

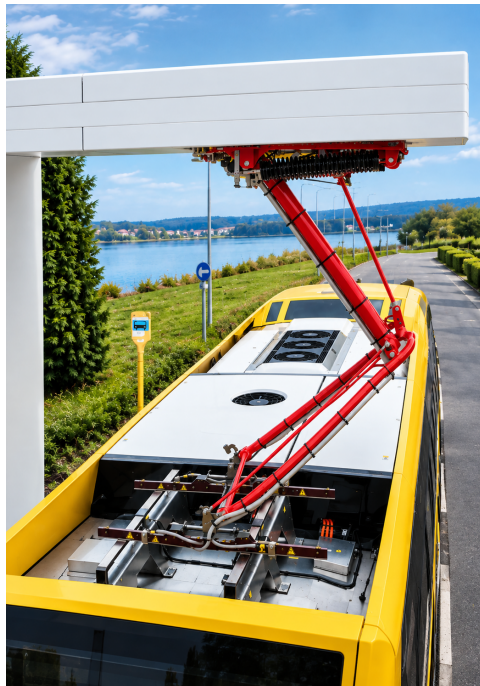
MATH0001-2 : Communication graphique

Pantographe inversé de chargement

Projet-Examen - Cahier des charges

Professeur : Eric BÉCHET

Assistants : Alex BOLYN - Florian RIHOUX



ANNÉE ACADÉMIQUE 2026-2027

Table des matières

1	Introduction	3
2	Objectifs du projet	3
3	Réalisation de pièces	4
3.1	Pièces totalement définies	4
3.2	Pièces à réaliser vous-même	4
3.3	Pièces paramétriques	5
4	Plans à réaliser	5
5	Réalisation de l'assemblage	5
6	Simulation cinématique	6
6.1	Position et conditions initiales	6
6.2	Première simulation	6
6.3	Seconde simulation	7
6.4	Rapport	7
7	Informations pratiques	8
7.1	Délivrables	8
7.2	Consignes pour le rapport	8
7.3	Questions sur le projet	9
7.4	Conseils généraux	9
A	Plan : châssis	11
B	Plan : bras supérieur	13
C	Plan : bras inférieur gauche	14
D	Plan : bras inférieur droit	15

E Plan : collecteur	16
F Plan : support antibalancement	17
G Plan : bielle	18
H Plan : assemblage	19

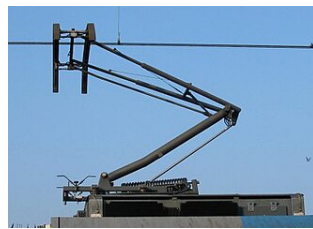
1 Introduction

Depuis quelques années, nous procédons en Belgique à l'électrification des réseaux de bus. À Liège, nous disposons notamment de bus entièrement électriques, dont ceux de la ligne reliant le campus du Sart-Tilman à la gare des Guillemins. Ces bus fonctionnent sur batterie et sont rechargés dans des stations de recharge rapide réparties sur le réseau¹. Mais ce n'est pas la seule technologie existante : d'autres types de bus électriques utilisent un réseau d'alimentation aérien, à l'instar de celui des tramways et des trains. Dans tous ces cas, le mécanisme permettant d'assurer la connexion électrique entre le véhicule et son alimentation est un pantographe.

Les pantographes sont des mécanismes principalement constitués de bielles, c'est-à-dire de barres ou de tubes reliés par des articulations. La longueur de ces éléments et leur disposition déterminent certaines propriétés géométriques et cinématiques du mécanisme. En dessin, par exemple, les pantographes permettent de reproduire des figures à différentes échelles, selon la configuration des barres (Figure 1.1a). Dans le cas des trains et des tramways, ils permettent notamment de maintenir l'archet en contact avec les lignes électriques (Figures 1.1b et 1.1c). Enfin, dans le cas de nos bus électriques, un pantographe permet à la station de recharge d'établir la connexion électrique avec le véhicule. On parle de pantographe *inversé* car, contrairement aux pantographes habituellement rencontrés dans les systèmes de transport, celui-ci se déploie de la station vers le véhicule : il descend au lieu de monter.



(a) Pantographe pour dessin



(b) Pantographe de train en Z



(c) Pantographe de train en diamant

Le principal intérêt de l'utilisation de pantographes pour l'alimentation électrique est que, bien dimensionnés, ils permettent de conserver l'orientation de l'archet peu importe leur degré d'ouverture. Comme pour ces applications la distance entre la base du pantographe et la cible de l'archet peut varier, cette propriété devient absolument nécessaire afin de permettre un contact optimal et régulier entre ceux-ci (et donc une recharge plus efficace).

Dans le cadre de ce projet, nous modéliserons et simulerons le mécanisme de déploiement d'un pantographe de station de recharge de bus.

2 Objectifs du projet

L'objectif de ce projet est de modéliser le pantographe inversé (simplifié) d'une station de recharge de bus.

Le projet est divisé en 5 grandes étapes :

1. Réalisation de modèles CAO.
2. Mise en plan de pièces.

1. Il y en a notamment une à côté de la clinique vétérinaire.

3. Réalisation de l'assemblage du mécanisme suivant le plan d'assemblage (à partir des pièces réalisées et données).
4. Réalisation d'une simulation cinématique du mécanisme.
5. Rédaction d'un rapport présentant les résultats de la simulation.

Sont fournis avec ce cahier des charges six pièces au format *STEP214* : verin, piston_verin, suspension_collecteur, levier_bras et attache_collecteur

3 Réalisation de pièces

À la fin de ce document se trouvent tous les plans nécessaires pour ce projet. Il y a au total 9 pièces à réaliser, réparties ci-après selon leurs spécificités. De la même manière que pour les travaux durant l'année, les modèles CAO attendus doivent être conformes aux plans (ou aux consignes spécifiques données dans cette section) et leurs constructions respecter les règles d'usage, bien que les choix de construction ne soient pas considérés dans l'évaluation. Ces règles ont été définies dans les énoncés des travaux pratiques et rappelées dans les commentaires des devoirs.

Si le plan de la pièce comporte un matériau, il vous est demandé de donner ce même matériau à votre modèle. Dans le cas contraire, il ne faut pas en affecter.

Pour cette partie, ce sont la lecture de plans et leur respect dans vos modèles, le respect des consignes et la fiabilité de vos modèles qui sont évalués. Les méthodes de construction employées pour réaliser vos pièces ne sont pas prises en compte, à la condition que celles-ci ne soient pas superflues ou illogiques.

3.1 Pièces totalement définies

À partir des plans complets fournis, réalisez les modèles CAO exactes des pièces suivantes :

- Chassis (Annexe A, p. 11),
- Bras supérieur (Annexe B, p. 13),
- Bras inférieurs gauche et droit (Annexe C, p. 14 et Annexe D, p. 15),
- Collecteur (Annexe E, p. 16).

Une note cependant concernant les plans des bras inférieurs : la courbe définie par le polygone de contrôle est bien une courbe de Bézier dont les tangentes de fin sont horizontales.

3.2 Pièces à réaliser vous-même

Le plan de la pièce "Support antibalancement" vous est transmis sous la forme d'une vue isométrique partielle (Annexe F, p. 17). Il vous est demandé de créer cette pièce à partir des dimensions imposées en imaginant les parties manquantes nécessaires. La construction doit être logique, c'est-à-dire qu'elle doit être conçue en un seul modèle CAO (et une seule pièce) et qu'on doit pouvoir la fabriquer facilement, en plus de s'assembler correctement avec le reste des pièces dans votre assemblage (et que la simulation démontre le fonctionnement attendu). Pour cette partie, vous devez fournir la pièce au format *prt* mais aussi en réaliser le plan, comme expliqué en section 4.

3.3 Pièces paramétriques

Les bielles "bielle supérieure" et "bielle inférieure" (conformément au plan d'assemblage en Annexe H, p. 19) n'ont été définies que sur un seul plan (Annexe G, p. 18). Elles sont en effet identiques mais à une longueur près, exprimée dans le plan par le paramètre d0.

