

Réalisation d'une équerre selon un **cahier des charges défini**

Dossier de conception (partie 1/2)

SAE 2-2

Conception, réalisation et validation d'un produit simple

Jean Della Longa

IUT de Bordeaux - Département de Science et Génie des Matériaux
Année 2023 - 2024

SOMMAIRE

Introduction

1. Présentation du cahier des charges

2. Conception de l'équerre

- 2.1 Choix du/des matériau(x)
- 2.2 Choix du procédé de fabrication
- 2.3 Partie renouvelable de l'équerre
- 2.4 Analyse du cycle de vie de l'équerre

3. Mise en plan par DAO/CAO

- 3.1 Croquis de l'équerre
- 3.2 Conception CAO et dessin technique de l'équerre
- 3.3 Vue isométrique de l'assemblage
- 3.4 Nomenclature
- 3.5 Evaluation de la résistance de l'équerre

4. Conclusion sur le travail effectué

- 4.1 Les points forts de ce travail
- 4.2 Les difficultés rencontrées
- 4.3 Conclusions personnelles
- 4.4 Bibliographie

Introduction

L'objectif de cette SAE est de permettre aux étudiants de comprendre le métier de concepteur et de prendre conscience des contraintes qu'il est possible de retrouver dans le monde de l'entreprise. L'objectif va donc être d'être capable de modéliser une équerre par CAO, de pouvoir l'implémenter dans un environnement virtuel en effectuant des assemblages avec d'autres objets par CAO, d'être capable de suggérer plusieurs solutions au cahier des charges soumis et de sélectionner celle qui semble la plus correcte en fonction des contraintes soumise.

Dans le cadre du cahier des charges numéro 8, qui concerne ce dossier, il sera nécessaire d'être en capacité de réaliser un bilan carbone ainsi qu'une analyse du cycle de vie de l'équerre.

Pour se faire, différents moyens ont été mis à disposition pour les étudiants afin de les aider dans leur travail comme des séances en présentielles avec des professeurs qualifiés permettant d'aiguiller chaque élève sur son projet.

Ce dossier porte sur l'aspect de conception des deux équerres et est structuré en trois grands axes : le rappel du cahier des charges ainsi que son analyse, les choix de conceptions de l'équerres sur le matériau ainsi que le procédé de mise en forme puis la dernière partie portera sur l'aspect de modélisation CAO de nos équerres en suivant les choix suivis préalablement.

