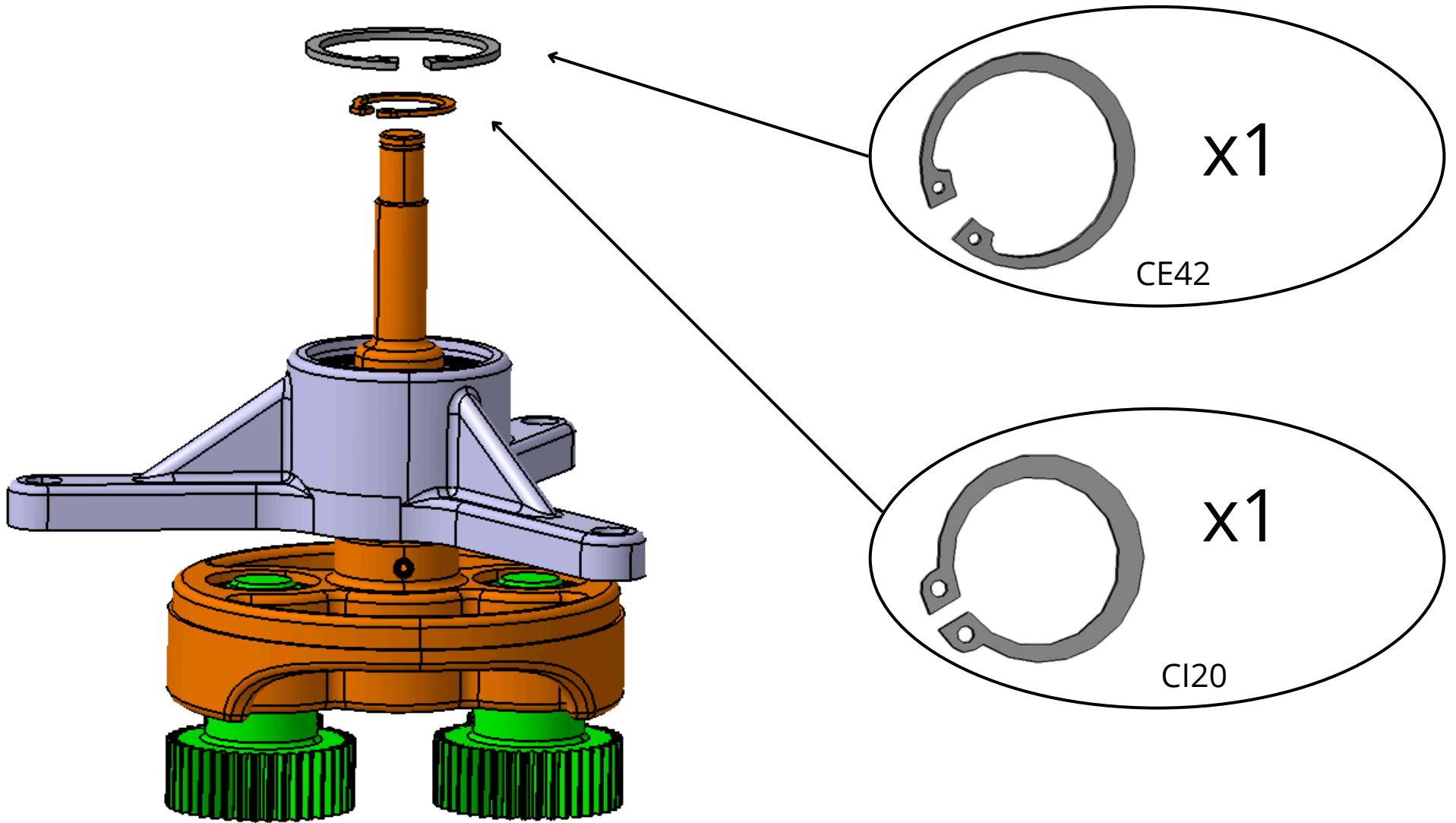
13



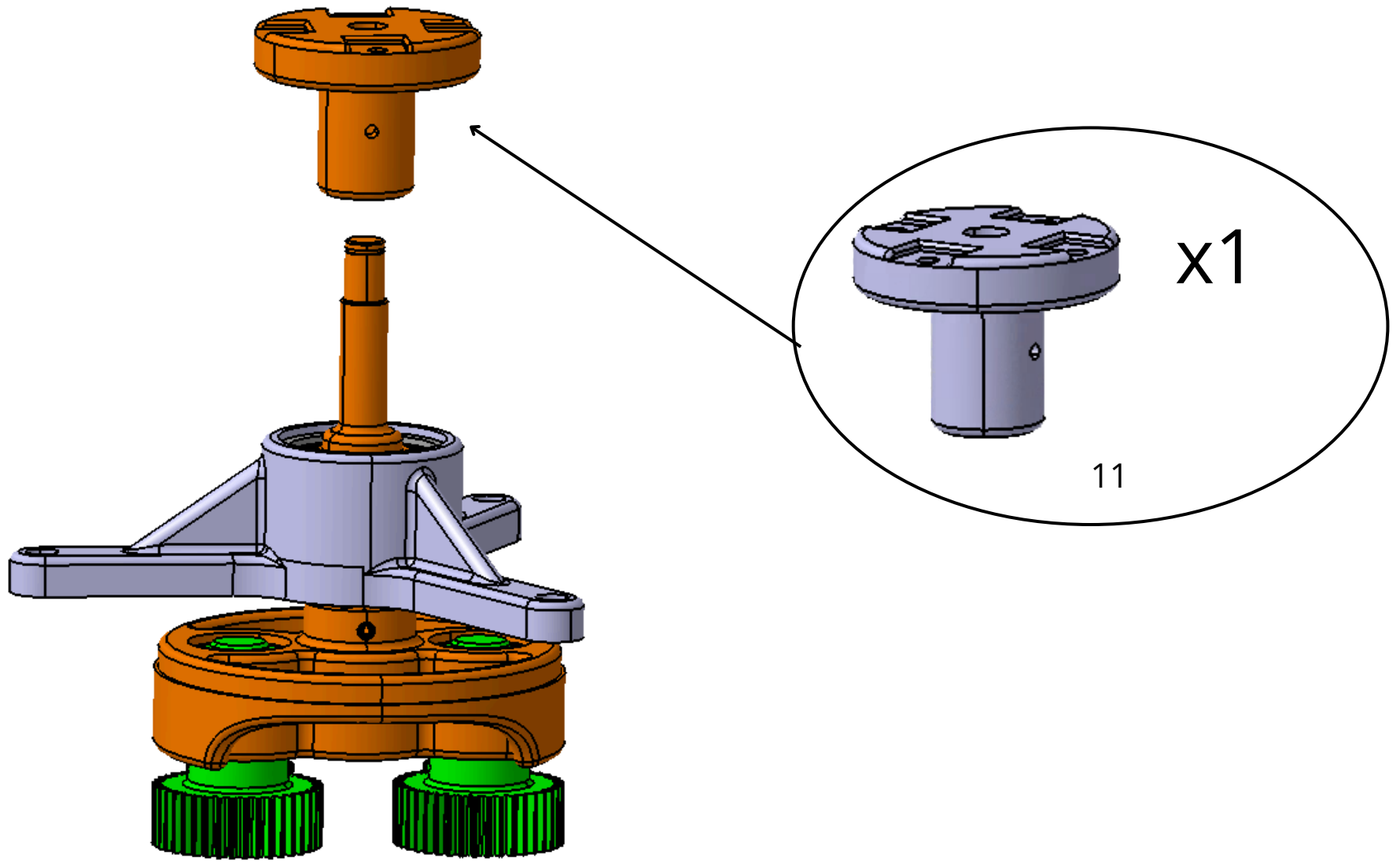
14



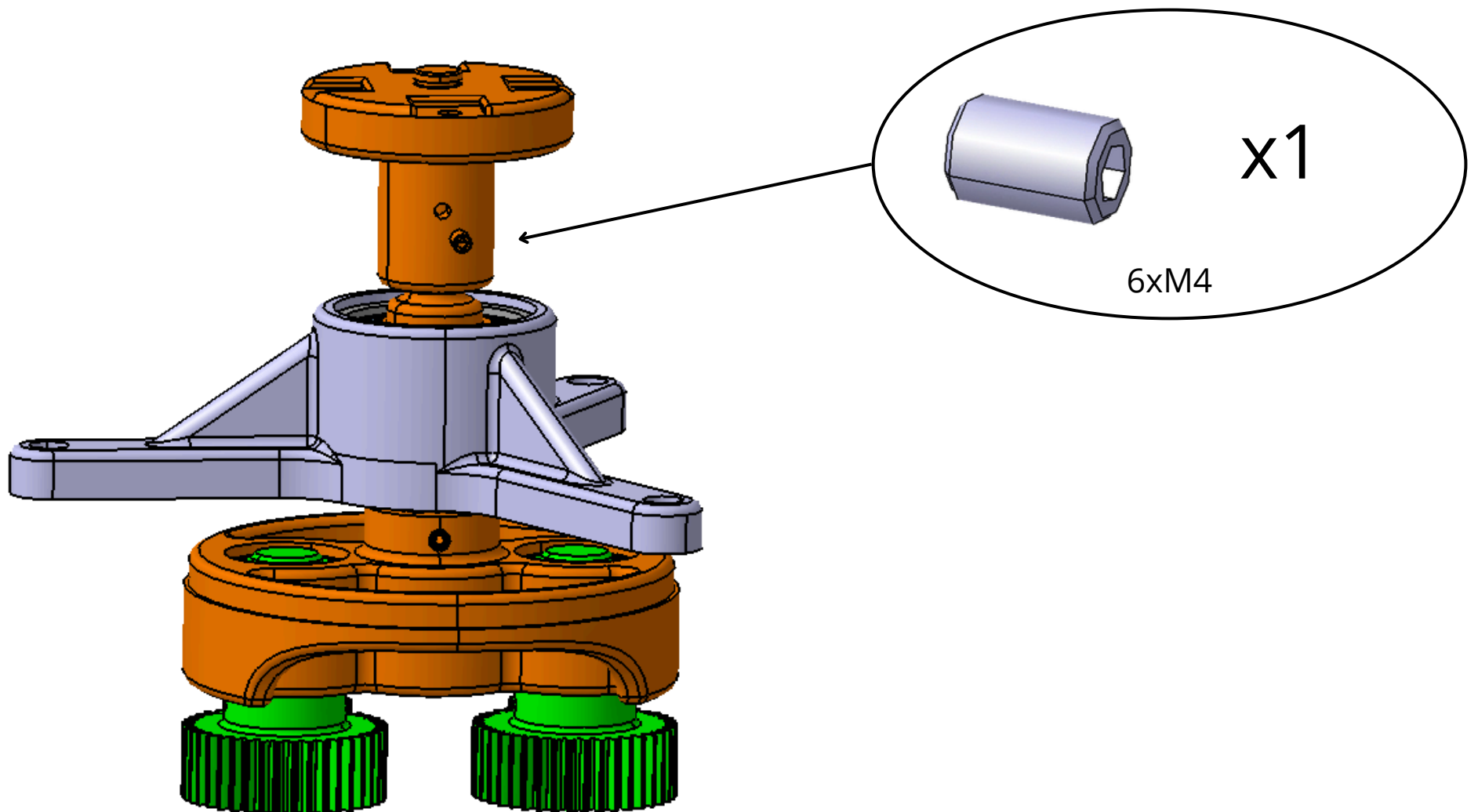
15



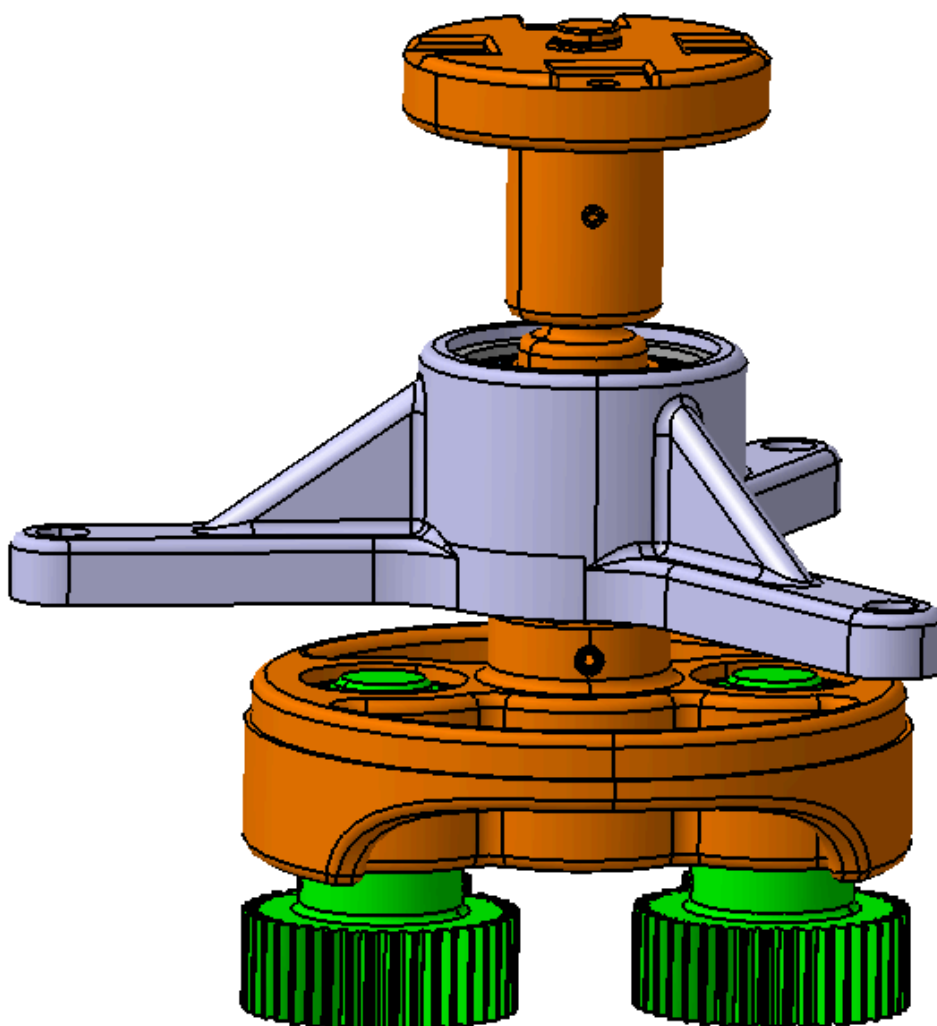
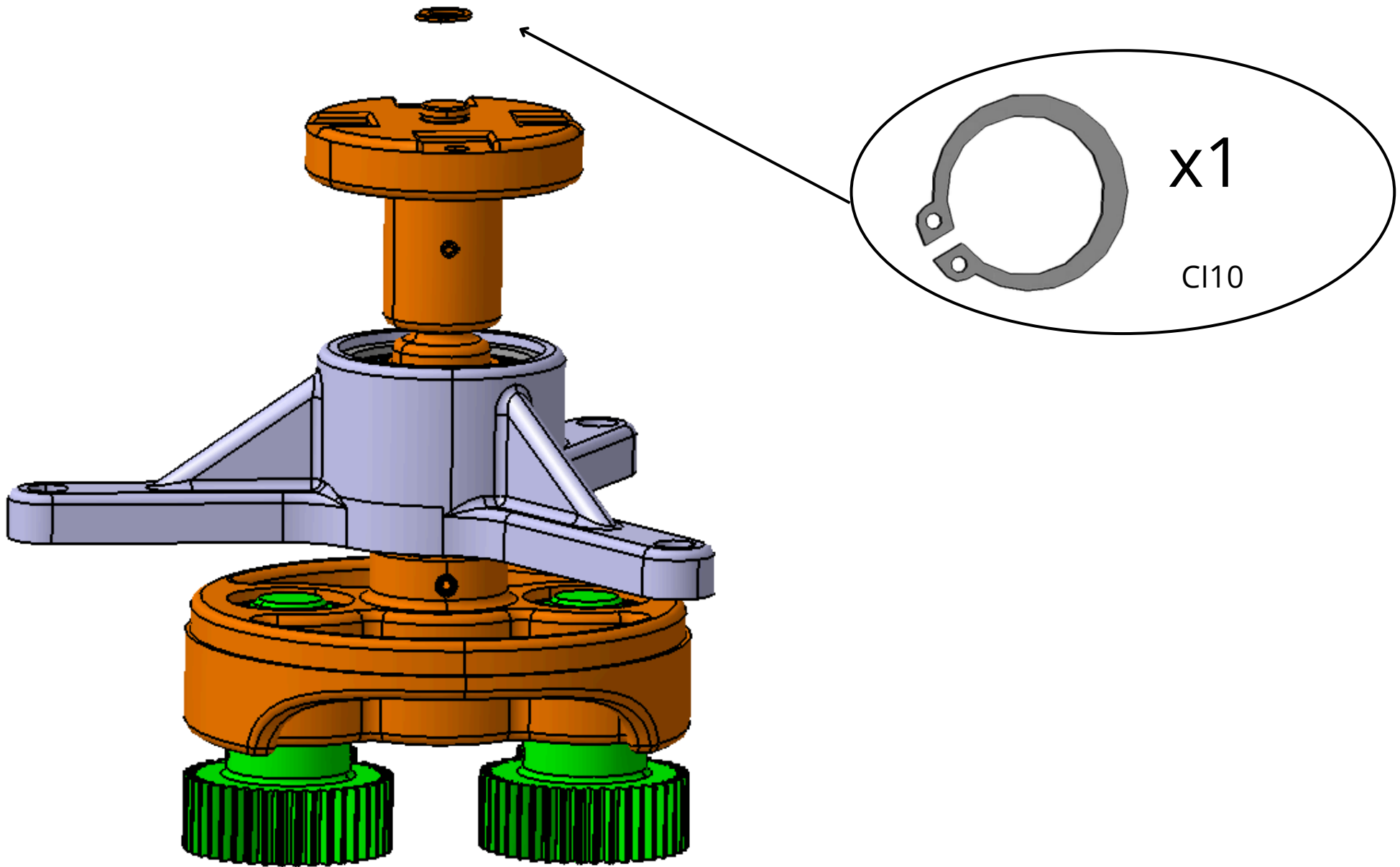
16



17

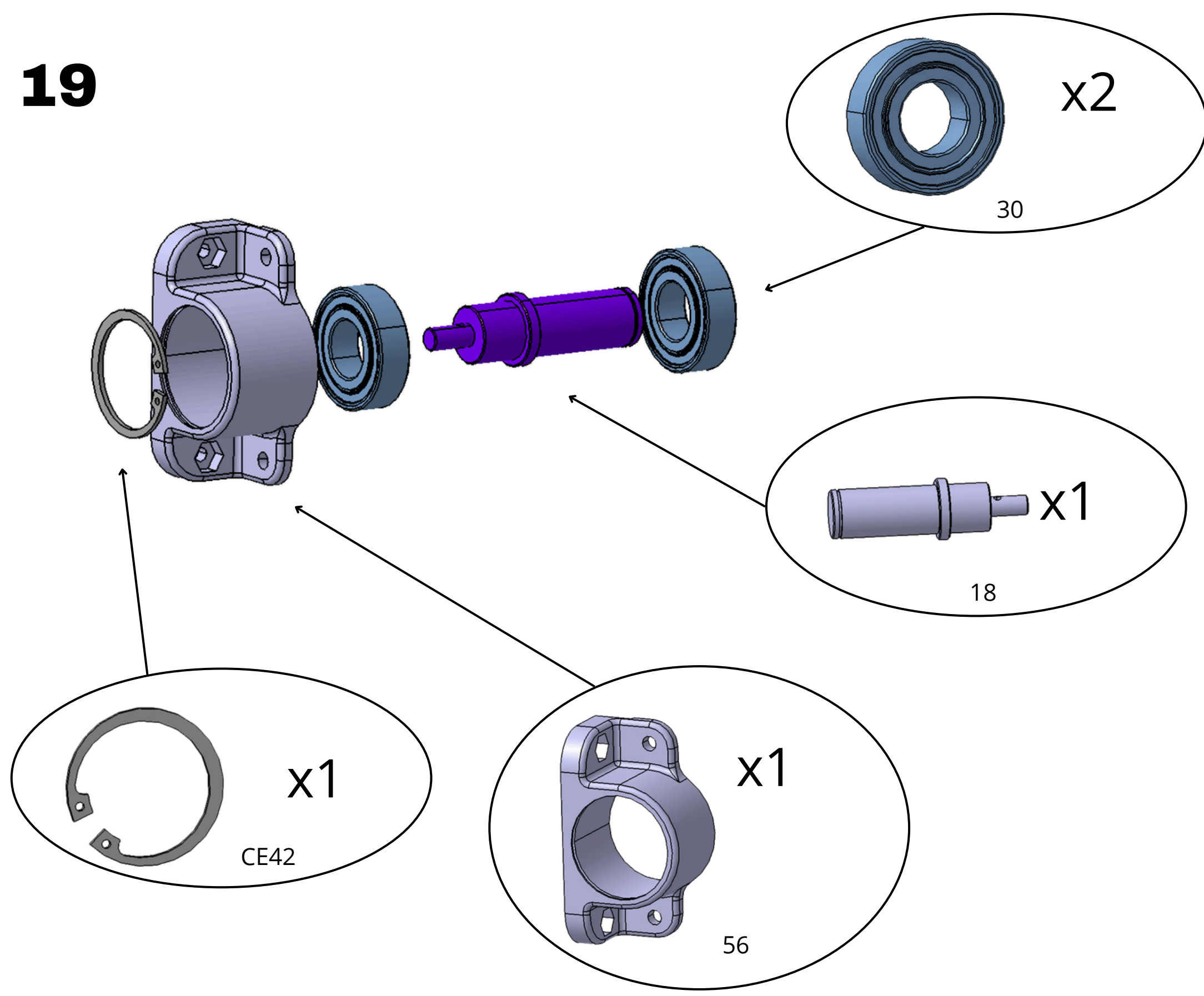


18

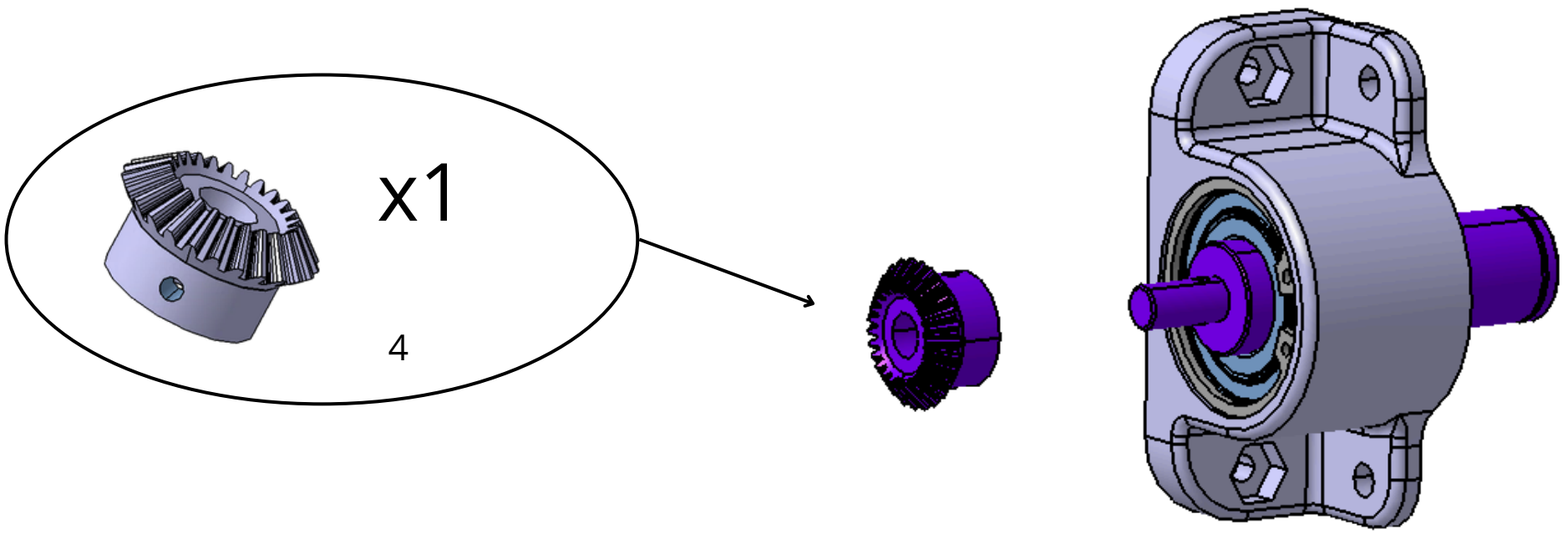


Réf. C

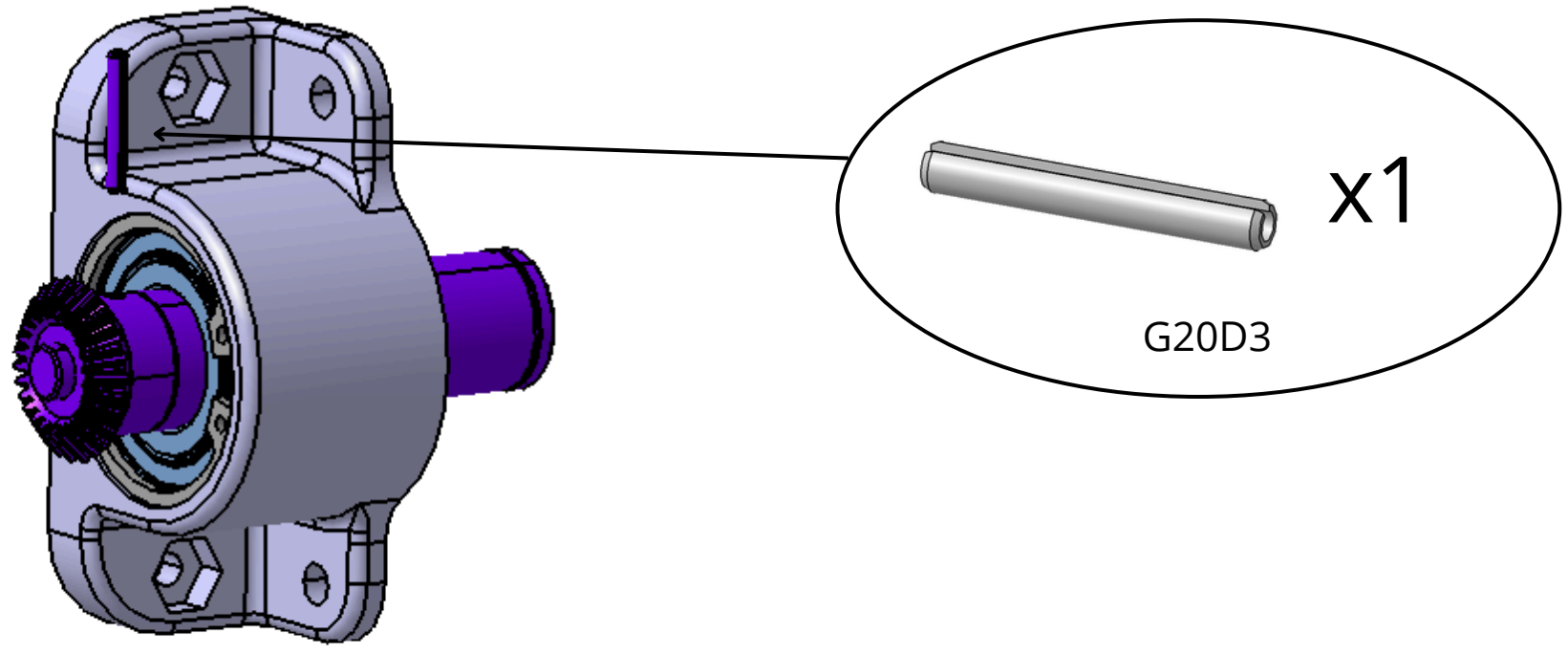
19



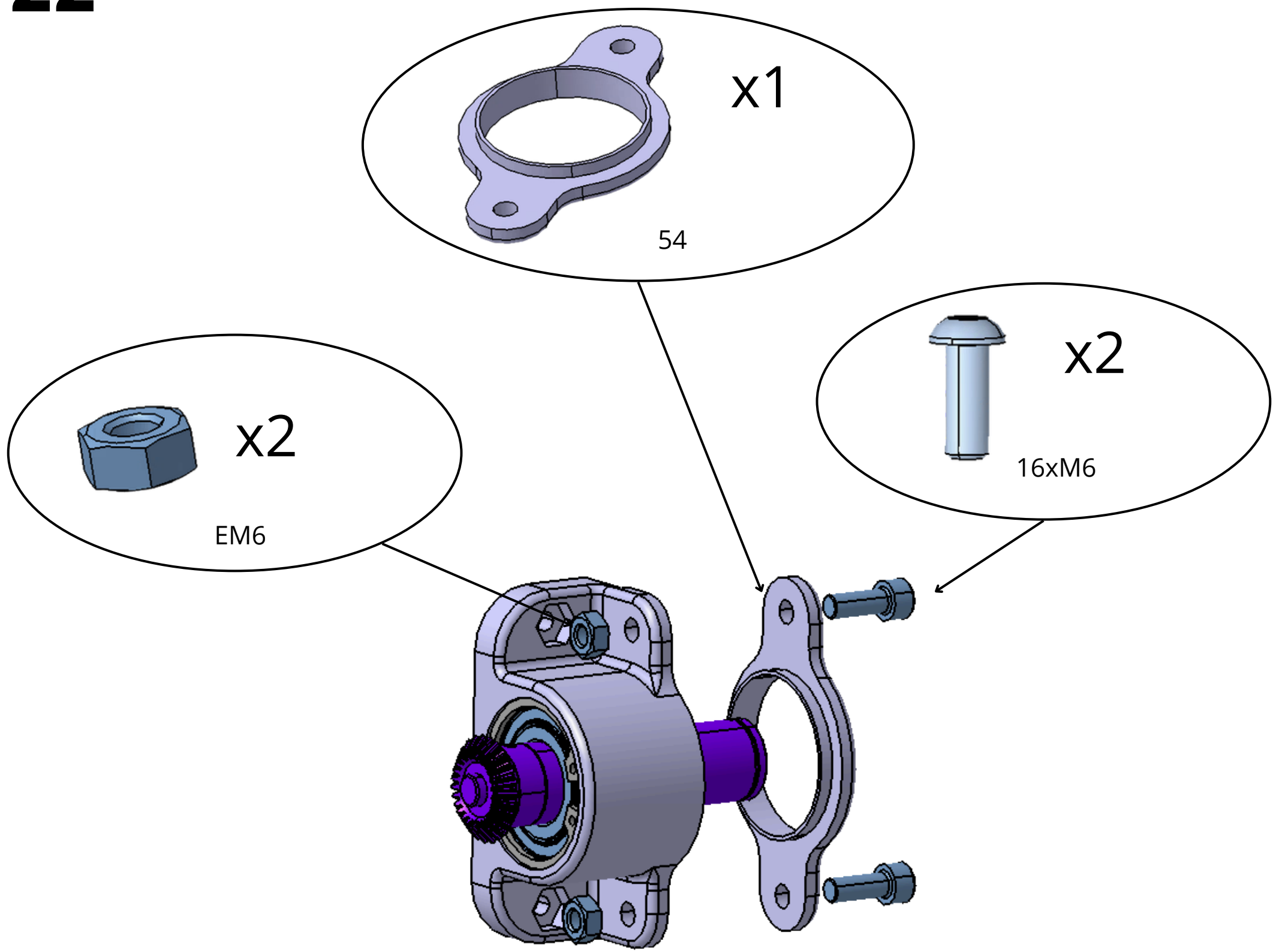
20



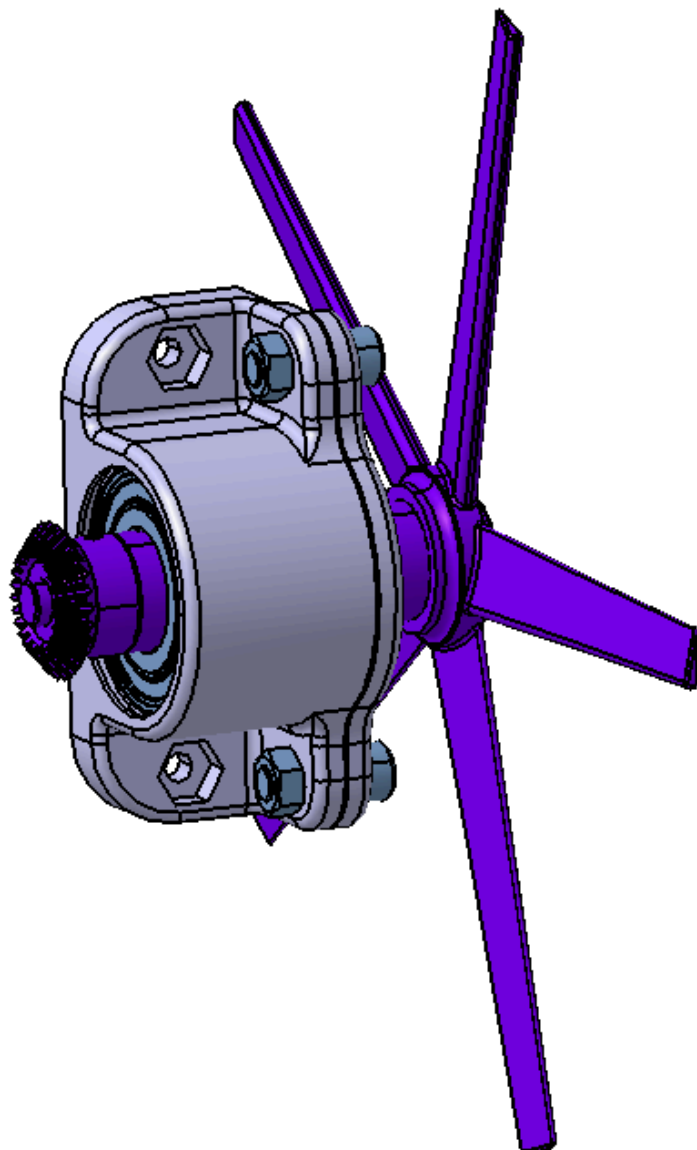
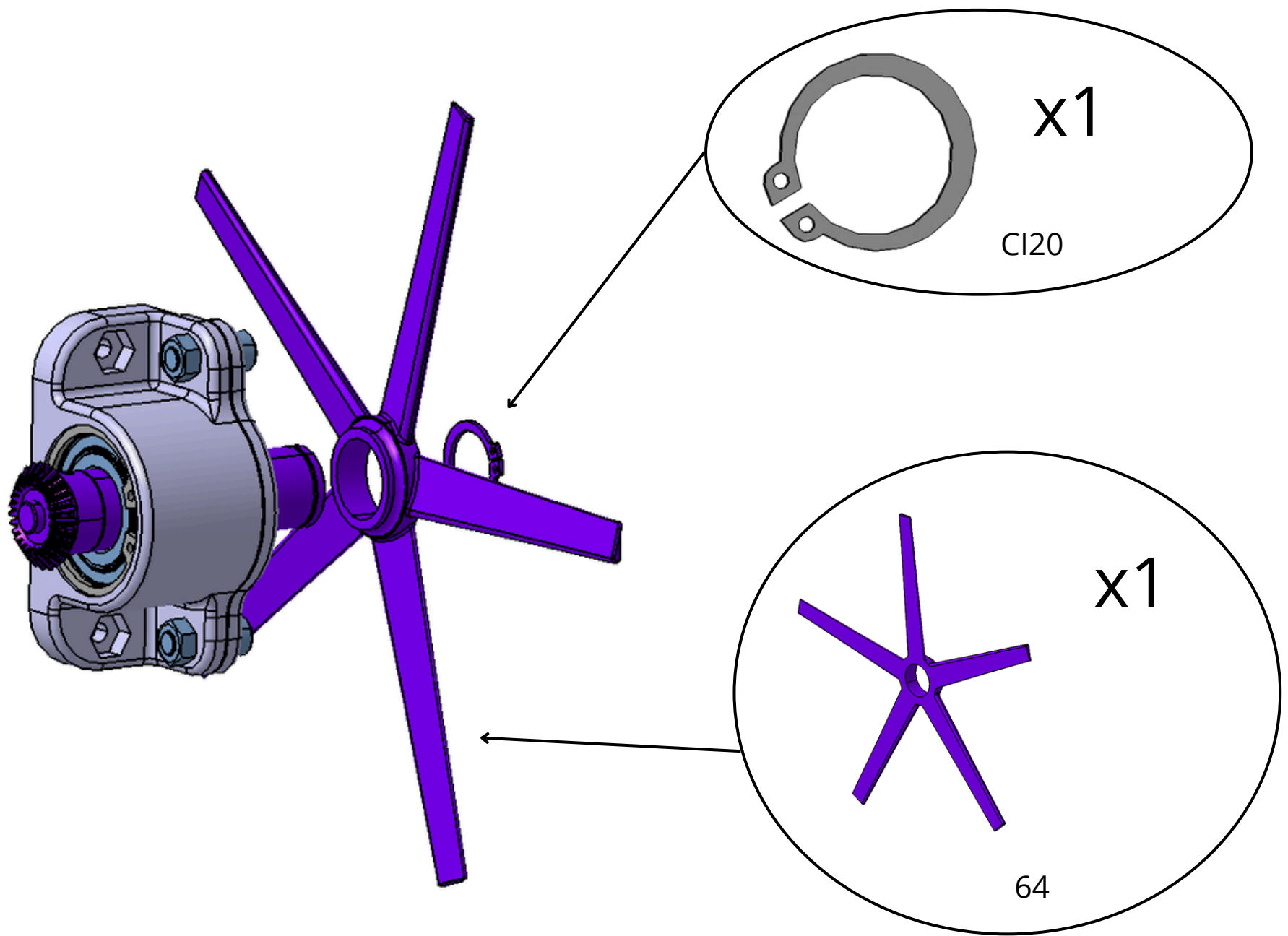
21