Un deuxième paramètre, noté d1, est également défini sur le plan afin de rendre le modèle CAO plus représentatif de la pièce réelle. En effet, la bielle réelle est constituée d'une barre creuse taraudée sur laquelle sont vissés deux anneaux. Cependant, dans le but de simplifier l'assemblage du pantographe, ces trois éléments sont considérés comme une seule pièce dans le modèle. Le paramètre d1 permet néanmoins de représenter la variation de longueur de la bielle, obtenue en vissant ou en dévissant les anneaux.

Afin de réaliser les deux bielles nécessaires au mécanisme, réalisez un modèle CAO paramétrique dépendant uniquement des paramètres de design d0 et d1 puis utilisez-le pour générer les deux pièces conformément au tableau 1.

	Bielle supérieure	Bielle inférieure
d0 (cm)	78	140
d1 (mm)	24	33.6

TABLE 1 – Paramètres de design pour les deux bielles du mécanisme.

Pour ce modèle, l'évaluation portera sur la flexibilité de votre paramétrisation (adaptation de votre modèle au changement des paramètres) en plus de la réalisation. Pour que nous puissions plus facilement comprendre votre modèle, nous vous demandons de nommer les paramètres de la même manière que sur les plans et de vous assurer que tous les paramètres n'intervenant pas dans la paramétrisation soient verrouillés. Lorsque vous rendez le projet, vous pouvez donner que les deux bielles mais elles doivent bien venir d'une seule même pièce paramétrique.

4 Plans à réaliser

Il vous est demandé de réaliser deux plans :

- Le levier de bras inférieur (matériau : Aluminium 2014)
- Le support antibalancement (voir section 3.2).

Ces plans doivent suivre les règles de cotation vues au cours. Comme pour les travaux durant l'année, la convention européenne doit être respectée et le plan doit être complet. Pour cette partie, l'évaluation portera sur le cartouche, le respect des normes, le choix des vues et la cotation du plan.

5 Réalisation de l'assemblage

Après avoir réalisé les fichiers .prt de toutes les pièces, assemblez le pantographe comme indiqué dans les plans d'assemblage (Annexe H, p. 19 et plus de précision pour le montage de la tête en page 20). L'assemblage doit être fonctionnel, cela signifie que vous devez pouvoir voir le mouvement du mécanisme en bougeant les pièces. N'hésitez pas à faire un (ou plusieurs) assemblage(s) intermédiaire(s) pour vous faciliter la vie lors de la réalisation de l'assemblage complet (mais n'oubliez pas qu'un sous-assemblage est considéré comme un seul corps rigide).

Il faut également noter deux choses à prendre en compte dès le début de la réalisation de votre assemblage pour vous faciliter les simulations par après (plus de précisions en section 6) :

- la position de départ de la simulation n'est pas celle montrée sur les plans d'assemblage.
- le mécanisme doit être orienté selon les axes absolus de votre assemblage pour obtenir des résultats exploitables.

6 Simulation cinématique

Sur base de votre assemblage, il vous est demandé de faire la simulation cinématique du déploiement du pantographe. Pour ce faire, placez le pantographe dans sa position initiale tel que décrit en section 6.1 et imposez une vitesse constante au mécanisme tel que décrit en section 6.2.

6.1 Position et conditions initiales

La position entièrement repliée du pantographe correspond à une configuration dans laquelle le bras supérieur est parallèle au châssis. Veillez donc à placer votre assemblage dans cette configuration avant de lancer les simulations décrites ci-après.

Pour avoir des résultats de simulation exploitables (et répondre aux questions de la section 6.4), il vous est demandé de :

- Créer pour votre simulation le corps "tête" qui est la tête du pantographe. Il s'agit donc des deux collecteurs avec leur système de suspension et fixation, et du support antibalancement. Cela vous permettra d'analyser les mouvements demandés plus fidèlement.
- Aligner les axes absolus avec le châssis comme présenté en figure 6.1. Ceci assurera que les angles d'Euler sont bien définis sur les axes absolus et vous permet d'utiliser directement le deuxième angle sans traitement mathématique ([page wikipedia sur les angles d'Euler](#)). Faites donc bien attention lors que vous commencez l'assemblage.

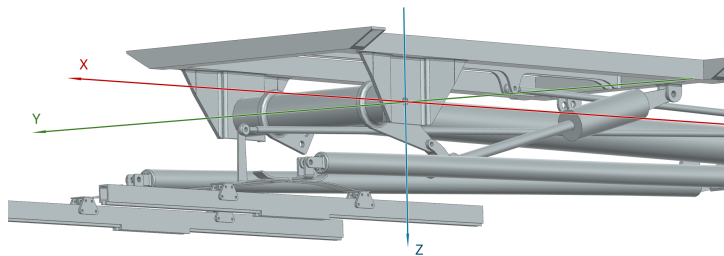


FIGURE 6.1 – Axes absolus à choisir pour la simulation

6.2 Première simulation

La première simulation et analyse à réaliser consiste à simuler le déploiement du pantographe, opération exécutée pour brancher le bus sur le système de chargement. Ce mouvement est assuré par l'actionnement du vérin, qui, en poussant le piston, fait pivoter le bras supérieur. Pour ce faire, il faut placer un "driver" sur le piston par rapport à son vérin.

Pour les joints cinématique à placer, ceux-ci sont facilement reconnaissables de par le mouvement souhaité. Il se peut que vous donniez une configuration sur-contrainte mais, pour ce type de mécanisme, le solver devrait être capable de supprimer les bonnes contraintes.

Il vous est demandé de réaliser une première simulation sur base de l'assemblage et des pièces décrites jusqu'à présent. Cette première simulation permet de répondre aux deux premières questions du rapport. Tous les paramètres nécessaires à cette simulation sont décrits dans le tableau 2.

Donnée [unité]	Valeur
Driver : vitesse d'avance [mm/s]	19.5
Simulation : durée [s]	5
Simulation : pas de temps [ms]	10

TABLE 2 – Données de la simulation

6.3 Seconde simulation

Une seconde simulation vous est demandée afin de voir l'impact de la longueur d'une des bielles sur la position des collecteurs (les bielles sont des modèles paramétriques, cf. section 3.2). Pour ce faire, modifiez le paramètre d_1 de la bielle inférieure selon la formule donnée en Equation 6.1 dont le paramètre M est le dernier chiffre de votre matricule étudiant. Attention, assurez-vous que le système reste bien dans la position initiale précisée en section 6.1 avant de faire la simulation.

$$d_1(\text{mm}) = 32.5 + \frac{1}{5}M \quad (6.1)$$

Les résultats de cette simulation vous permettront de répondre à la dernière question pour le rapport.

6.4 Rapport

Dans votre rapport (voir également les consignes le concernant en section 7.2), nous vous demandons de répondre aux questions suivantes :

1. Analyser la position verticale du collecteur.

Pour répondre à cette question, montrez le graphique de la position de la tête au cours du temps et expliquez pourquoi on peut considérer ce mouvement comme linéaire. En prenant cette considération en compte, déterminez la vitesse moyenne de descente des collecteurs.

2. Montrer que le collecteur reste parallèle au sol.

Donnez et analysez le graphique du deuxième angle d'Euler de la tête. Est-ce que les collecteurs restent bien parallèles au sol tout le long de la descente, sachant que, grâce au système d'amortisseur ressort tenant les collecteurs, on tolère une erreur de 5° sur l'angle des collecteurs rapport au sol (autour de l'angle de référence) ?

3. Quelle est l'influence de la longueur de la bielle inférieure sur l'angle du collecteur par rapport au sol ?

Donnez un graphique comparant le deuxième angle d'Euler au cours du temps avec la bielle modifiée et celui obtenu à la question 2. Comparez les extrema des deux tracés, comparez leurs taux d'utilisation et concluez. Le taux d'utilisation dans ce cas représente le pourcentage de la plage autorisée réellement exploitée par le mécanisme, c'est-à-dire la variation maximale d'angle par rapport à l'angle de référence divisé par la variation maximale d'angle autorisée (par rapport à ce même angle de référence).