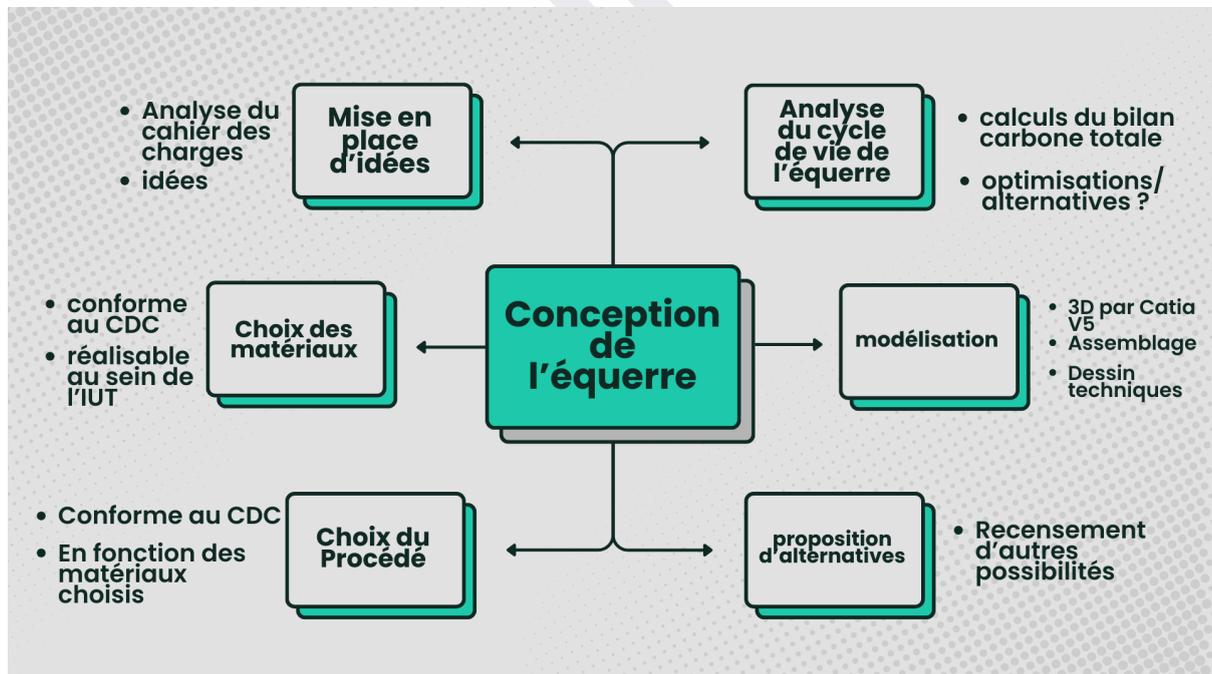


Figure 0 : Carte mentale de l'aspect de conception pour la réalisation de deux équerres en suivant un cahier des charges donné.

1. Présentation du cahier des charges

Lors d'une lecture attentive du cahier des charges, il est évident que notre équerre doit se positionner sur certains axes de conception prioritaires. Dans les priorités, il est demandé de minimiser le prix ainsi que la masse. Il est également demandé de prendre en compte dans la conception une part de 80% de matériaux renouvelables dans nos équerres ce qui limite énormément la palette de matériaux utilisables dans la fabrication des deux équerres. L'empreinte carbone, notée comme prioritaire dans le cahier des charges doit être la plus basse possible ce qui va être très important à prendre en considération car il va falloir respecter tous ces éléments du cahier des charges sur la même conception ce qui risque d'être compliqué.

De plus, en rapport avec le respect d'un bilan carbone minimum il faut prendre en considération la norme ISO 14067 qui traite de la réduction de l'empreinte carbone d'un produit en suivant son cycle de vie (extraction, acheminement, fabrication, fin de vie).

Et pour finir, nos équerres sont soumises à une contrainte sur le style à respecter, classée en F3 donc dans les contraintes les moins importantes du cahier des charges, le respect du style art floral.

Les dimensions des équerres sont communiquées sur le cahier des charges et doivent ensemble supporter une charge de 50kg, le matériau devra donc avoir une bonne résistance mécanique.

Aperçu du cahier des charges :

Critères	Fonction	Valeurs	Classe
Défaut max de planéité du support sur la zone de fixation	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	1 mm/100 mm	F0
Perpendicularité de l'étagère / au support	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	8 mm/m	F0
Charge maximum	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	50 kg	F0

Position de la charge	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	Centre de l'étagère	F0
Flèche verticale max. sous charge max. (mesurée à l'extrémité de l'étagère)	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	5 mm	F0
Dimension étagère	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	200 x 800 x 38 mm ³	F0
Matériau étagère	Maintenir une étagère et son chargement perpendiculaire à un support	Contre-plaqué	F0
Fixation – type	Doit s'adapter aux fixations prévues sur le support	Vis HM4 - 50	F0
Fixation – nombre maximum	Doit s'adapter aux fixations prévues sur le support	6	F0
Fixation localisation	Doit s'adapter aux fixations prévues sur le support	Cf. plan support	F0
Fixation type	Doit s'adapter aux fixations prévues sur l'étagère	6 Vis M4 – tête à définir	F0
Fixation localisation	Doit s'adapter aux fixations prévues sur l'étagère	Cf. plan étagère	F0

Plus grande dimension de l'équerre	Doit respecter un encombrement maximum	200 mm	F1
Temps de montage maximum	Doit être facile à monter	3 minutes	F2
Nombre d'outils différents maximum	Doit être facile à monter	3	F0
Masse de la solution	Doit minimiser la masse	Minimum	F0
Prix de la solution	Doit minimiser le prix	Minimum	F0
Empreinte carbone de la solution	Doit minimiser l'empreinte carbone	Minimum	F0
Pourcentage massique mini du produit intégrant un matériau renouvelable	Doit comporter une part de matériau renouvelable	80%	F0
Style de la ligne du mobilier associé	Doit respecter un style prédéfini	Art floral	F3
Conforme à la norme	Doit minimiser l'empreinte carbone	NF EN ISO 14067	F1

2. Conception de l'équerre

2.1 Choix du/des matériau(x)

Nous avons réfléchi à trois solutions qui répondaient au cahier des charges imposé.