22

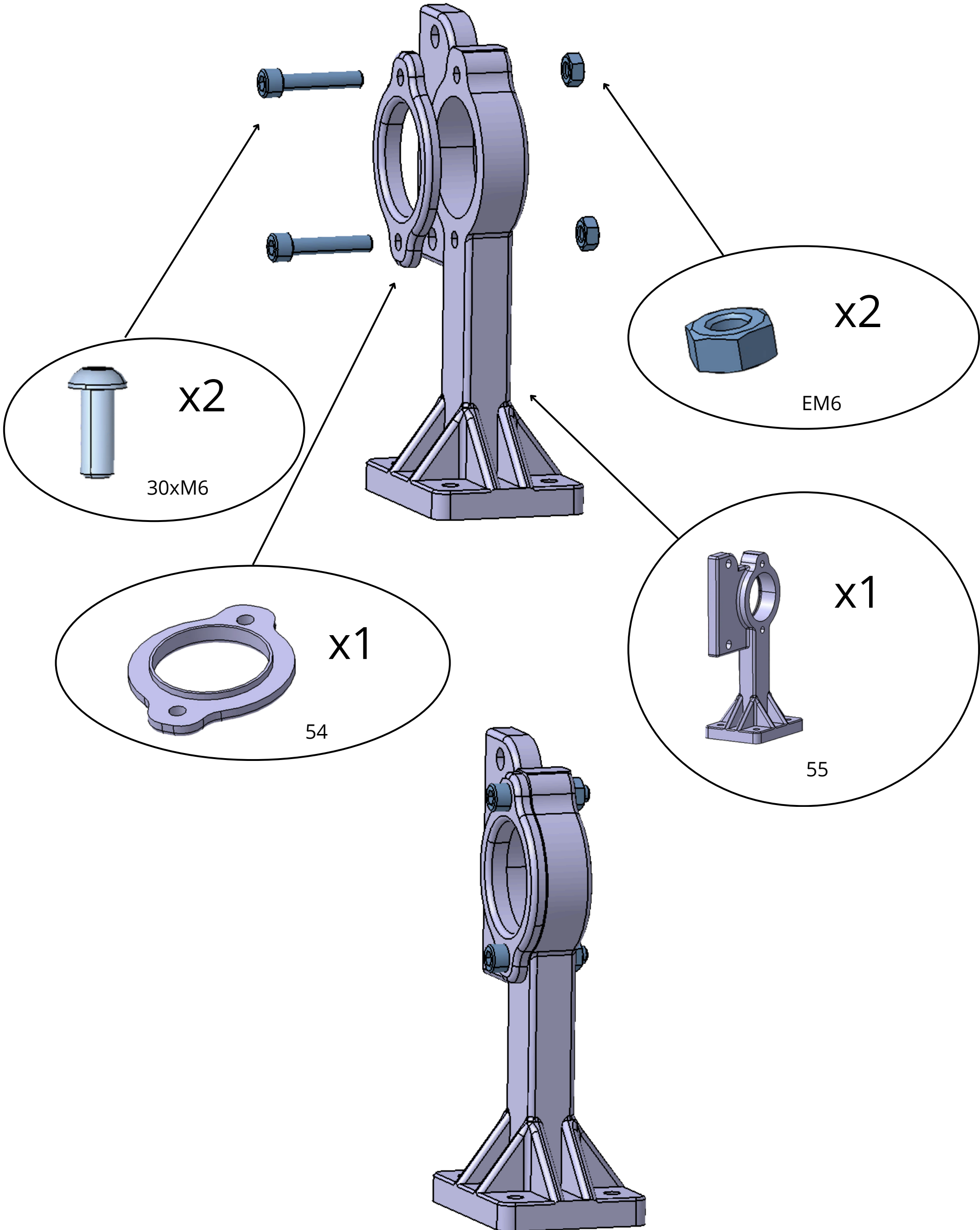


23



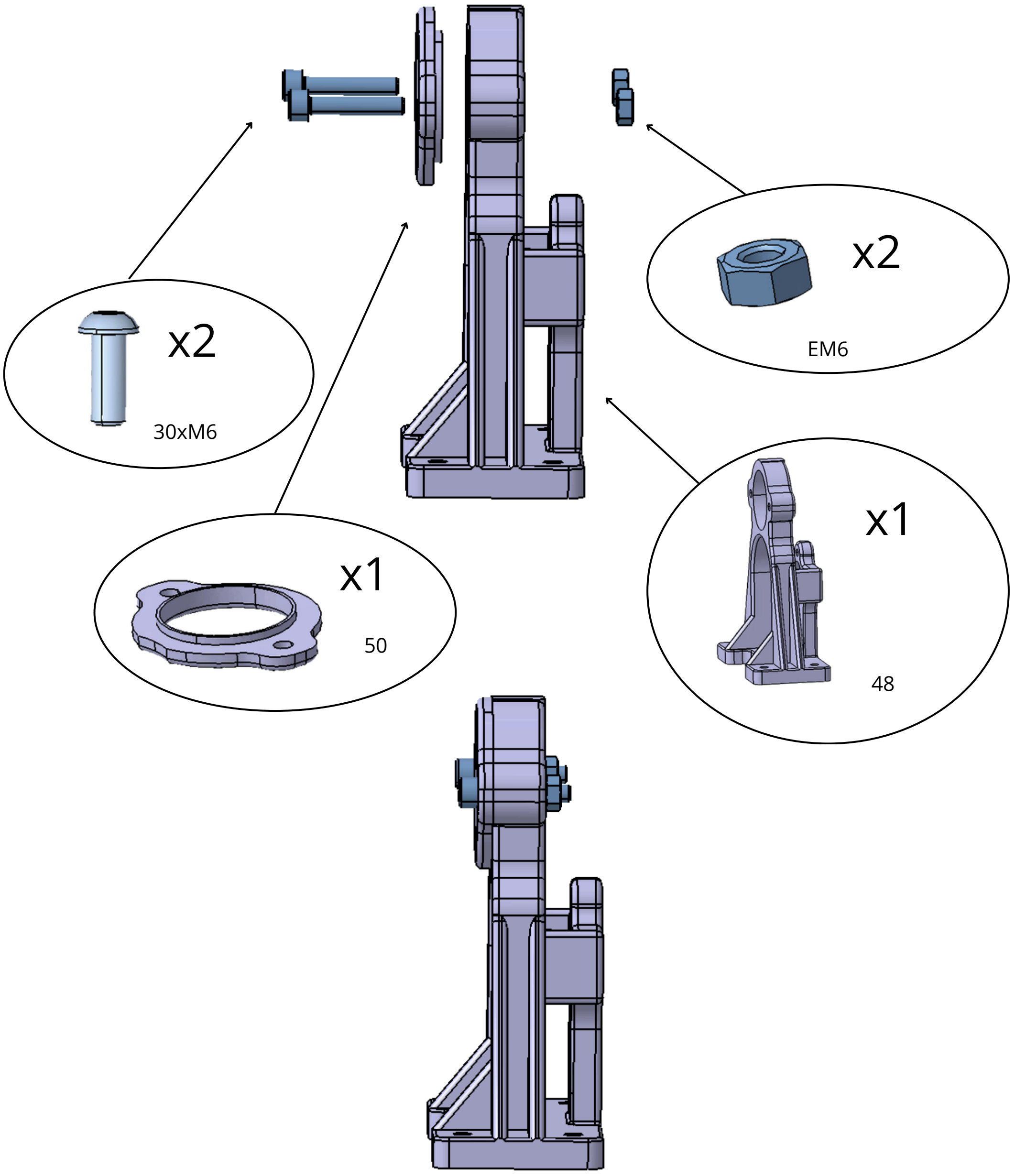
Réf. D

24

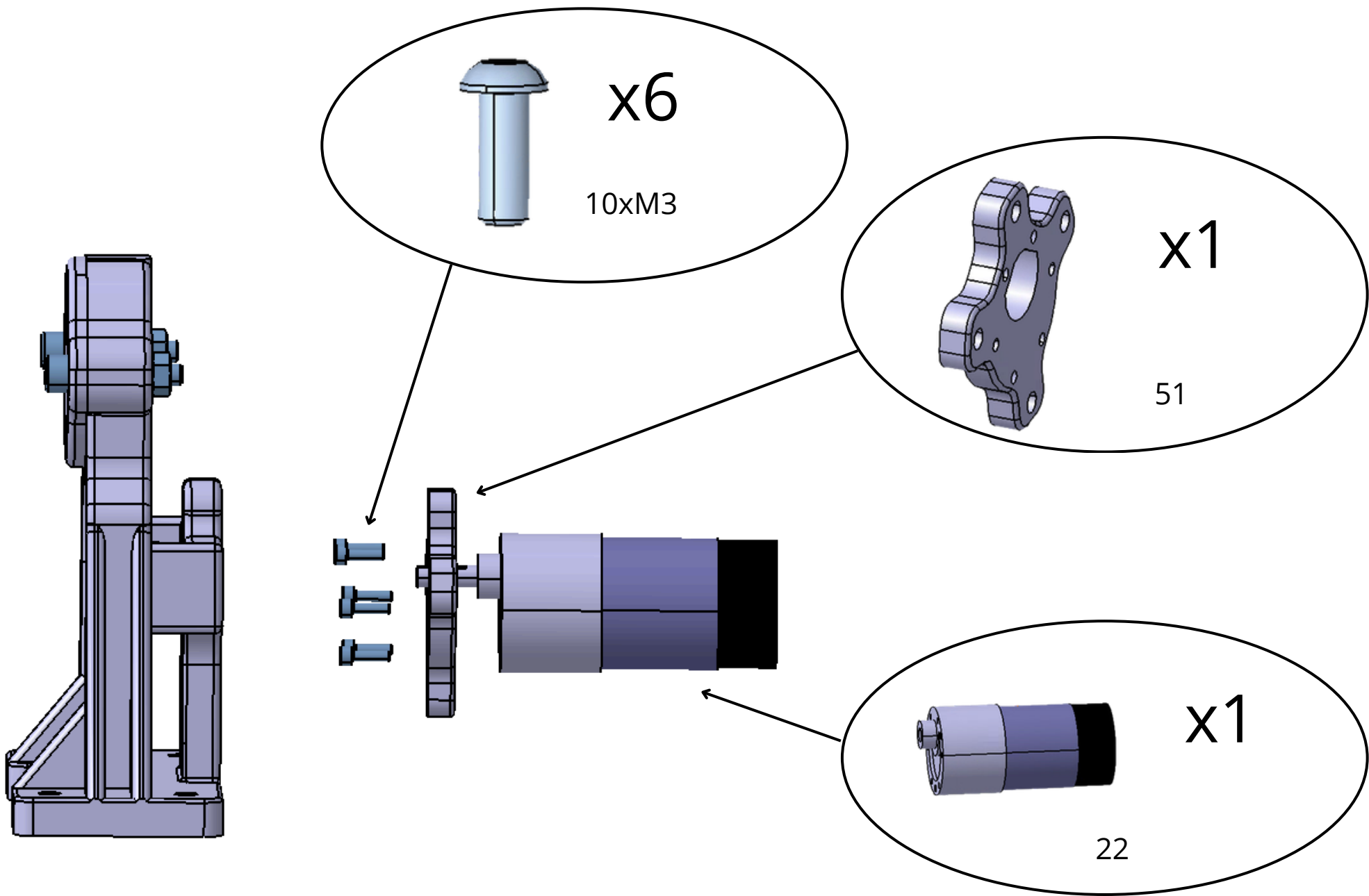


Réf. E

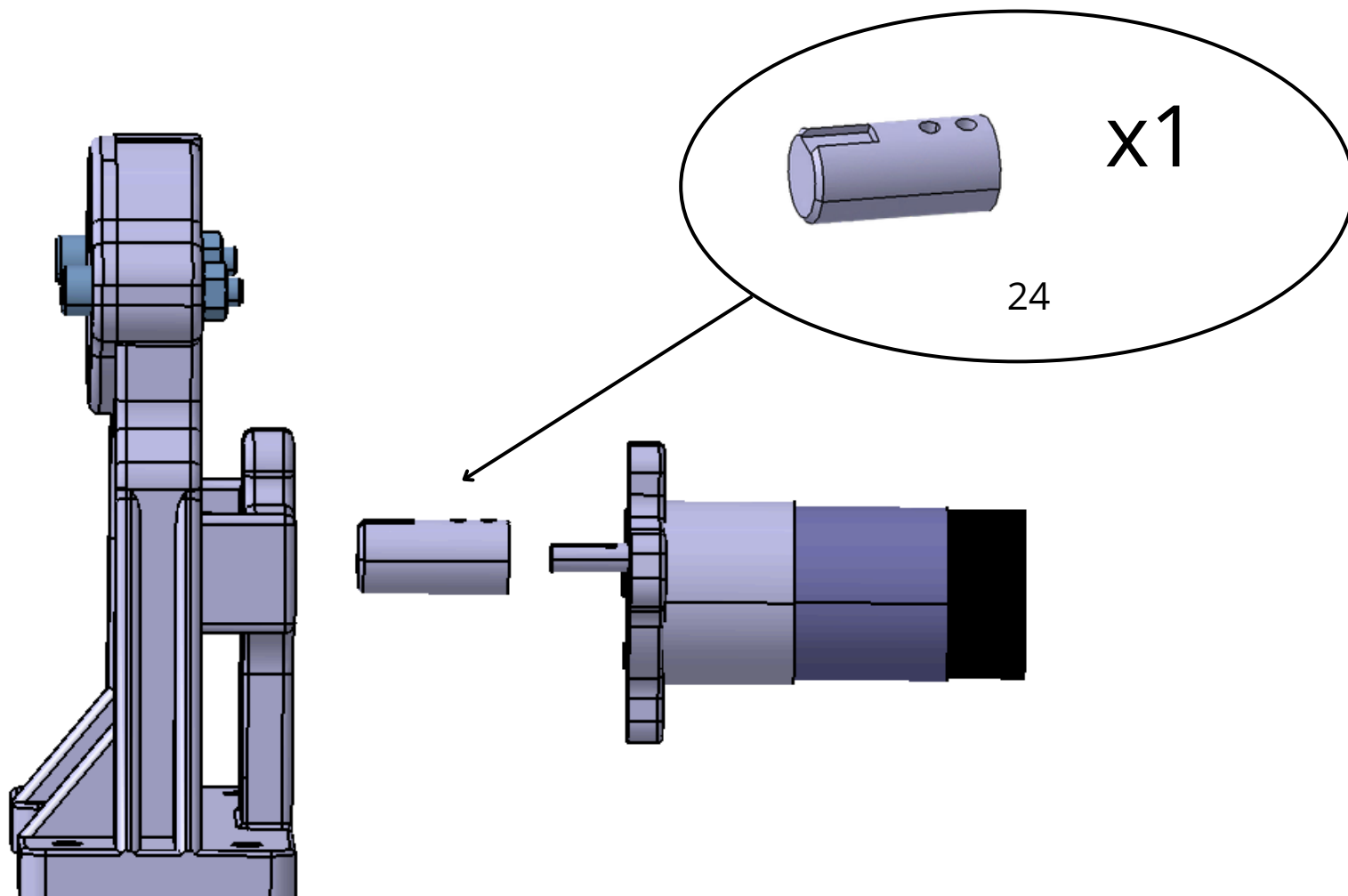
25



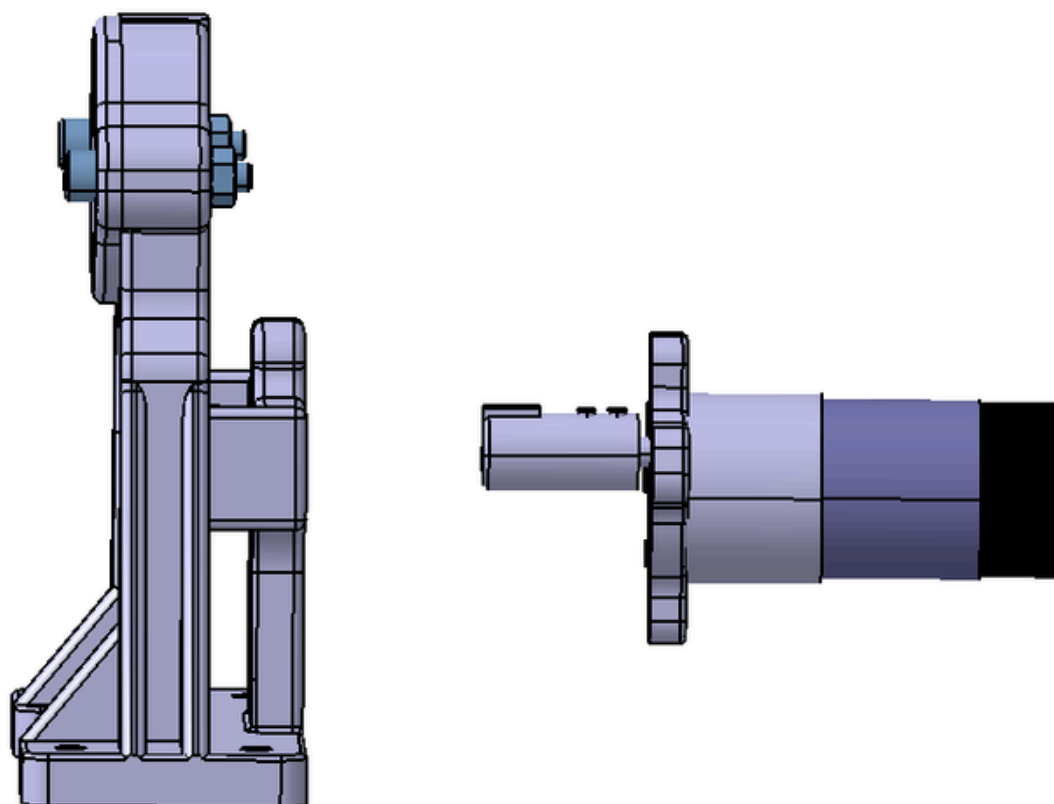
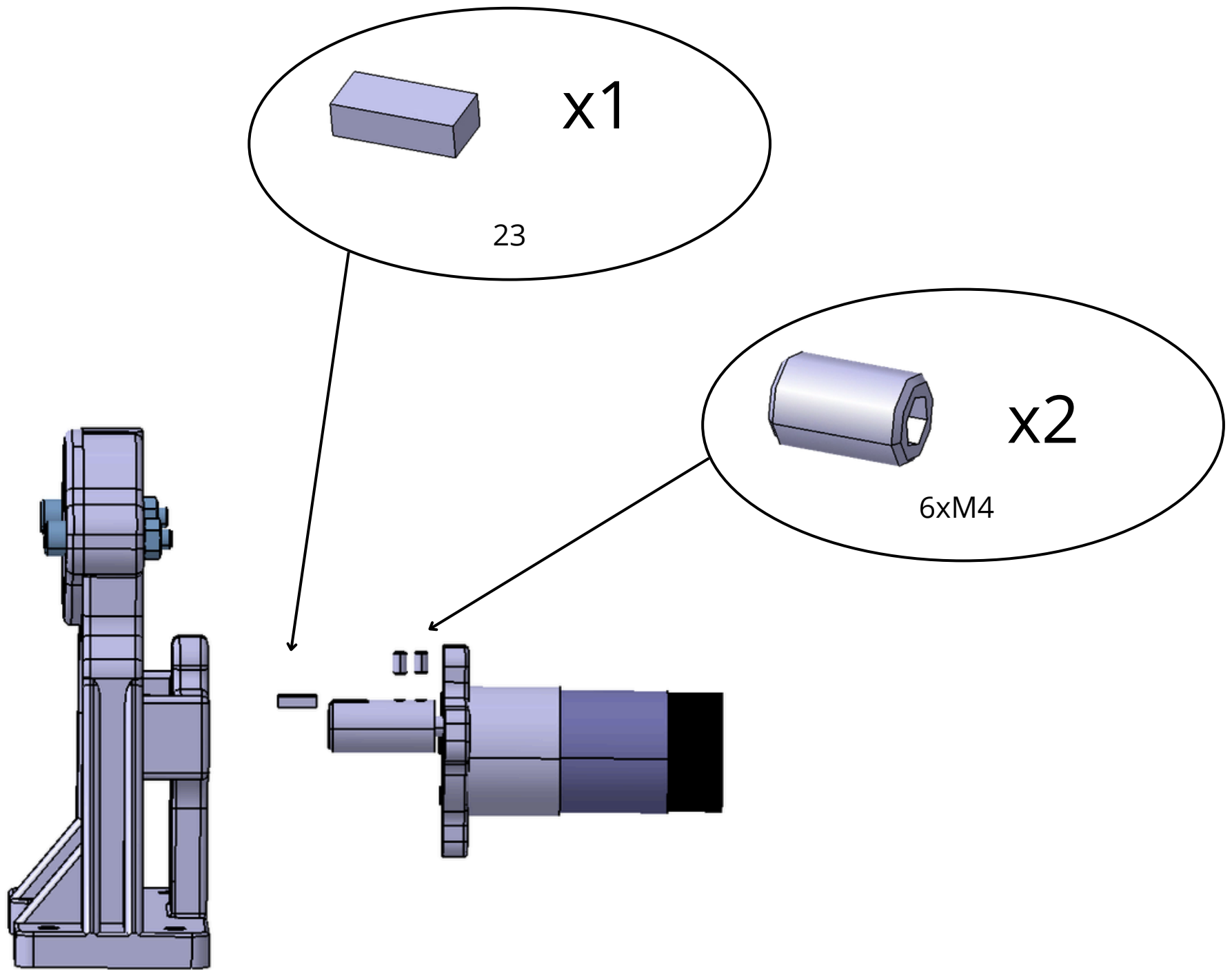
26



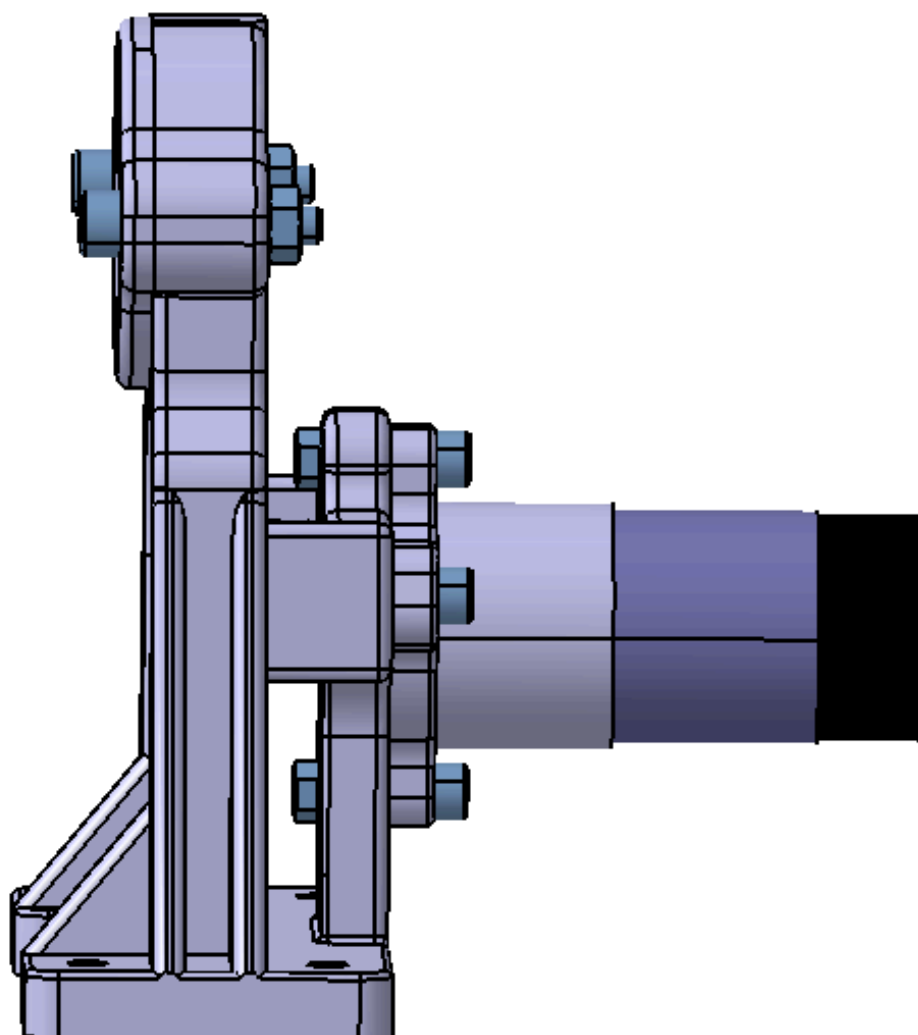
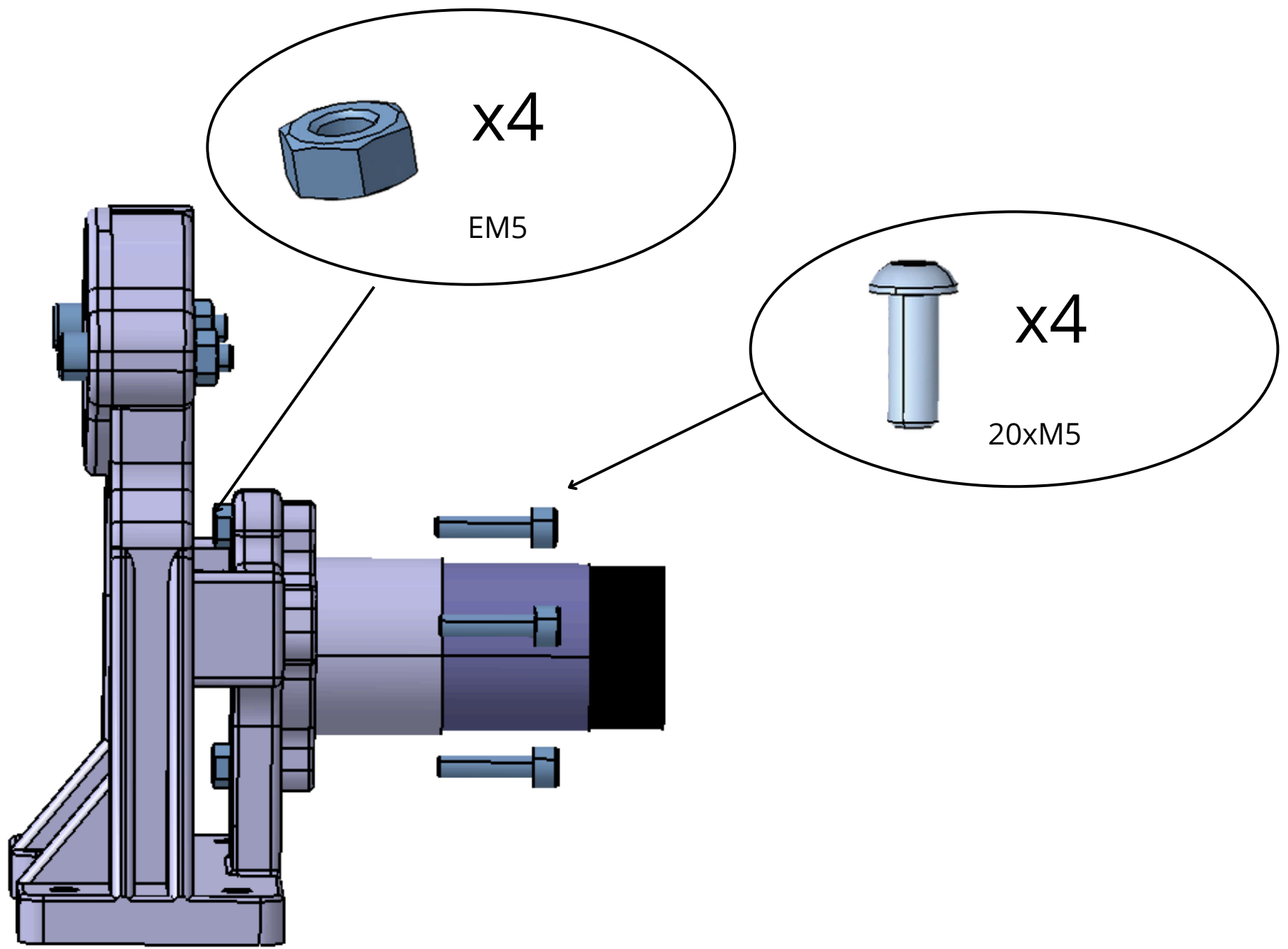
27