7 Informations pratiques

7.1 Délivrables

Le projet est individuel. Tous les projets seront passés au logiciel anti-copie afin de vérifier l'absence de plagiat (total ou partiel). Cependant, rien ne vous empêche de vous entraider, à condition que votre travail reste intégralement personnel.

Un seul fichier peut être déposé sur la page de dépôt (dont le lien est indiqué sur la page web du cours dans la section concernant le projet). Vous devez donc fournir tous les fichiers de votre projet compressés dans un seul fichier *.zip*. Conformément à ce qui est expliqué plus bas, évitez d'alourdir le fichier en y incluant des éléments inutiles comme les fichiers *step* ou l'énoncé.

Le **nom de ce fichier zip** sera votre matricule (exemple : "s123456.zip"). Vous devez organiser le fichier zip en deux dossiers :

- **Pieces** : Ce dossier doit contenir toutes les pièces, les assemblages et simulations que vous avez créés avec NX (les fichiers *.prt*, *.sim* et fichiers de résultats de simulation). Veillez à ne stocker que les versions finales de vos pièces, et assurez-vous que leurs noms soient explicites et ne comportent pas de caractères spéciaux. N'oubliez pas que **dès qu'une pièce est ajoutée à un assemblage, son nom et son emplacement ne peuvent plus être modifiés** !
- **Documents** : Ce dossier doit inclure tous les plans que vous avez créés et le rapport, **tous au format PDF uniquement**. Nous ne pouvons accepter que des fichiers au format PDF, veuillez donc effectuer l'exportation correctement.
- **Autres** : Ce dossier contient des annexes à votre projet comme les données servant à vos graphiques (fichier csv, fichier excel, etc.). Ce dossier est facultatif, n'en mettez pas si vous n'en avez pas le besoin.

Votre projet (le fichier zip) est à rendre avant le **20 décembre 2026 à 23h59**. Tout retard engendrera un retrait de points proportionnel au retard en question. Le non-respect des consignes engendrera également des pénalités.

7.2 Consignes pour le rapport

Le rapport doit être soumis en PDF, mais peut être rédigé à l'aide de l'éditeur de votre choix (Word, LaTeX...) et les résultats/figures peuvent être générés également avec un logiciel de votre choix (Excel, Matlab, Python...). Utilisez une mise en page claire. La première page (page de garde) doit contenir, au minimum, votre nom, votre matricule et un titre. Vous pouvez vous inspirer de la page de garde de ce document, ou de celles des devoirs et des exercices du cours. Le document doit rester court, répondez uniquement à la question sans ajouter de détails superflus. La limite maximum est de une page physique par question, mais vous pouvez évidemment faire plus court. D'ailleurs, pour chaque question (détaillées en section 6.4) à laquelle vous répondez, indiquez en guise de titre de section le numéro et le titre de la question indiqué dans les consignes.

Il est possible de nous faire partager vos commentaires ou remarques concernant votre travail dans une section spécifique en fin de rapport (par exemple, spécifier une particularité de votre travail pour faciliter la compréhension de celui-ci). Enfin, assurez-vous que tout est lisible dans le rapport (graphiques lisibles, aux bonnes échelles, etc.), que la mise en page est soignée, et

relisez l'orthographe. Veillez à la clarté de vos propos en étant précis dans les mots et tournures employées, et faites des références précises aux éléments de vos graphiques (par exemple en numérotant les figures).

Concernant les graphiques que vous présenterez dans le rapport (mais cela s'applique en général, même en dehors de ce cours), il est primordial que tout soit lisible sur le graphique. Pensez à ajuster la taille des polices d'écriture (avec des valeurs qui ont du sens et sont faciles à comprendre), l'épaisseur des traits et les axes pour que le graphique soit lisible sur le document. La lecture d'un graphique doit rester fluide et il ne faut pas que le lecteur ait à zoomer ou réfléchir trop longtemps pour comprendre les informations communiquées.

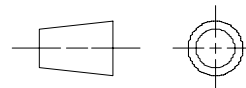
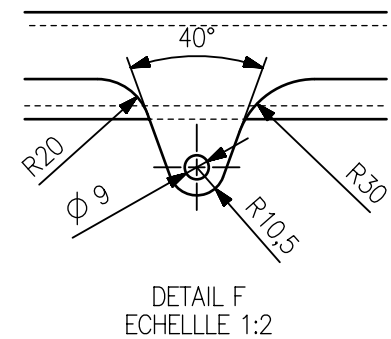
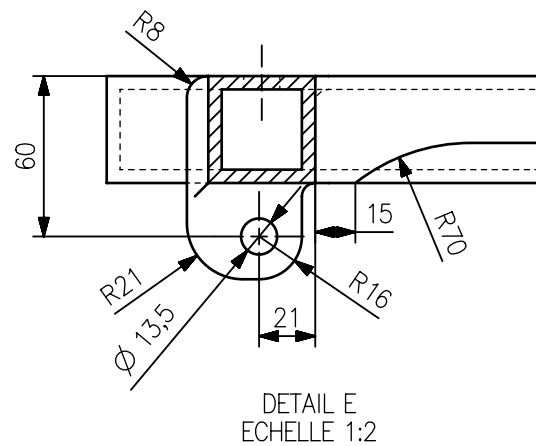
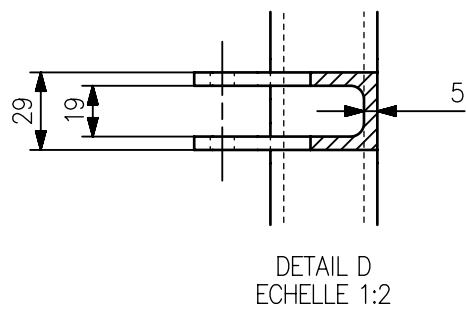
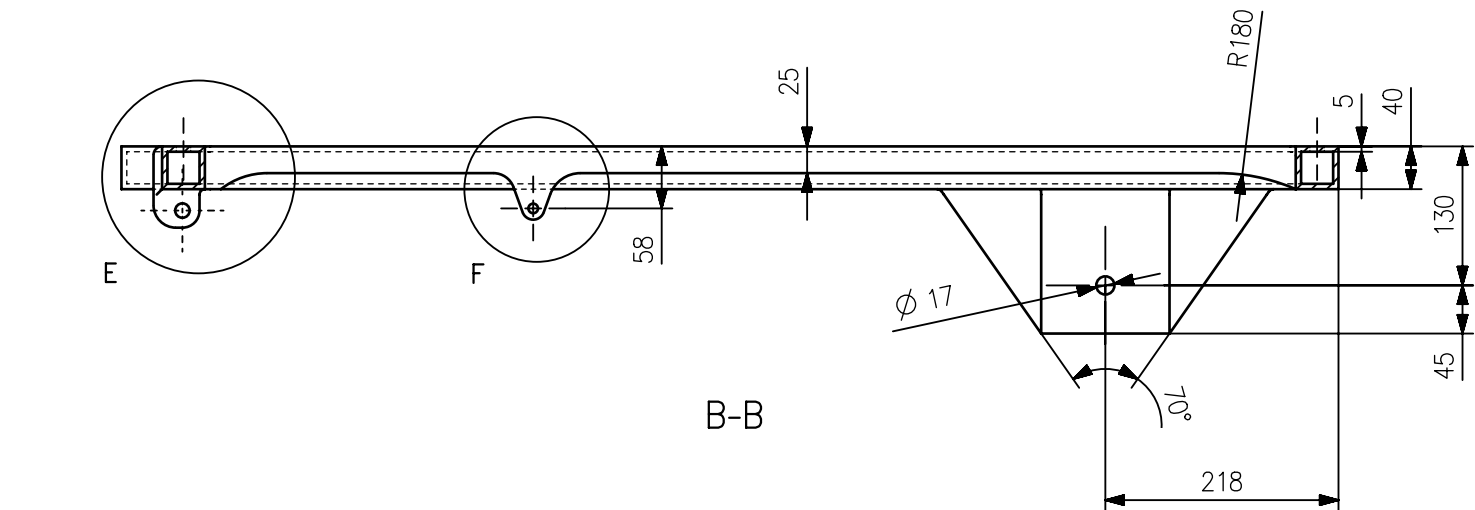
7.3 Questions sur le projet