Nous avons de nombreuses contraintes qui nous orientaient vers une gamme restreinte de matériaux qui pouvaient respecter au mieux le cahier des charges, notamment en termes de prix, de poids, de recyclage, de dimensions, et de forme de l'équerre.

Tout d'abord, il a fallu évaluer par le logiciel GrantaDesign les matériaux renouvelables compris dans une base de données.

Nous en avons trouvé 5 en réalité : Papier/carton, Bambou, PLA, Bois dur, Mousses (autres sphères vertes foncées présentes sur le diagramme).

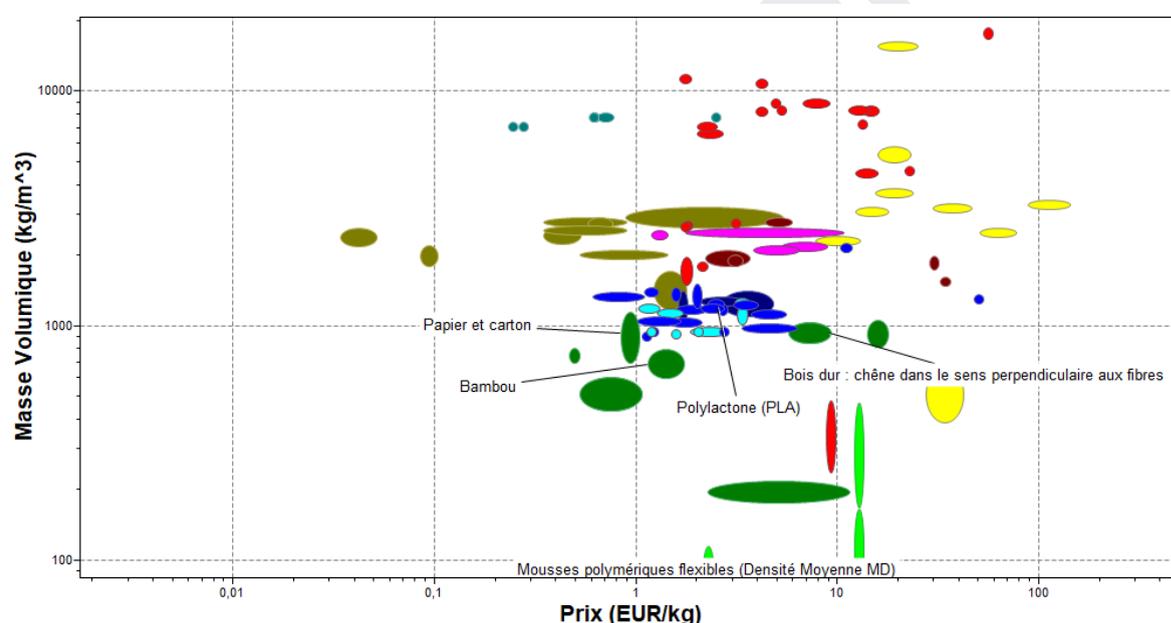


Figure 1 : Diagramme comparatif des matériaux (MV en fonction du prix/kg)

Nous avons directement dû enlever le carton/papier car en réalité la résistance mécanique de ces matériaux ne nous auraient pas permis de supporter la charge de 50 kg indiquée dans le cahier des charges même en le comprimant énormément à cause du sens des fibres au sein du matériau qui ne sont qu'uni-directionnelles ce qui ne confère une résistance mécanique que dans un sens. En revanche, au niveau du prix, du bilan carbone et de la masse, le carton semblait avoir de bons points forts, il est donc dommage de ne pas l'utiliser. [4]

Nous n'avons pas non plus retenu l'option de l'utilisation de mousses au sein de notre équerre car elle est compliquée à mettre en forme, peu résistante à des sollicitations mécaniques et nécessite un autre matériau pour lui conférer une résistance quelconque.

De plus, la mousse n'a pas une durabilité aussi bonne que des matériaux comme le bois ou le PLA.

Et pour finir, il aurait été catégoriquement impossible de visser à l'intérieur d'une mousse et donc de la fixer sur un support.