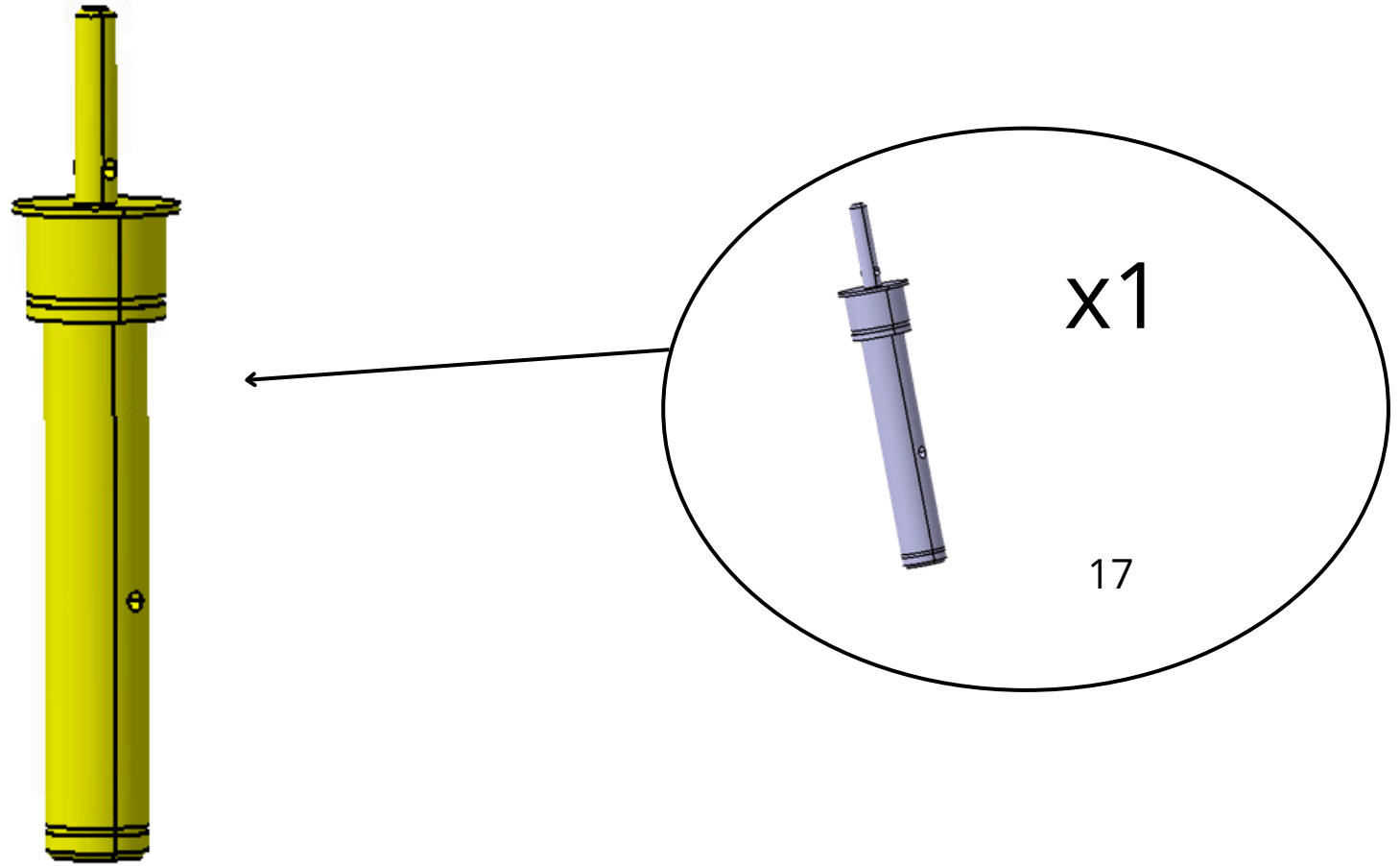
28



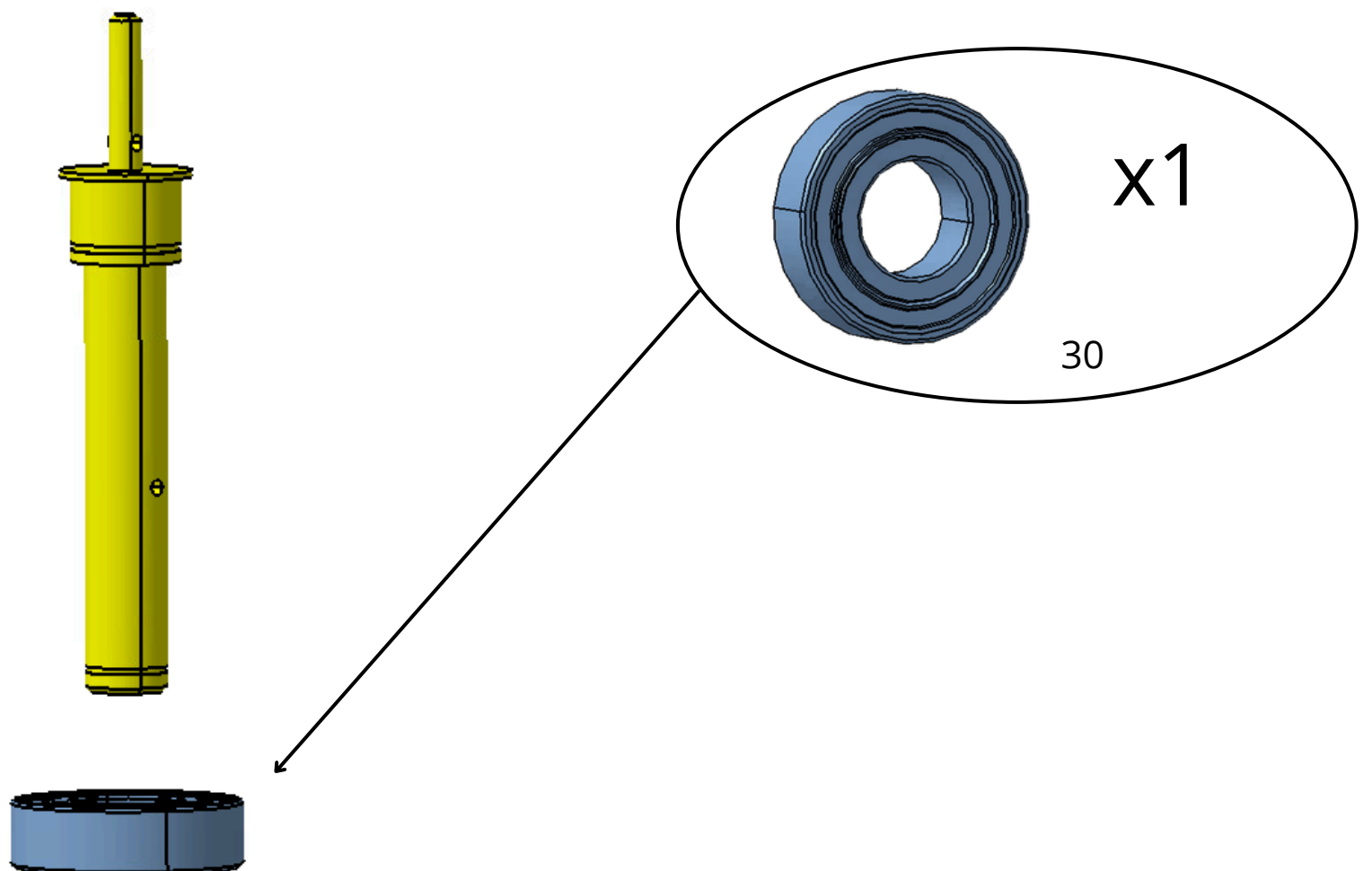
29



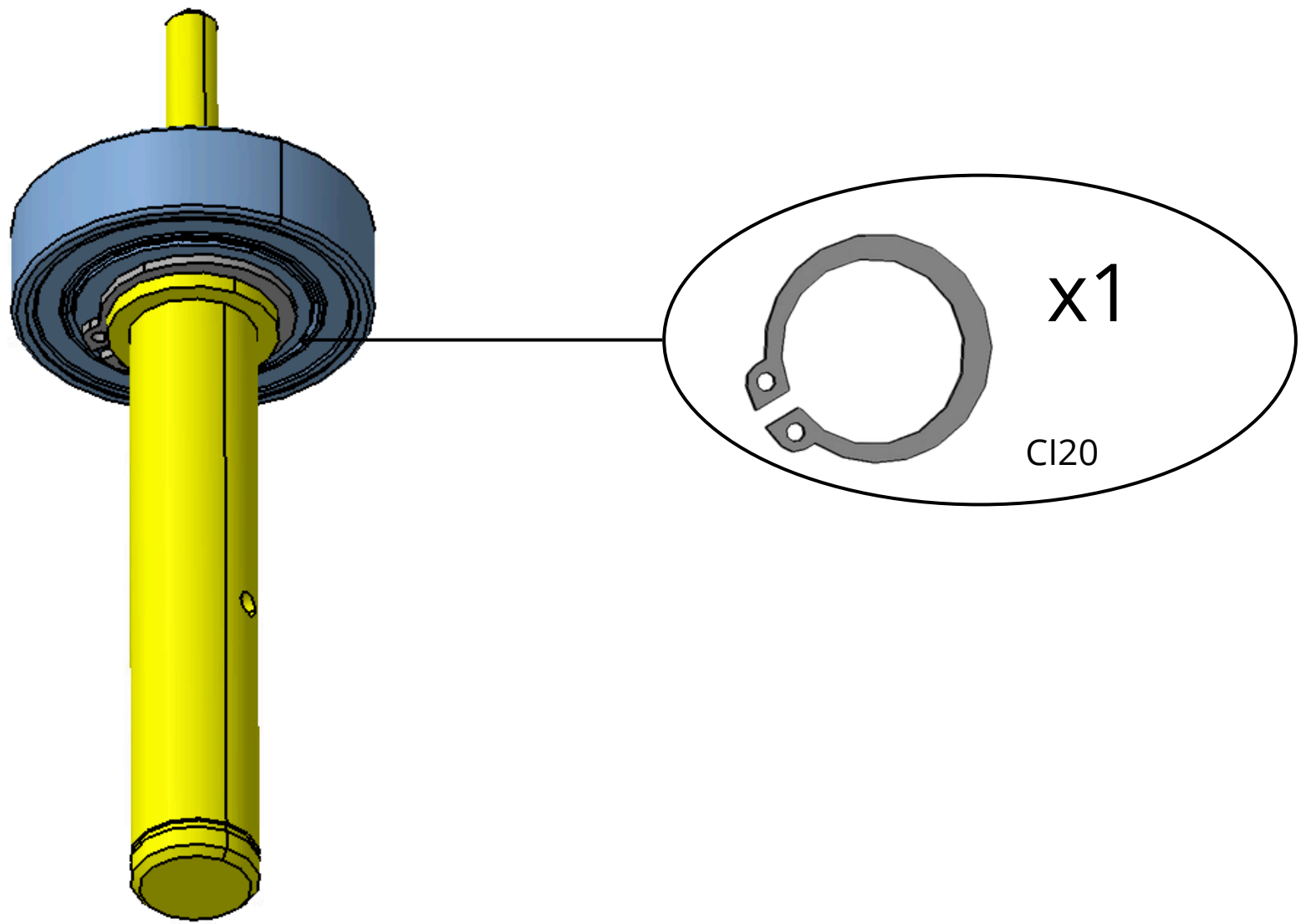
30



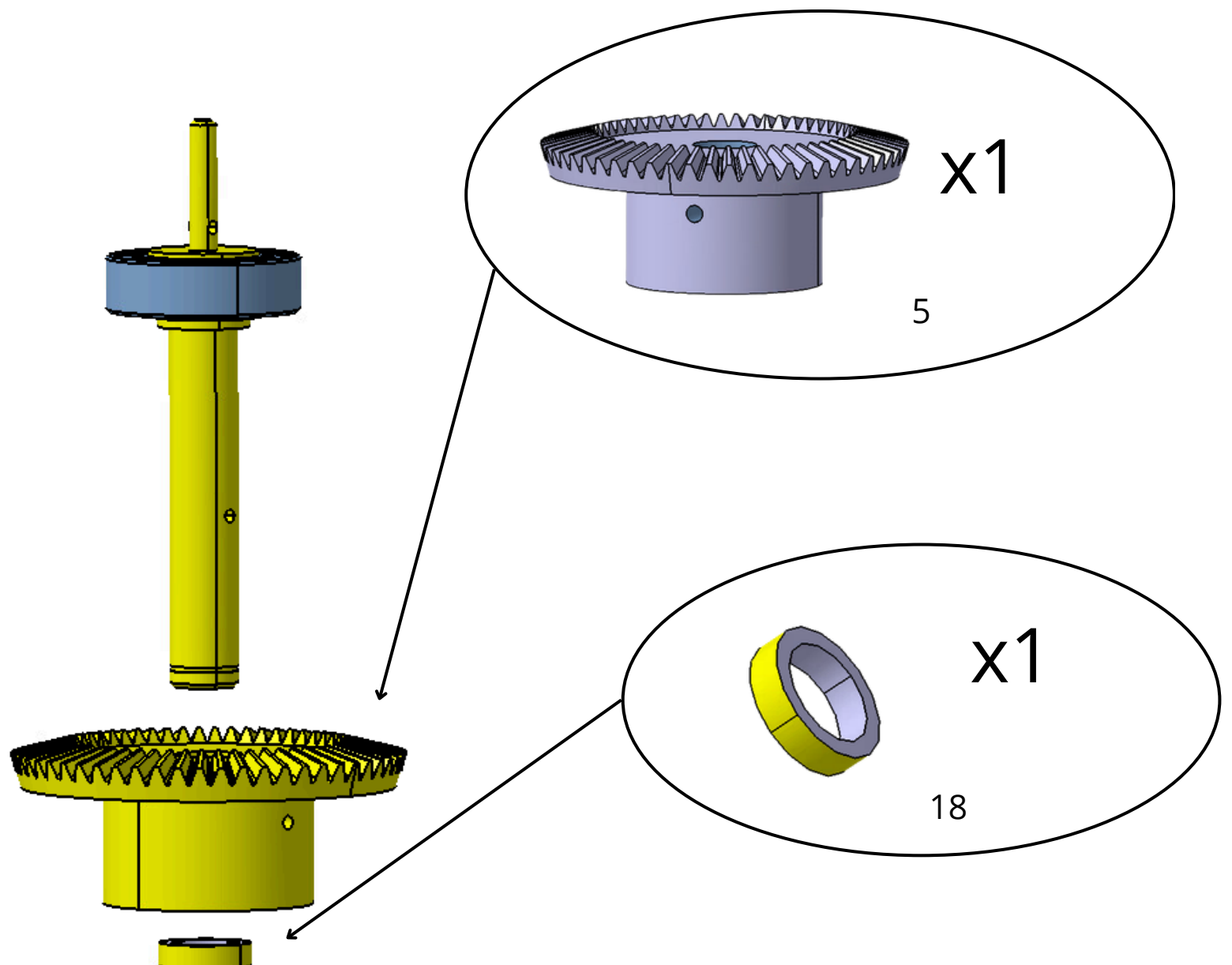
31



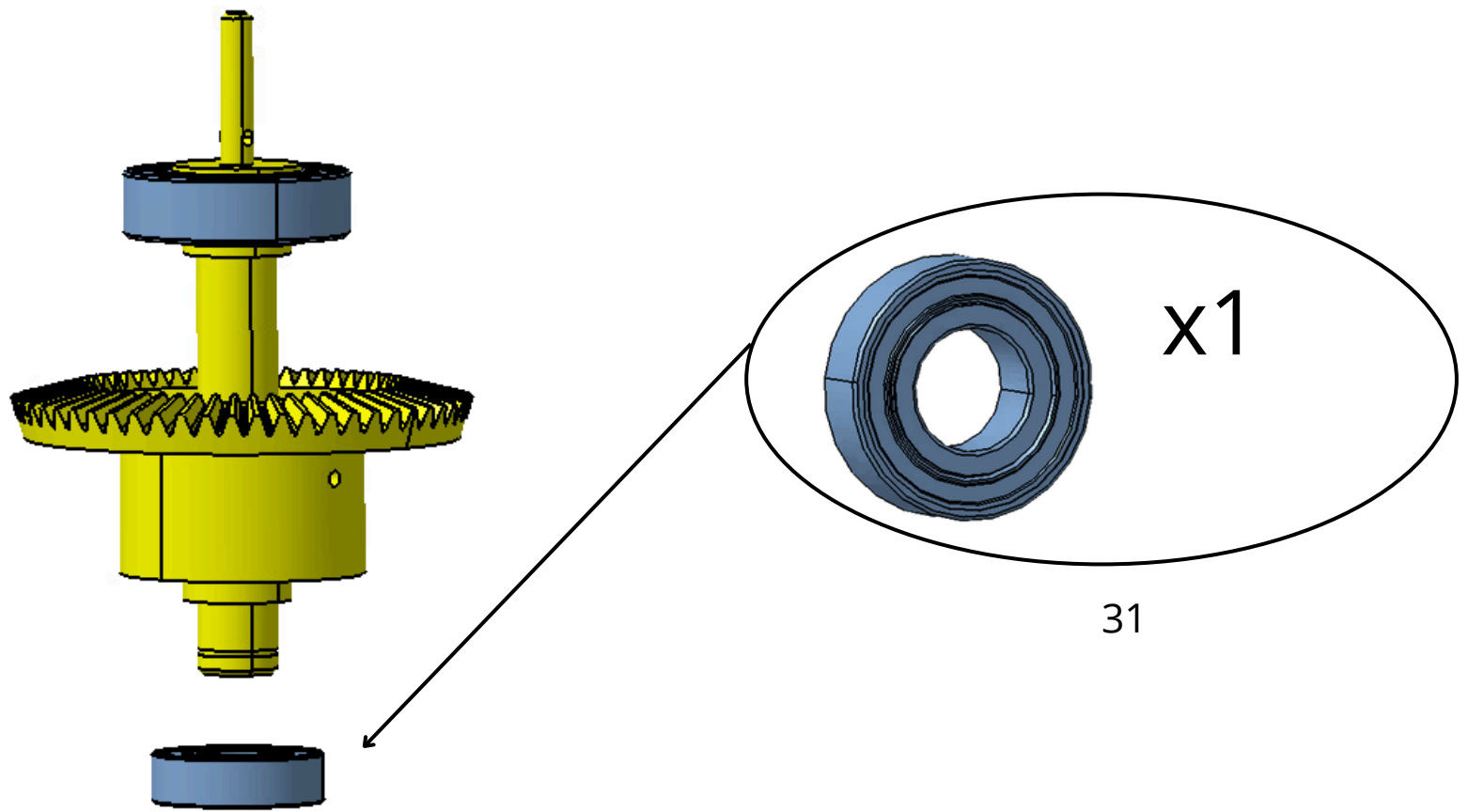
32



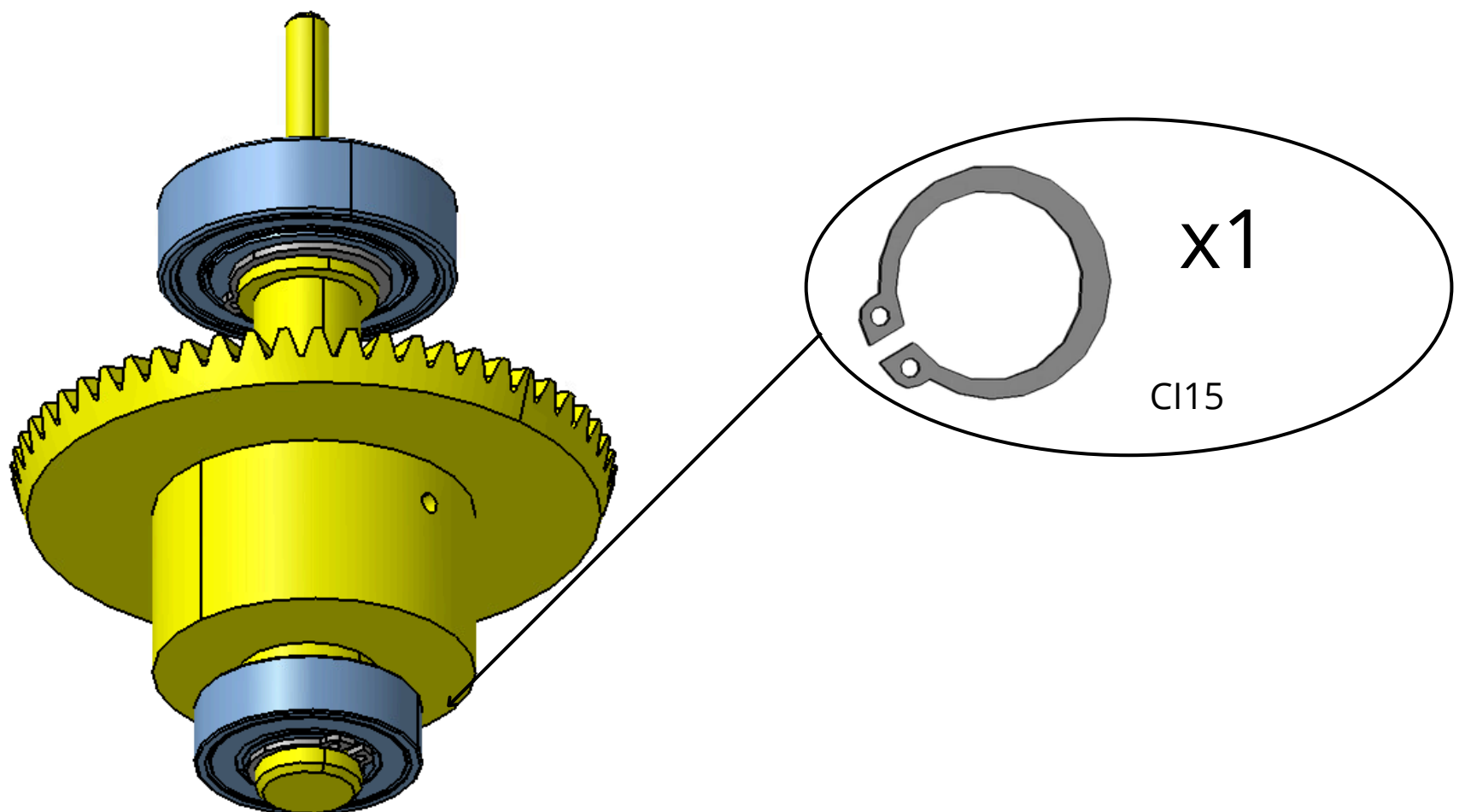
33



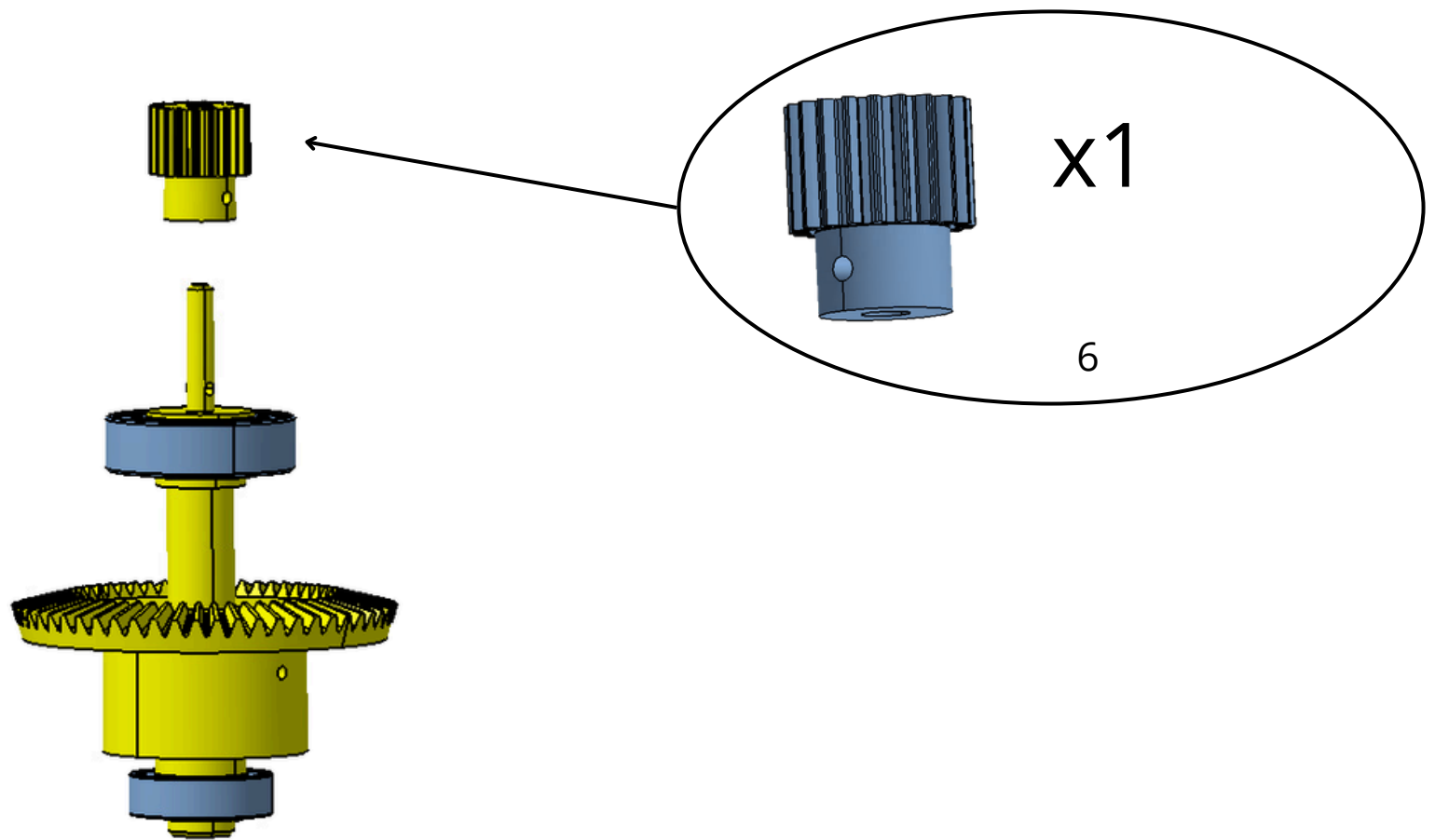
34



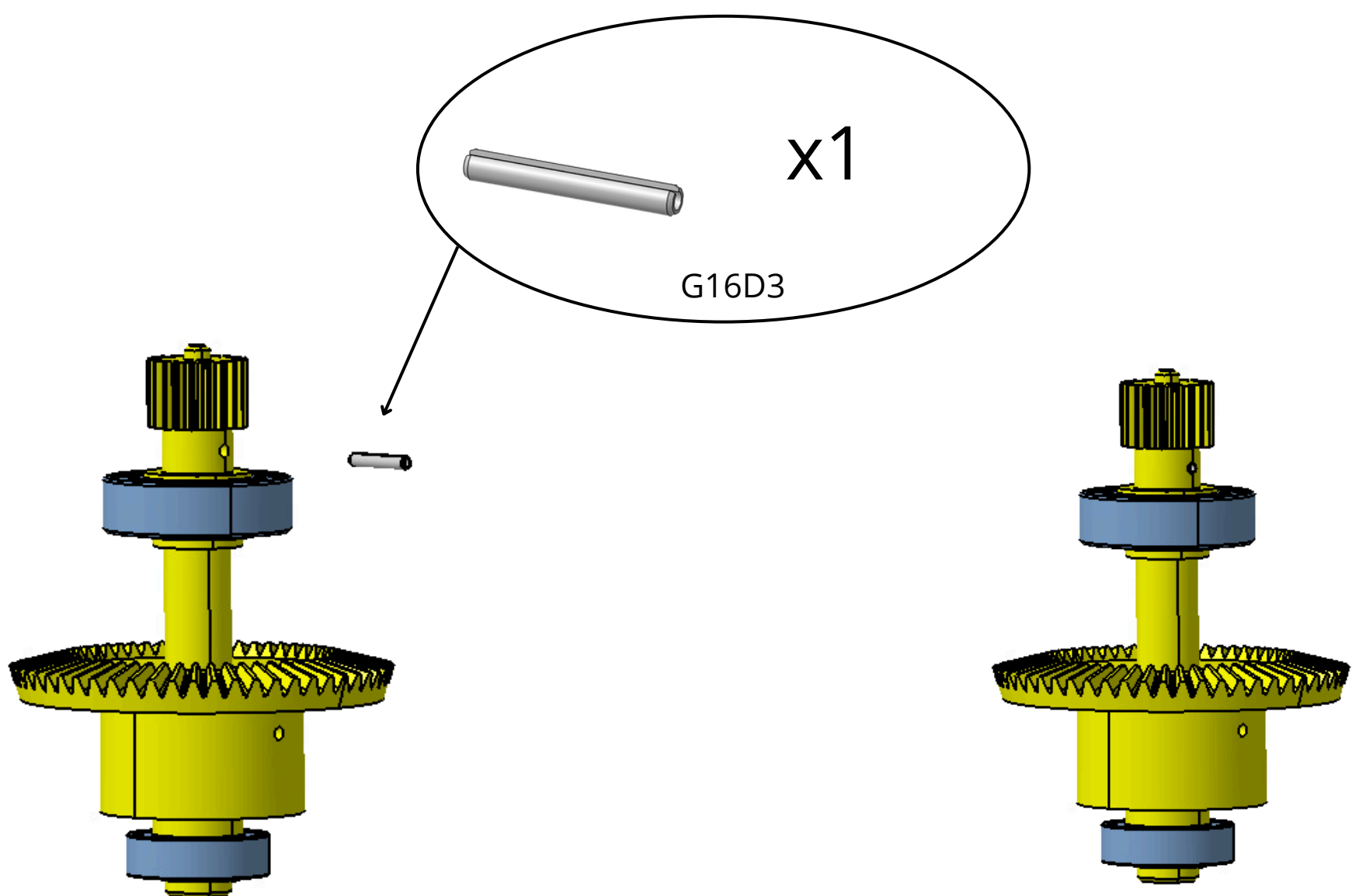
35



36

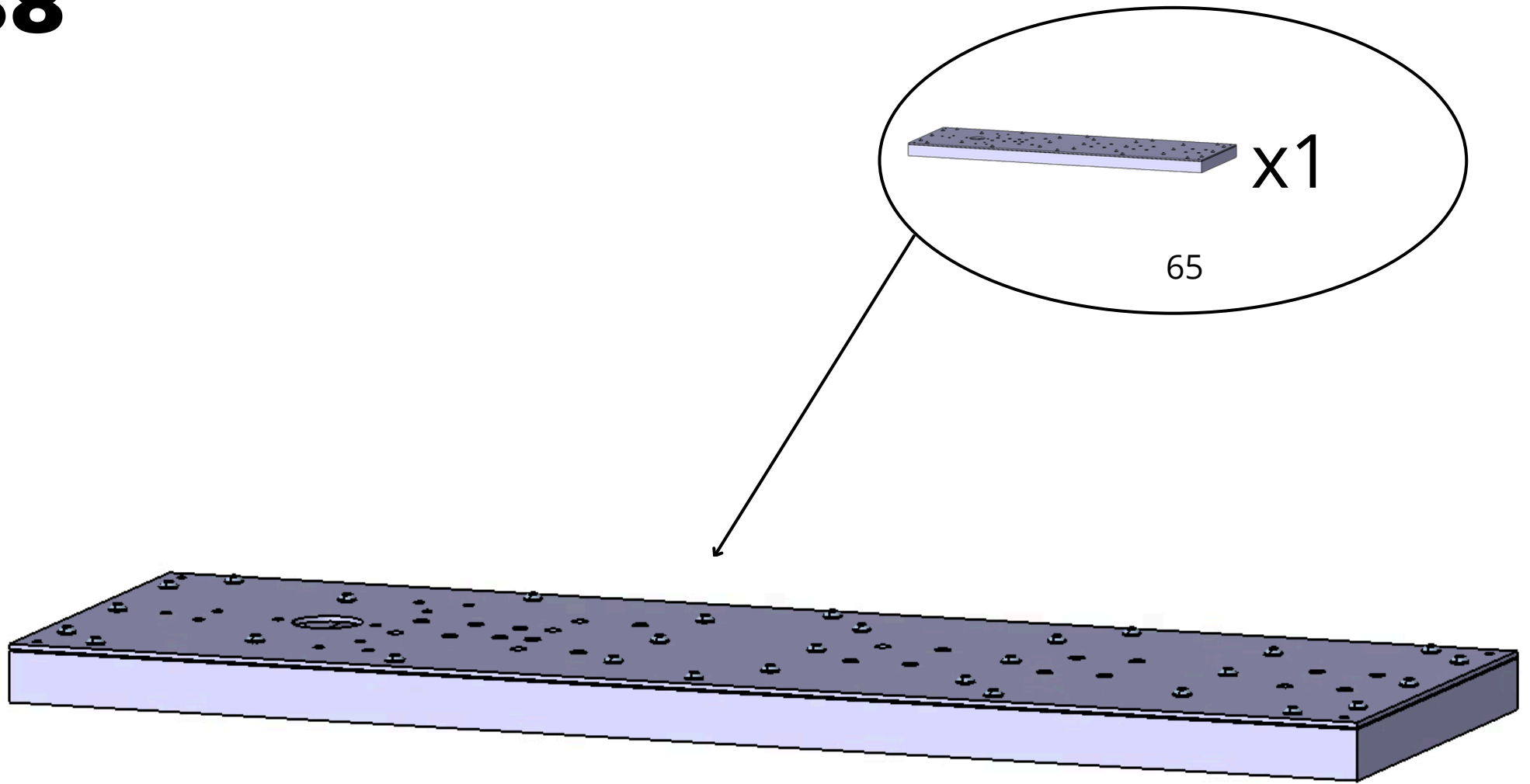


37

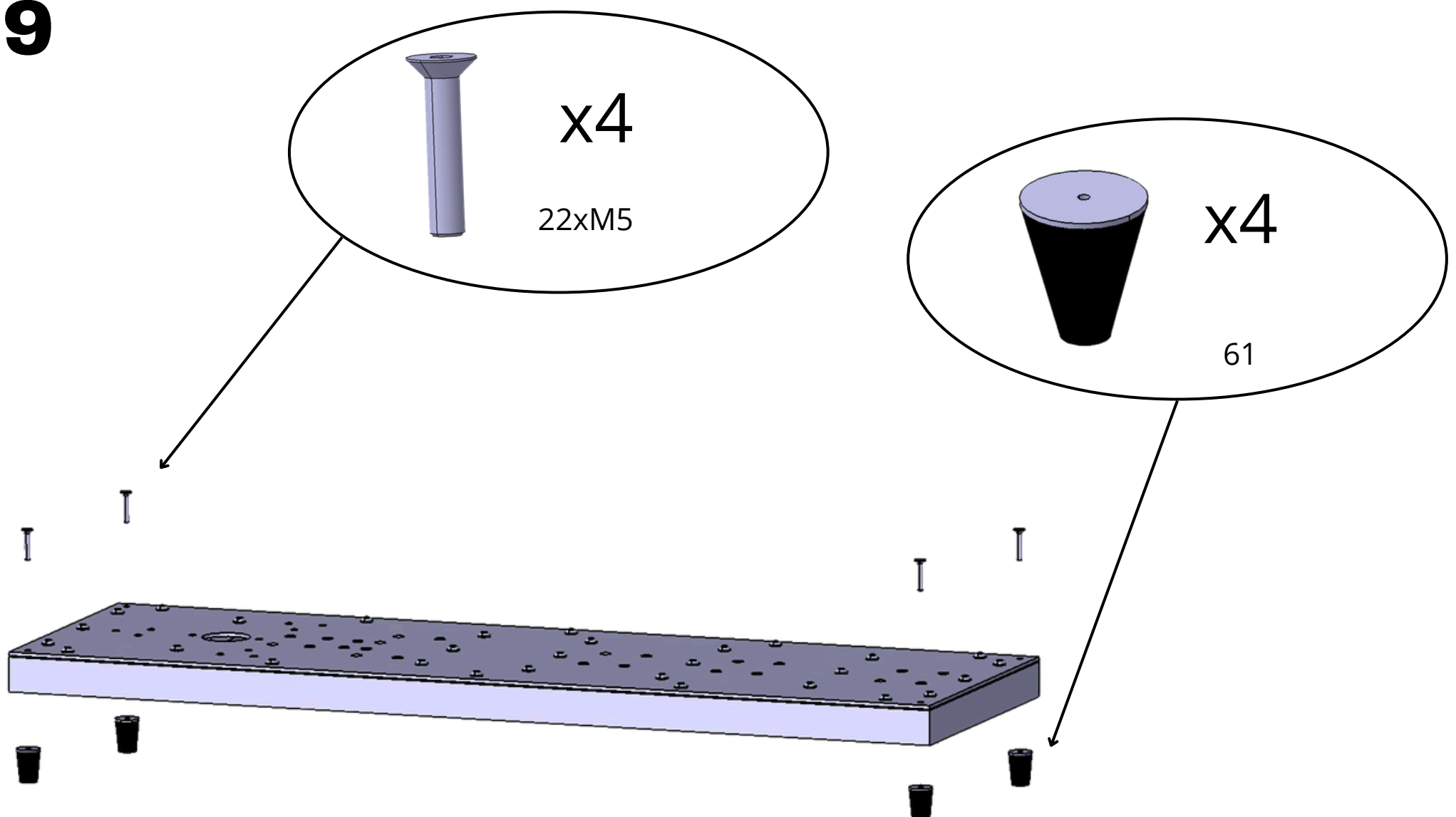


Réf. G

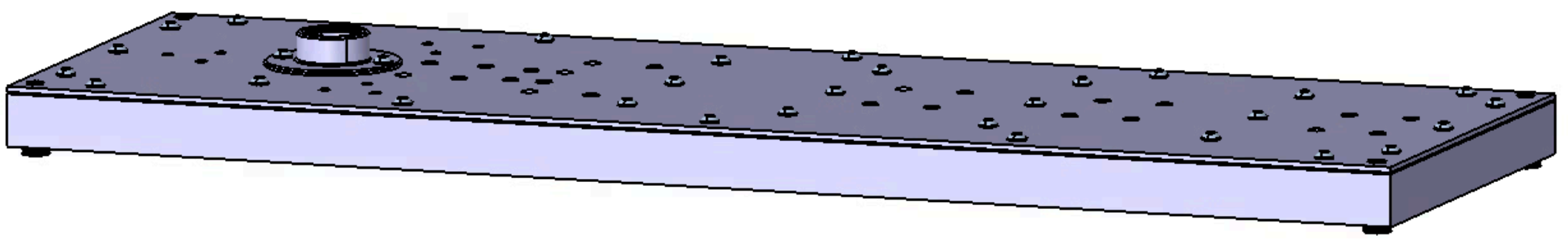
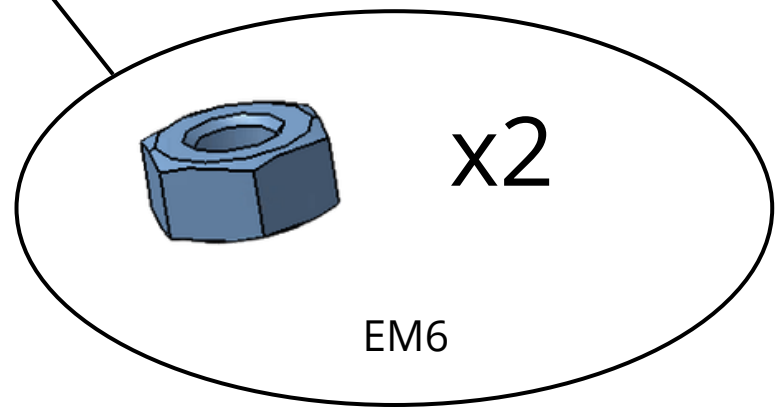
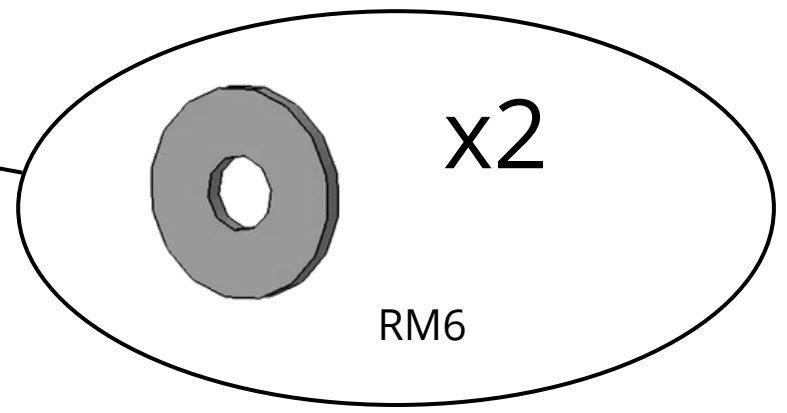
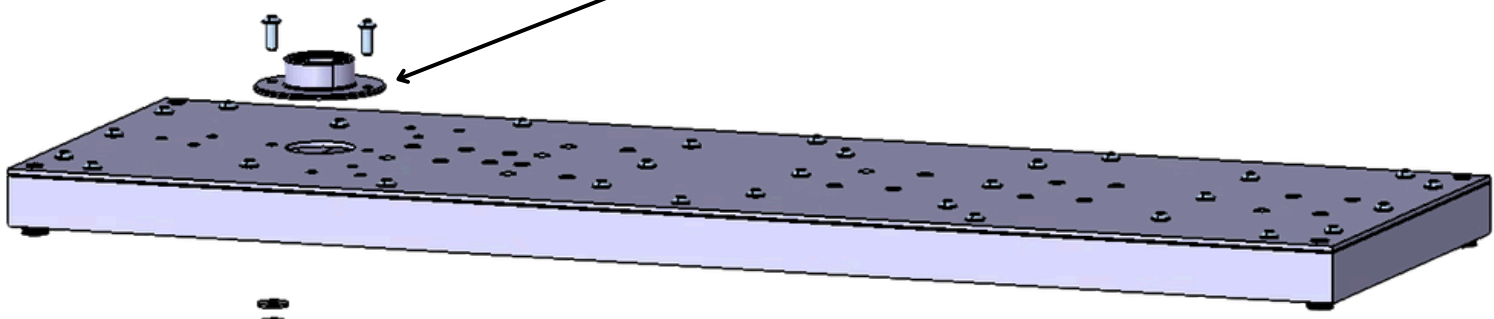
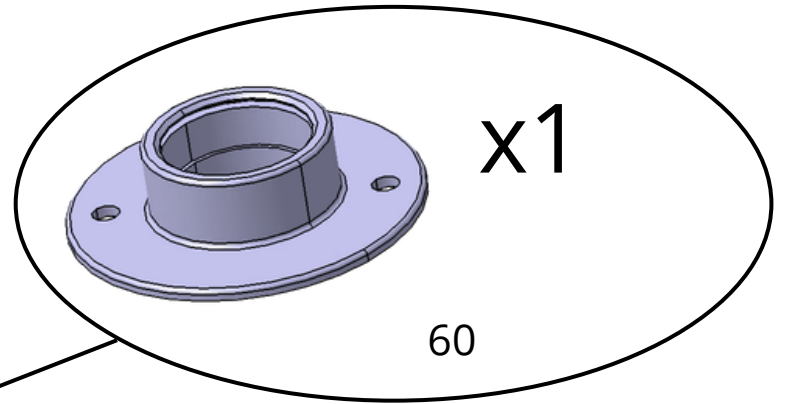
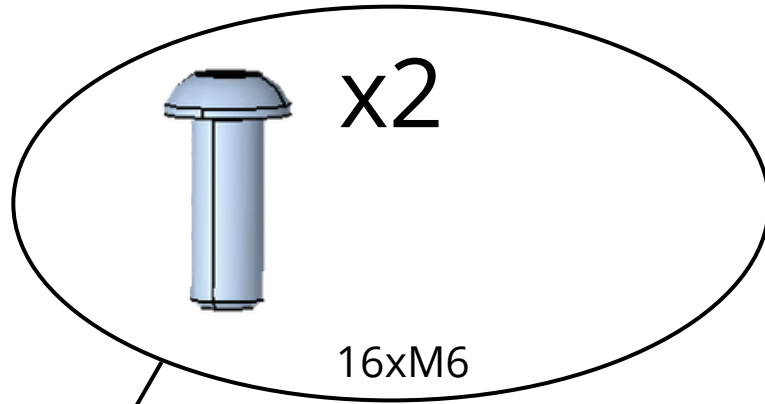
38



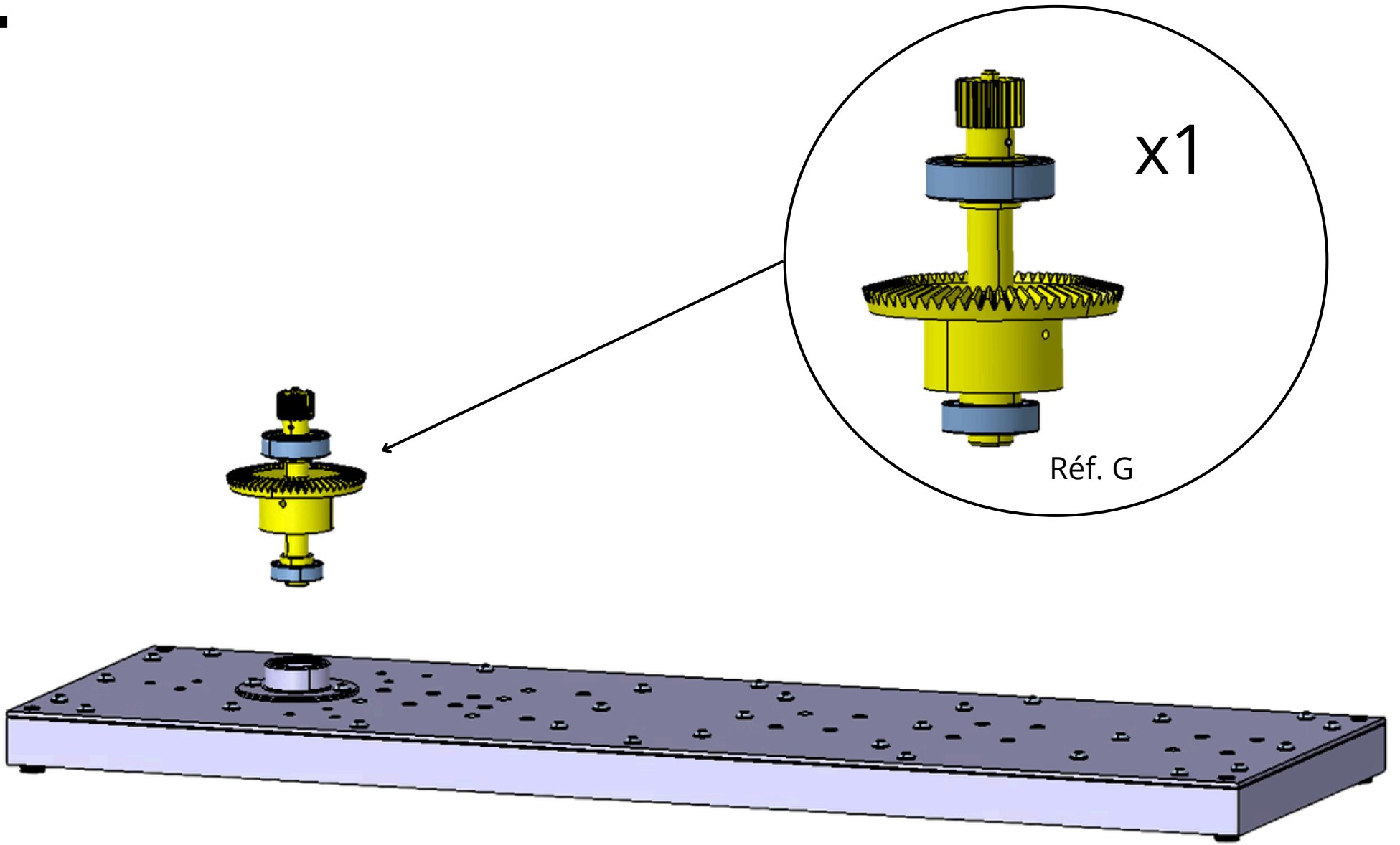
39



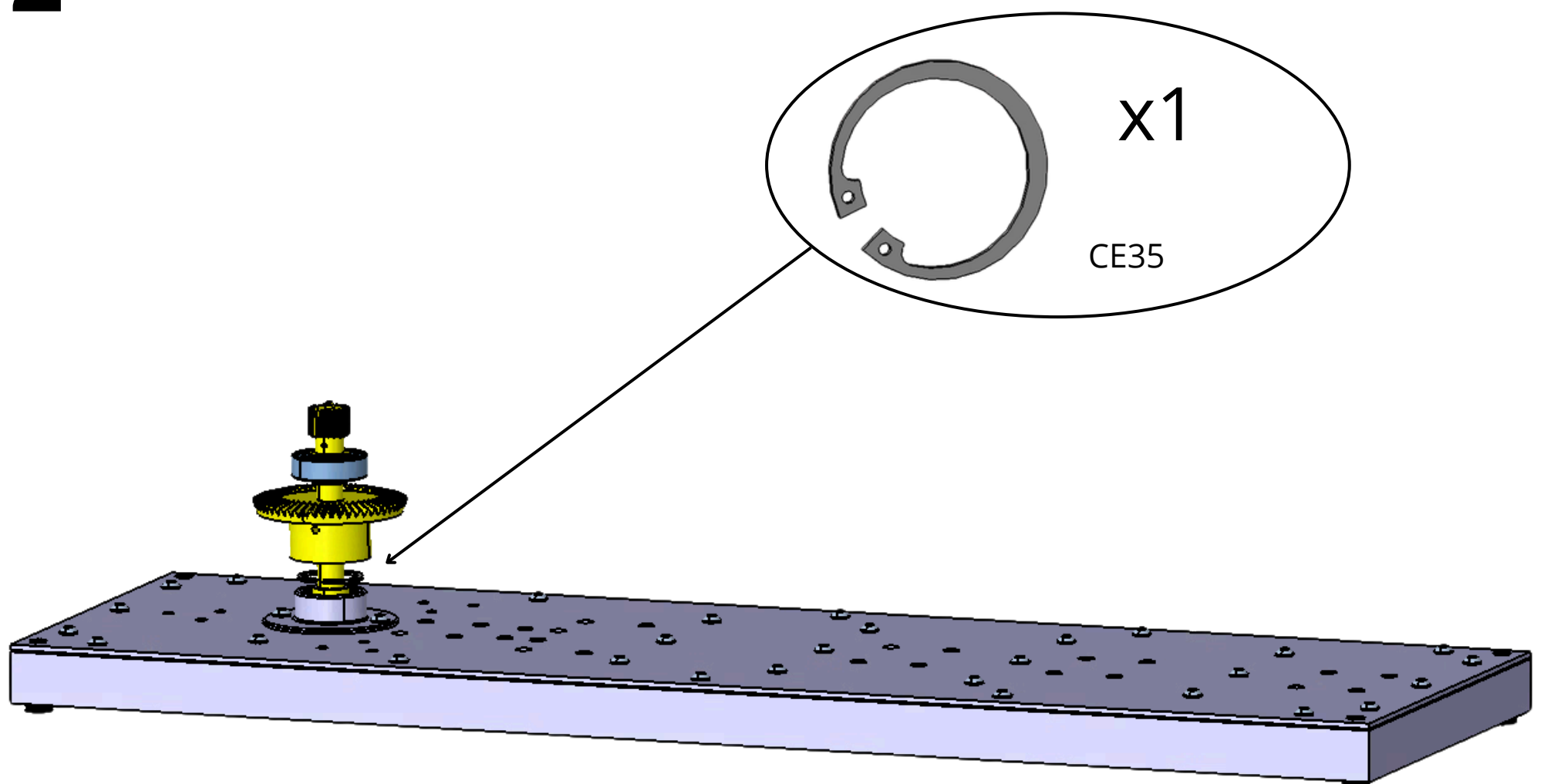
40



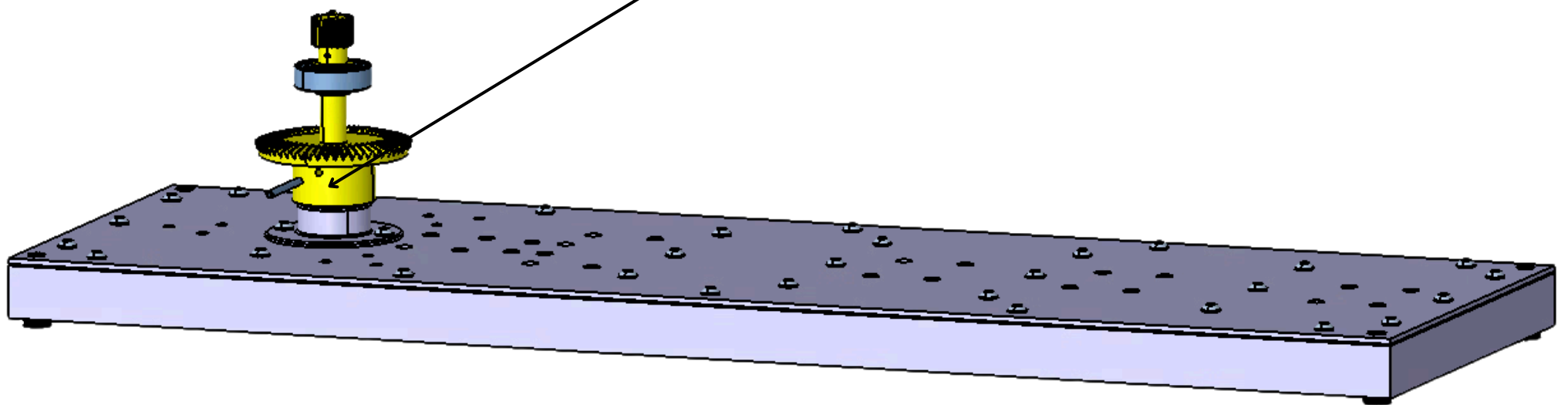
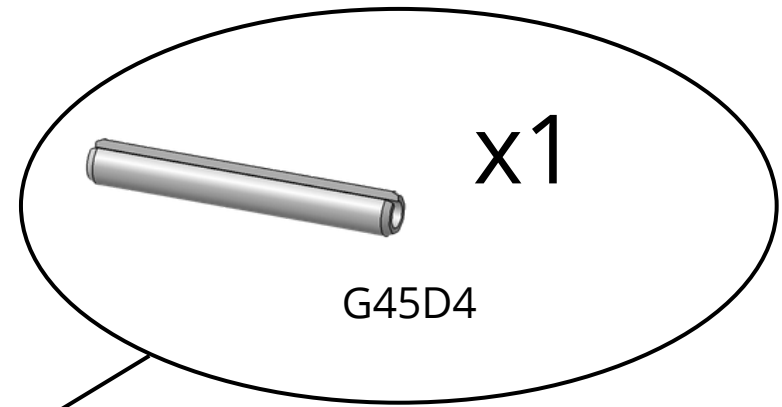
41