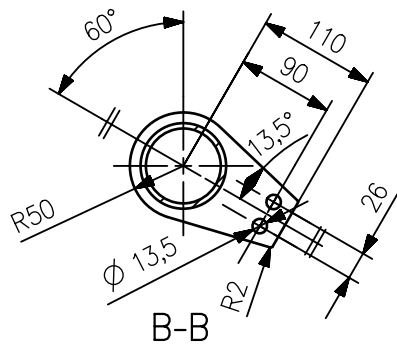
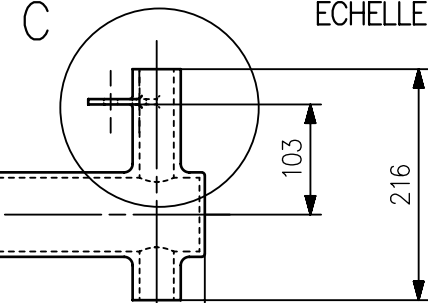
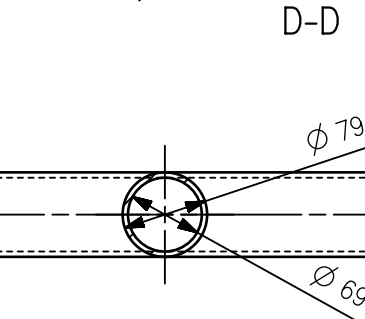
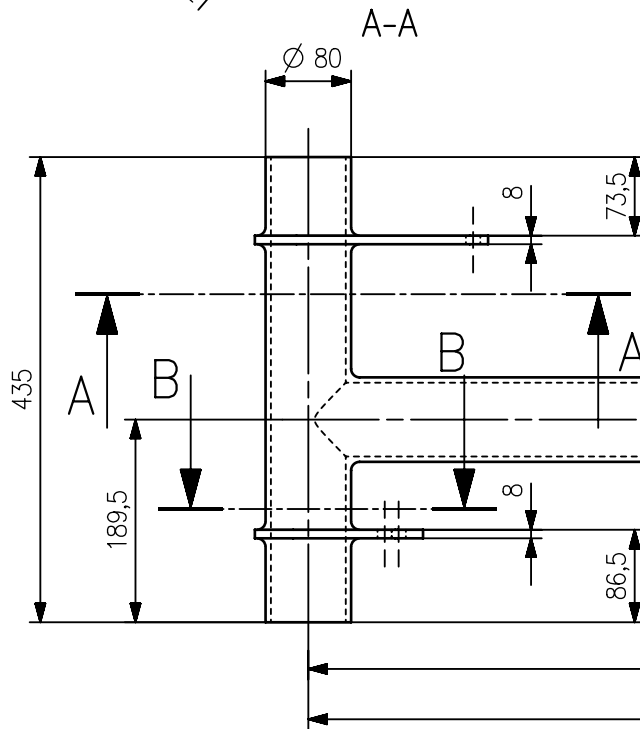
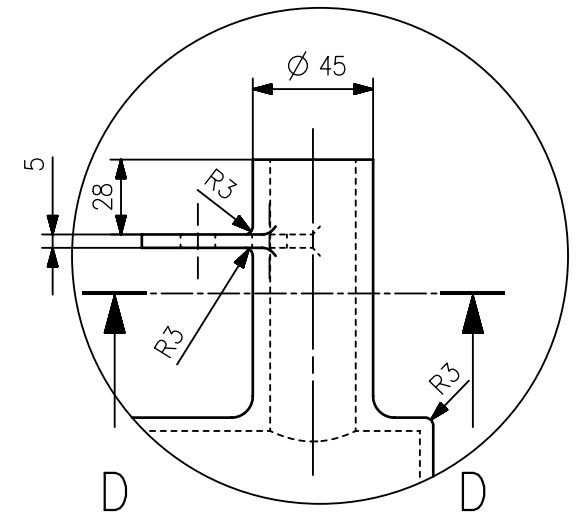
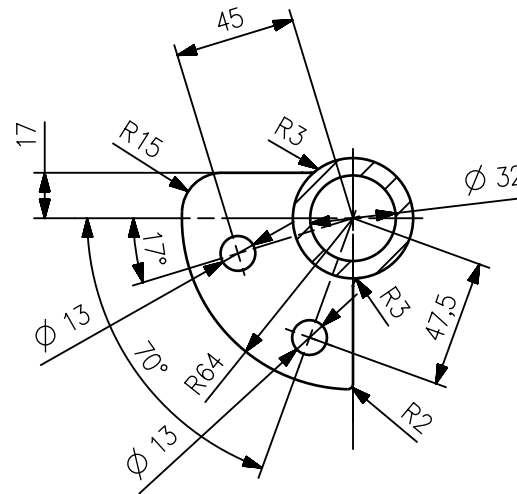
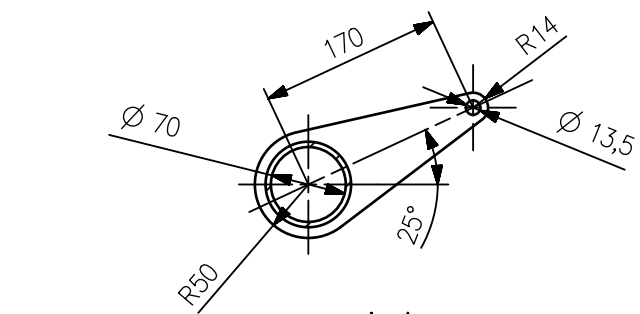
- N'hésitez pas à poser des questions aux séances d'exercices. Cependant, afin de ne pas perturber son bon déroulement, faites-le avant ou après la séance.
- Le **forum** disponible sur eCampus dans la section "Forum de discussion" (ou la page "Discussions"). Si vous avez des questions, le forum est votre premier ami. Les questions envoyées par courriel n'obtiendront pas de réponse car nous préférons qu'elles soient sur le forum afin que tous les étudiants puissent profiter des conseils et astuces proposés par les encadrants du cours. Nous sommes également susceptibles de publier des remarques ou des conseils pour la réalisation du projet sur la page eCampus.

7.4 Conseils généraux

- Profitez de toutes les ressources disponibles : énoncés des séances d'exercices, retours sur les devoirs, cours théorique... Elles vous aideront à mener à bien le projet et spécifient tous les critères pour lesquels vous serez évalués.
- Vous disposez de deux mois pour accomplir ce projet, et cela n'est pas sans raison. Attendre jusqu'à la dernière minute comporte le risque de réaliser un travail incomplet ou incorrect, en plus de sacrifier votre sommeil à l'approche de la période de blocus et du réveillon. Commencez le travail assez tôt, afin de pouvoir poser toutes vos questions.
- Les séances d'exercices vous forment et donnent les outils pour réaliser le projet au fur et à mesure du quadrimestre mais n'attendez pas que le cours soit terminé pour vous y atteler. Conformément au planning donné sur la page web du cours, nous aurons terminé :
 - les éléments de modélisation CAO lors de la séance 6 du 2 novembre (mais la majeure partie est déjà faite depuis le 28 septembre avec la séance 2),
 - les plans lors de la séance 5 du 19 octobre,
 - les assemblages et simulations lors de la séance 9 du 23 novembre.
- Lisez bien les consignes ! Vérifiez une dernière fois que tout est en ordre avant de soumettre votre travail. Extrayez le fichier zip et vérifiez que vous trouvez directement les dossiers mentionnés plus haut avec tous les fichiers qui peuvent être ouverts sur NX directement. Si nous ne pouvons pas ouvrir une pièce ou un assemblage, il sera impossible d'évaluer cette partie !