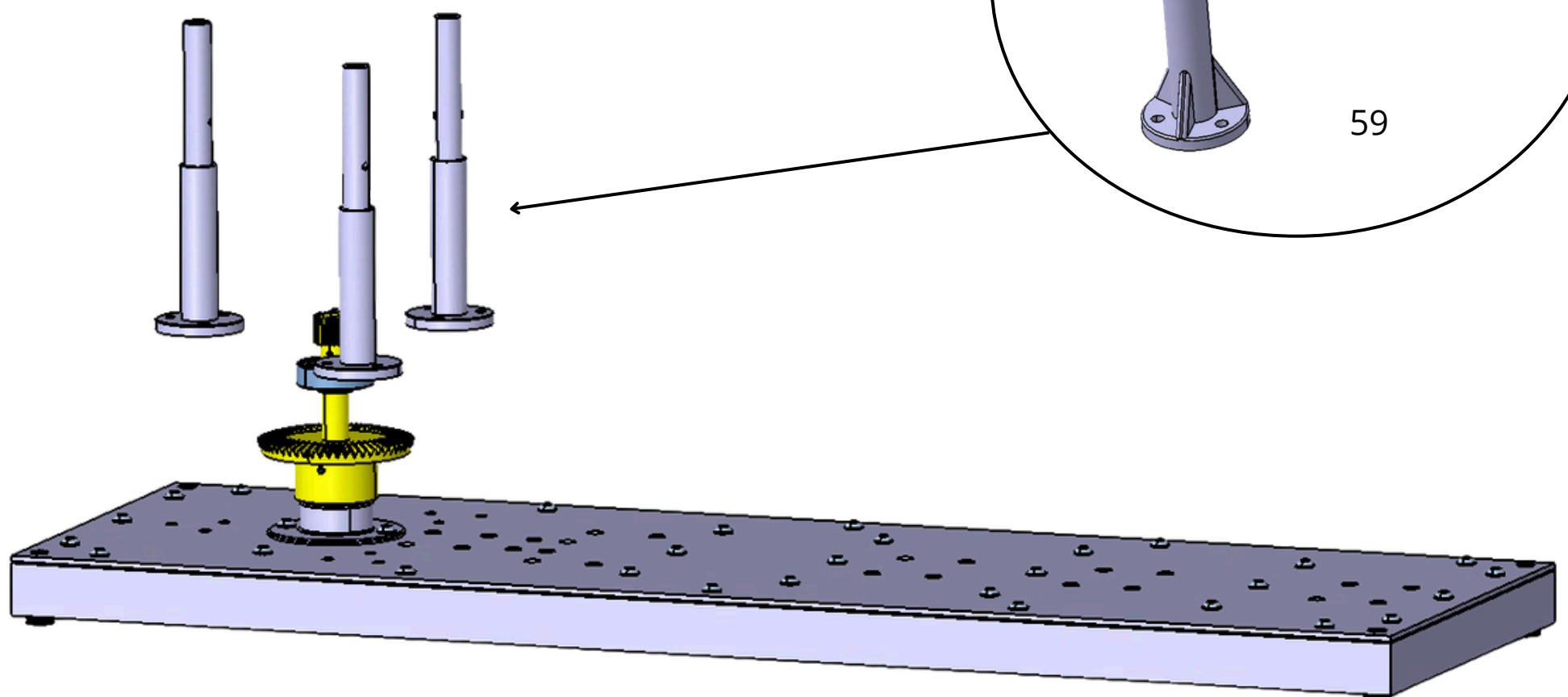
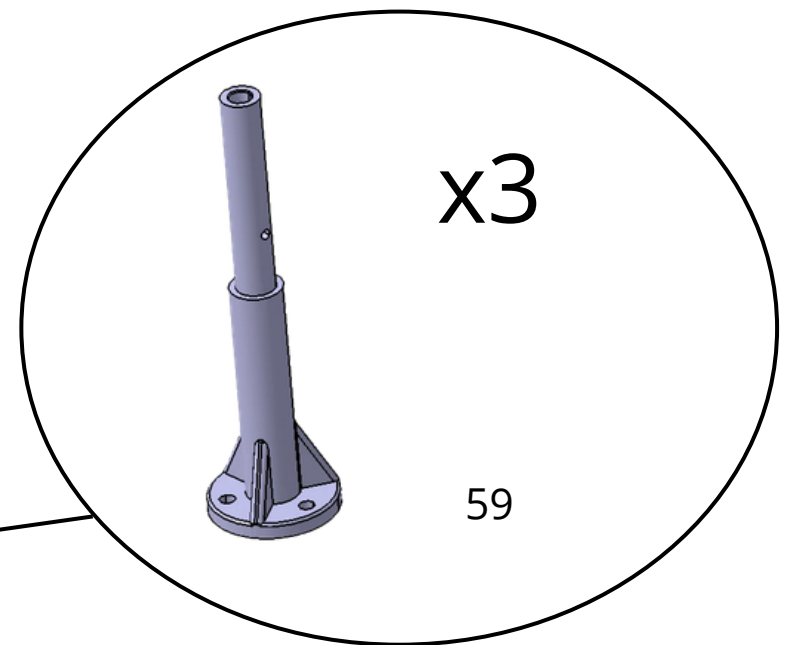
42



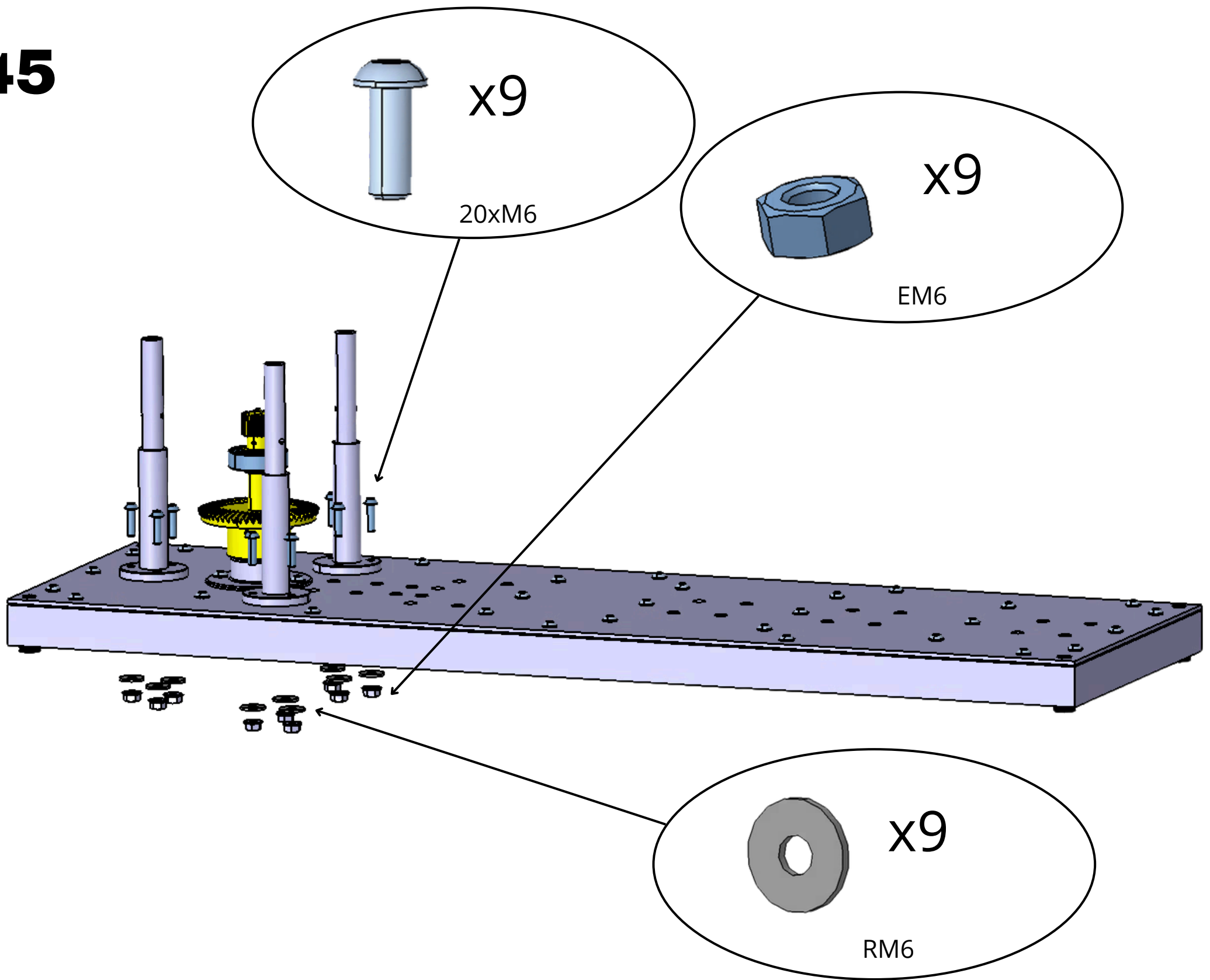
43



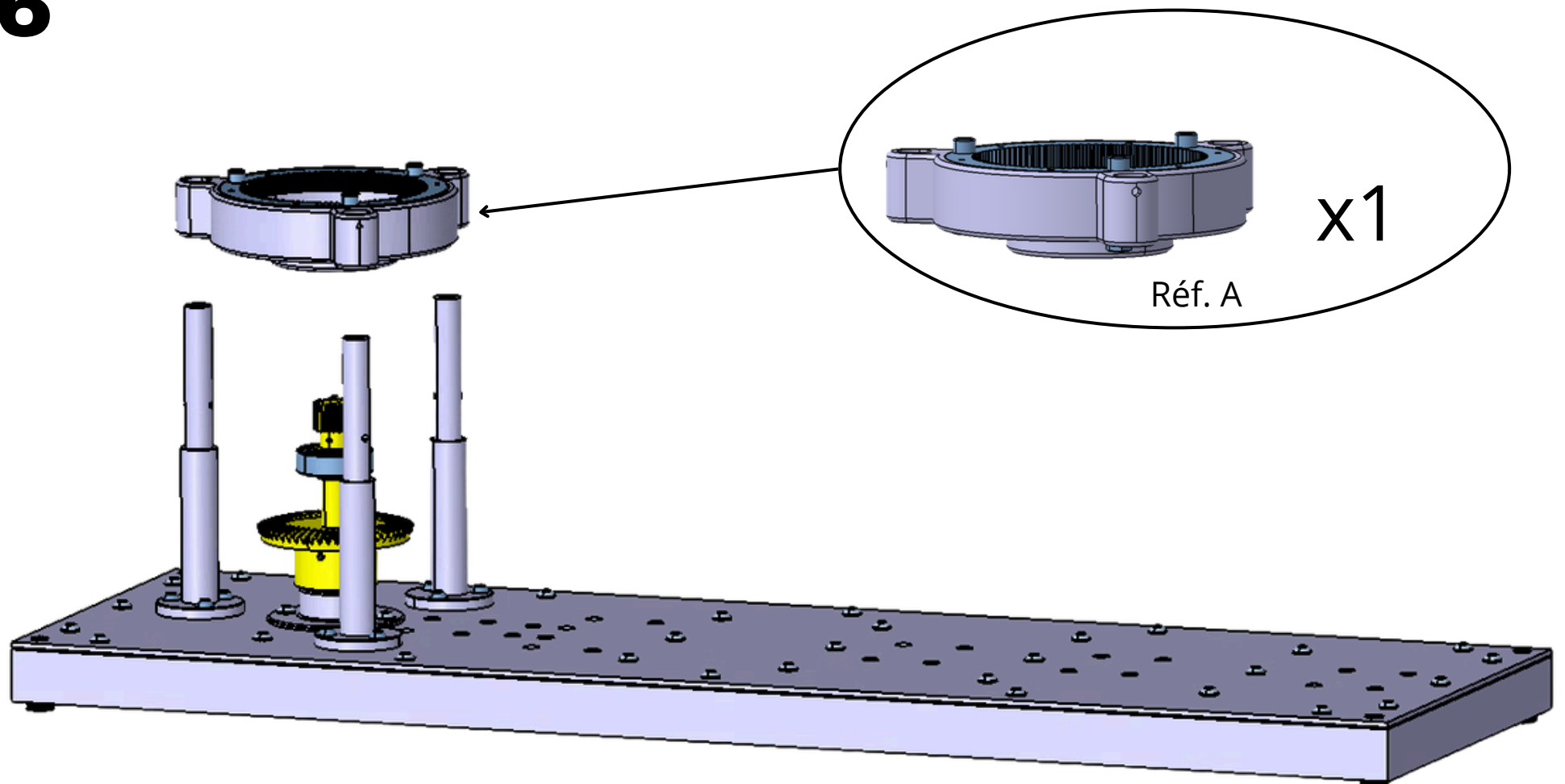
44

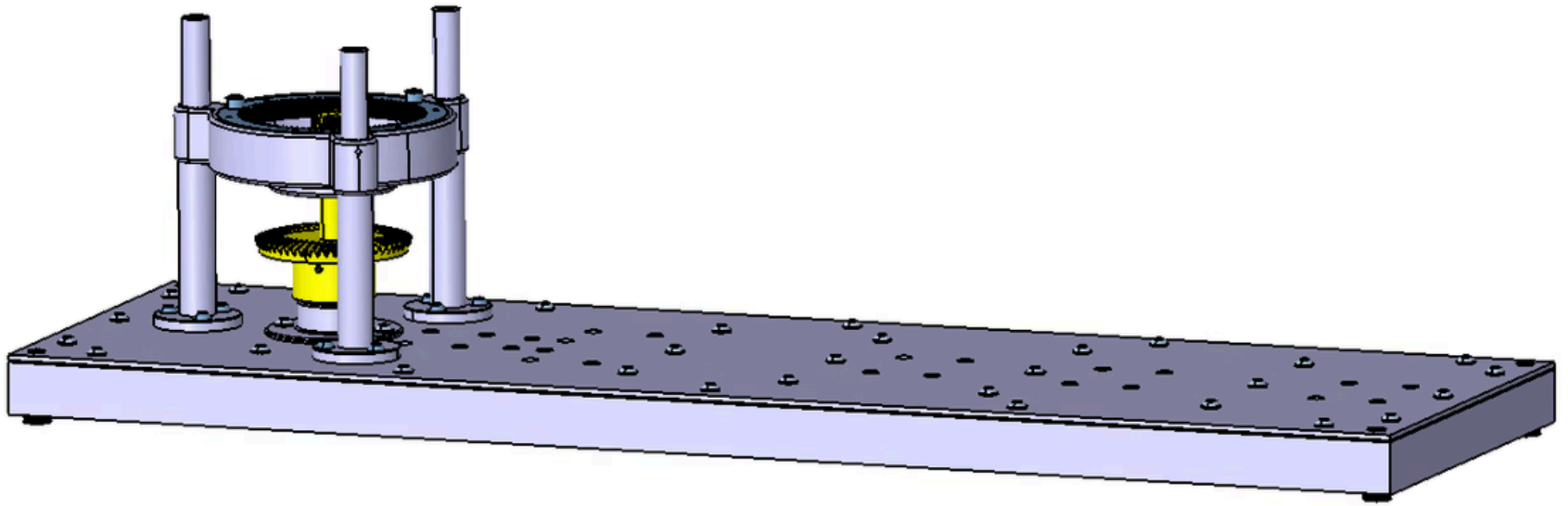


45

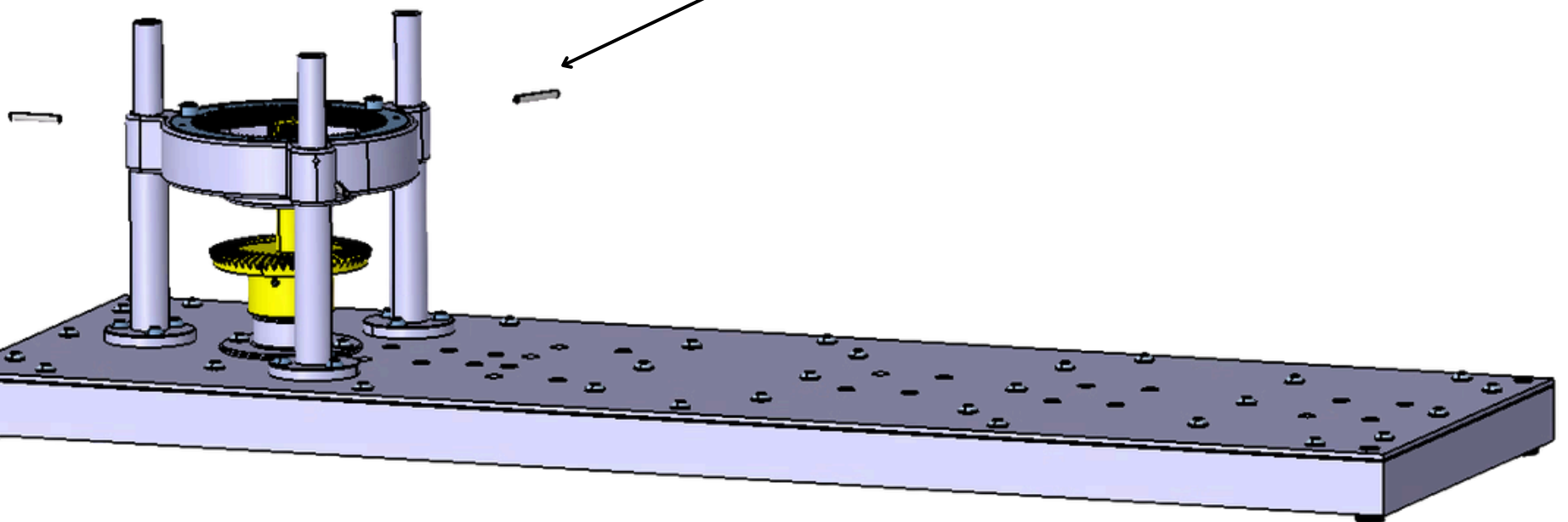
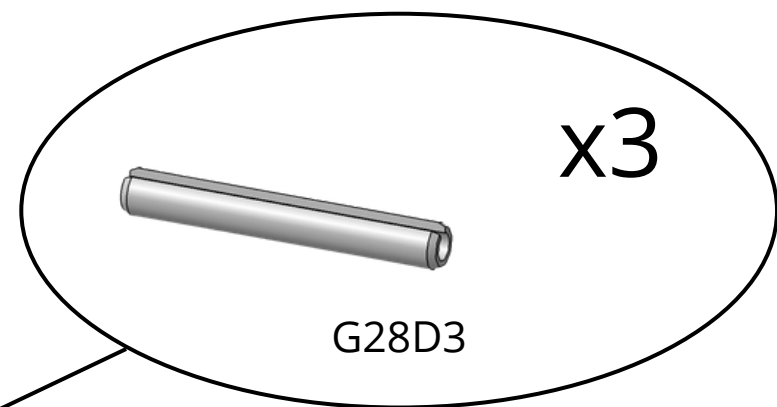


46

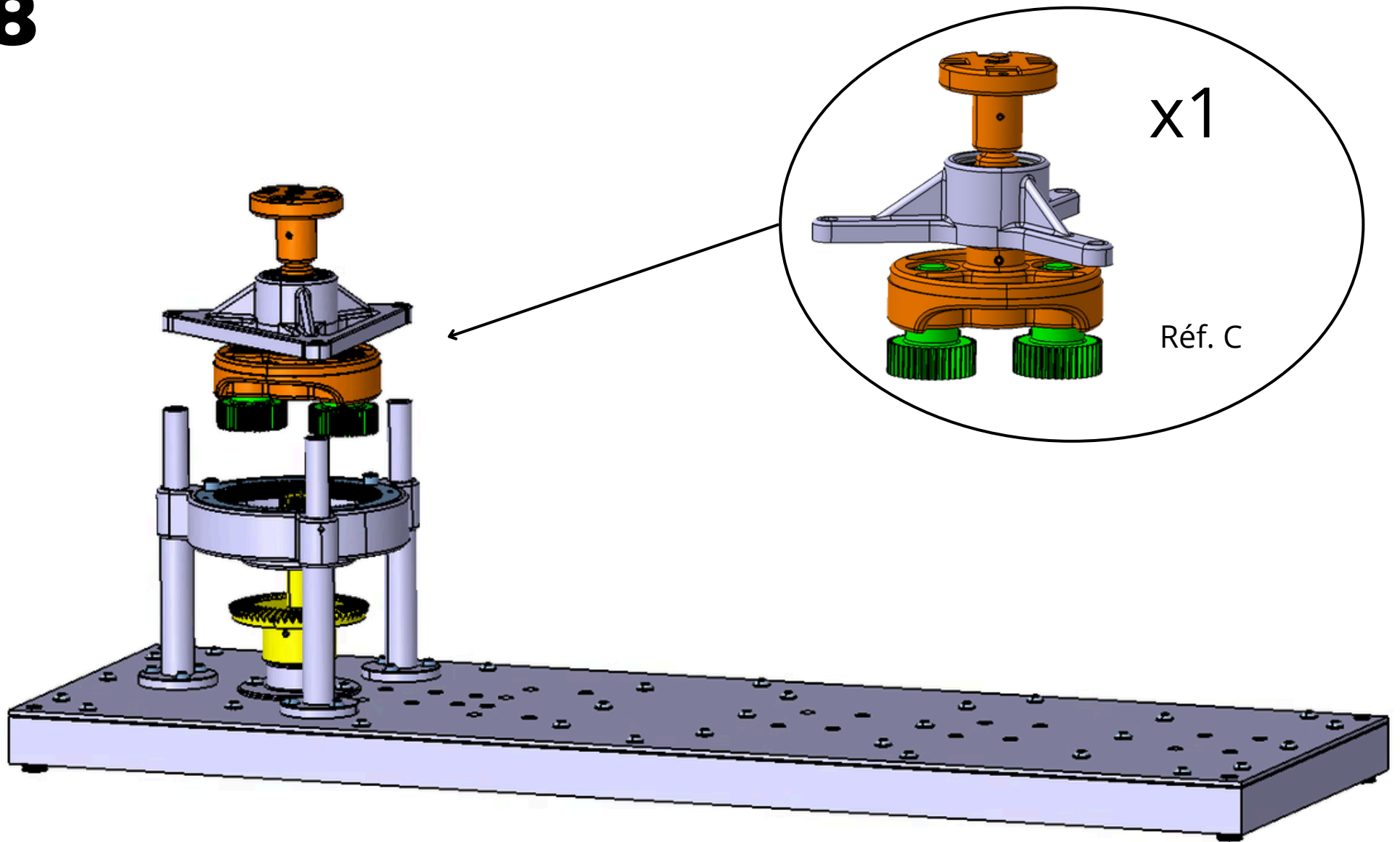




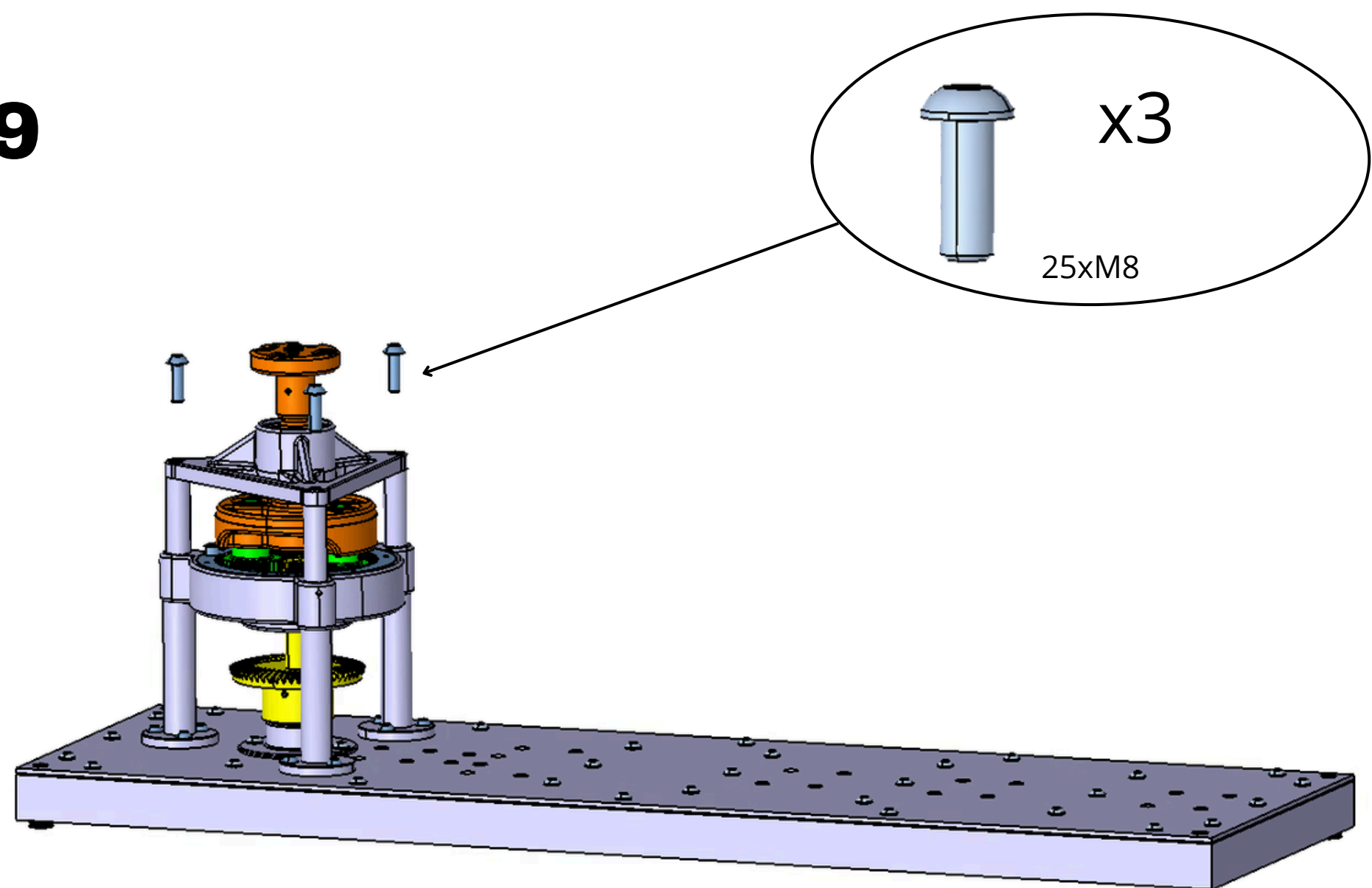
47

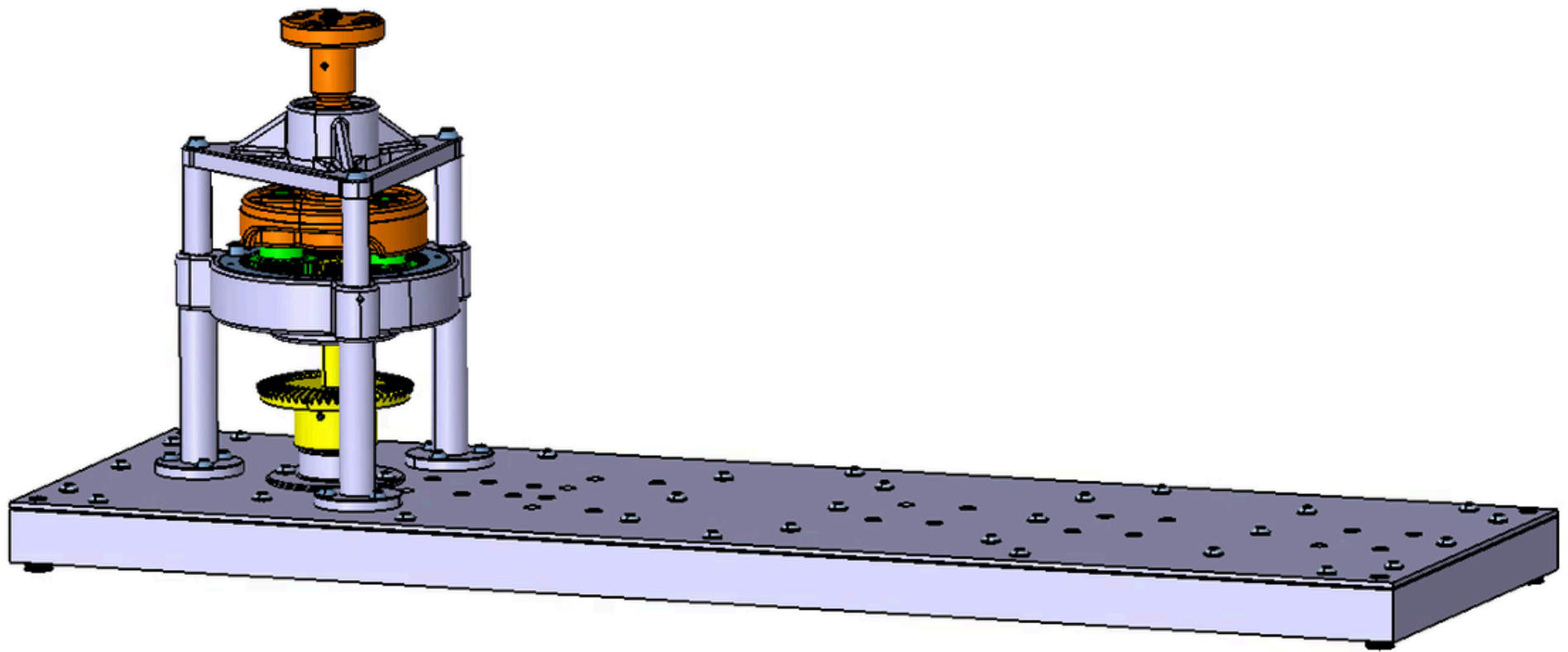


48

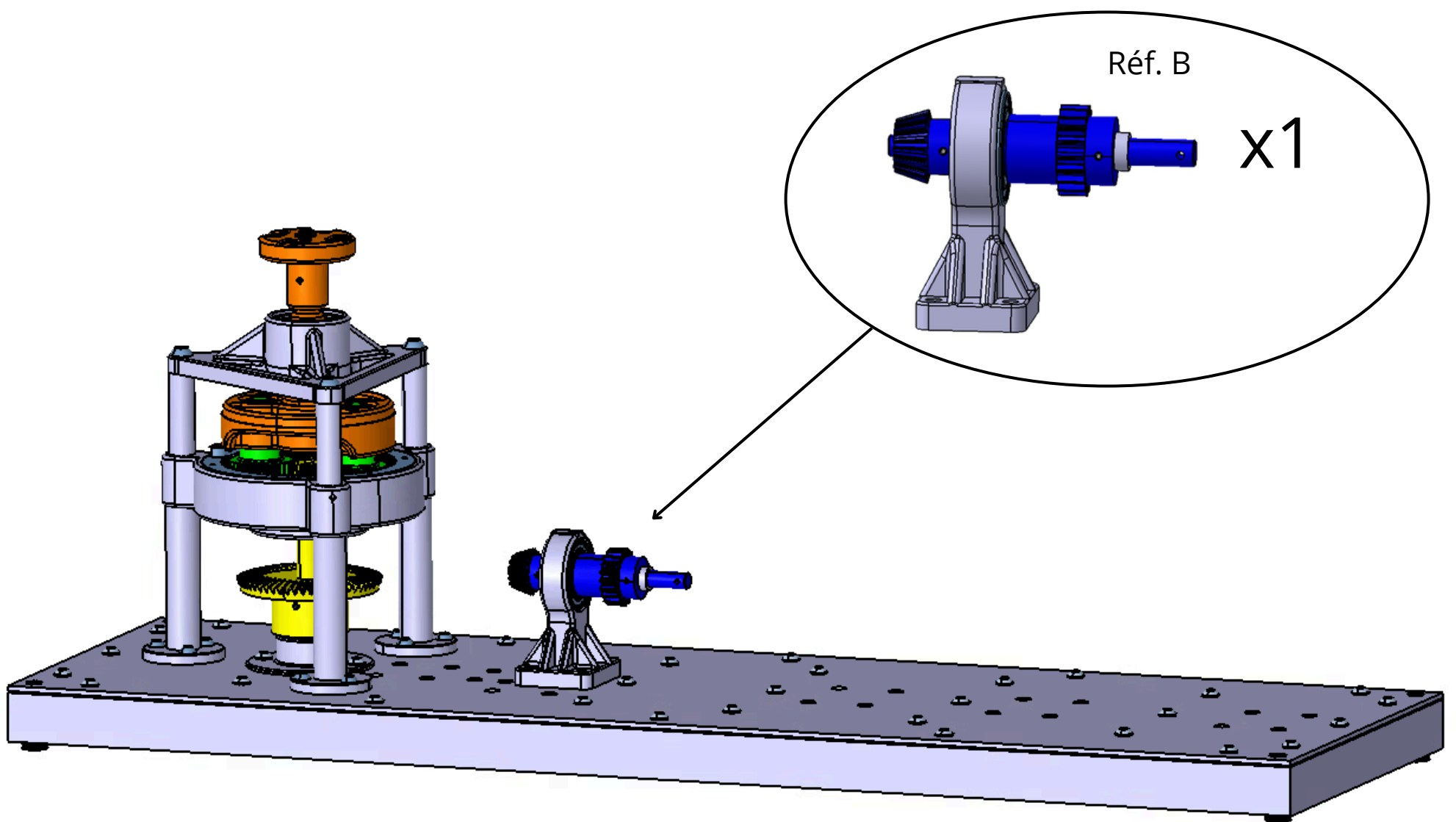


49

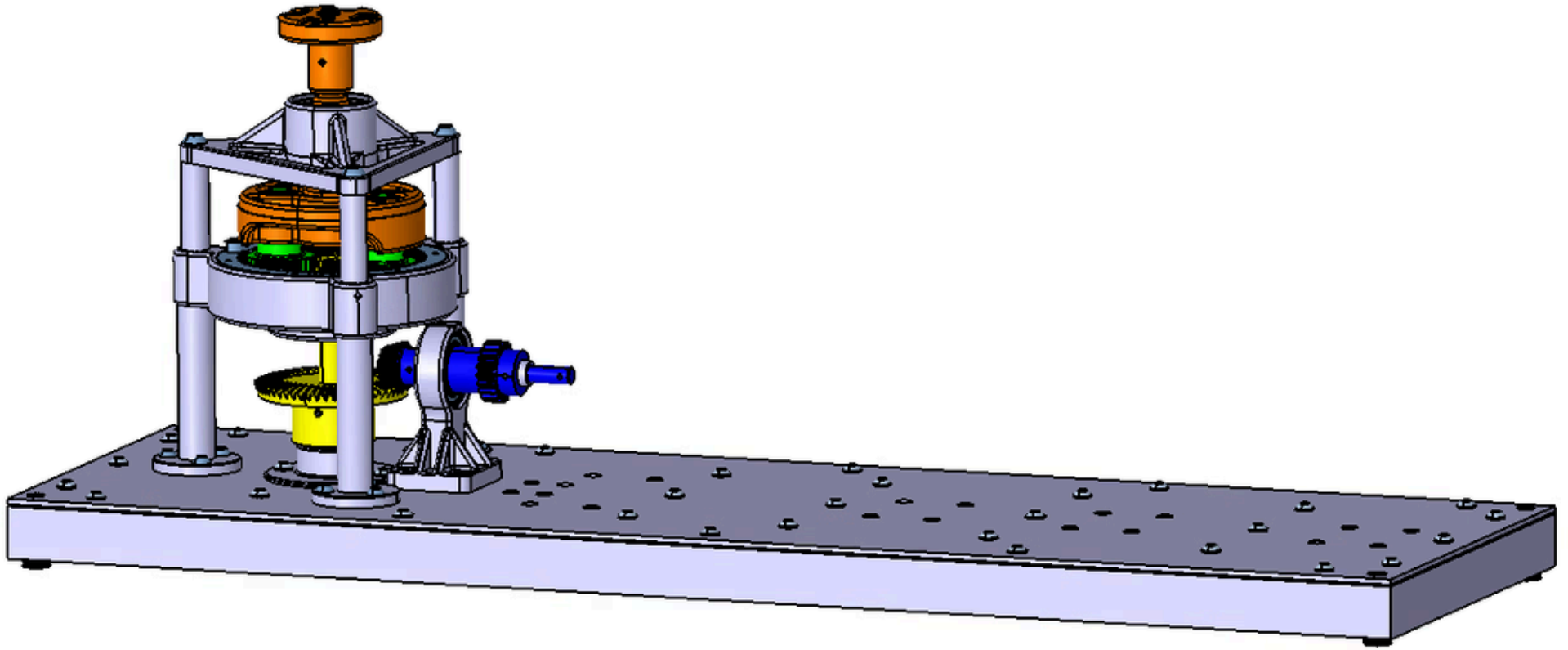




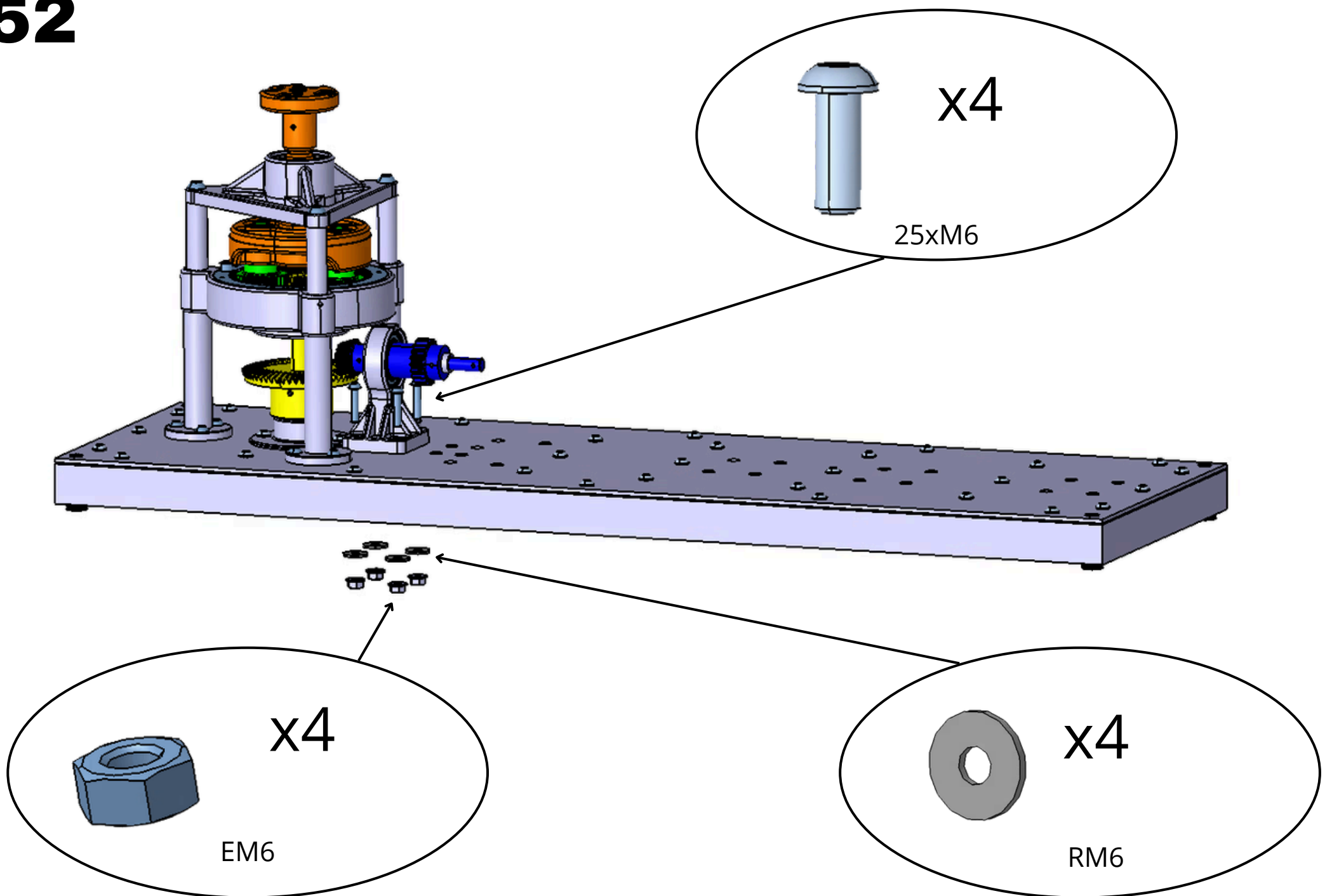
50

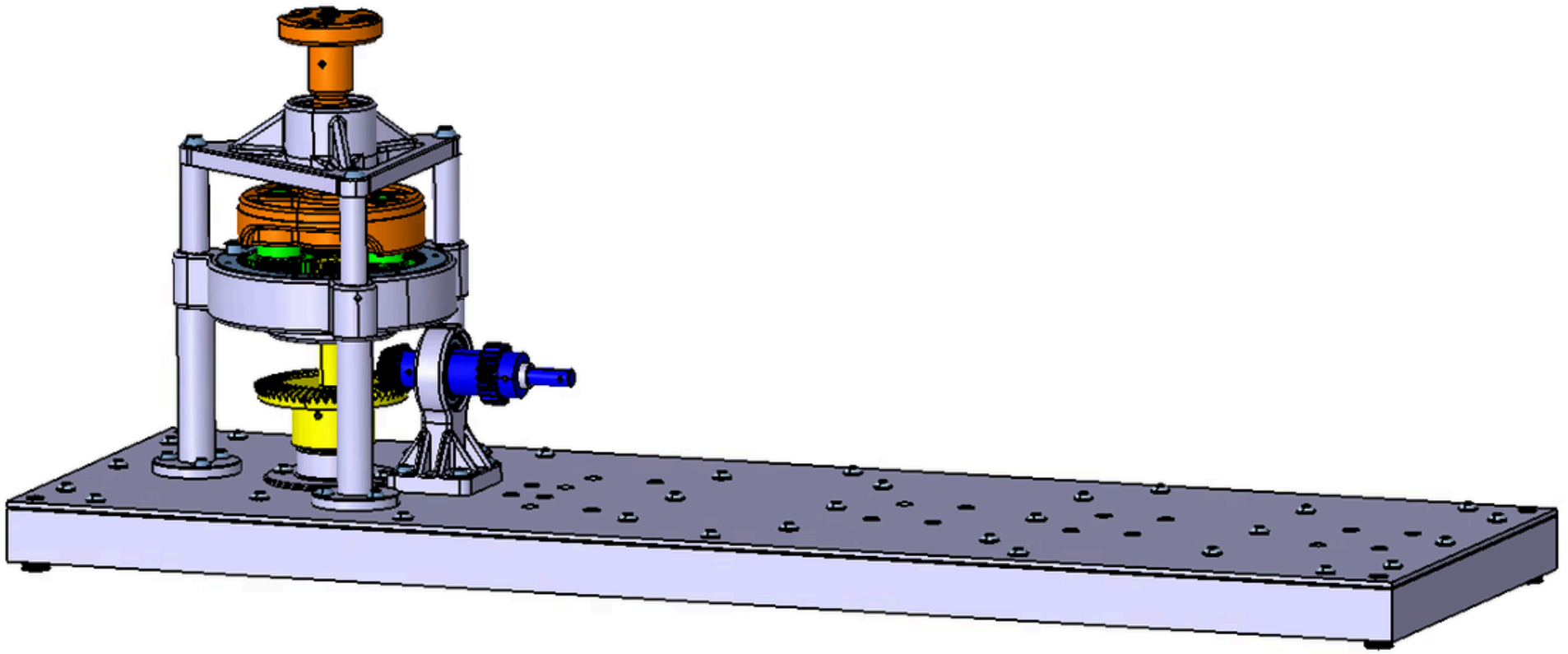


51

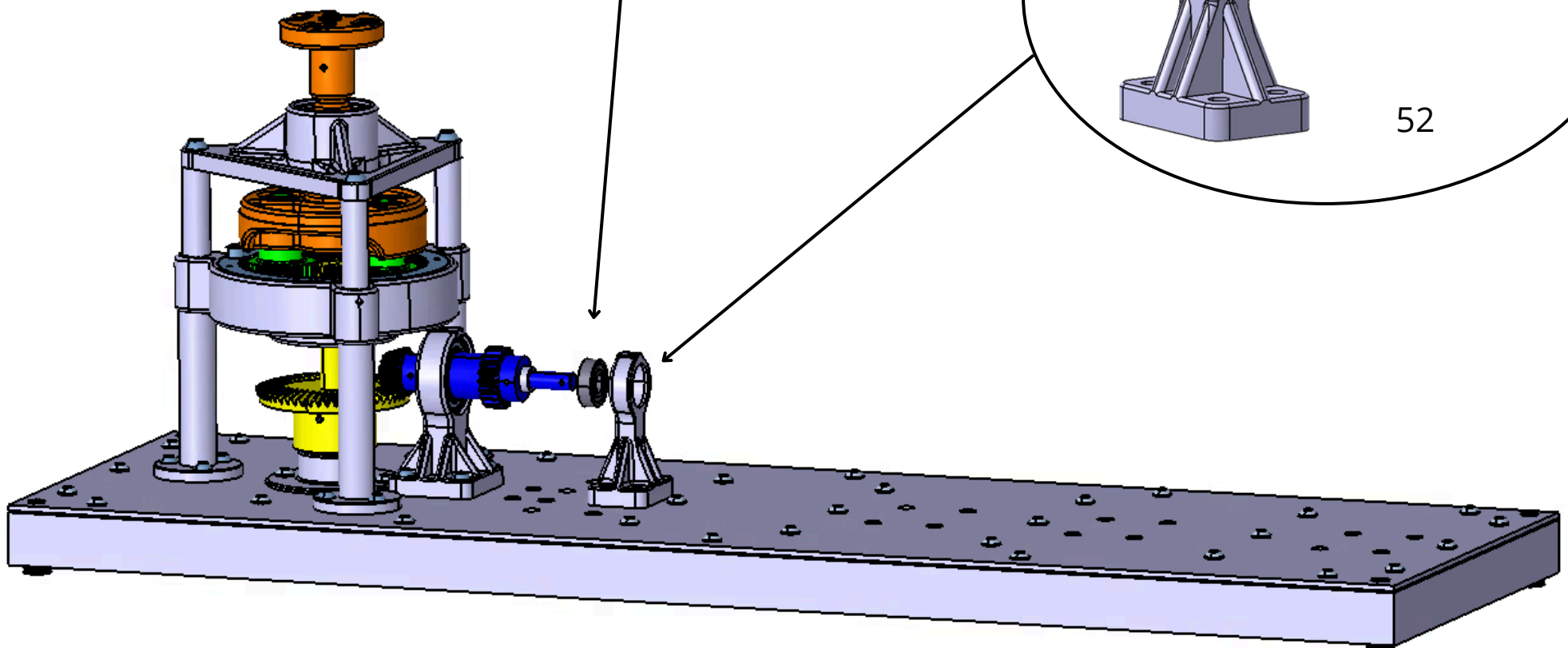
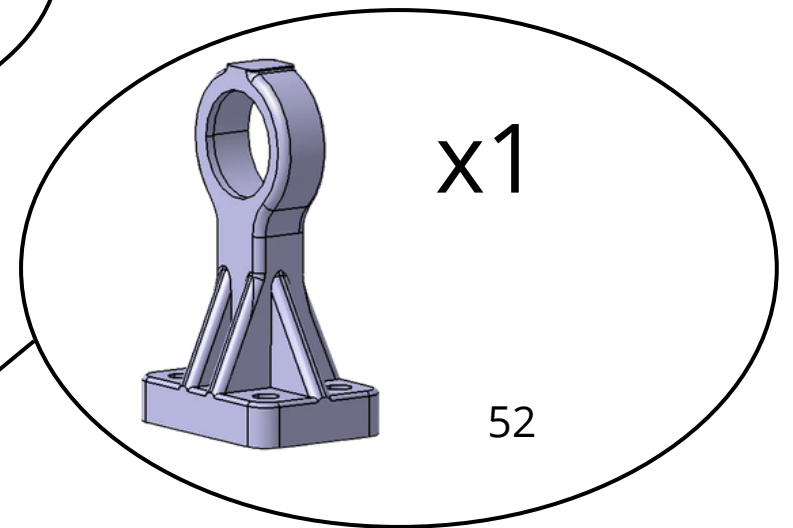
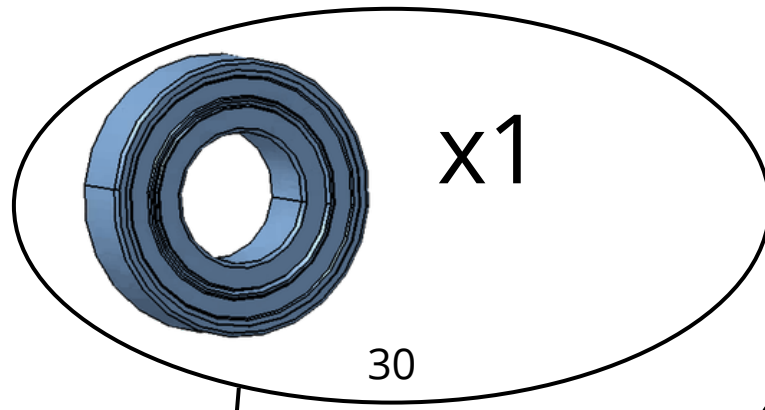


52

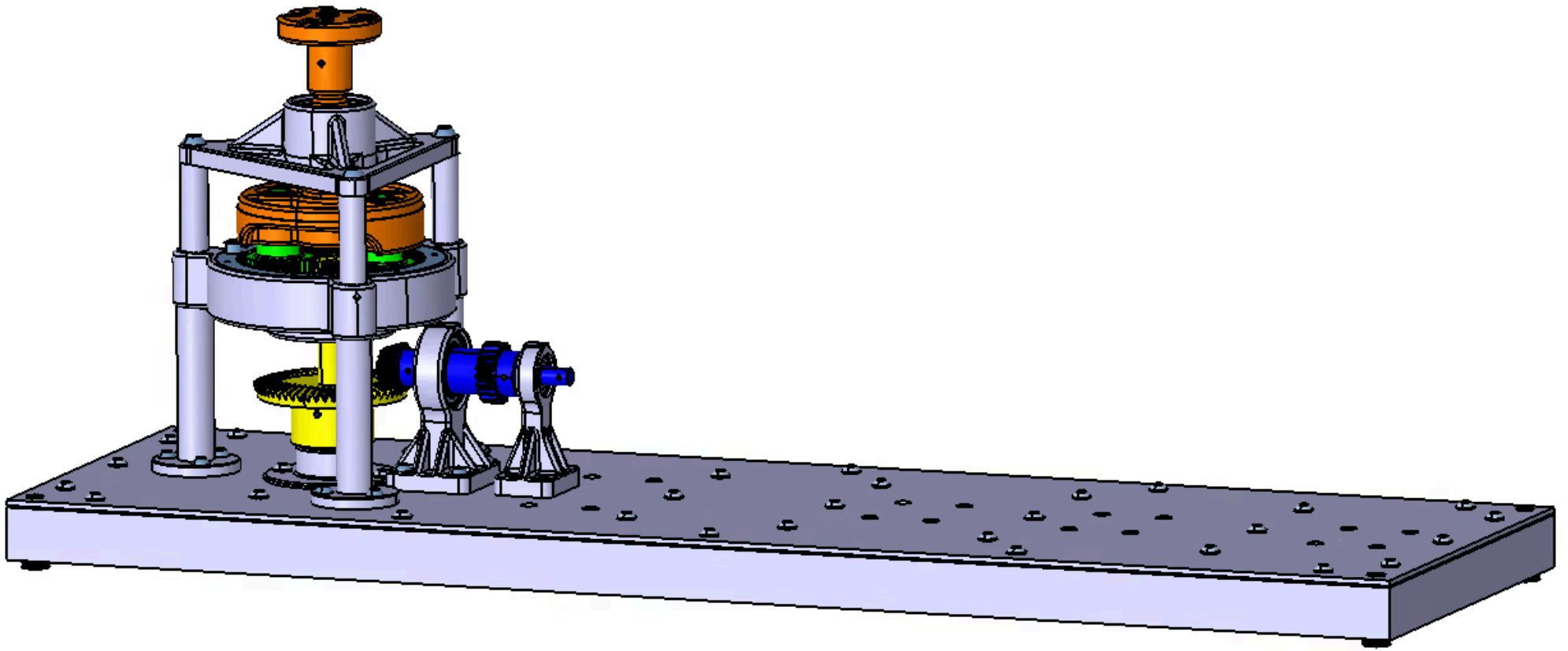




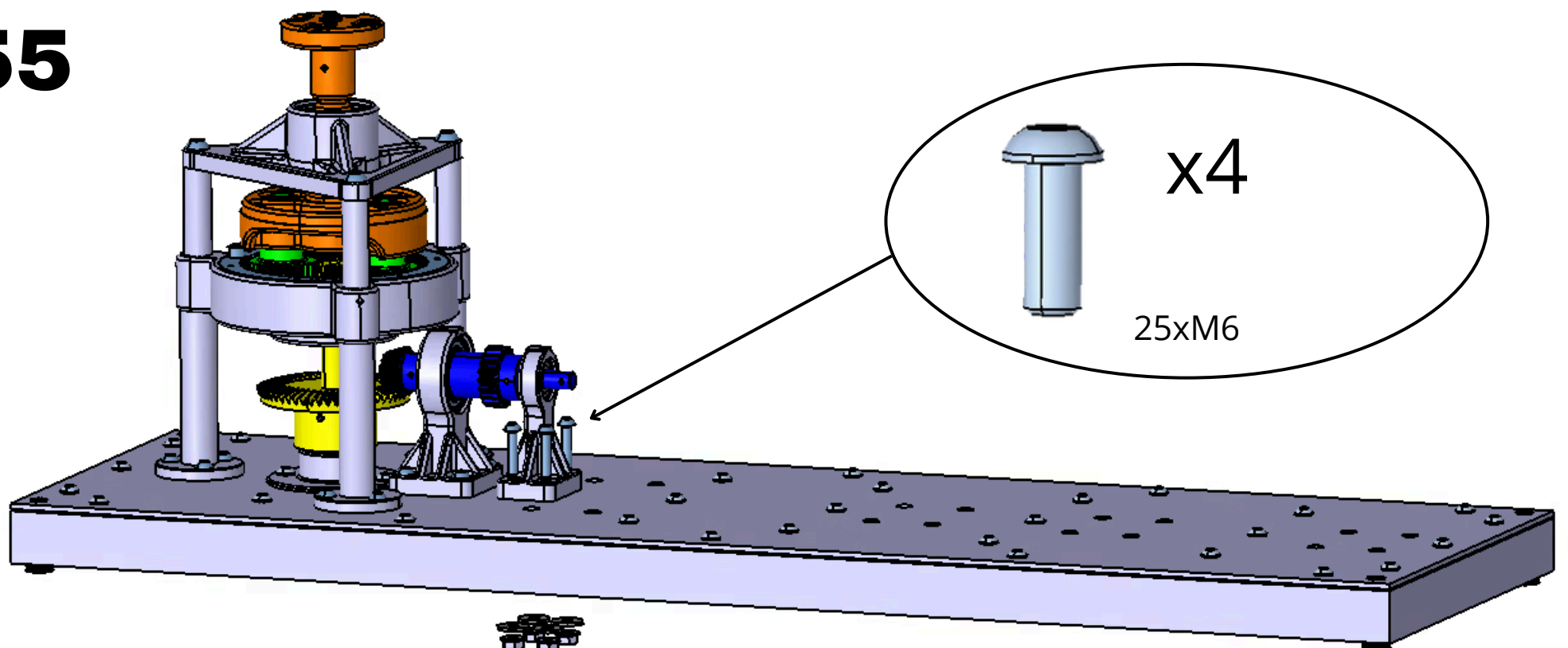
53



54

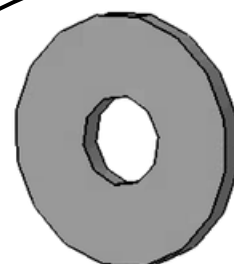


55



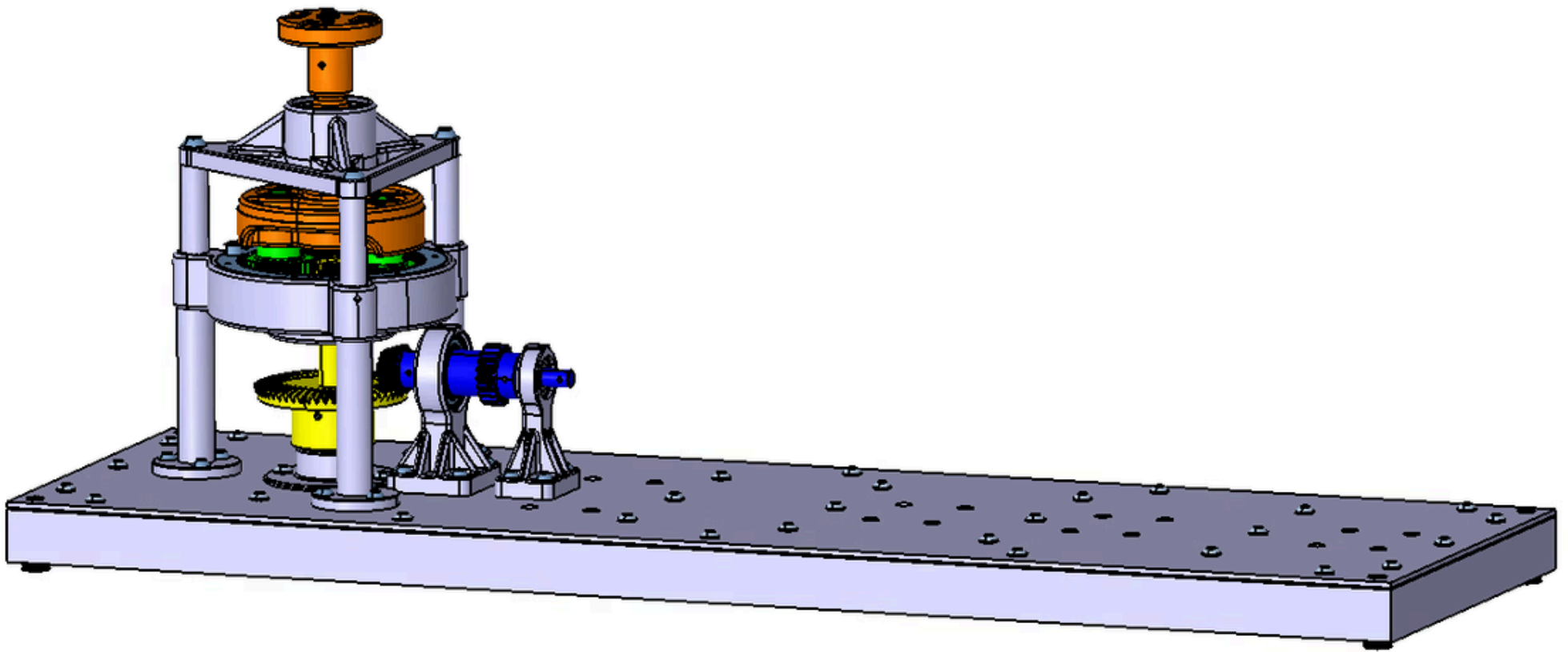
x4

EM6

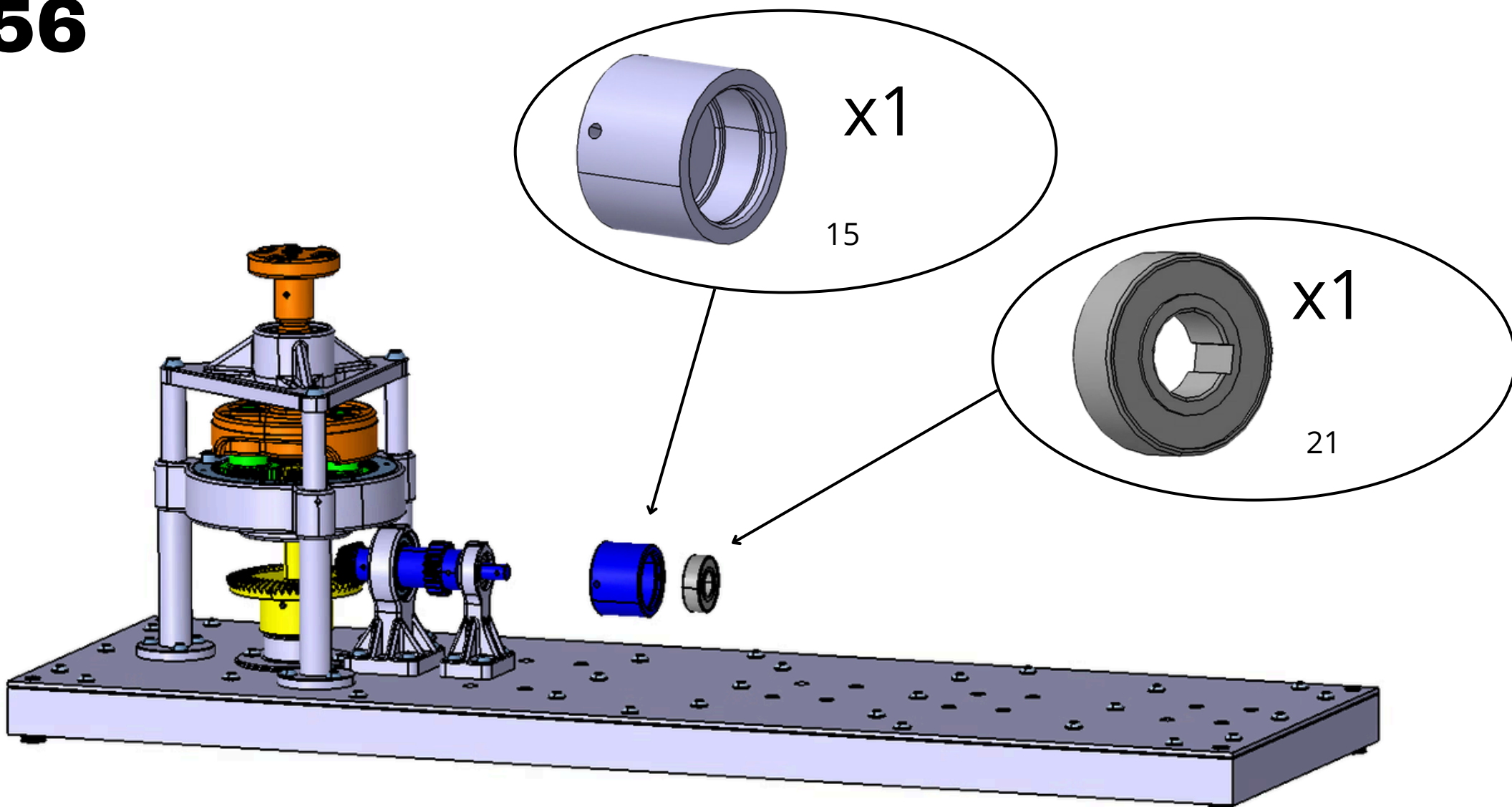


x4

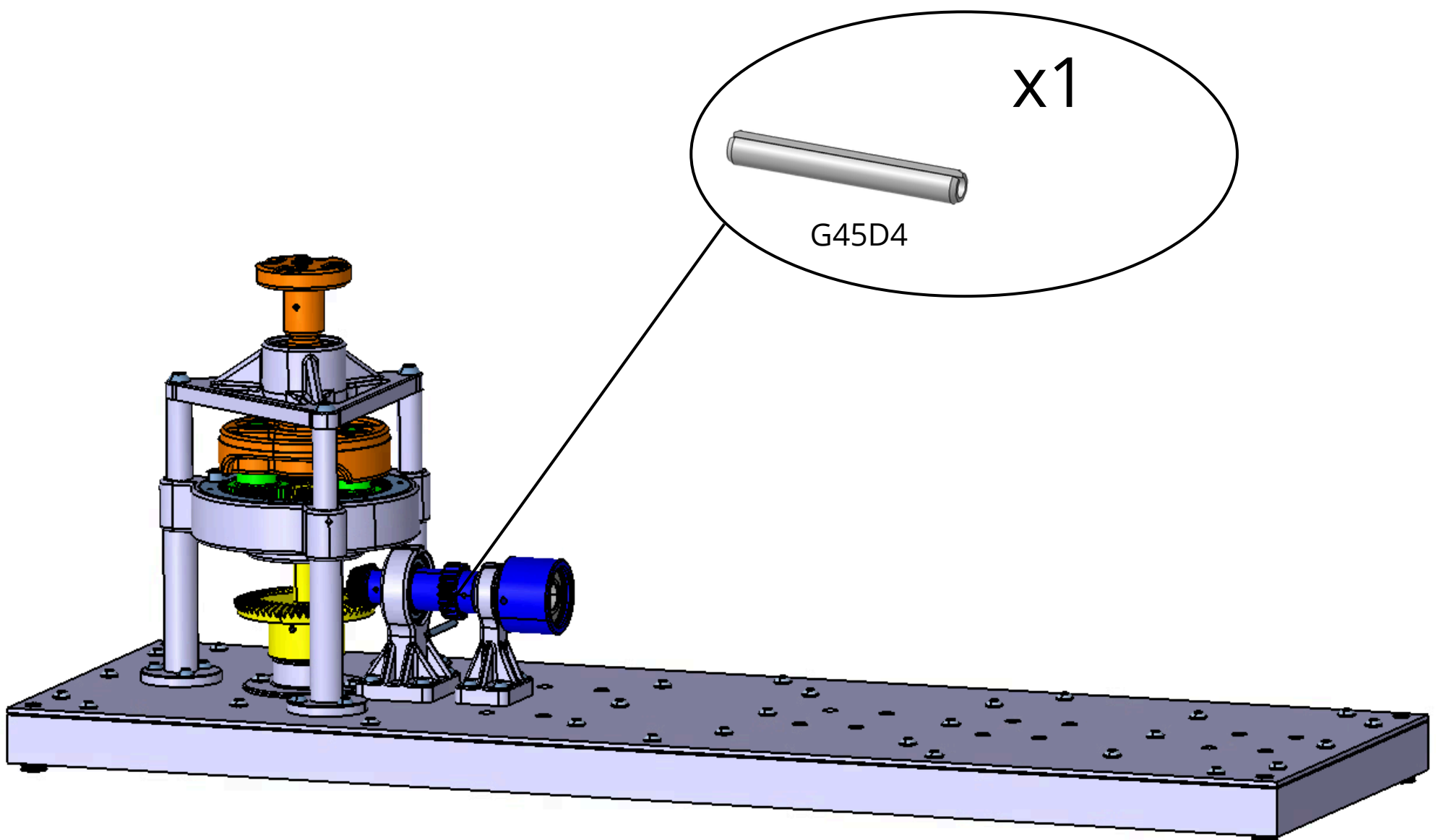
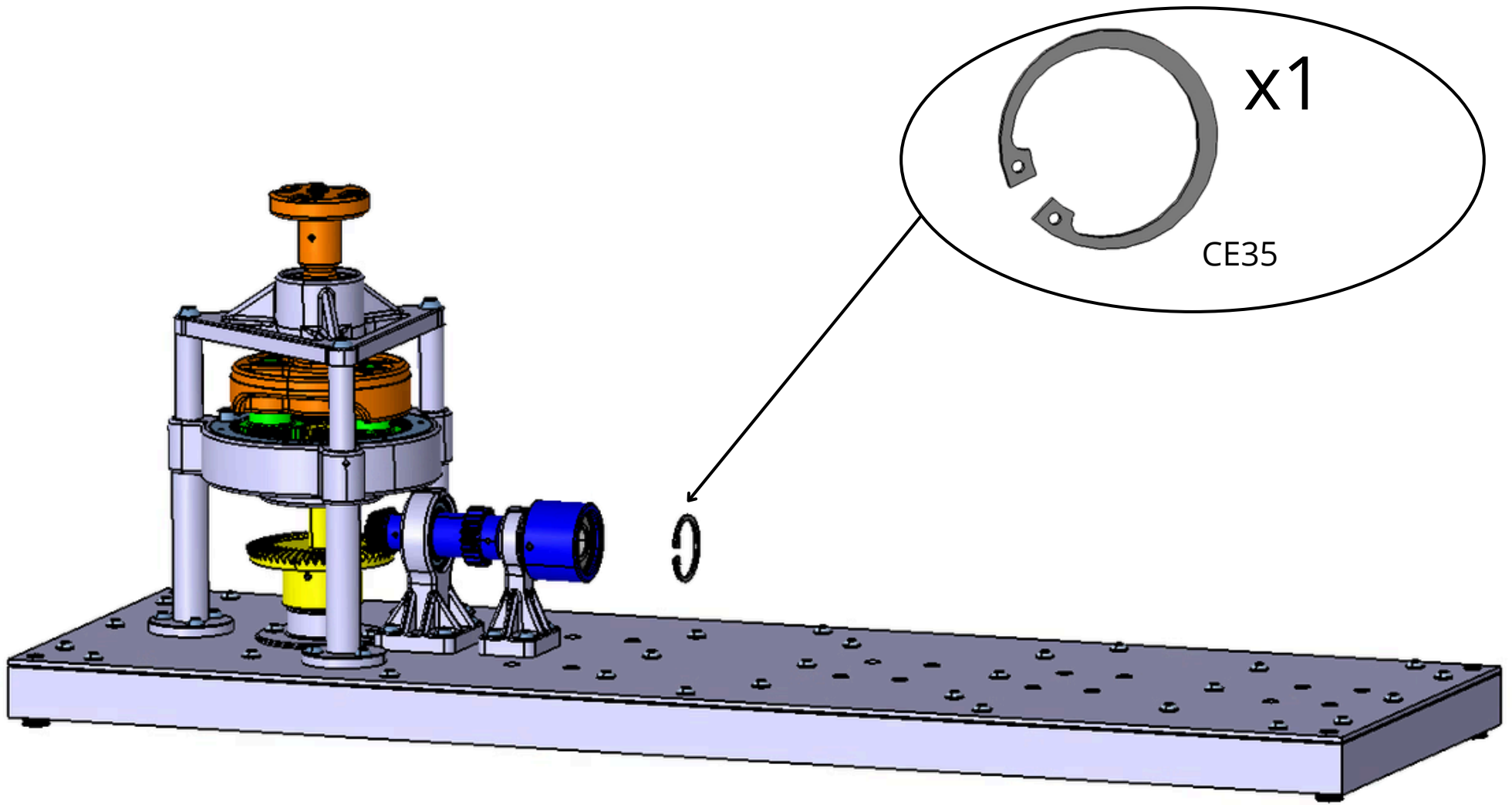
RM6



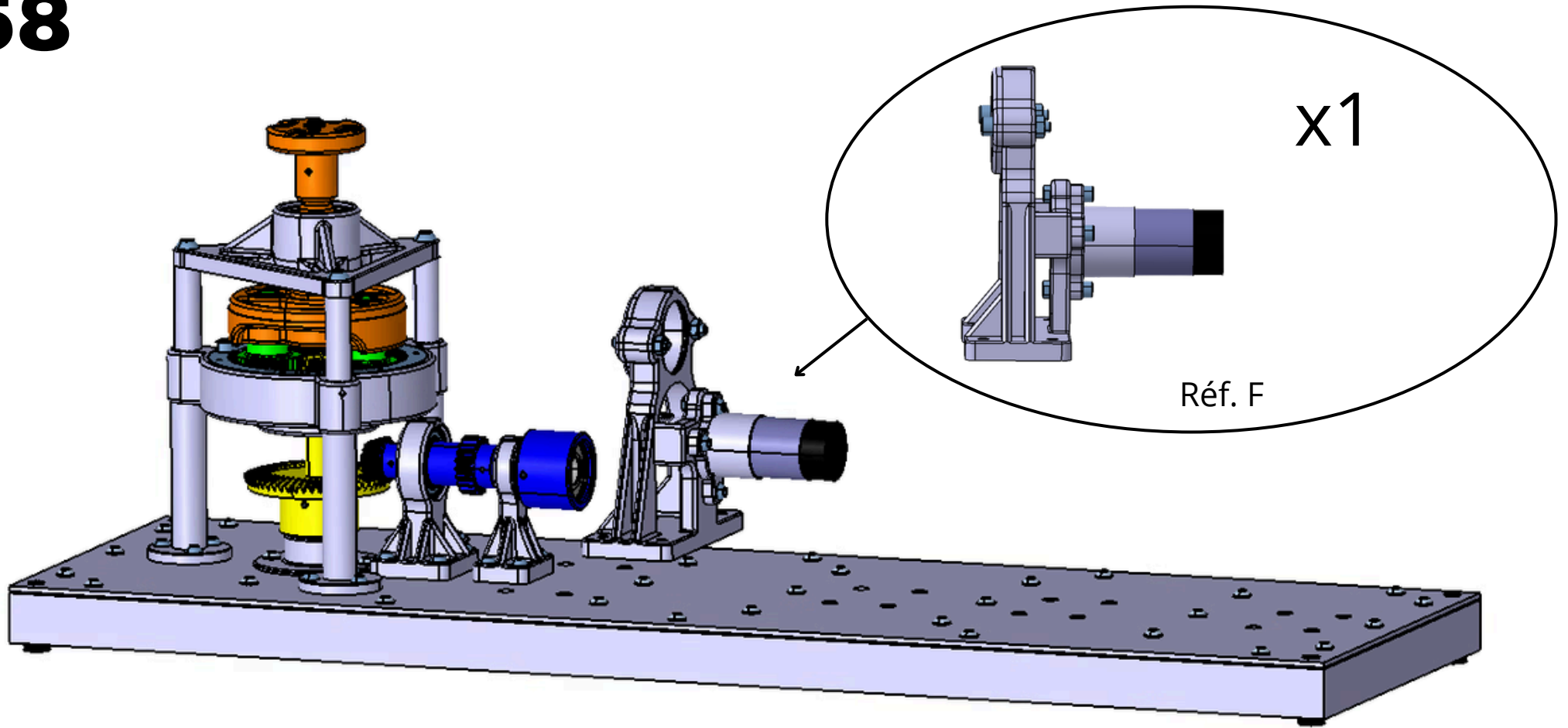
56



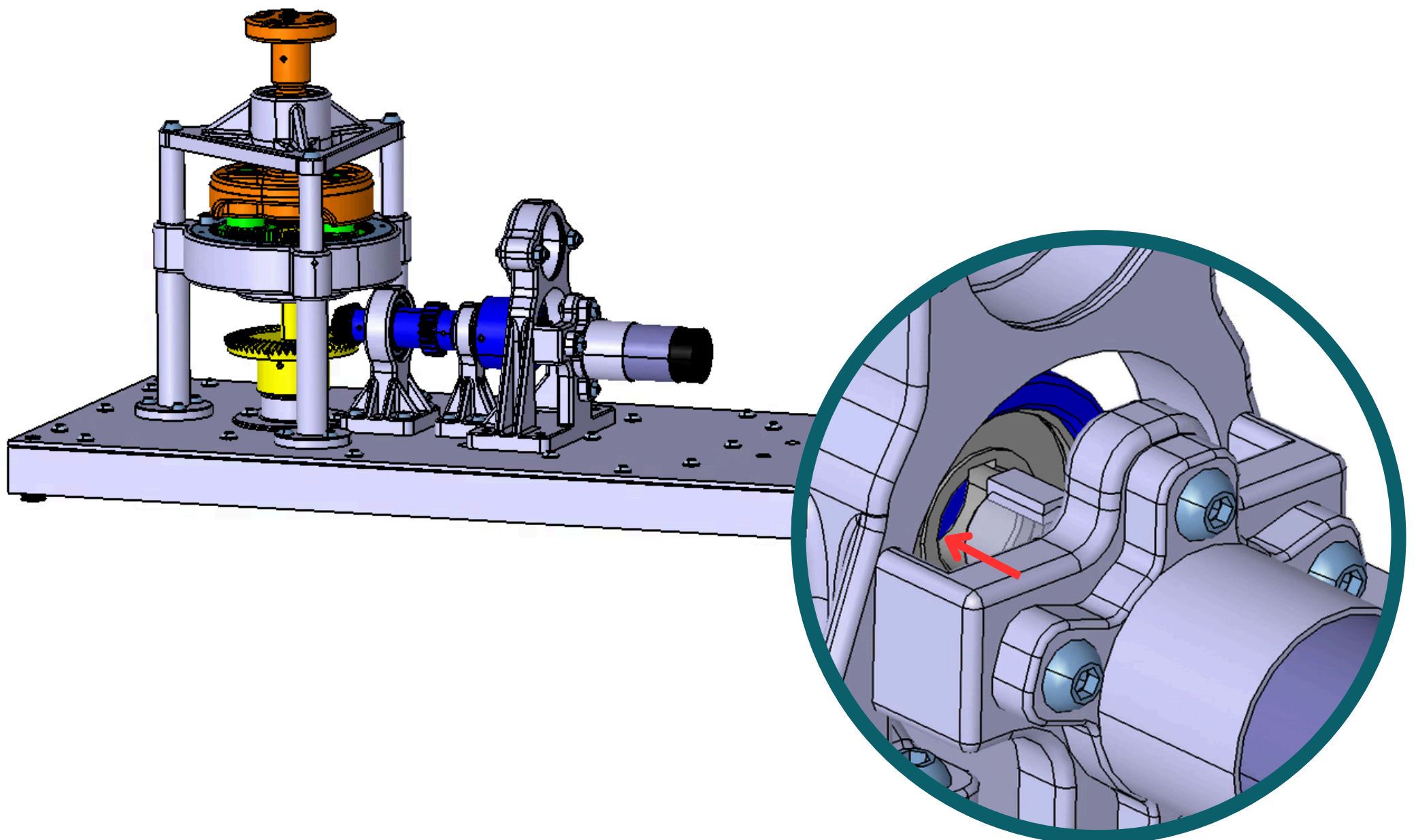
57



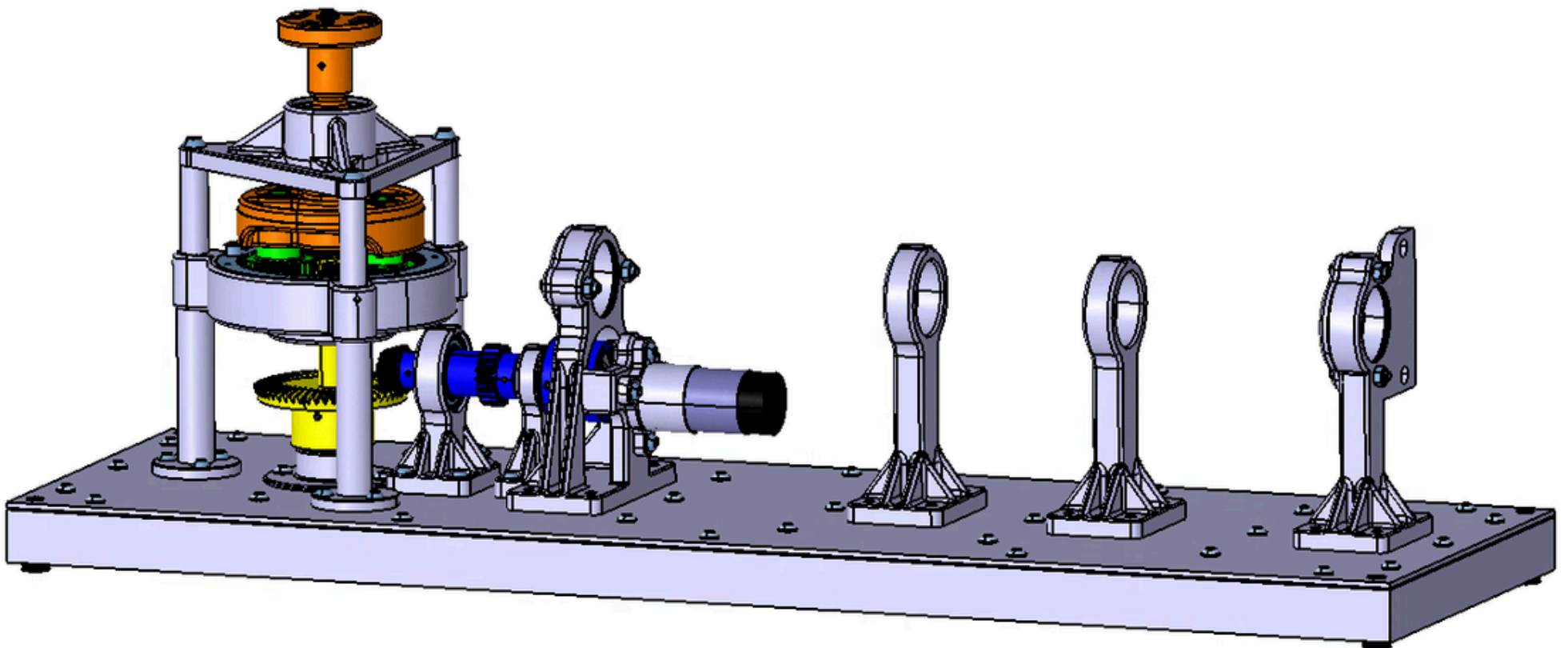
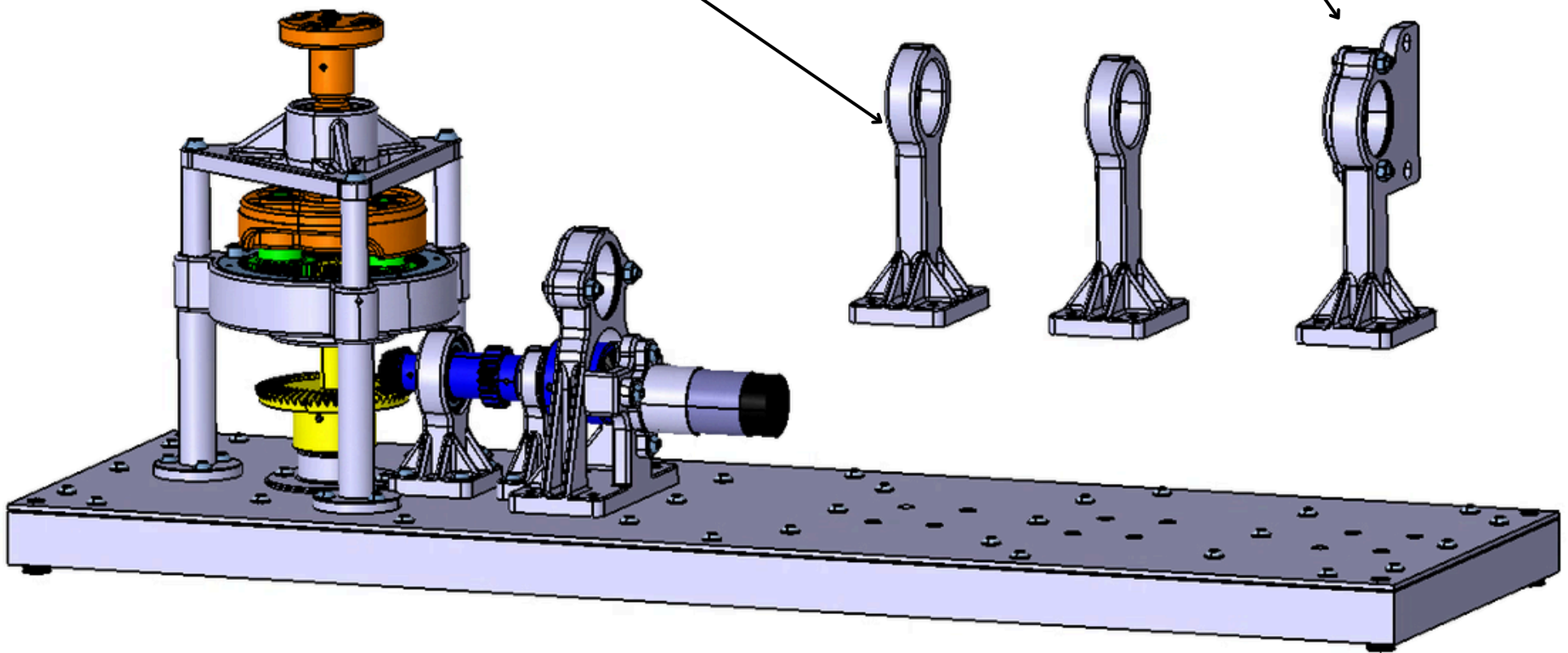
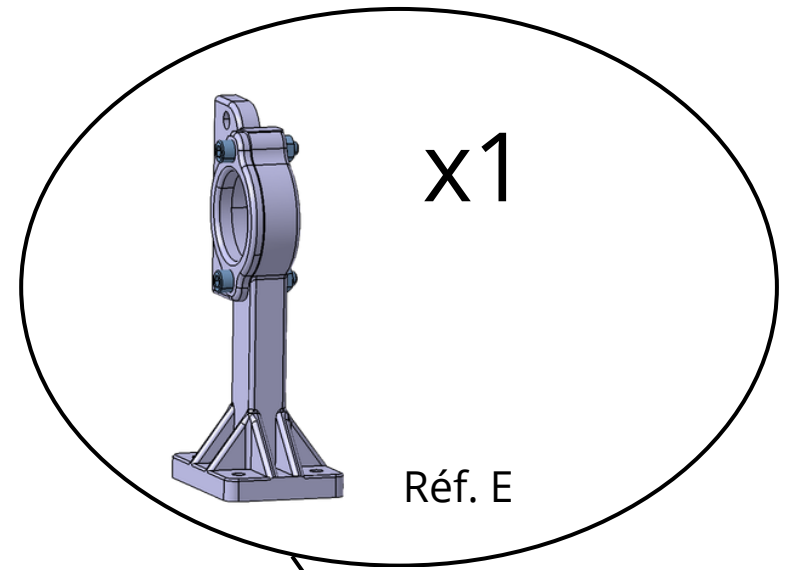
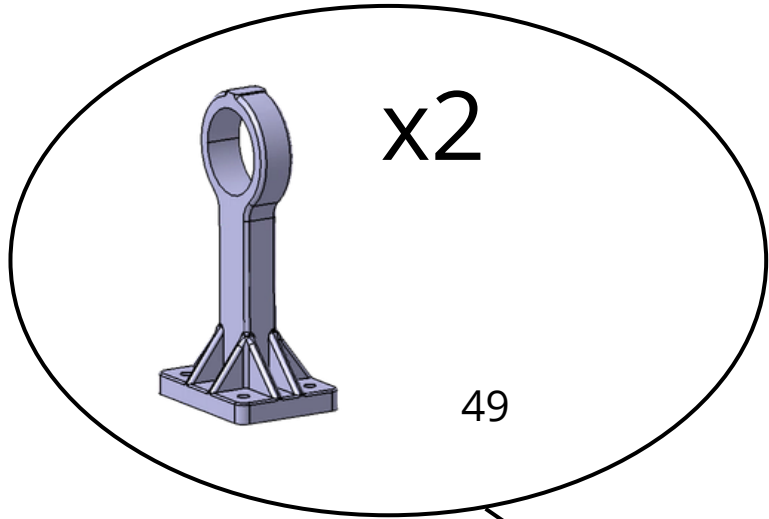
58