Bon travail !





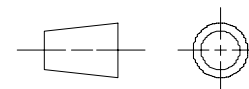
CONGES DE RACCORDEMENT
NON COTES R8



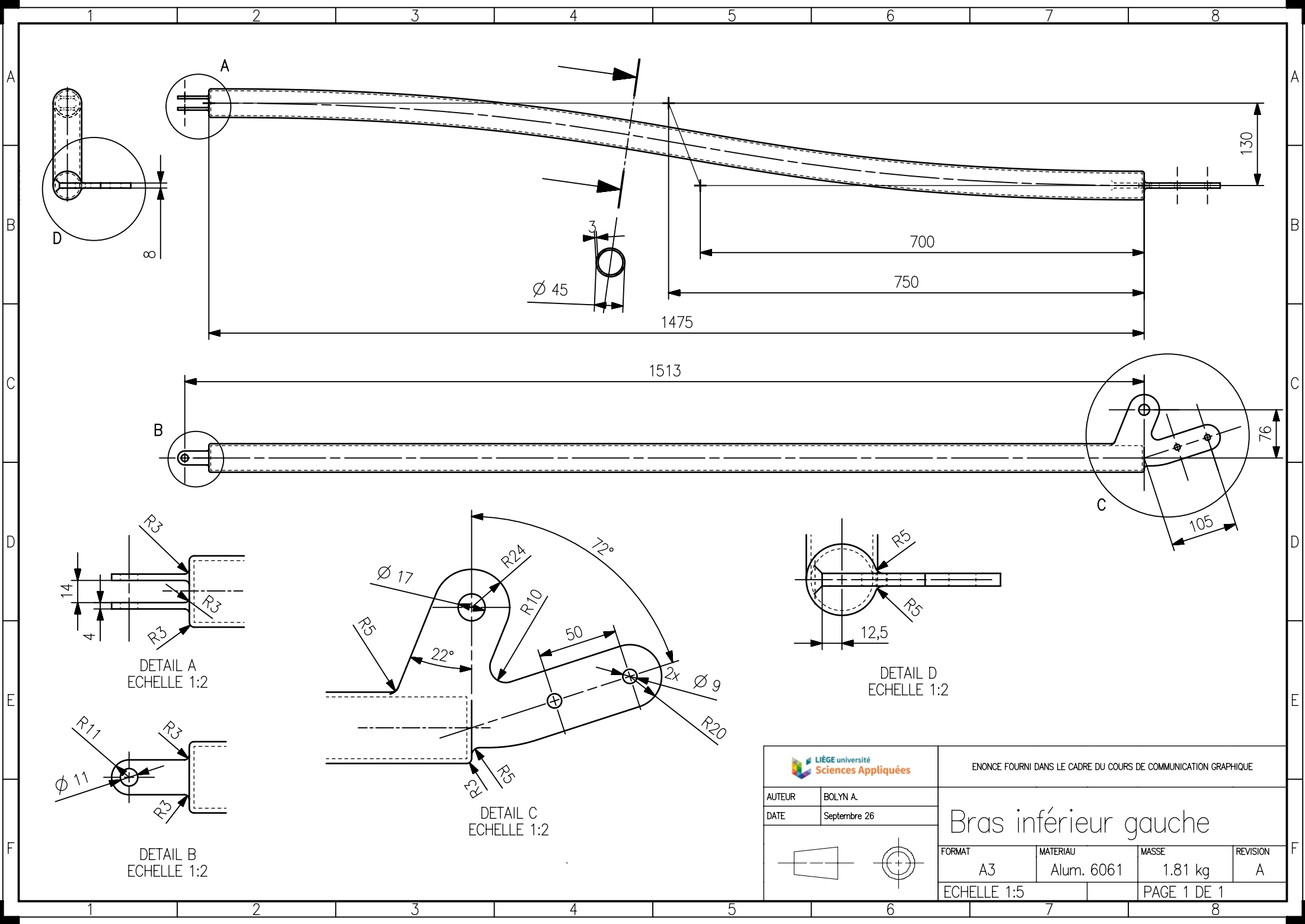
ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE