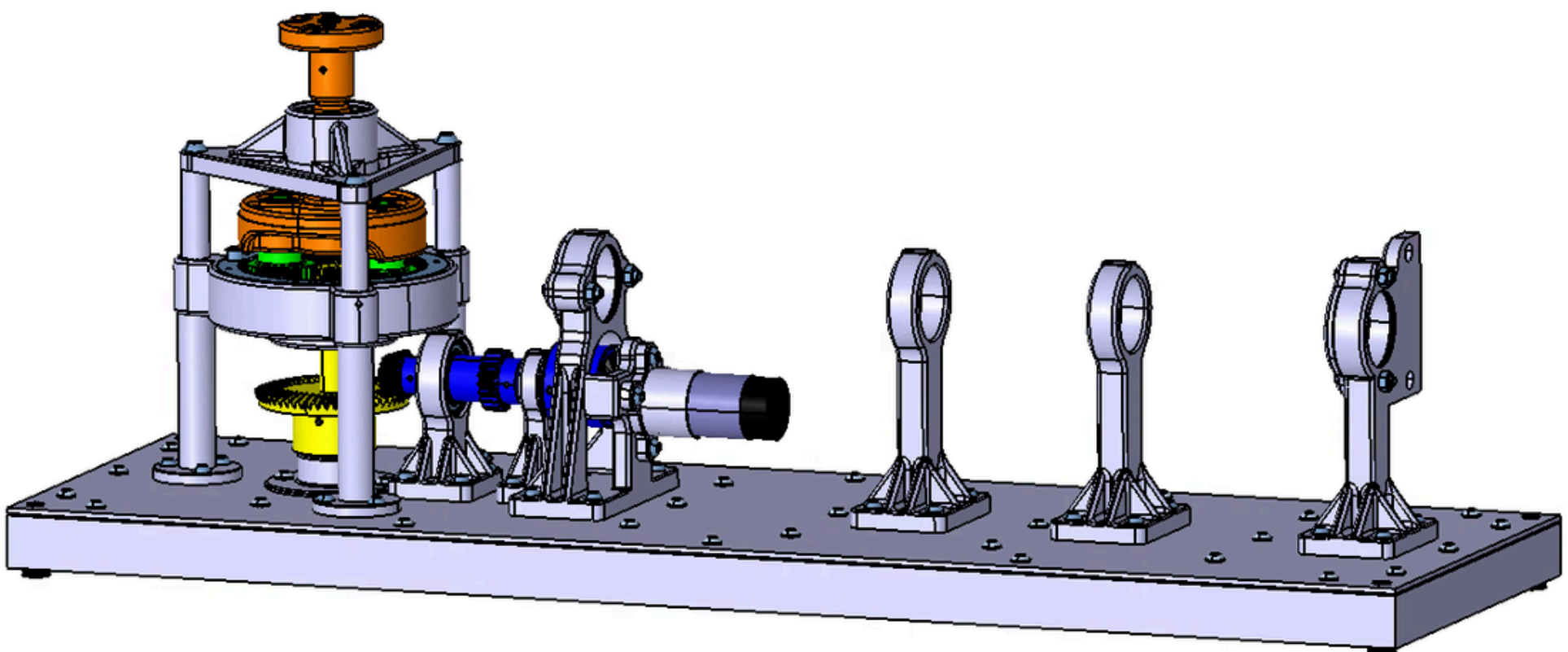
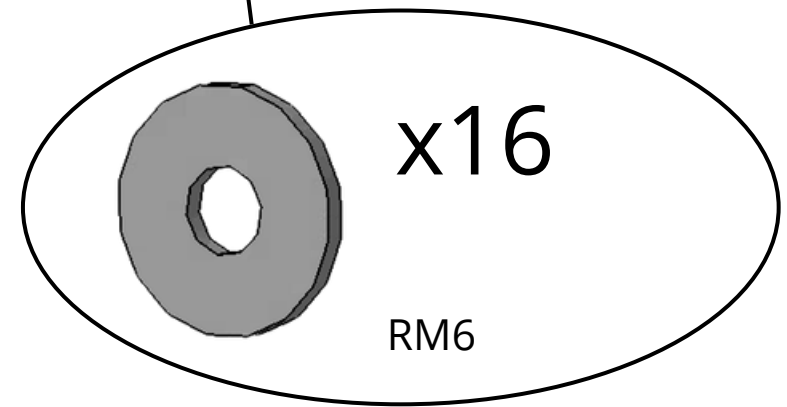
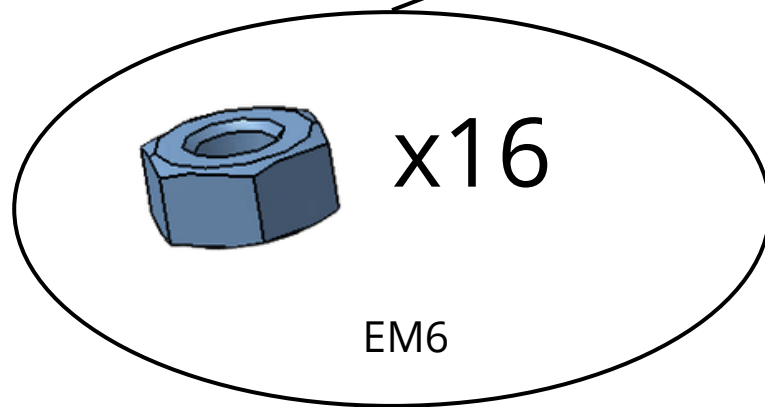
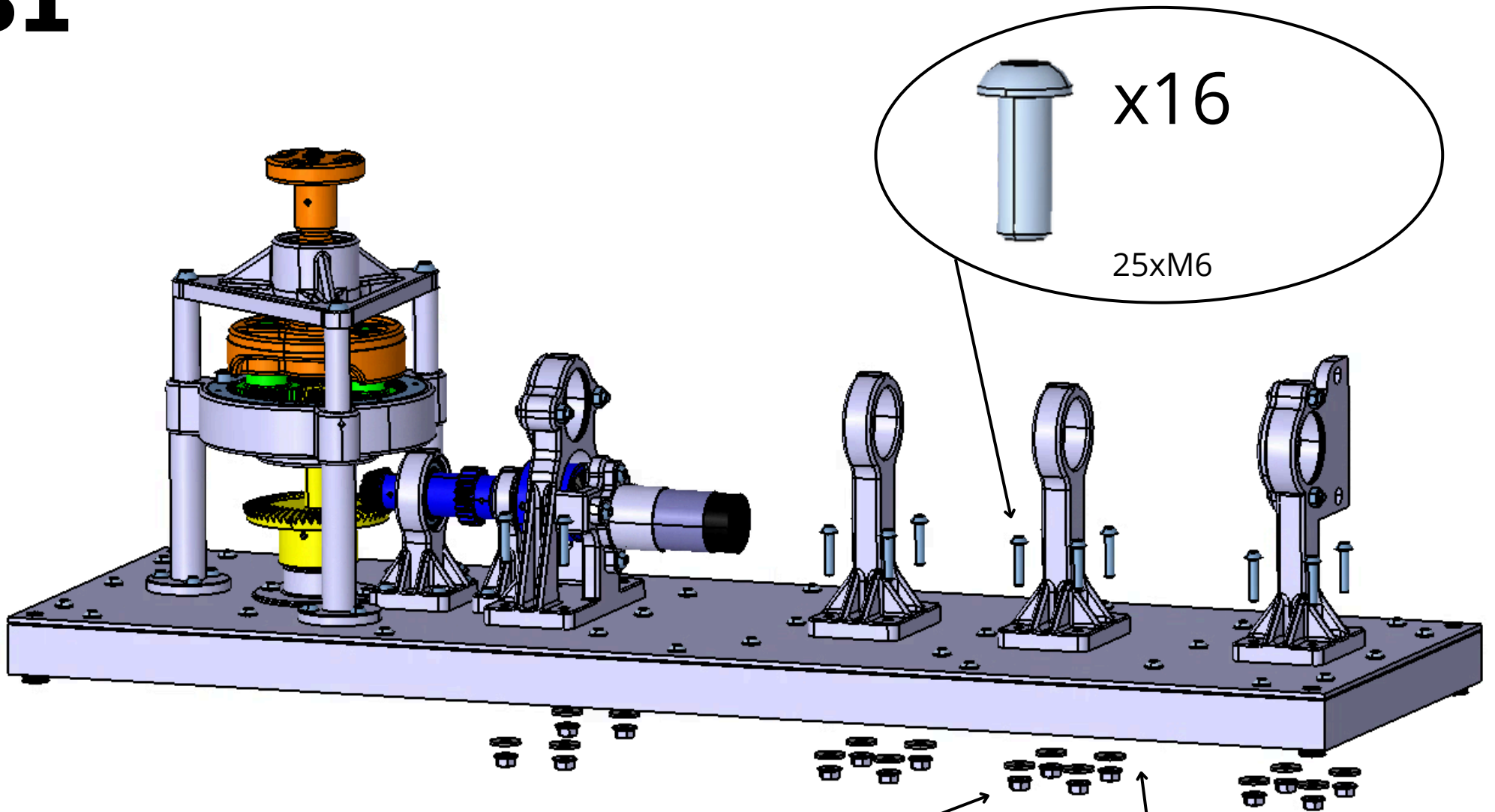
59



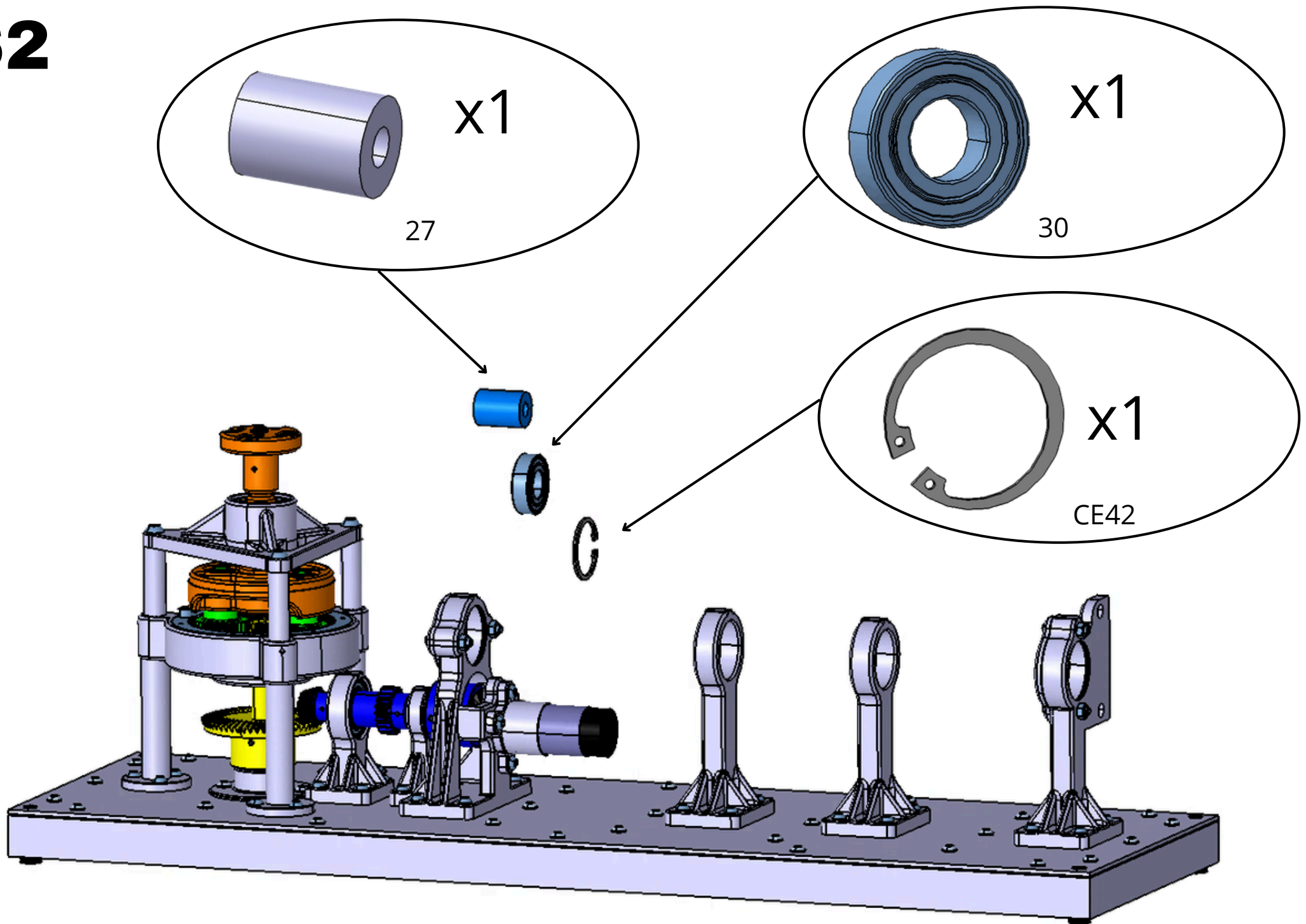
60



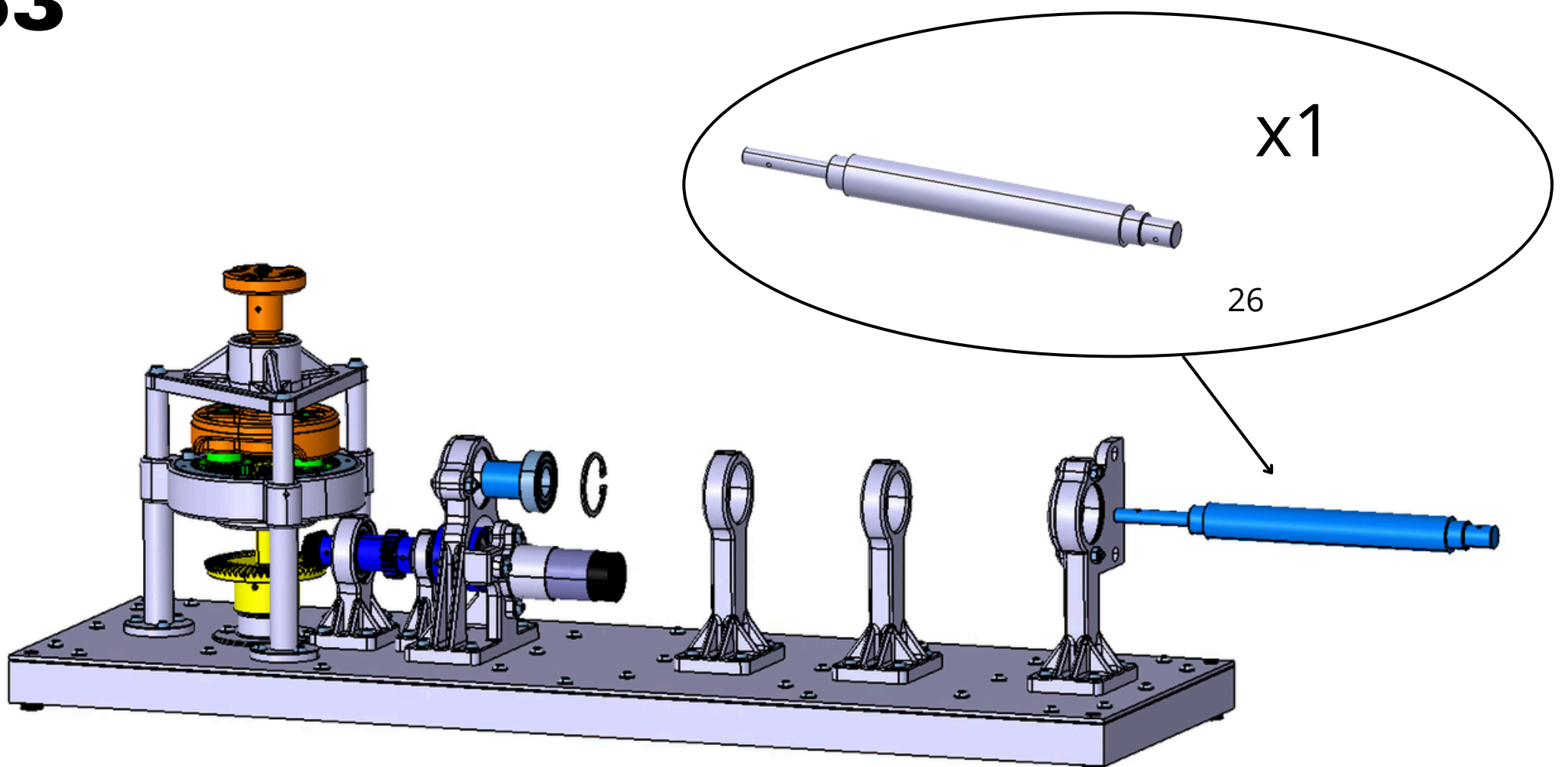
61



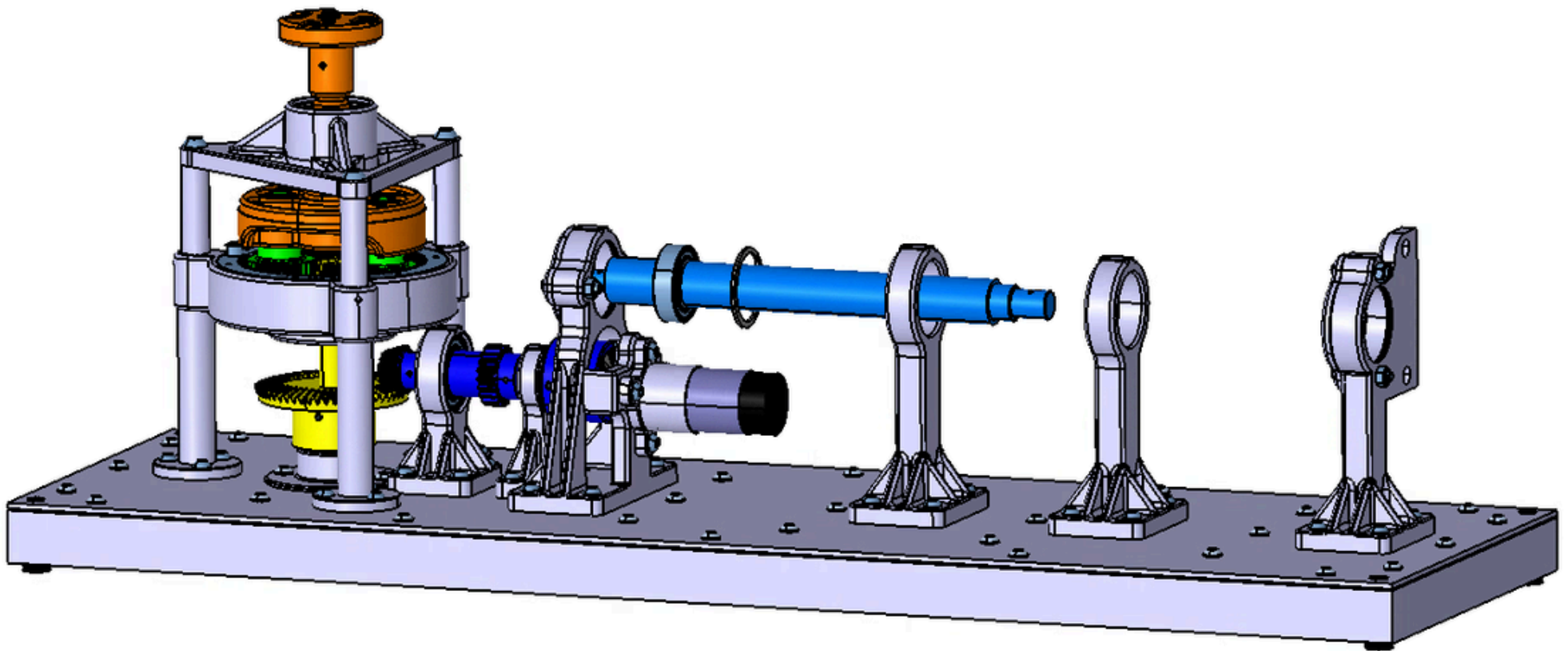
62



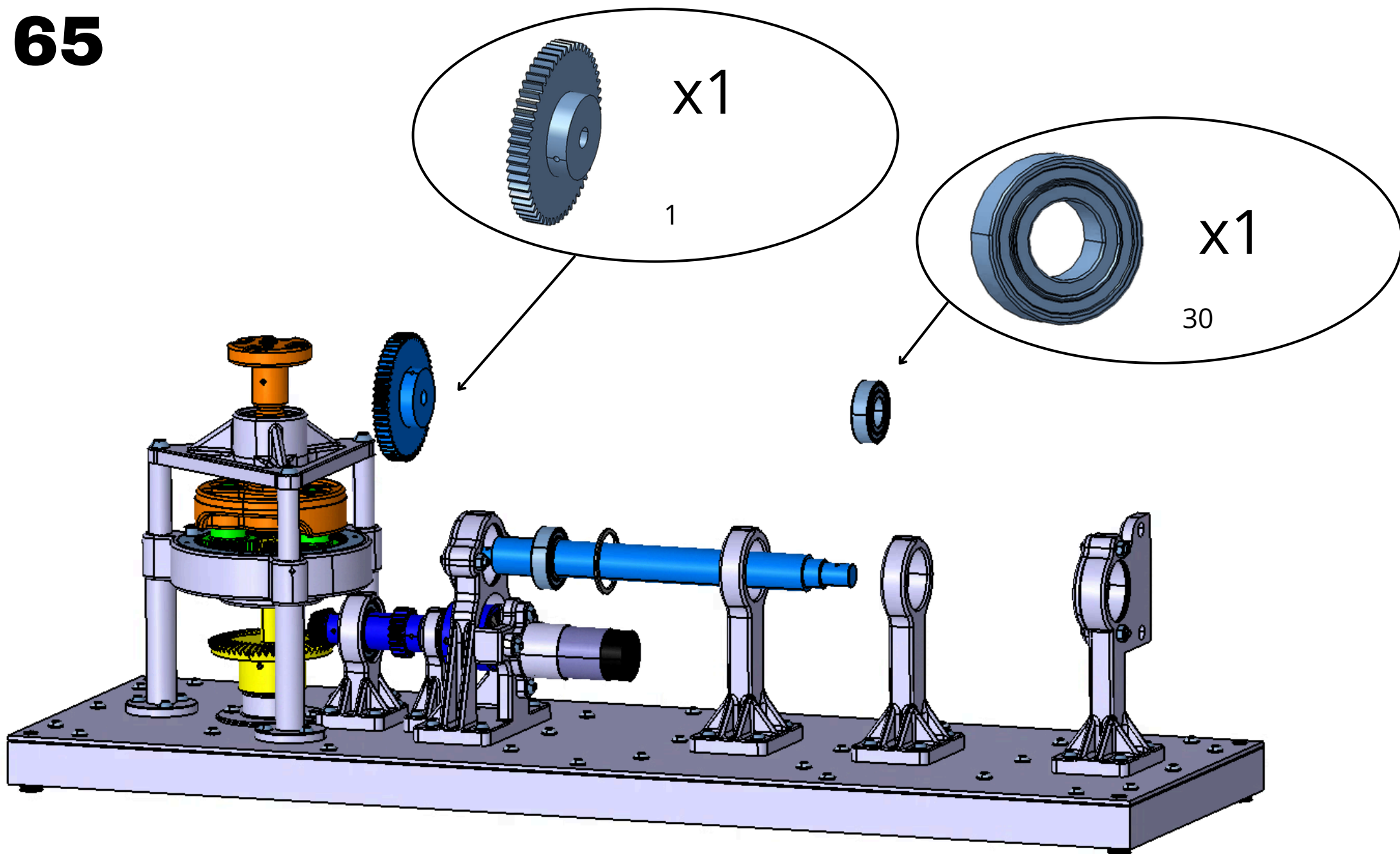
63



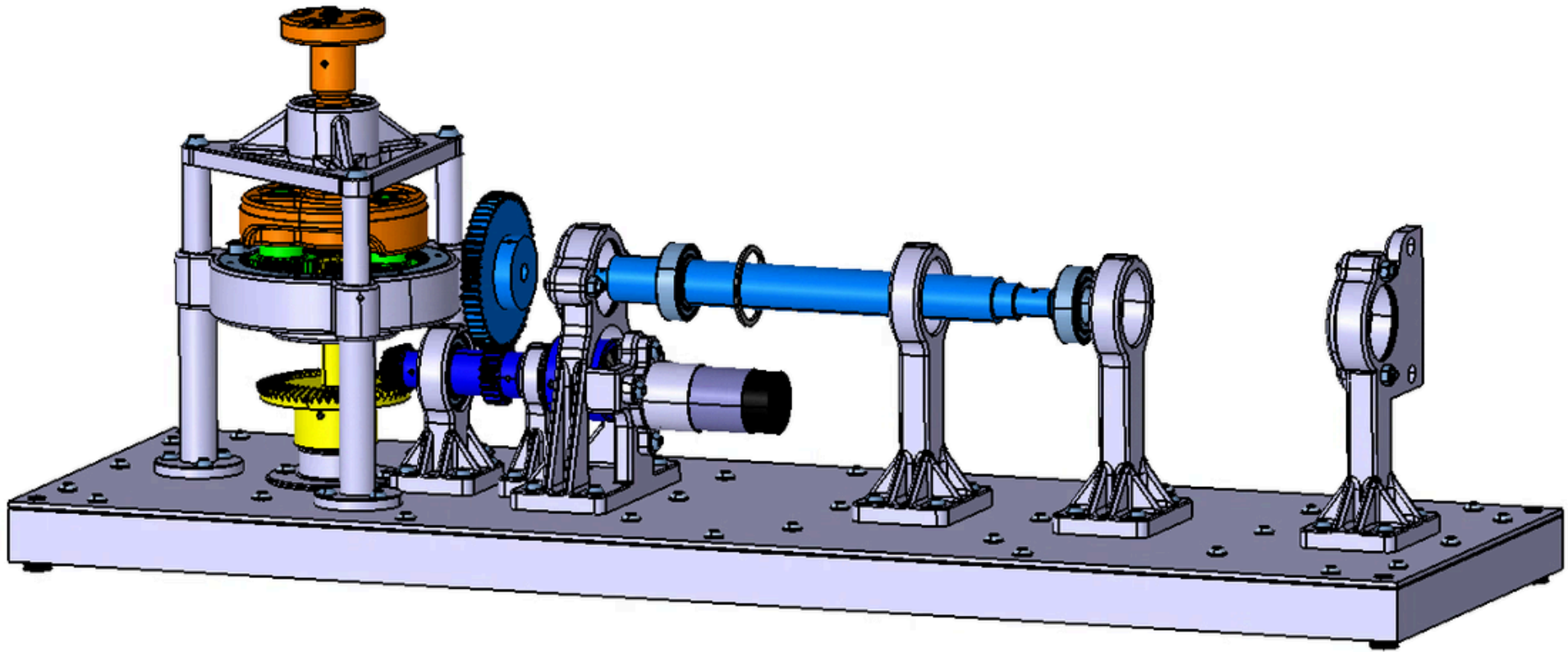
64



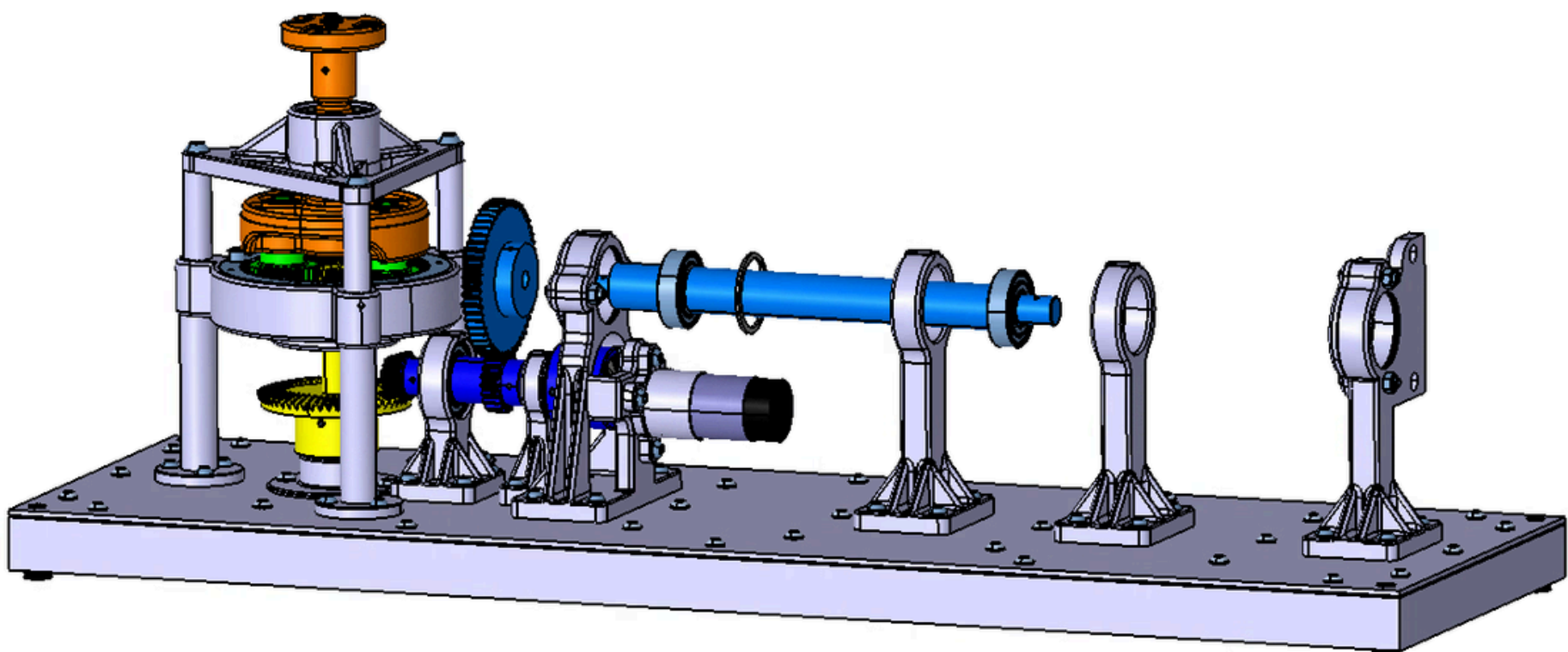
65



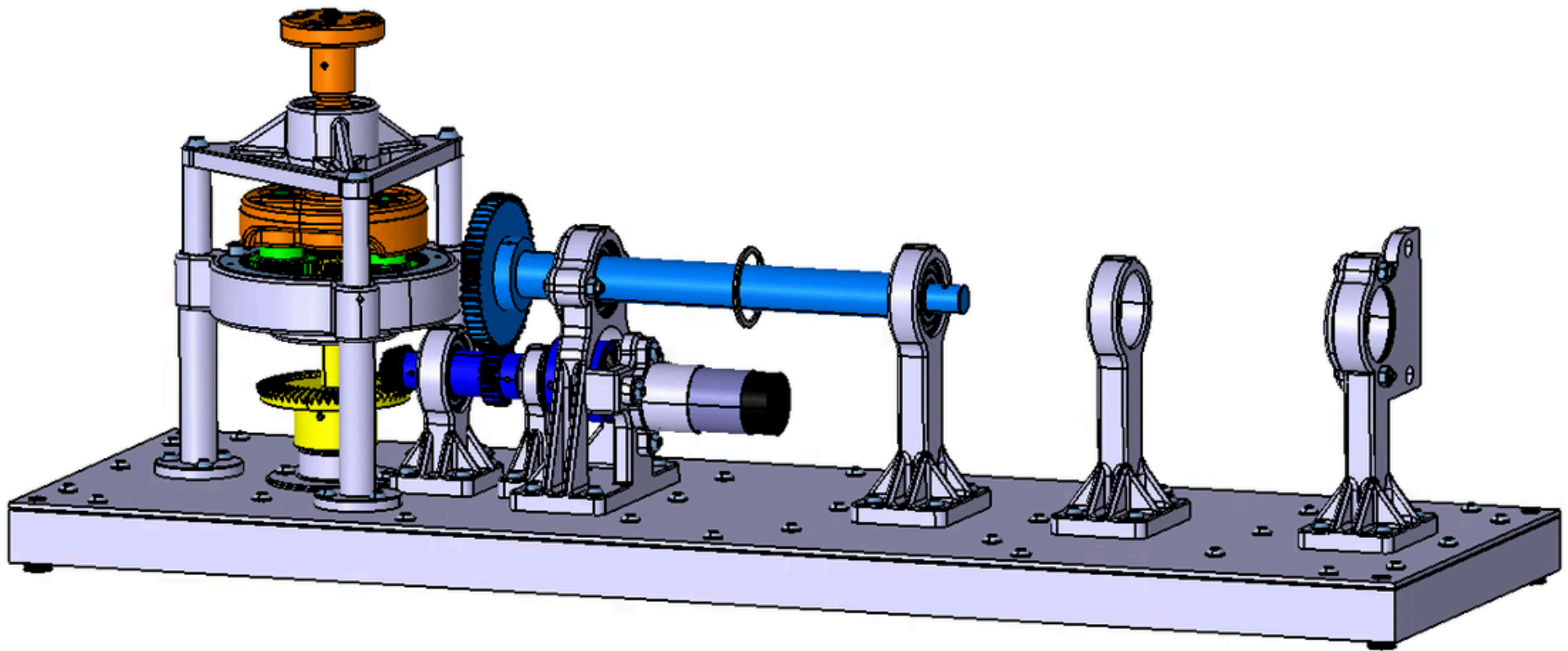
66



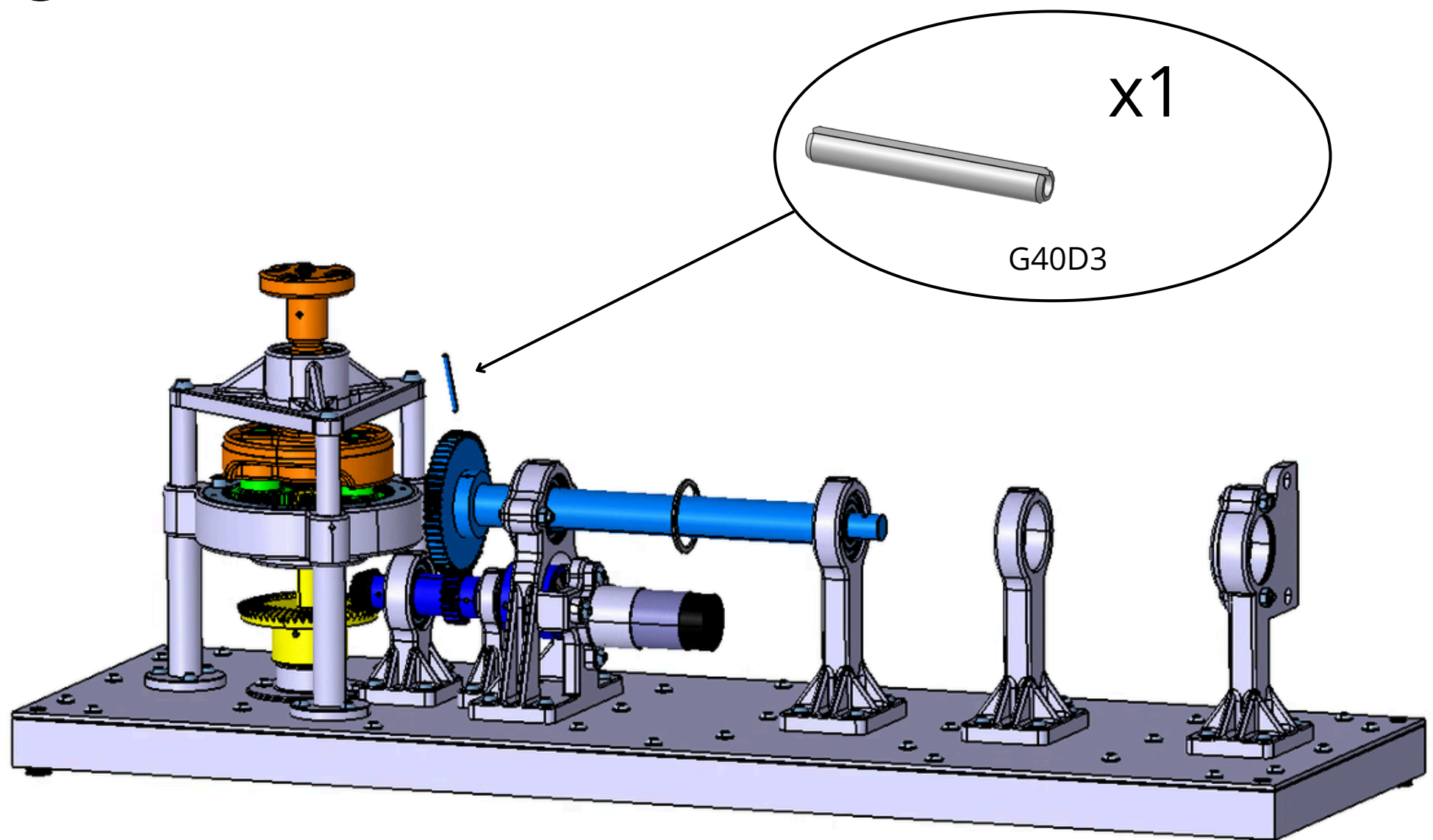
67

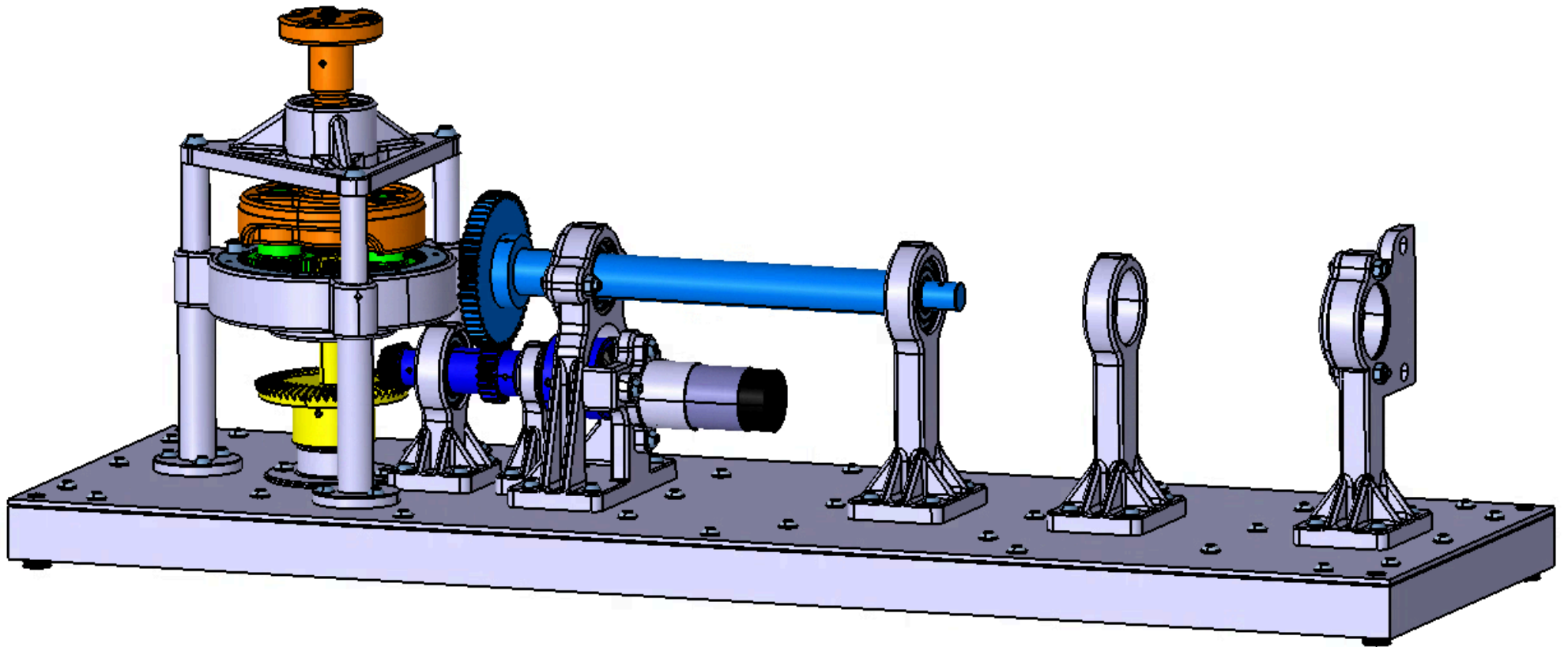


68

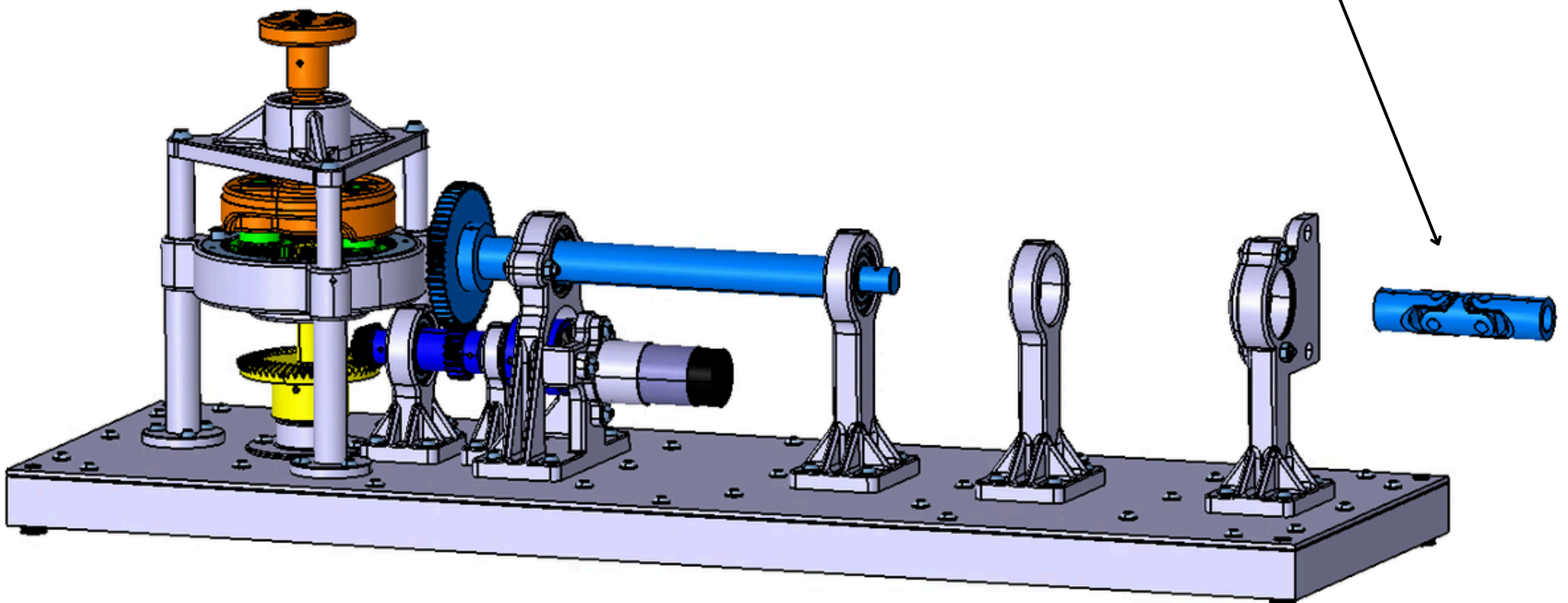
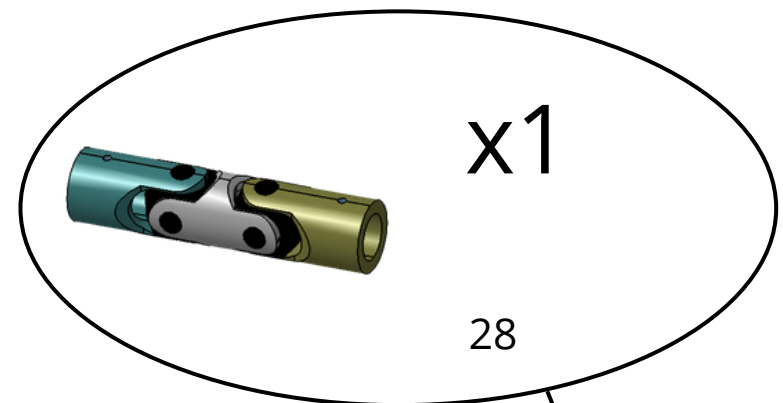


69

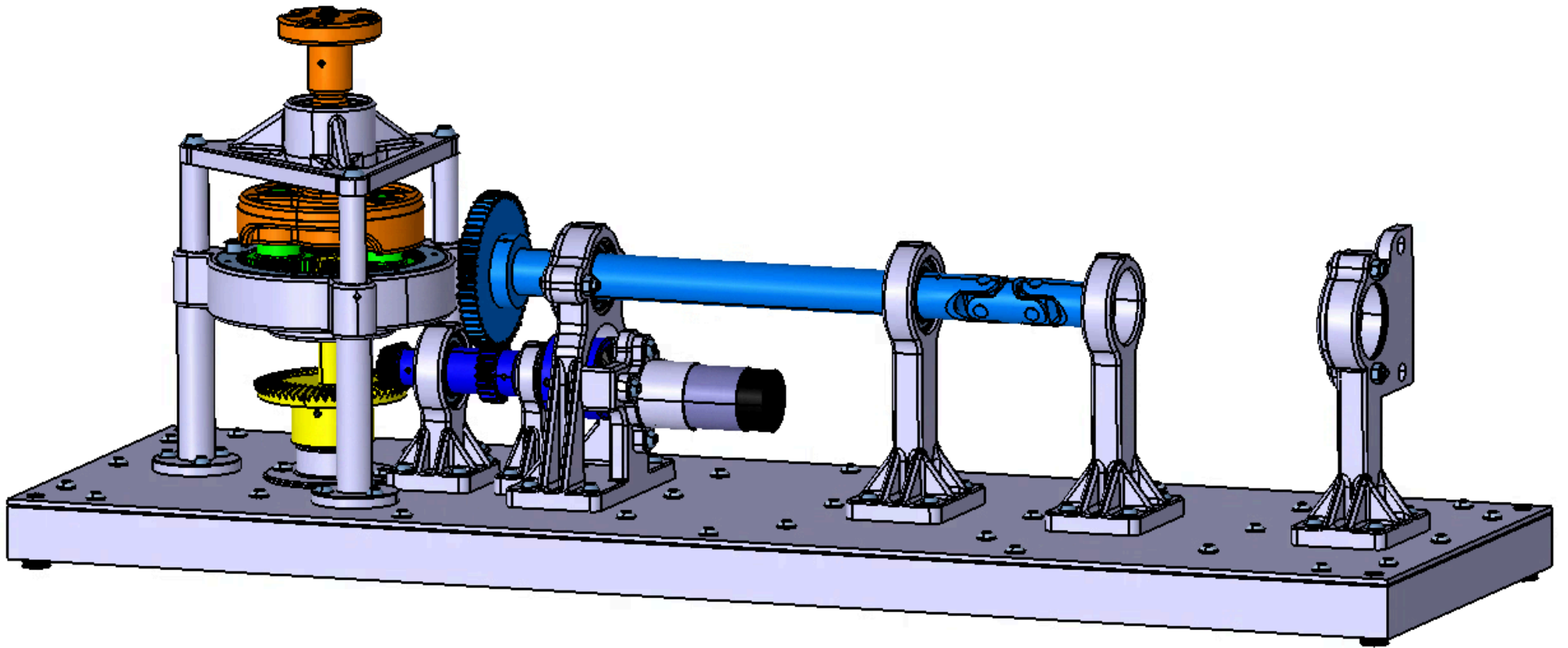




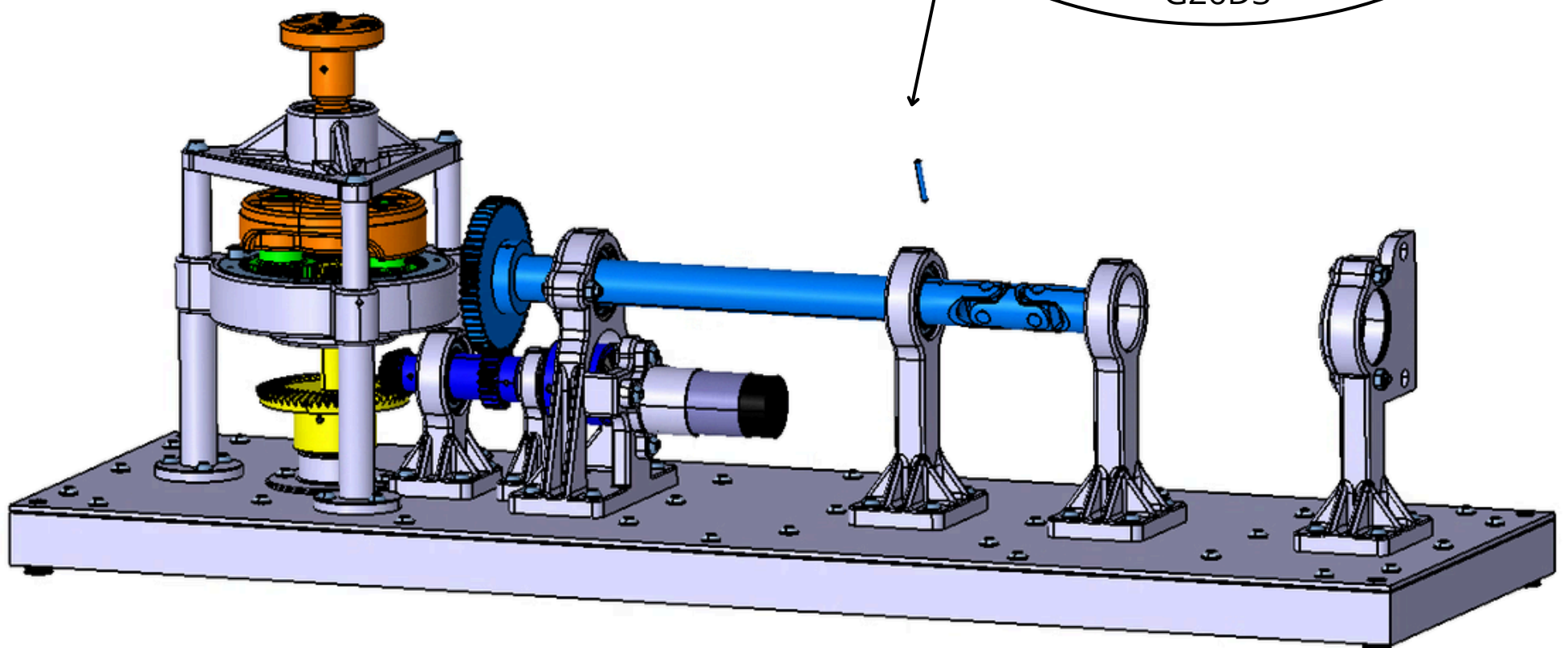
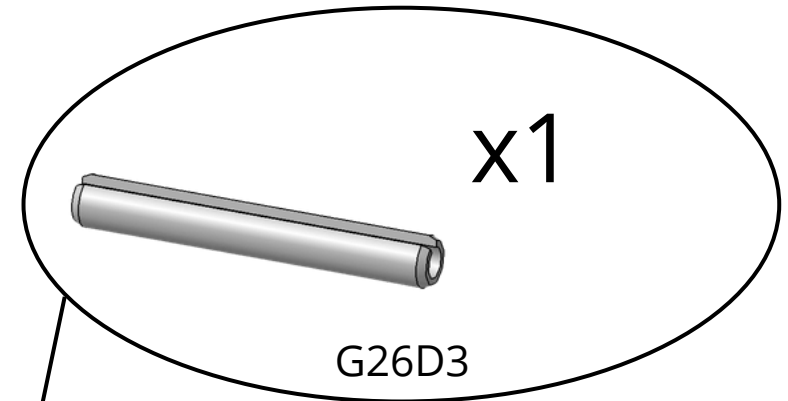
70



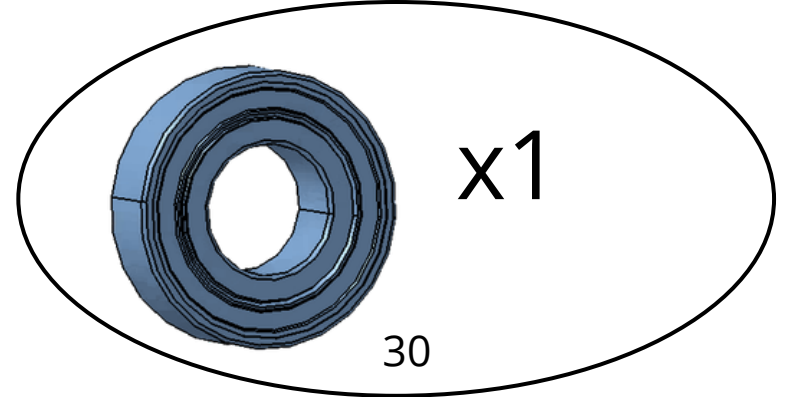
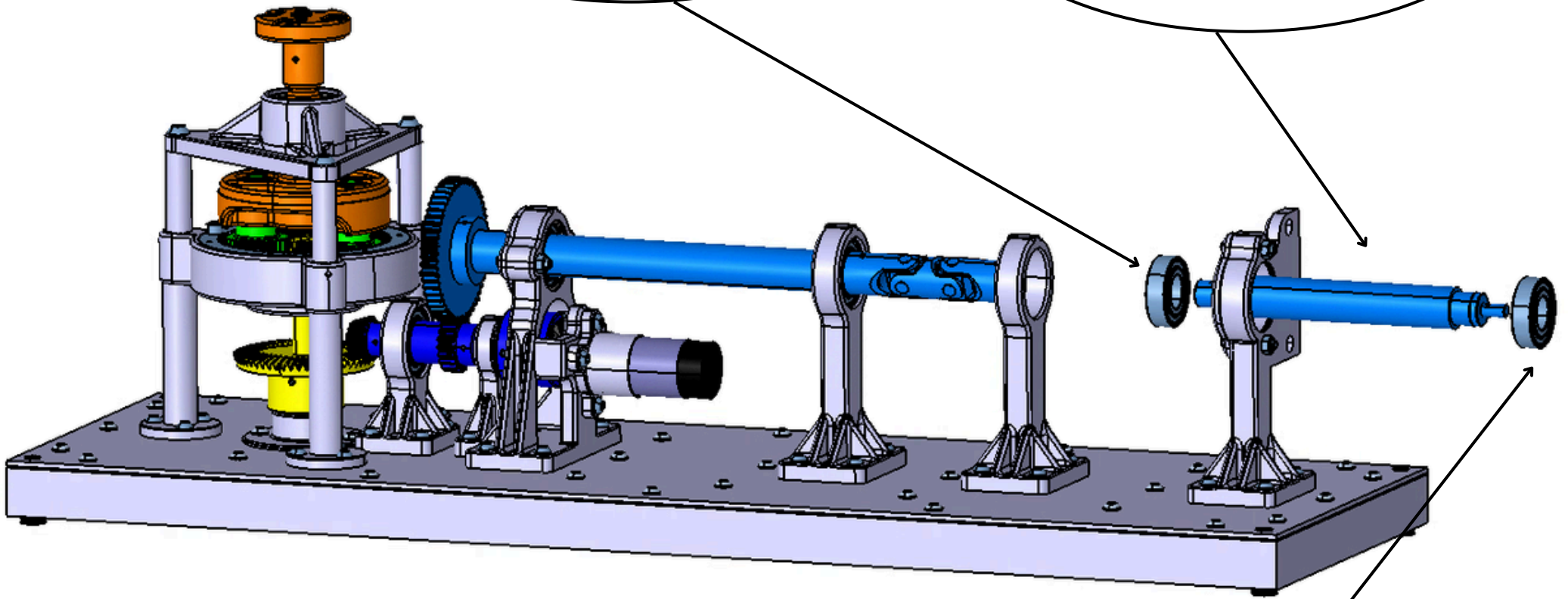
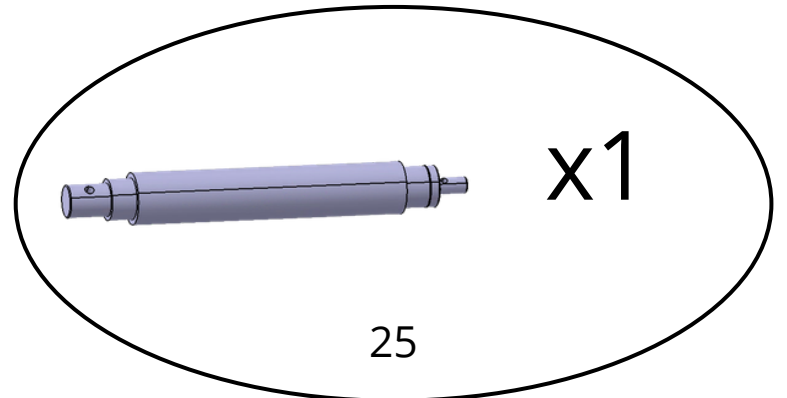
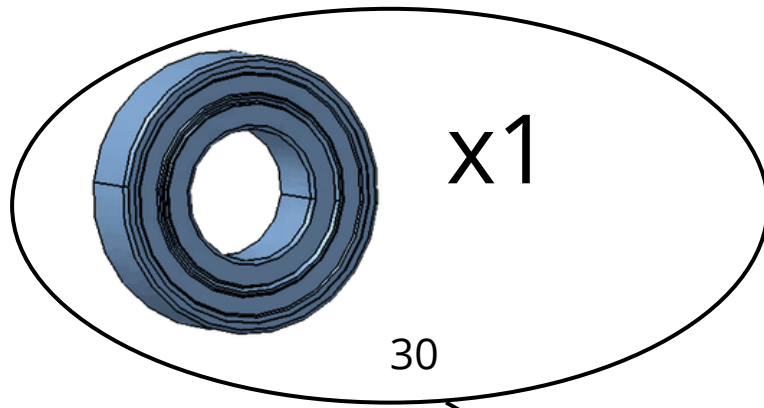
71



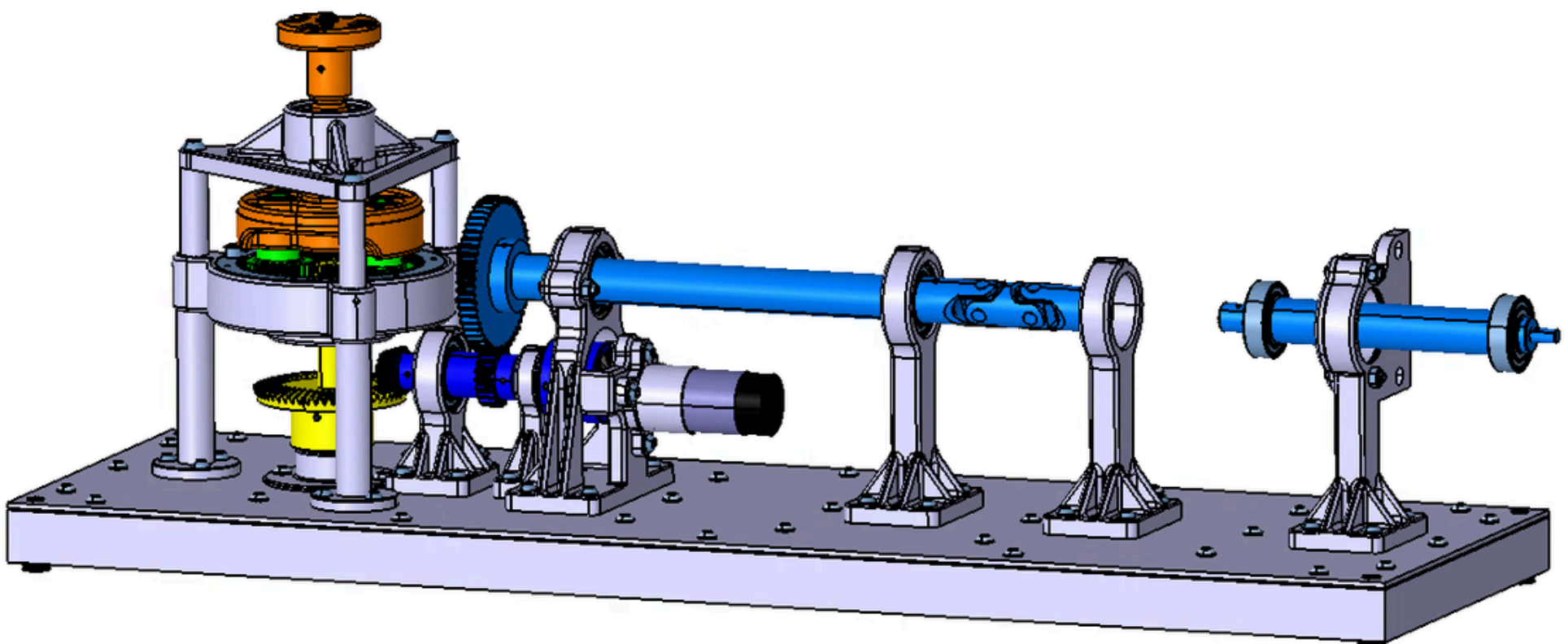
72



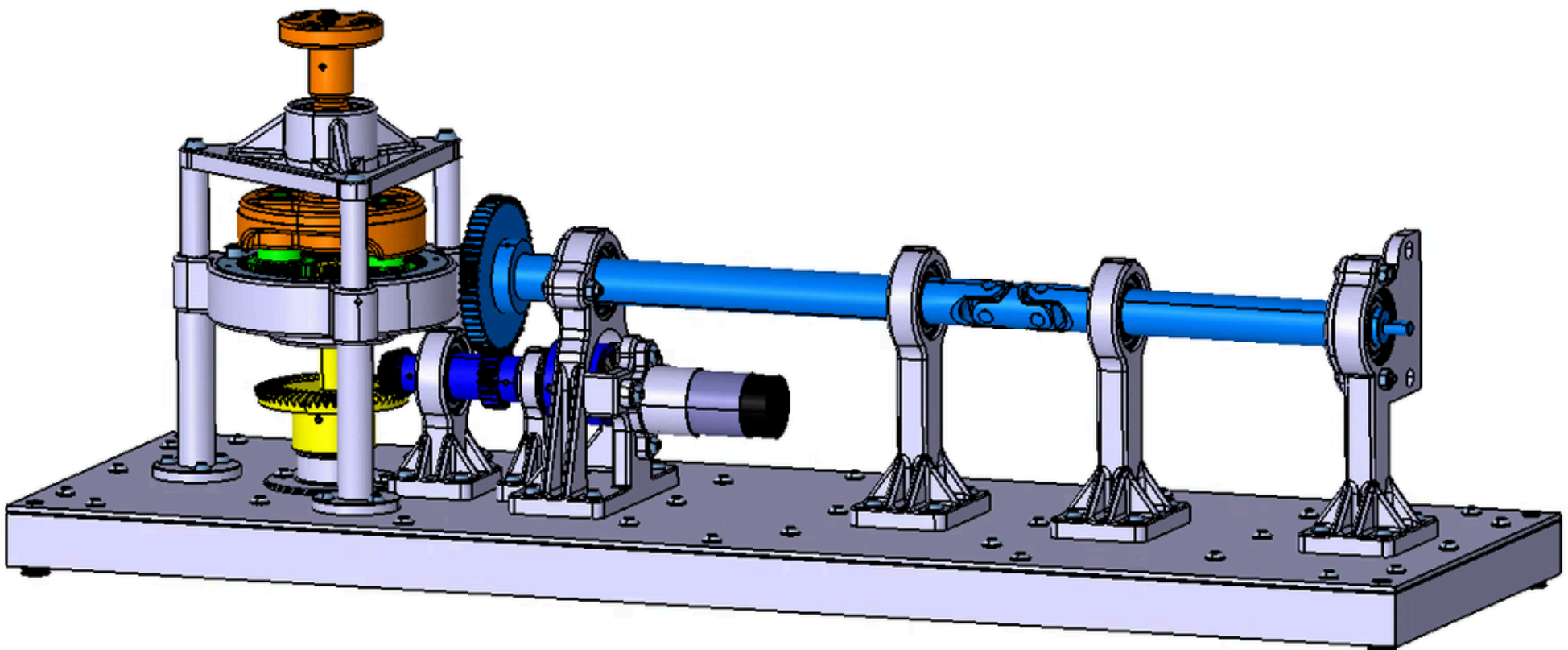
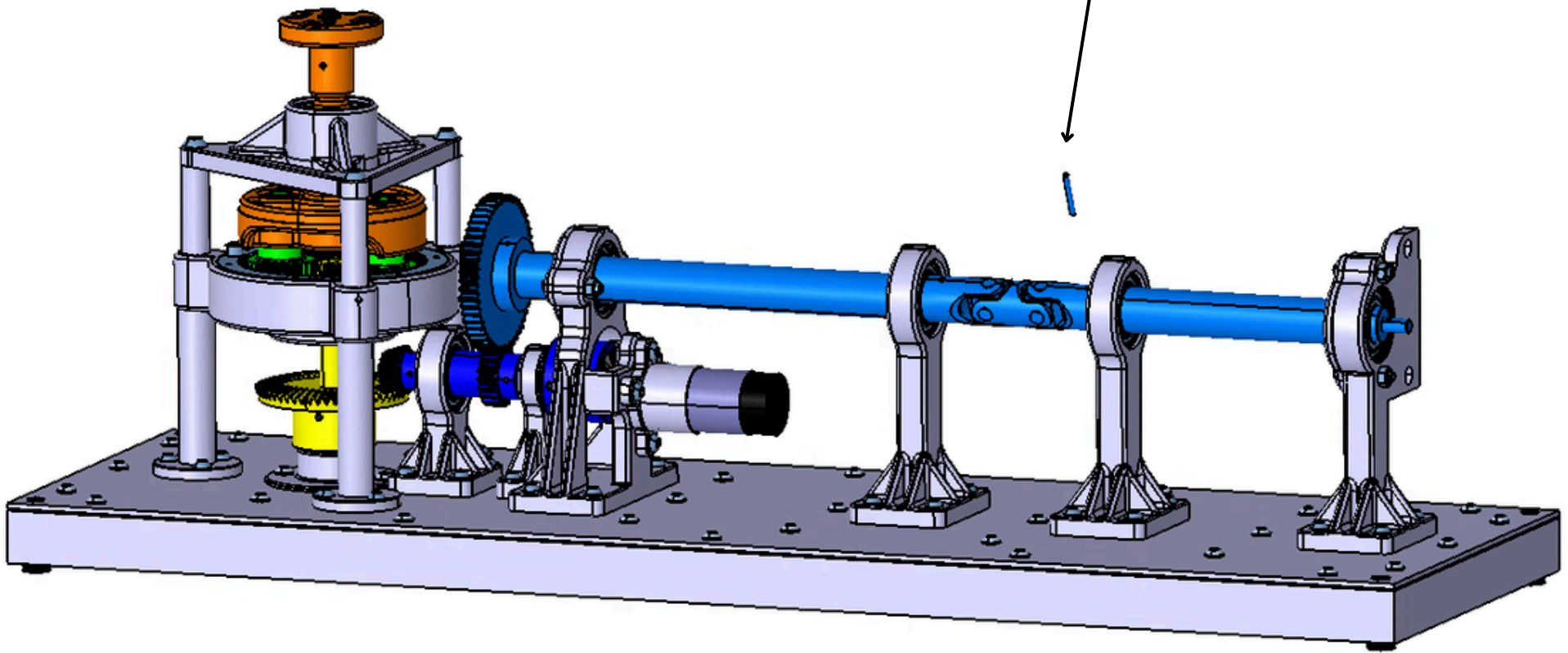
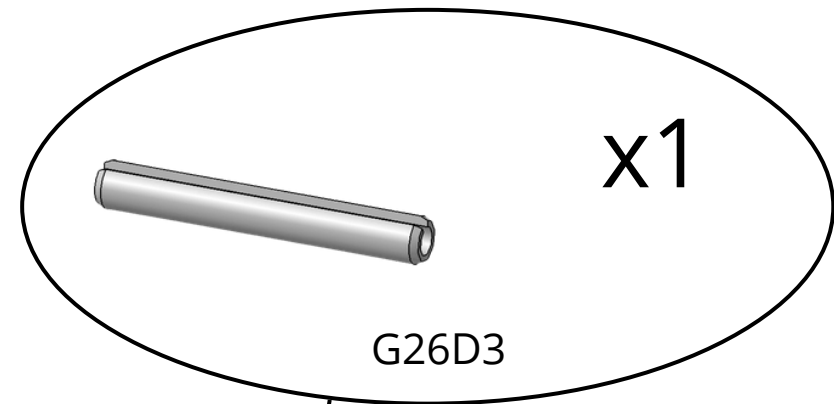
73



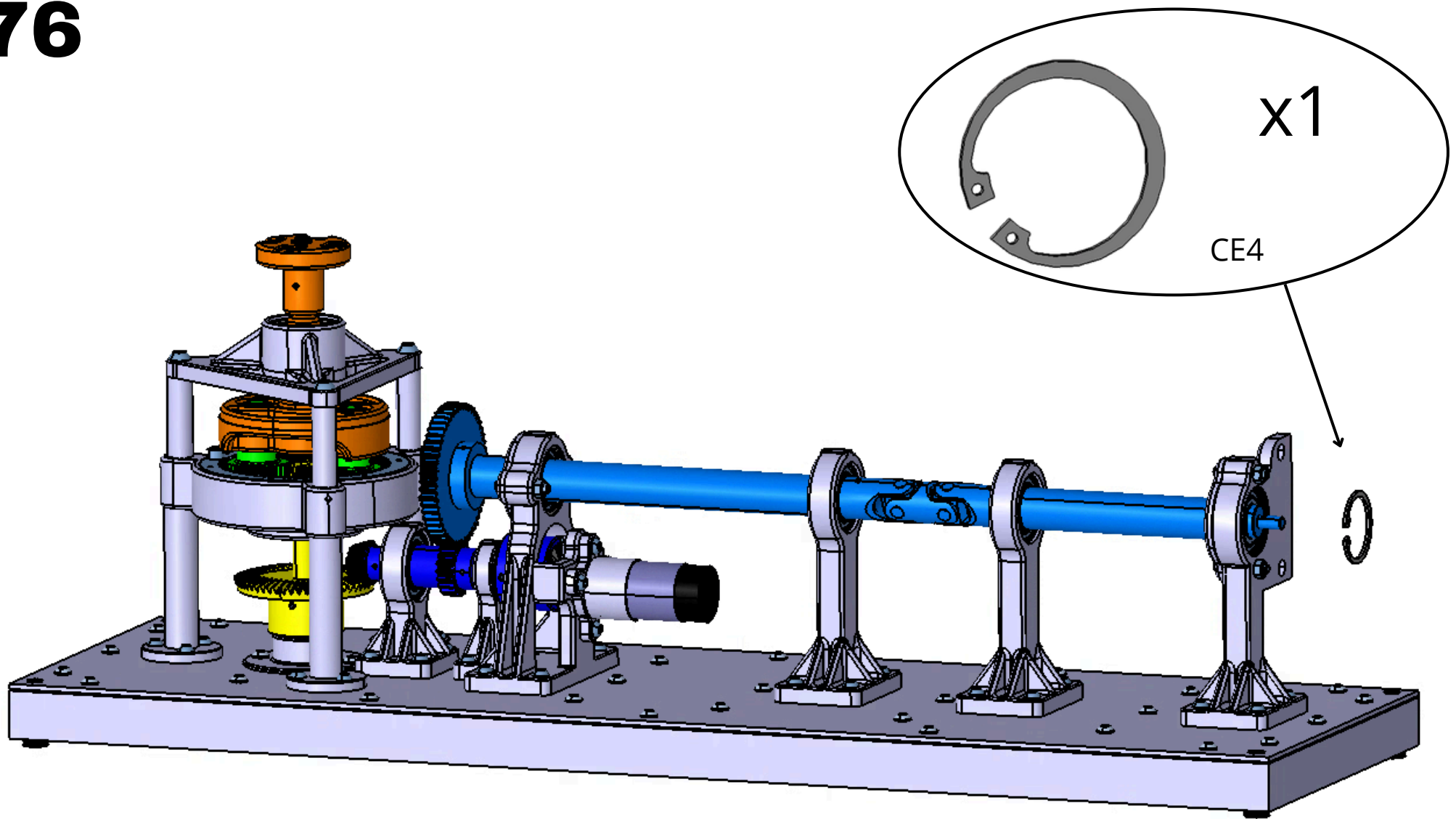
74



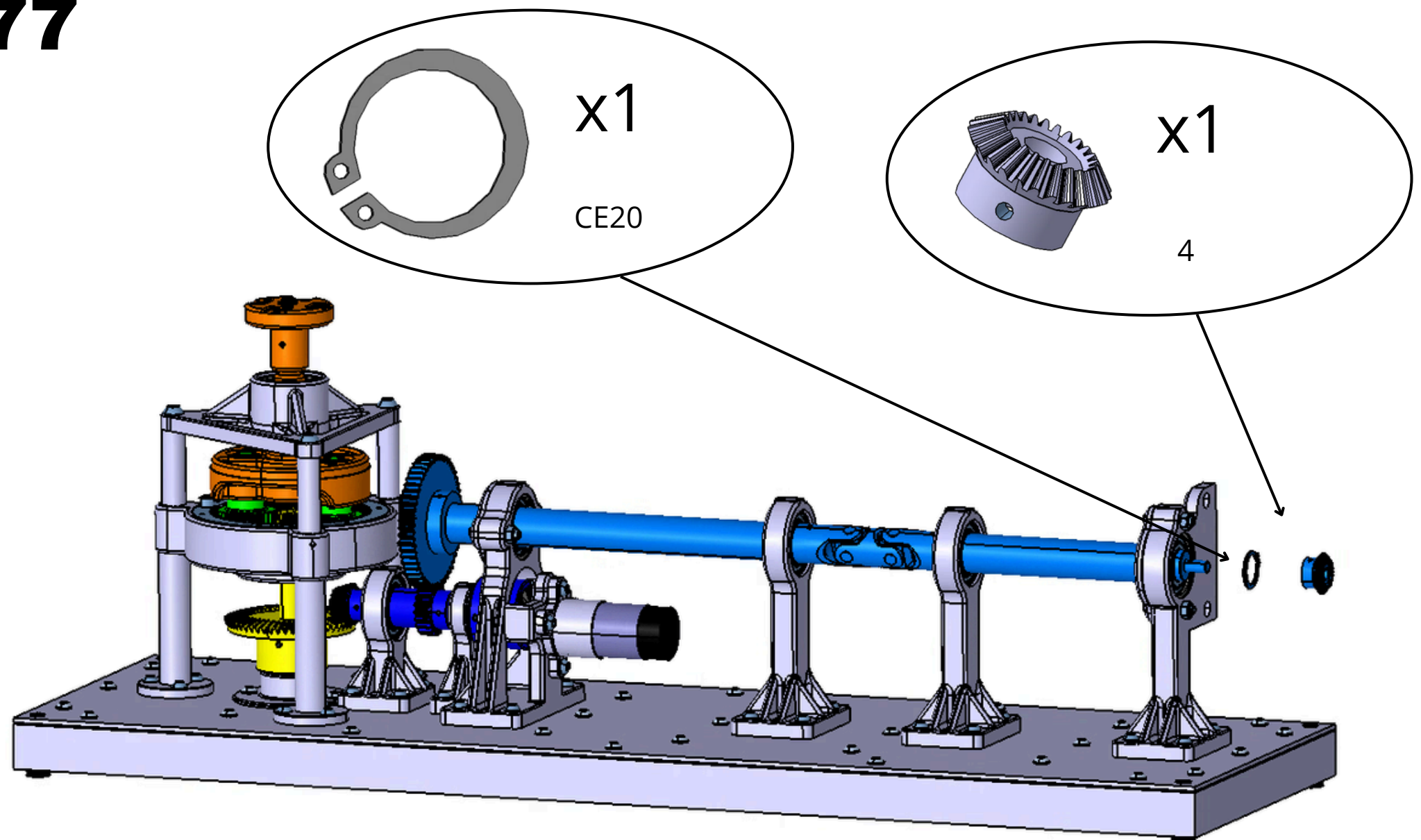
75



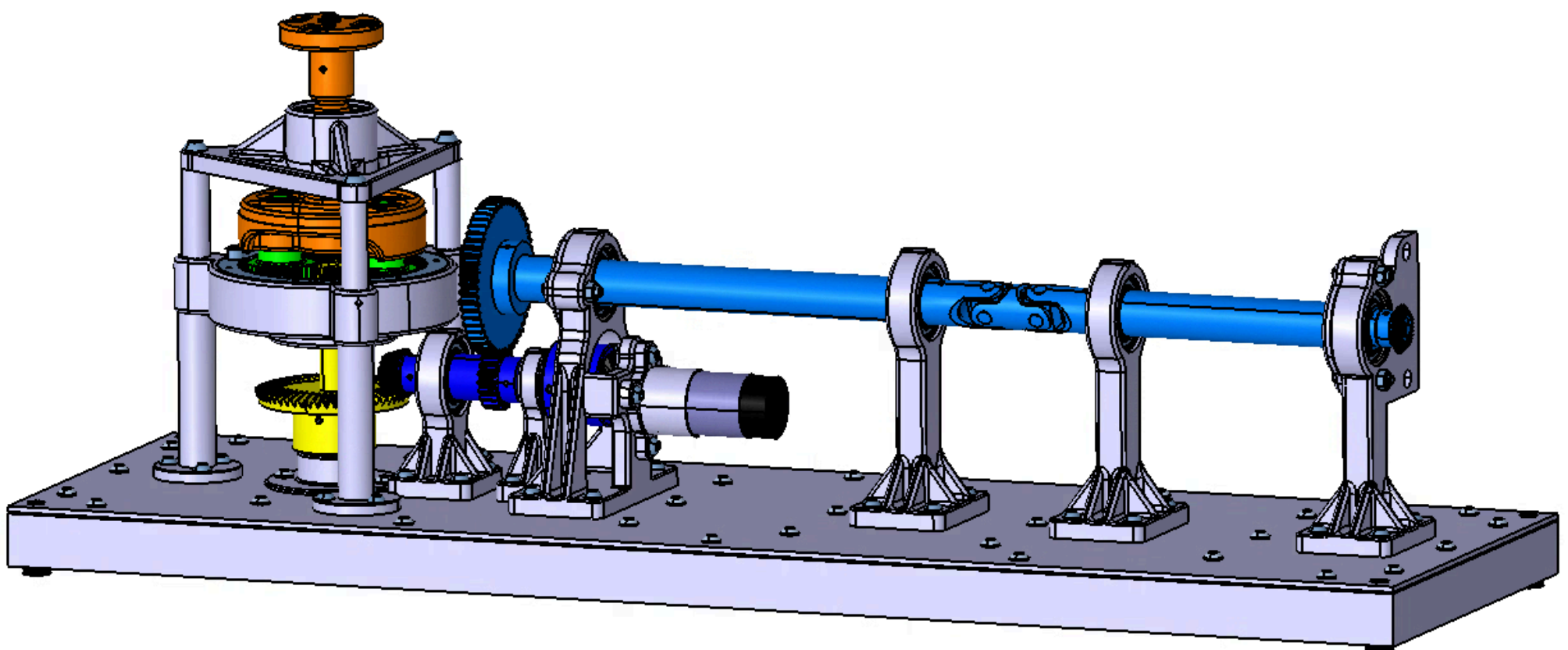
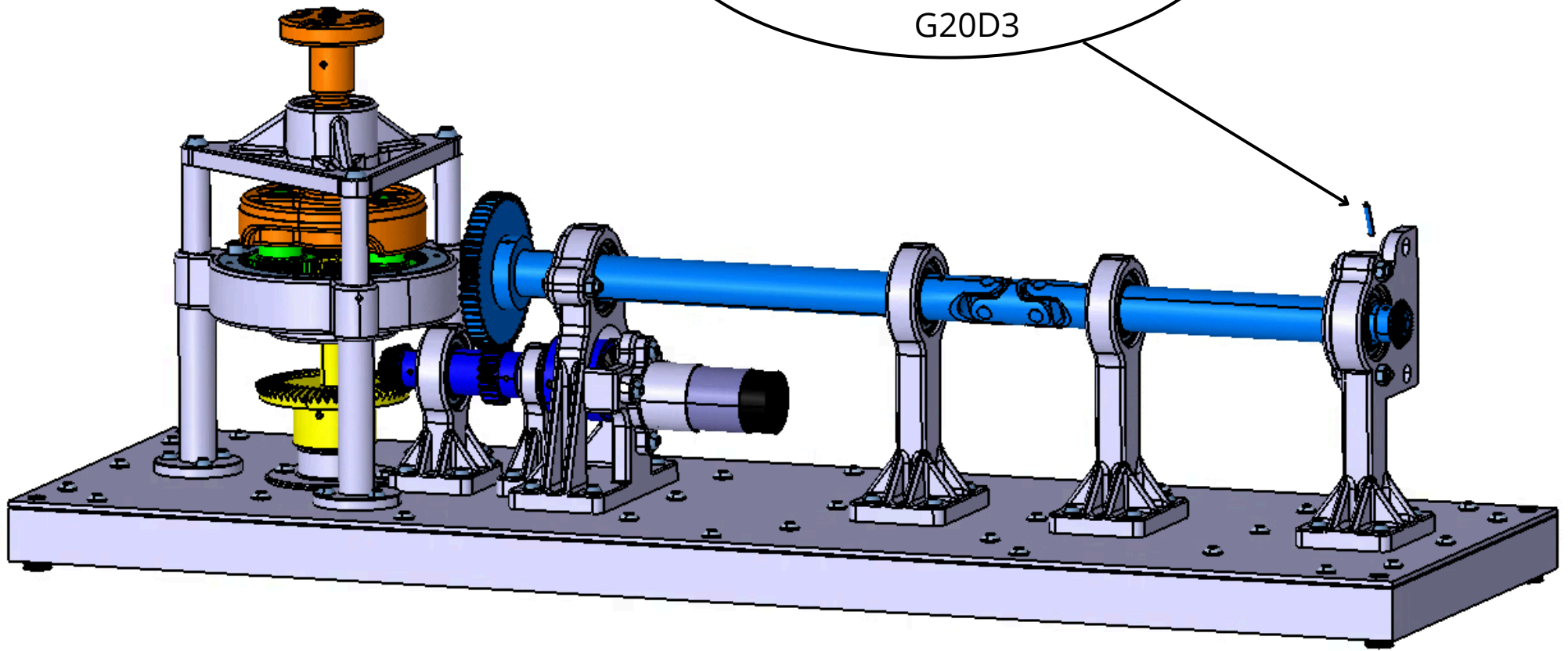
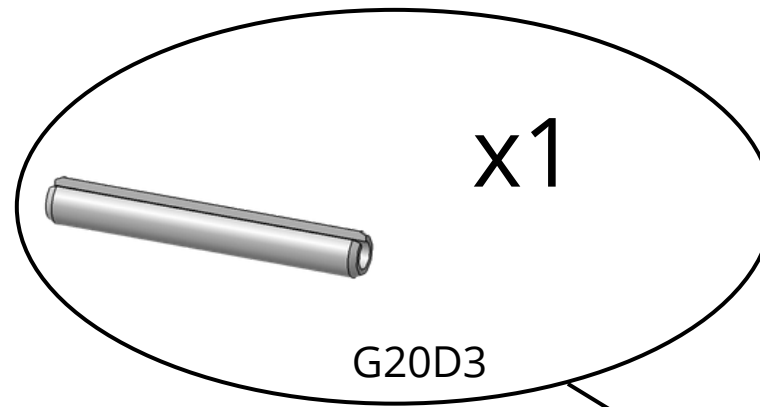
76