AUTHOR Bolyn A.
DATE Septembre 26

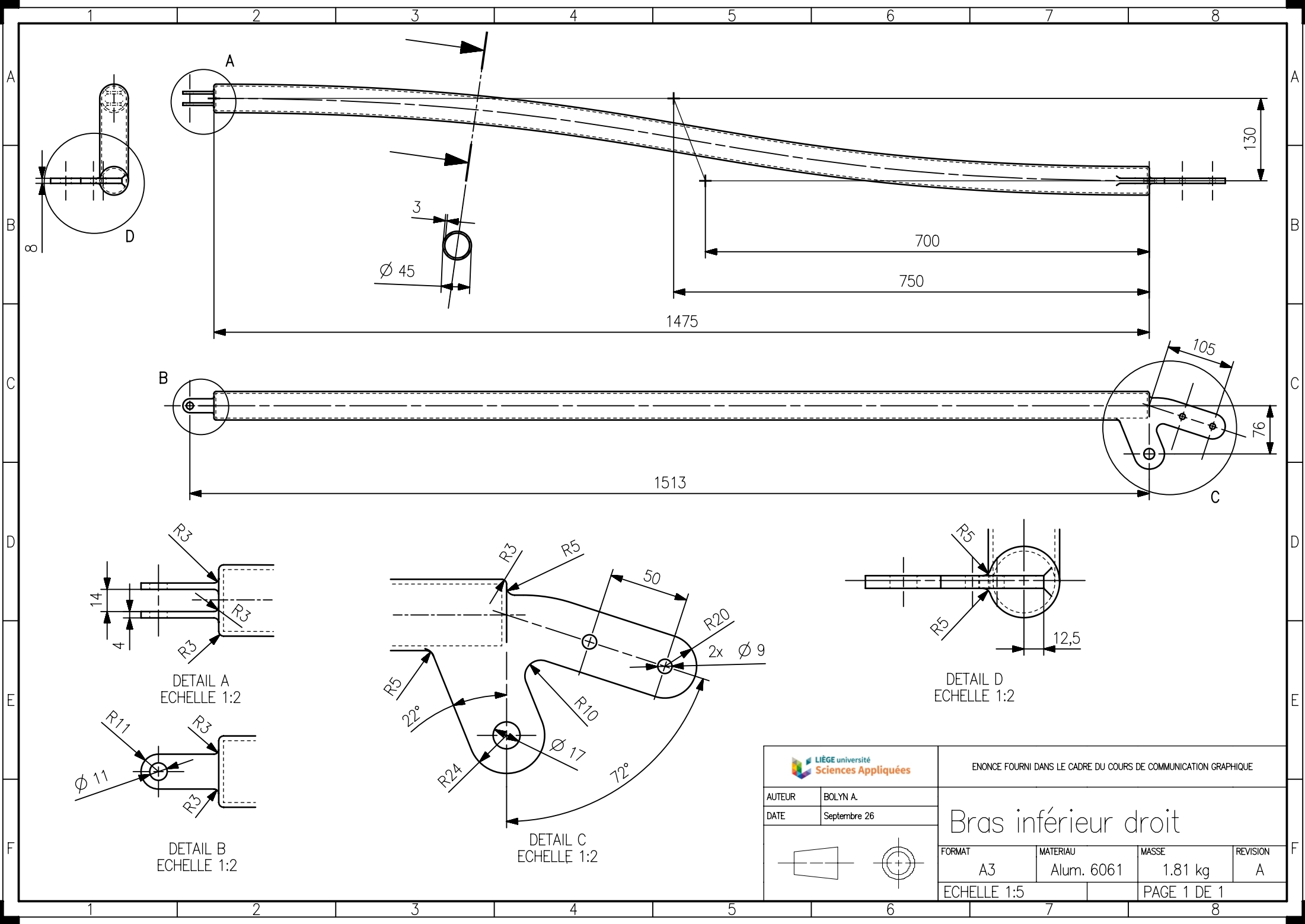
Bras supérieur



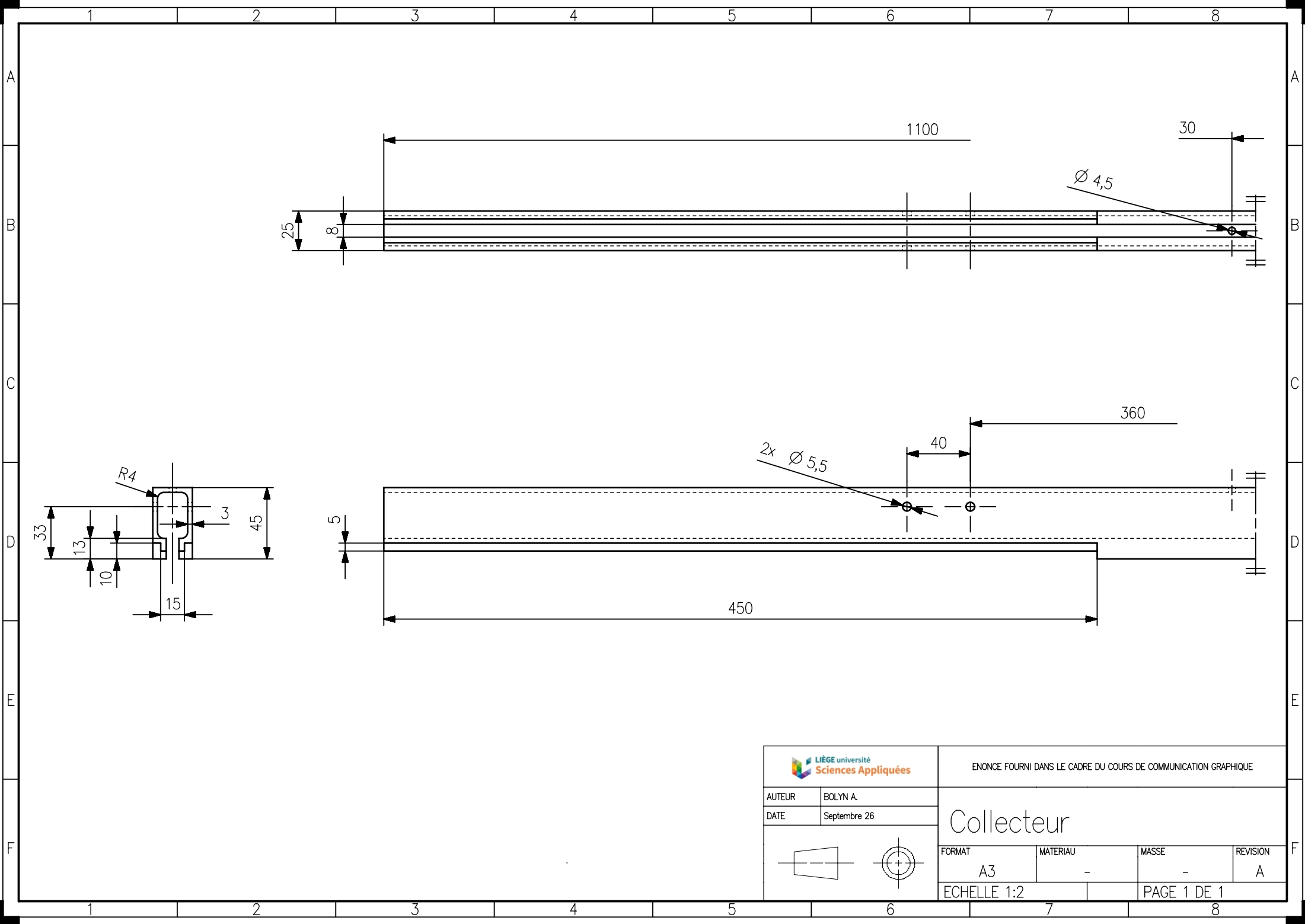
FORMAT	MATERIAU	MASSE	REVISION
A3	Alum. 6061	5.96 kg	A
ECHELLE 1:5		PAGE 1 DE 1	



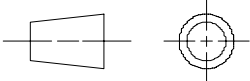
		ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE			
AUTEUR	BOLYN A.	Bras inférieur gauche			
DATE	Septembre 26				
		FORMAT	MATERIAU	MASSE	REVISION
		A3	Alum. 6061	1.81 kg	A
		ECHELLE 1:5		PAGE 1 DE 1	



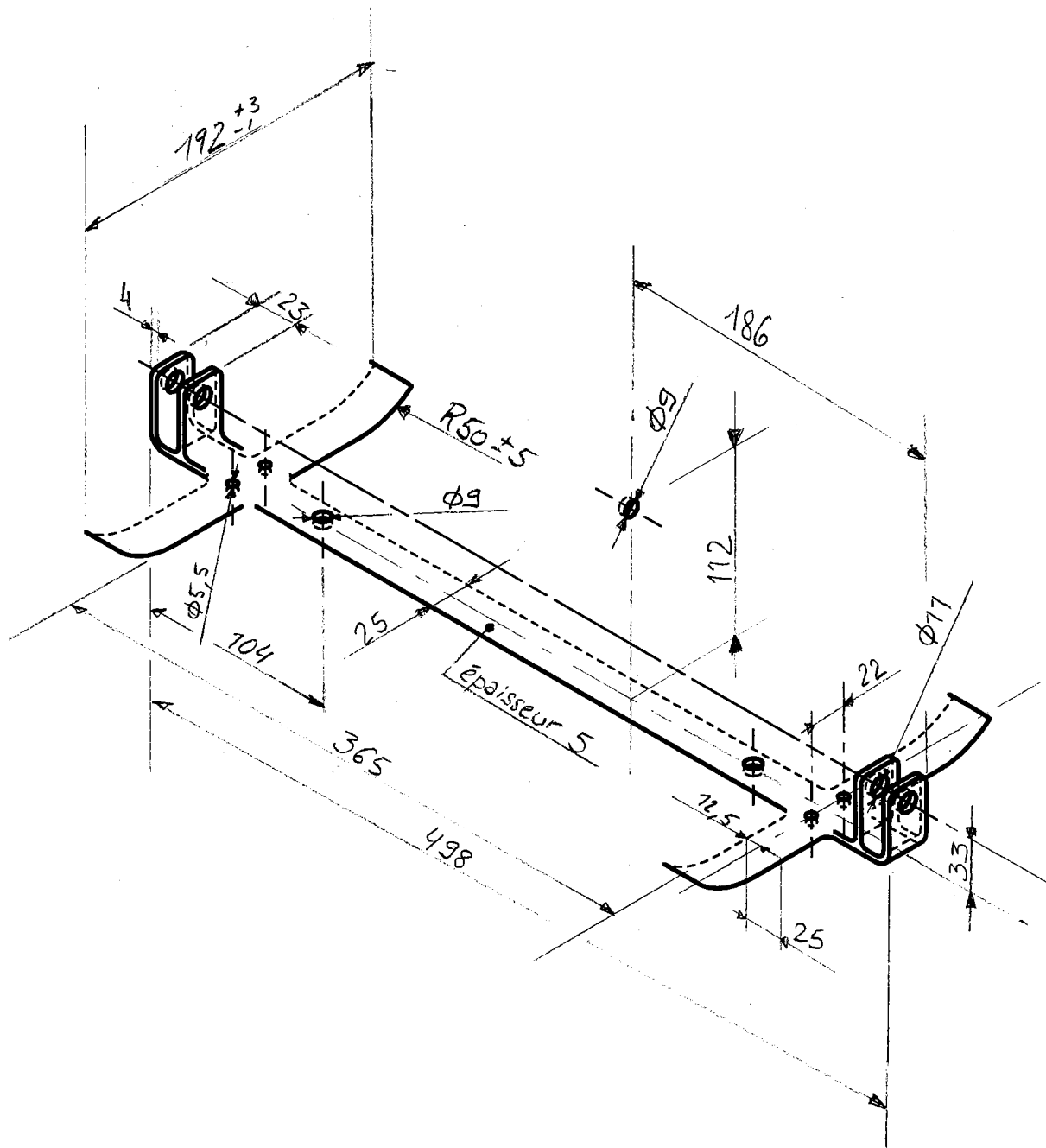
		ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE			
AUTEUR	BOLYN A.	Bras inférieur droit			
DATE	Septembre 26				
		FORMAT	MATERIAU	MASSE	REVISION
		A3	Alum. 6061	1.81 kg	A
		ECHELLE 1:5		PAGE 1 DE 1	



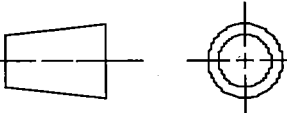


AUTEUR	BOLYN A.
DATE	Septembre 26
	

ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE			
Collecteur			
FORMAT	MATERIAU	MASSE	REVISION
A3	-	-	A
ECHELLE 1:2		PAGE 1 DE 1	



Masse max.: 300 g

 LIÈGE université Sciences Appliquées		ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE		
		TITRE		
AUTEUR	Bolyn A.	Support antibalancement		
DATE	Septembre 26			
		FORMAT	MATERIAU	VERSION
		A4	Alu. 6061	A
		ECHELLE 1:3		PAGE 1 DE 1

1 2 3 4

A

B

C

D

E

F

A

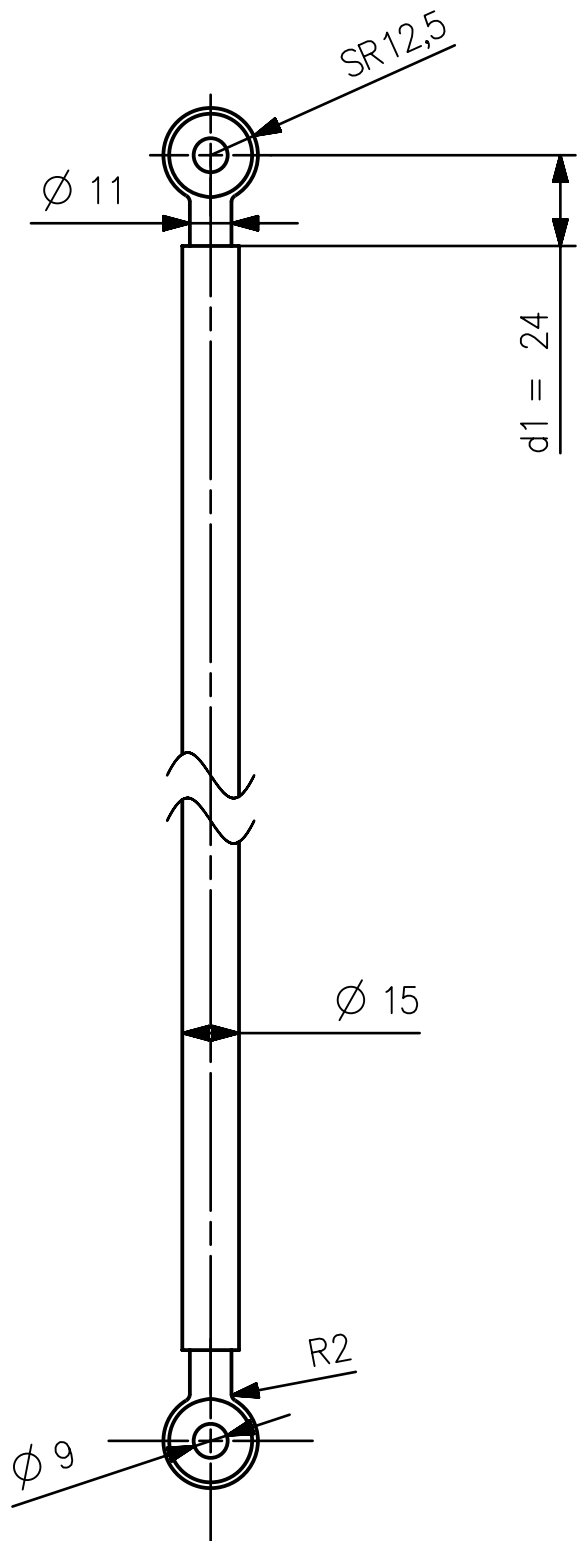
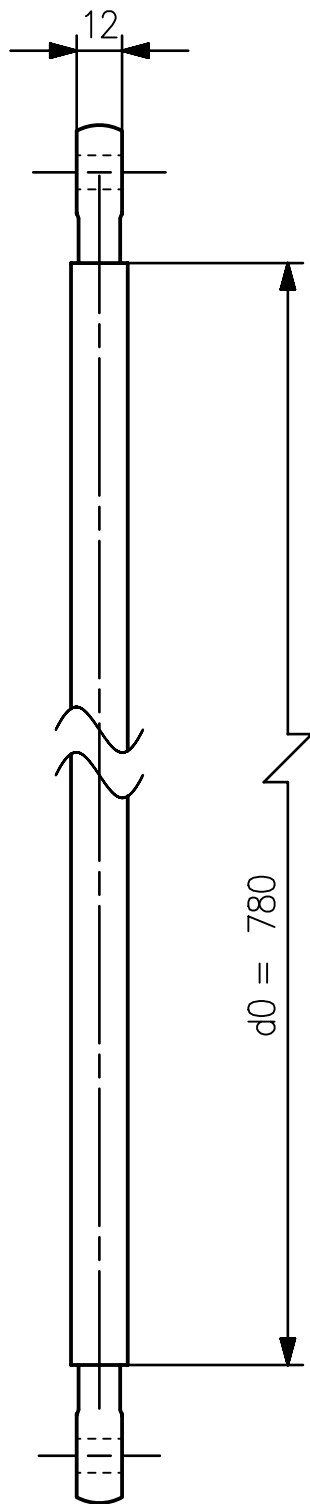
B