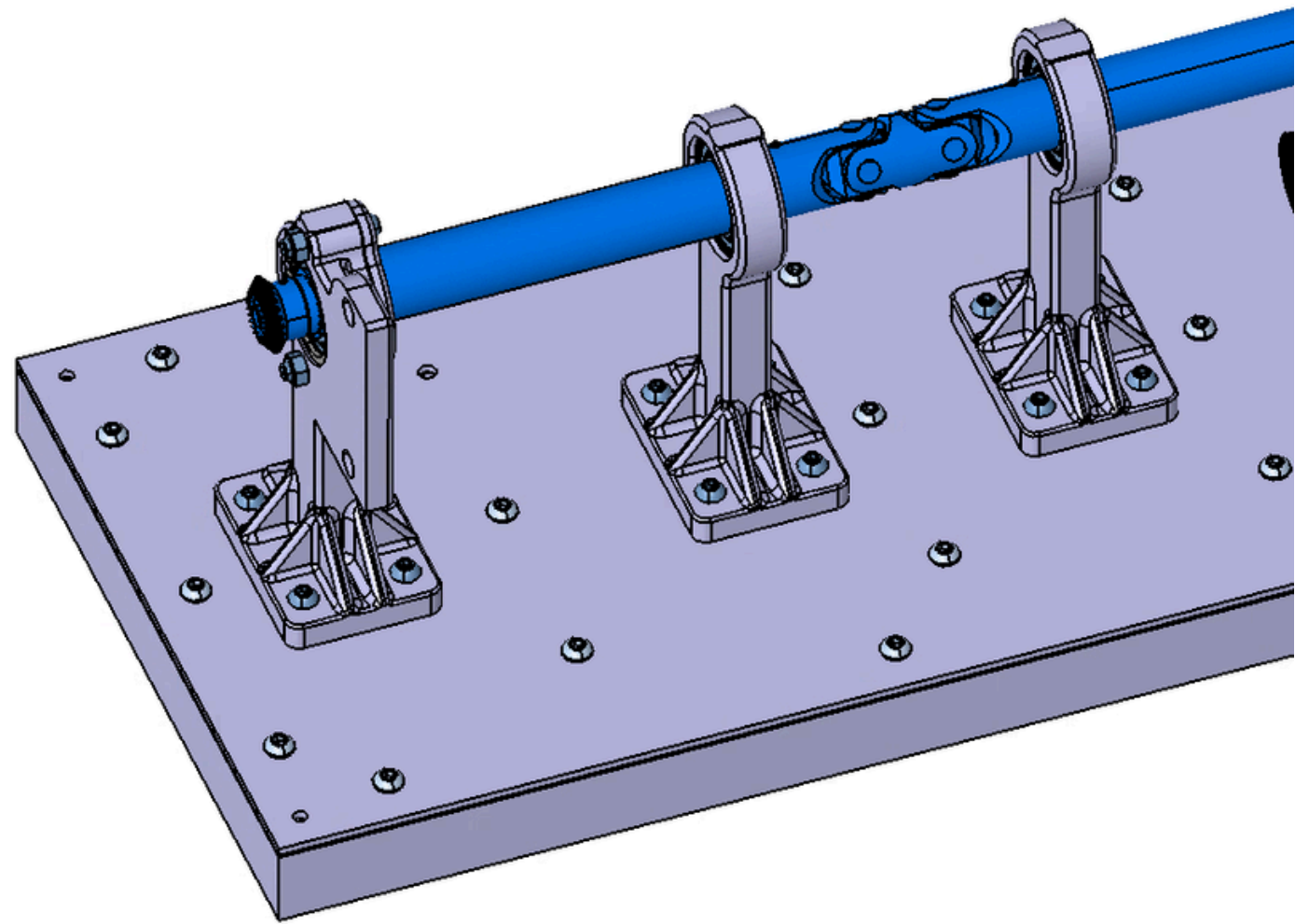


77

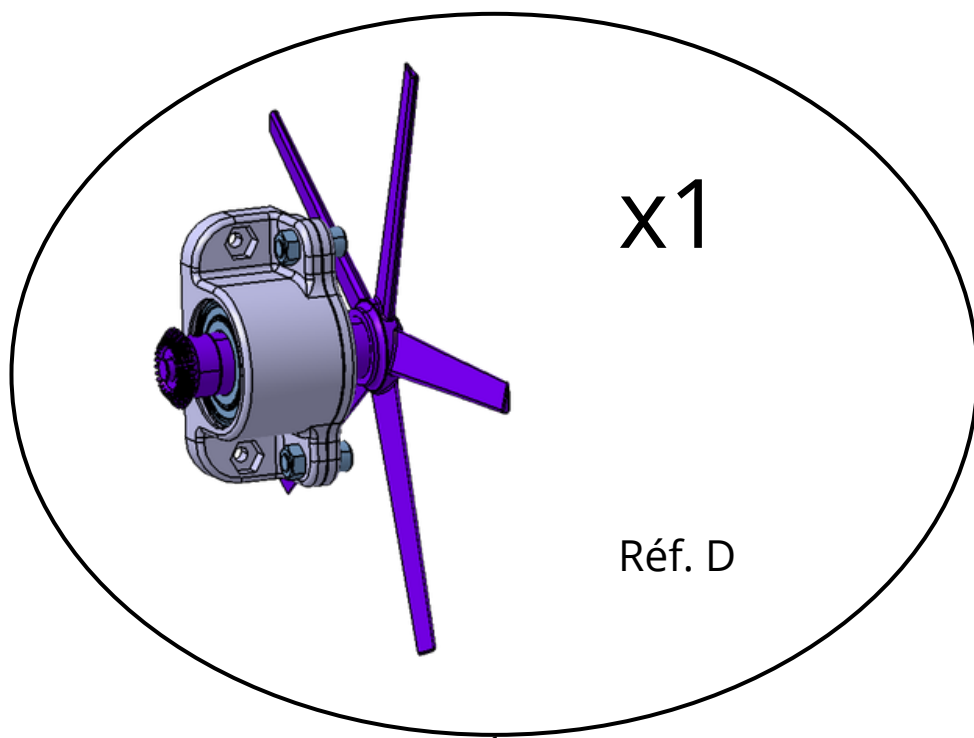


78



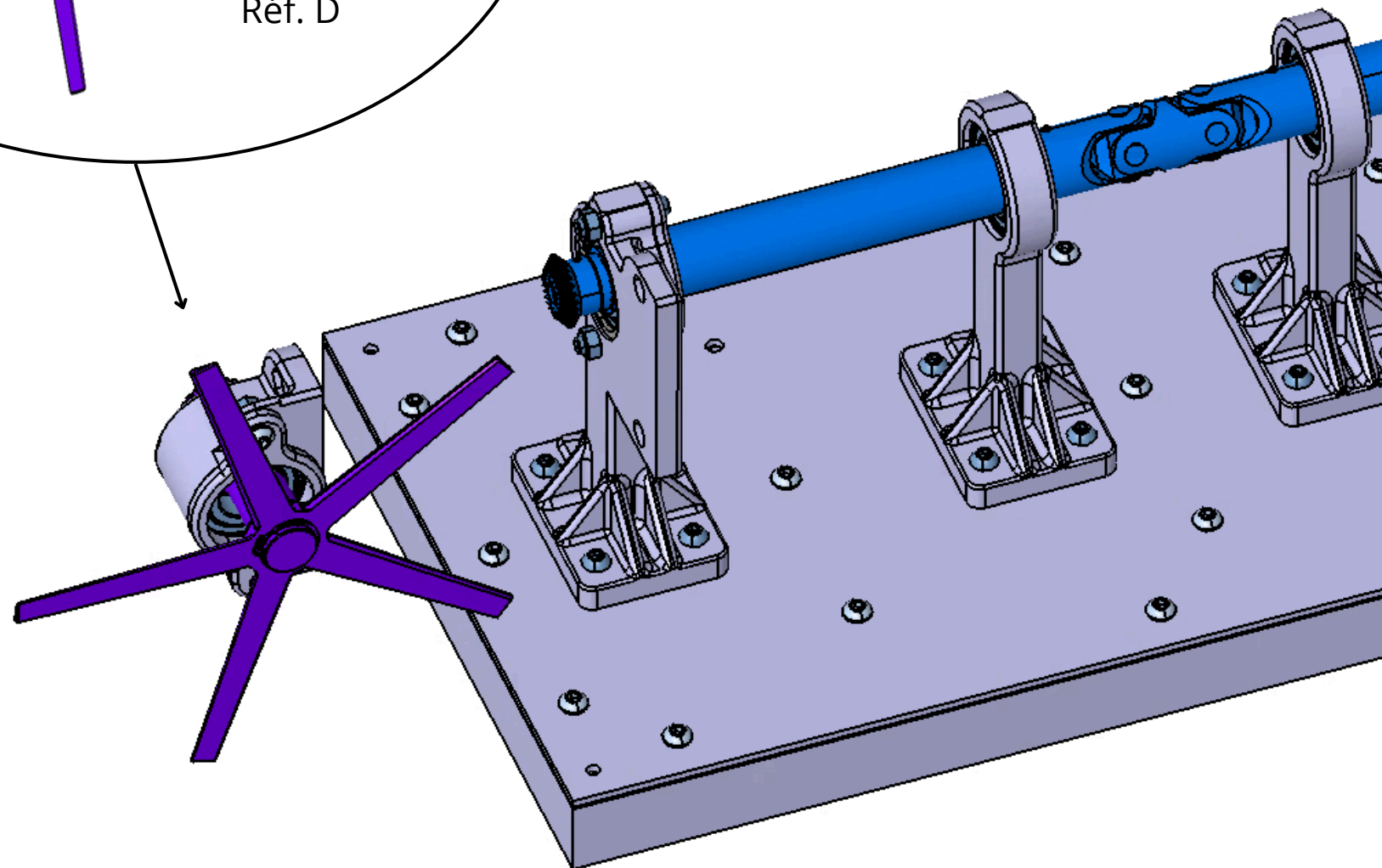


79

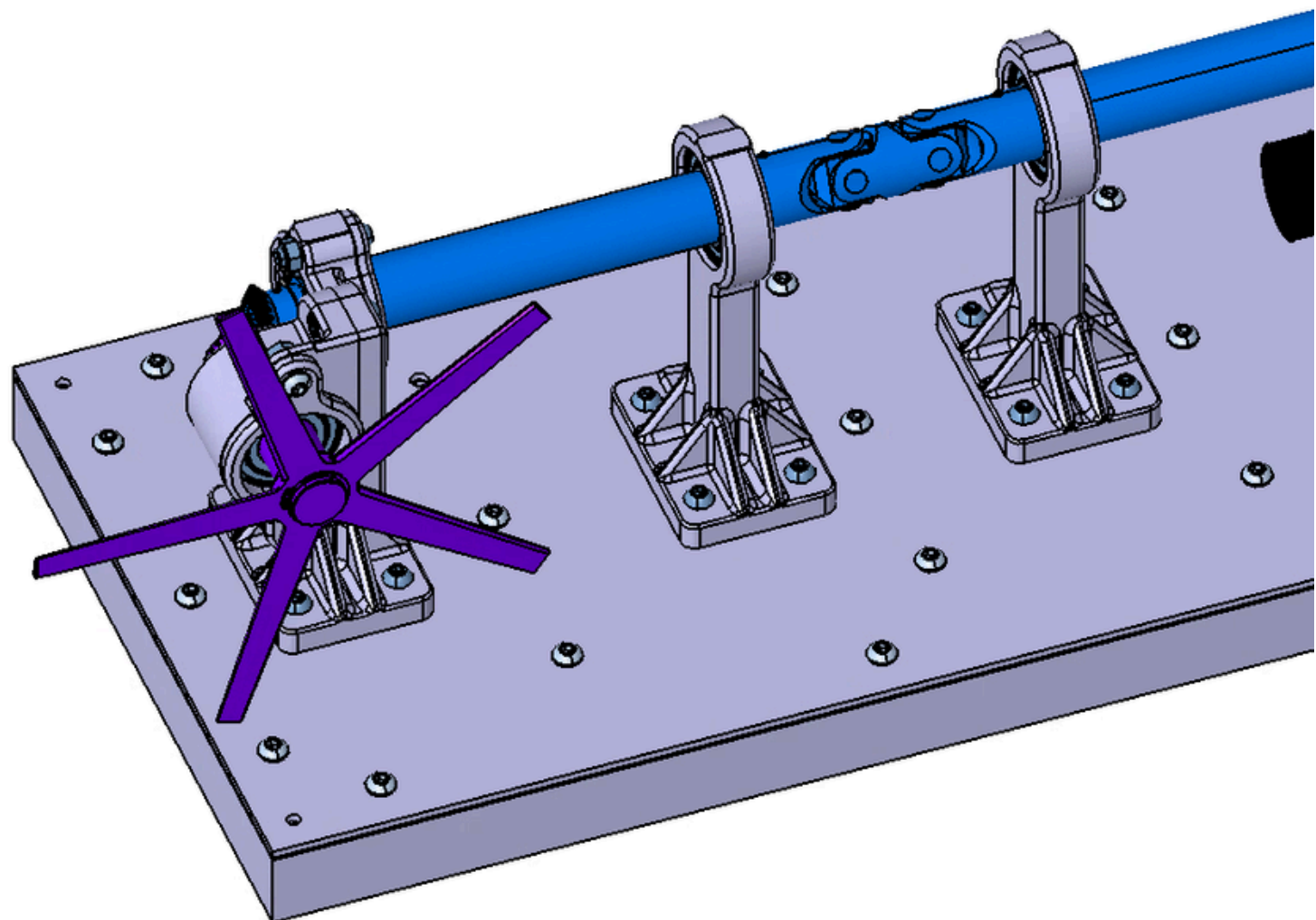
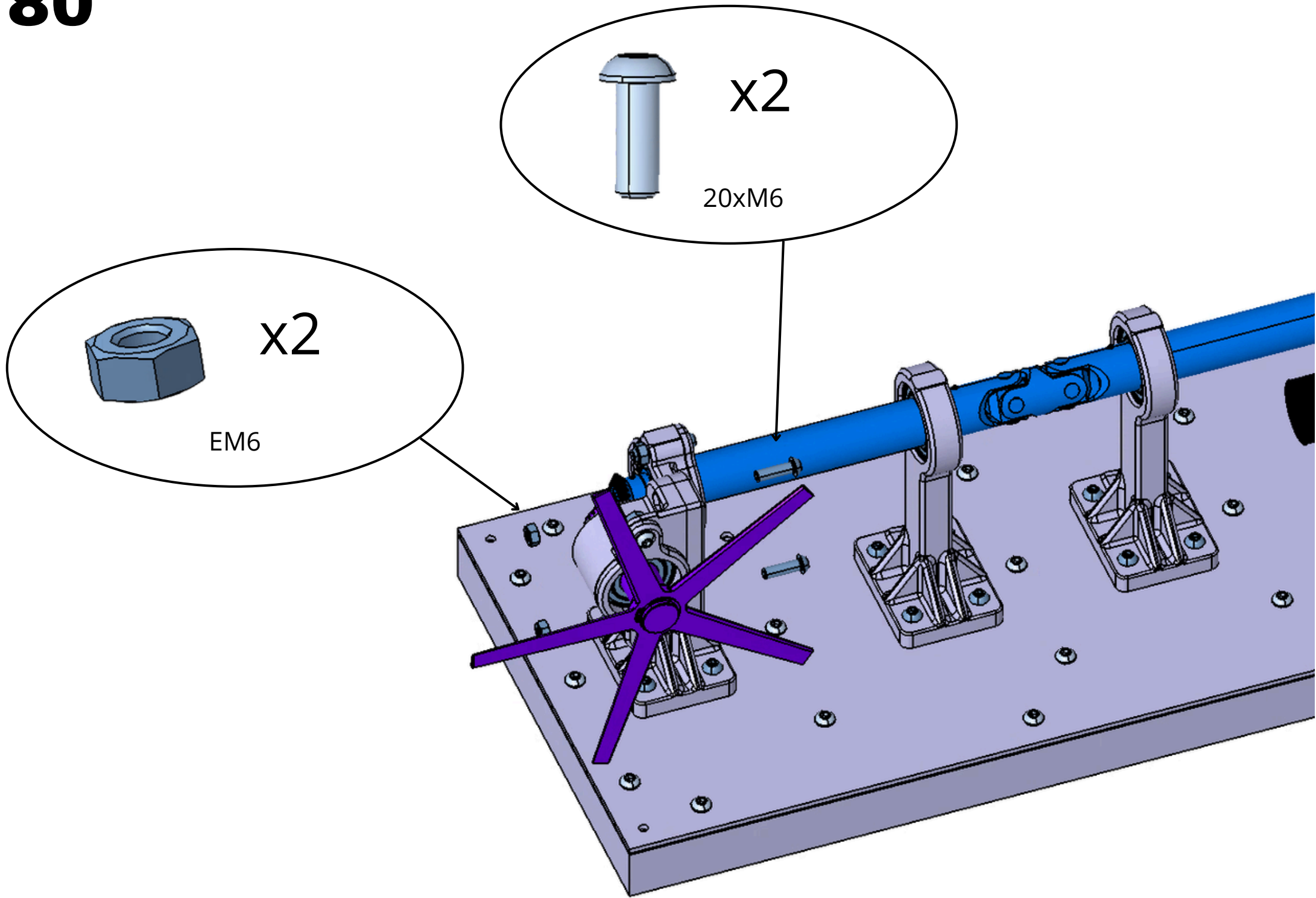


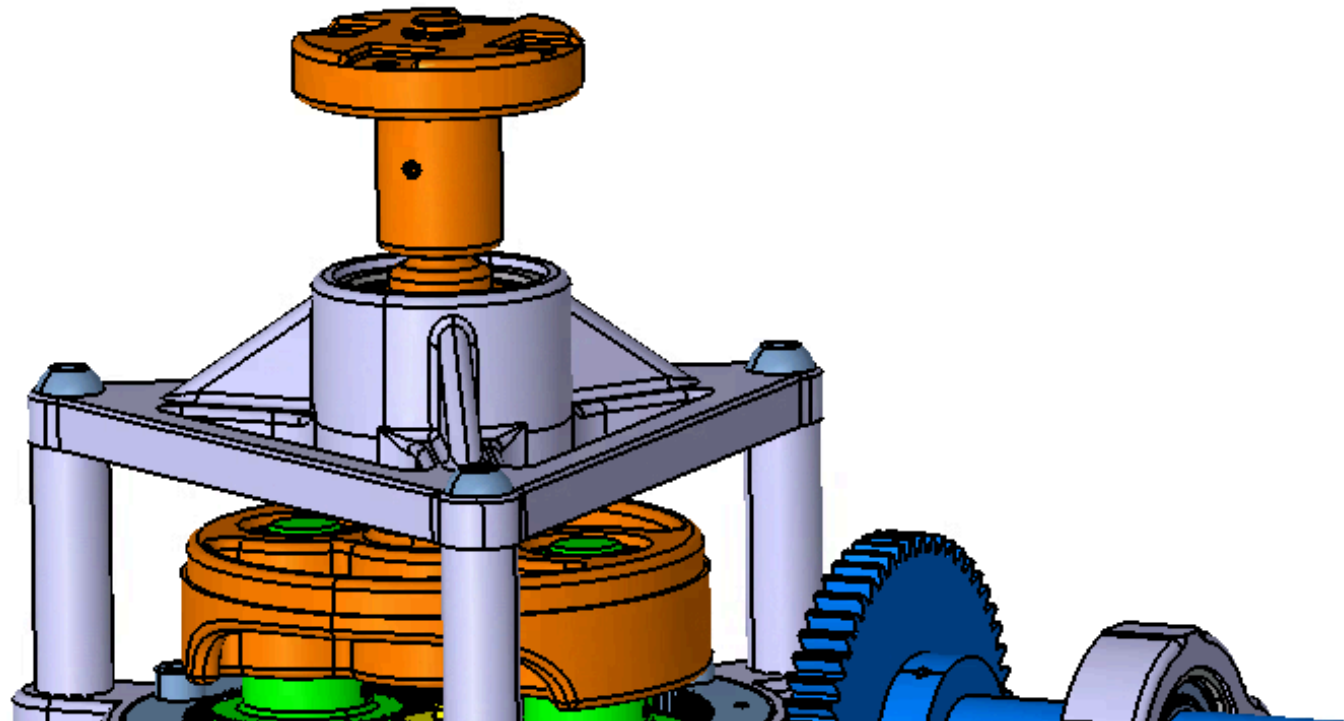
x1

Réf. D

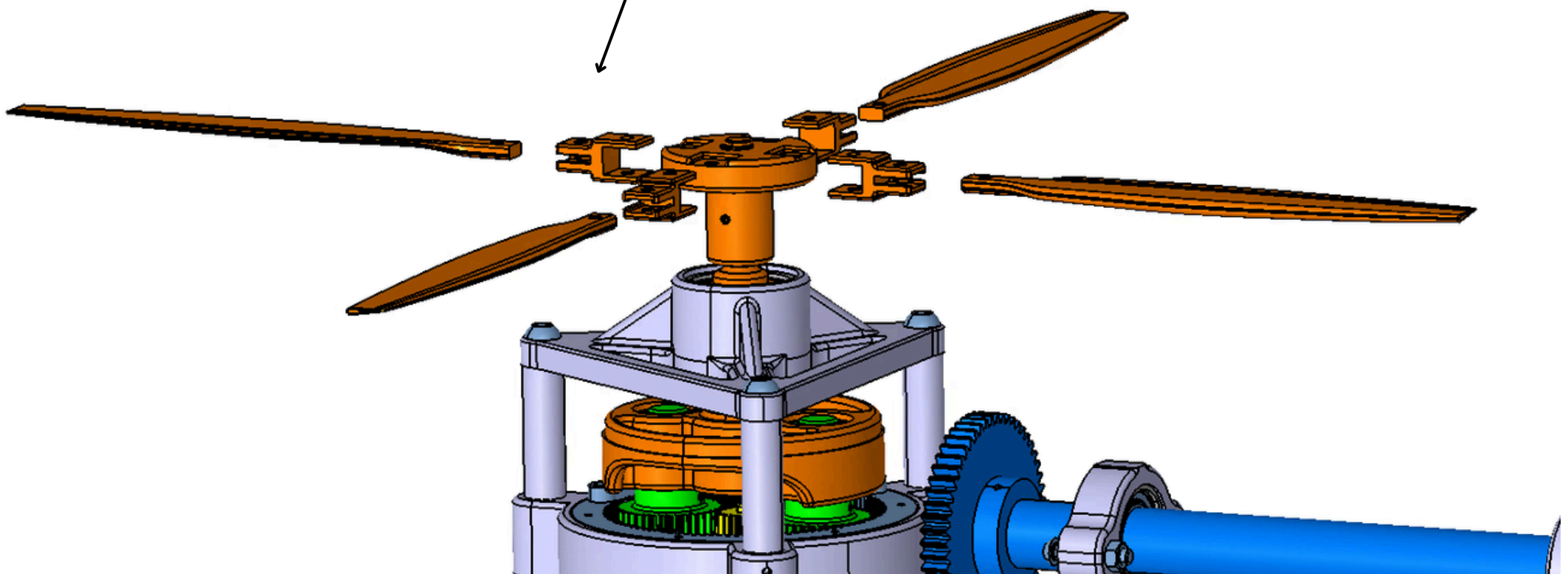
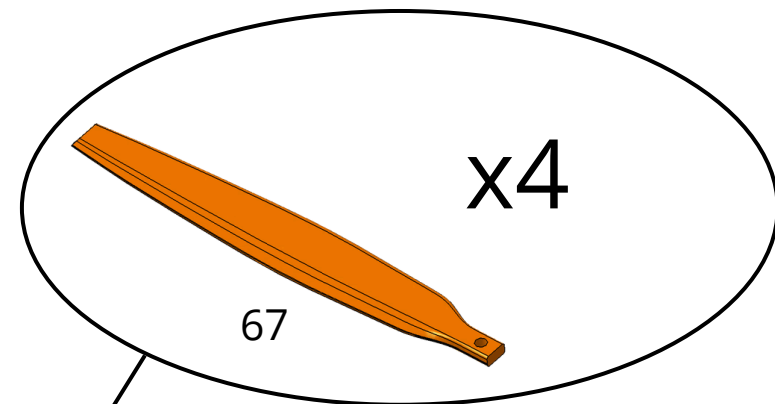
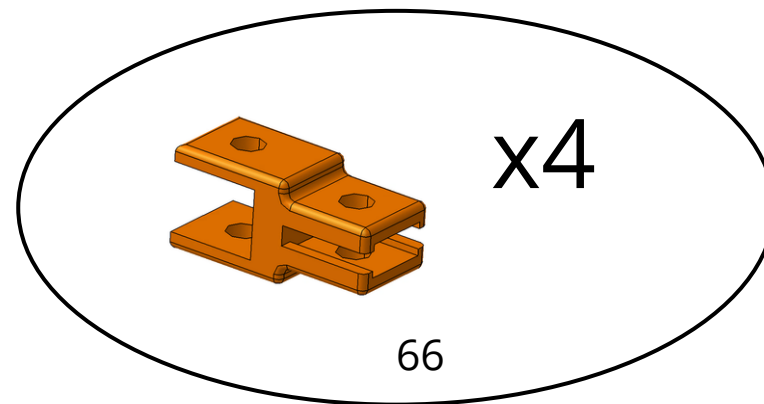


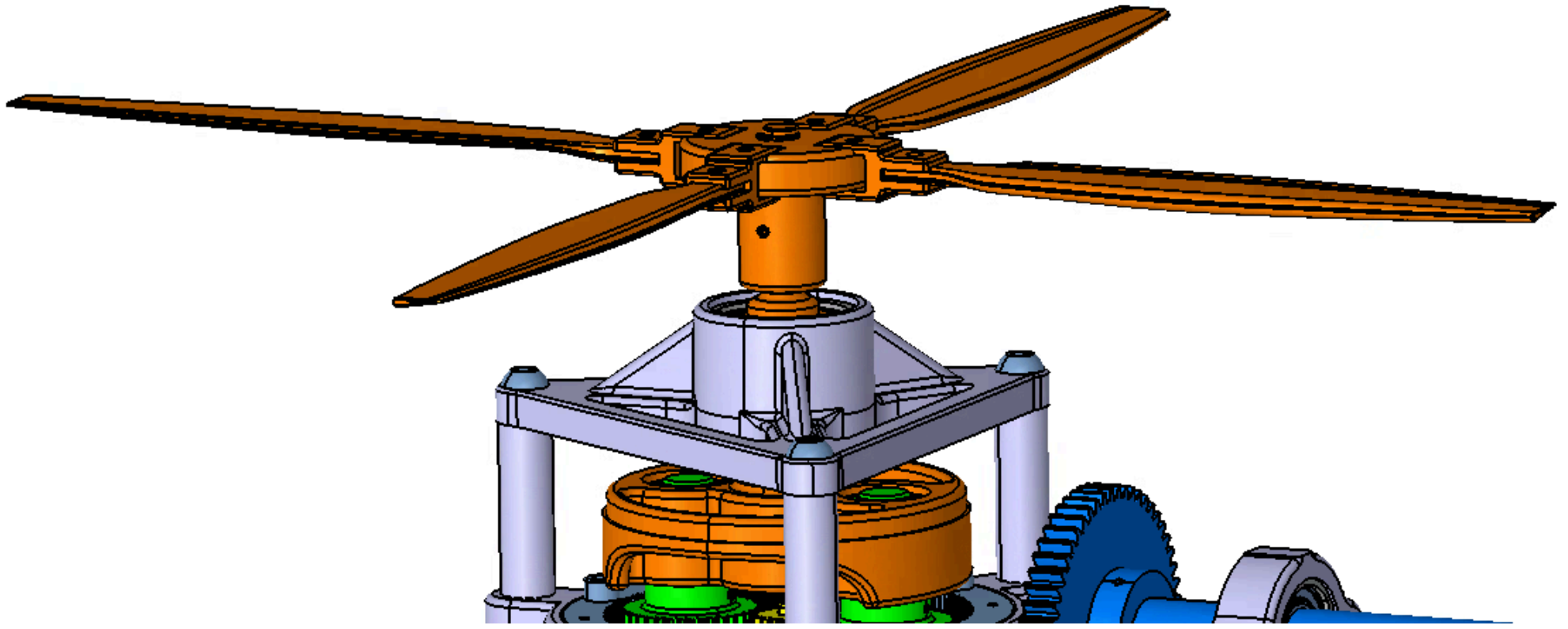
80



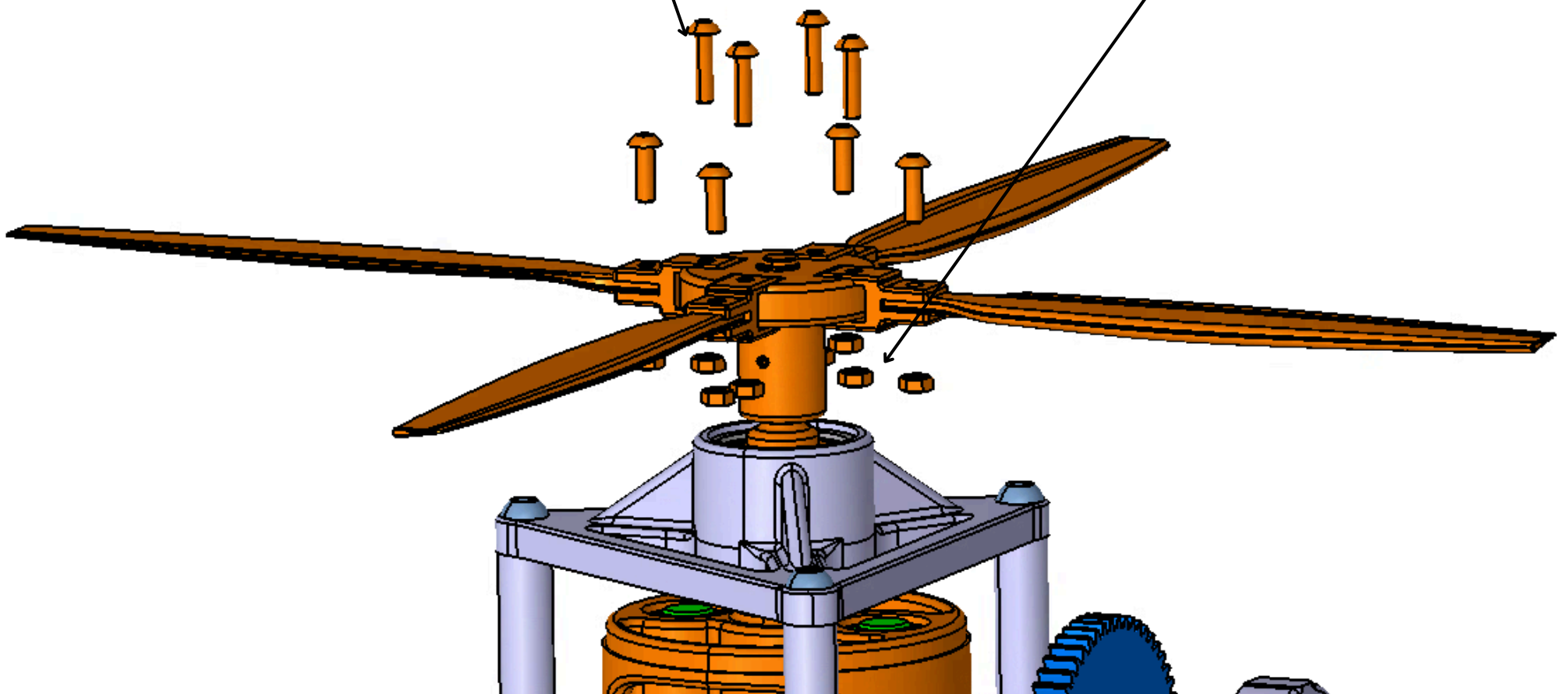
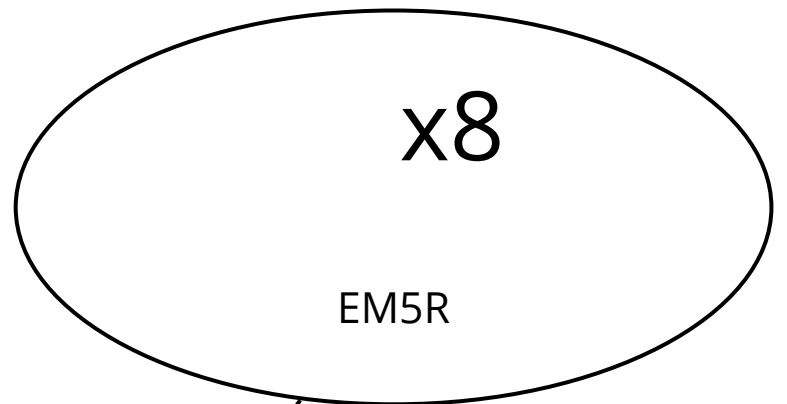
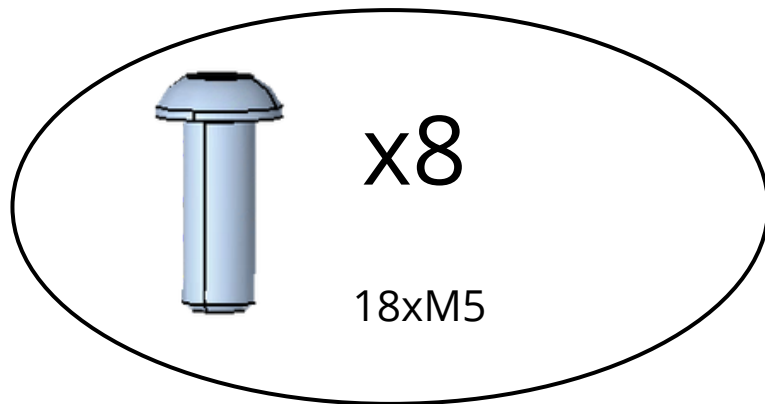


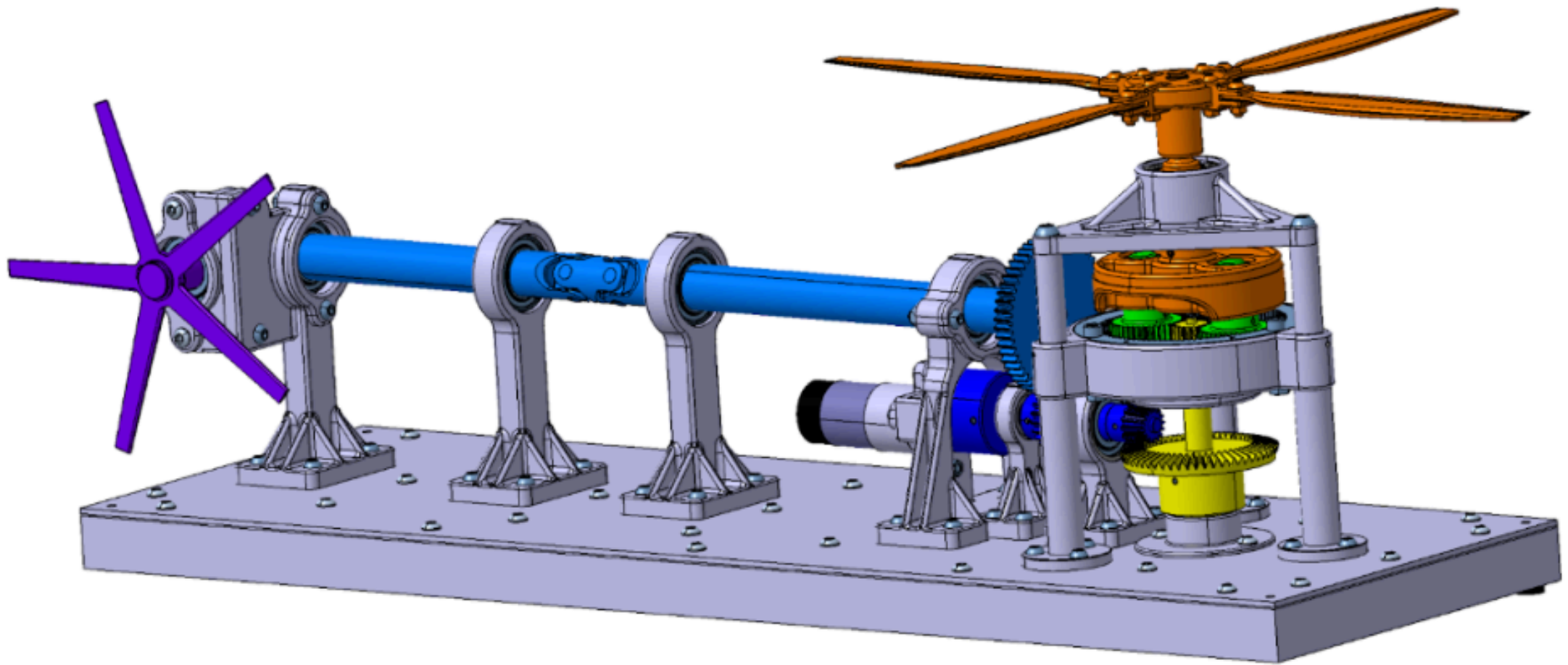
81





82





FIN