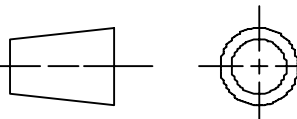
C

D

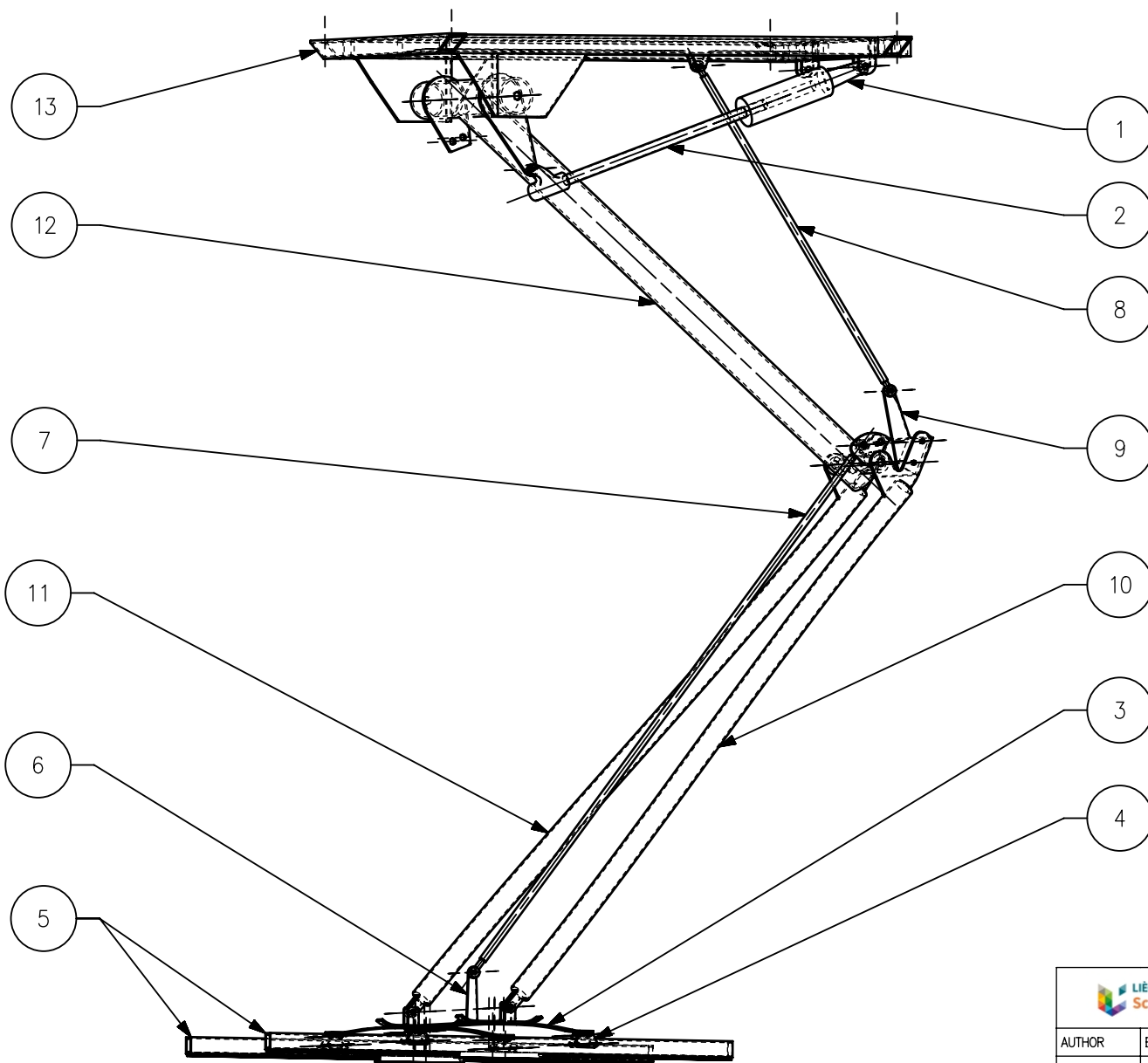
E

F



		ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE		
AUTEUR	Bolyn A.	Bielle		
DATE	Septembre 26			
		FORMAT	MATERIAU	VERSION
		A4	-	A
		ECHELLE 1:2		PAGE 1 DE 1

1 2 3 4

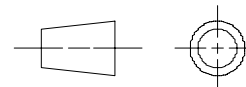


13	CHASSIS	1
12	BRAS SUPERIEUR	1
11	BRAS INFERIEUR GAUCHE	1
10	BRAS INFERIEUR DROIT	1
9	LEVIER DE BRAS INFERIEUR	1
8	BIELLE SUPERIEURE	1
7	BIELLE INFERIEURE	1
6	SUPPORT ANTIBALANCEMENT	1
5	COLLECTEUR	2
4	ATTACHE DE COLLECTEUR	8
3	SUSPENSION DE COLLECTEUR	2
2	PISTON DE VERIN	1
1	VERIN	1
N°	NOM PIECE	QTE



AUTHOR BOLYN A.

DATE Septembre 26



ENONCE FOURNI DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE

PANTOGRAPHE INVERSE DE CHARGEMENT

FORMAT A3	MATERIAU -	MASSE -	REVISION A
--------------	---------------	------------	---------------

ECHELLE 1:10 PAGE 1 DE 2

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

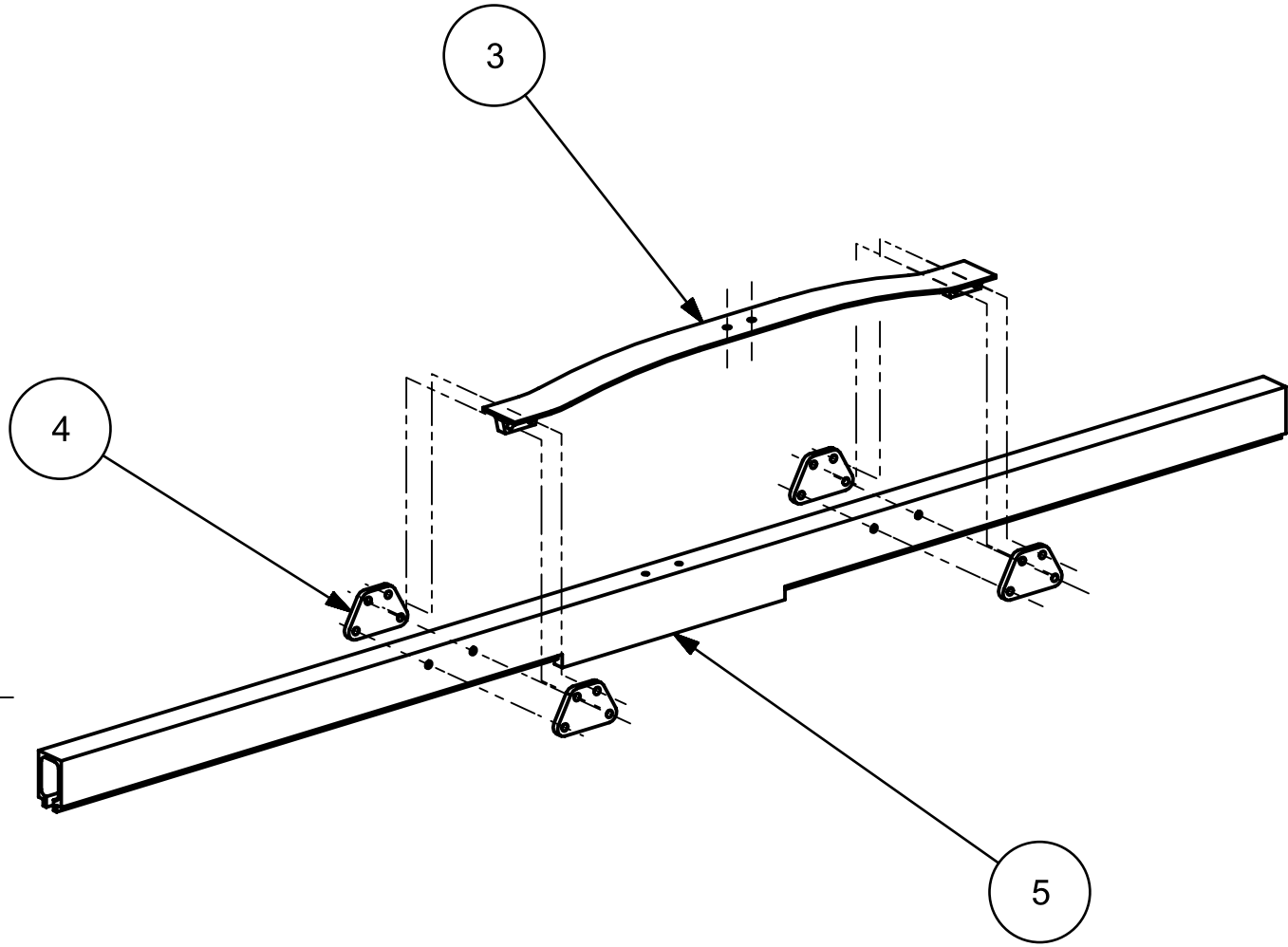
D

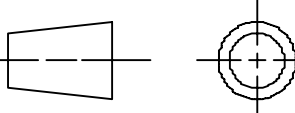
E

E

F

F



		EPURE REALISEE DANS LE CADRE DU COURS DE COMMUNICATION GRAPHIQUE (UNIVERSITE DE LIEGE - FACULTEE DES SCIENCES APPLIQUEES)		
		TITRE		
DATE	Septembre 26	PANTOGRAPHE INVERSE DE CHARGEMENT		
AUTEUR	Bolyn A.			
		FORMAT	MATERIAU	VERSION
		A4	-	A
		ECHELLE 1:5		PAGE 2 DE 2

1 2 3 4