Il ne nous restait plus que le bois ainsi que le PLA comme matériaux possibles pour réaliser nos équerres, nous avons donc établi un tableau comparatif des matériaux à notre disposition pour la réalisation des équerres :

Critère	Importance du critère	Respect du critère	
		Bois	PLA
Masse minimum de la solution	++++	+	-
Prix minimum de la solution	++++	-	+
Empreinte carbone minimum	++++	-	+
Nombre d'outil maximum : 3	++++	=	=
Part renouvelable au minimum 80%	++++	-	+
Art floral	+	-	+

Figure 2 : Tableau comparatif Bois-PLA

Le + correspond aux critères qui sont le plus en accord avec le cahier des charges sur ce tableau.

Première option envisagée : En effet nous avons tout d'abord pensé à réaliser une équerre totalement en bois avec une tige en métal pour assurer une bonne résistance à la sollicitation en flexion de l'équerre, or ce que nous pensions être le gros point fort de cette solution s'est révélé être la raison pour laquelle nous avons abandonné cette idée. Nous pensions que la simplicité était de prendre un morceau de bois brut puis de l'usiner, de cette façon nous aurions eu le motif souhaité. Mais le problème était tout d'abord qu'il nous est impossible, faute de moyens techniques, d'usiner un morceau de bois brut à l'IUT. Et cela aurait posé un problème au niveau des sens des fibres car avec cette technique nous casserons les fibres dans le bois à cause de l'usinage et l'équerre ne serait pas uniformément résistante au poids. De plus, en se référant à la figure 2, on se rend compte que le bois était assez cher au kg surtout dans les conditions souhaitées ce qui va à l'encontre du cahier des charges. Mais aussi, le bois ne correspond pas à nos attentes en matière de bilan carbone car sa collecte ainsi que son acheminement entraîne un bilan carbone assez lourd, en effet, pour l'avoir à un prix raisonnable, surtout en 2024 avec l'inflation sur les matériaux de construction en général, il faut le faire venir d'Amérique du Sud, un endroit où des conditions de travail sont assez floues. (se référer au croquis 2 de la partie 3.1 du dossier)

Seconde option envisagée : Dans un second temps nous nous sommes dit que nous pourrions simplement réaliser la base de l'équerre avec du bois avec deux morceaux que

nous serions venus assembler à mi-bois pour conserver une bonne résistance. Puis faire des motifs floraux avec du PLA par impression 3D et nous serions venus assembler les deux parties par collage ce qui ne nécessiterait pas d'usinage. Le PLA est un polymère compostable et imprimable en 3D, raison de notre choix. Cette solution avait un problème majeur, l'assemblage des deux parties par collage qui pouvait représenter des problèmes mécaniques lors de sollicitation et une fragilité de l'équerre, de plus il est compliqué de trouver une colle correspondant au bois et au PLA. (se référer au croquis 3 de la partie 3.1 du dossier)

Nous nous sommes dit qu'il serait peut-être plus simple de tout faire en PLA et évaluer les zones de sollicitations et agir en conséquence.

Dernière option envisagée : En effet, notre dernière solution est celle que nous avons décidé d'utiliser est de faire l'équerre totalement en PLA ce qui permettait d'enlever la partie assemblage entre le bois et le PLA. Mais aussi ce qui nous permettra d'avoir une équerre en un seul matériau ce qui la rendra plus harmonieuse. Au départ , nous comptions rajouter une tige en acier pour améliorer la résistance de l'équerre puis nous nous sommes rendus compte par le calcul que nous n'avions pas besoin de cette tige et qu'elle représenterait un problème pour le taux de matière renouvelable à respecter de l'équerre.

Si l'on se réfère à la figure 2, on remarque que le PLA a de nombreux avantages vis à vis du bois comme son prix qui est nettement inférieur (voir le diagramme de la figure 1) et l'on peut le travailler pour y incorporer un style floral et donc pour respecter le cahier des charges.

Le PLA est aussi un matériau considéré comme renouvelable et qui s'indexe à la norme ISO 14067 ce qui en fait un matériau idéal pour concevoir nos équerres. (se référer au croquis 4 de la partie 3.1 du dossier) [1]

Au niveau de sa mise en forme, le PLA nous laisse entrevoir différentes méthodes ce qui va nous laisser plus de possibilités sur un choix optimal vis à vis du cahier des charges qui nous a été soumis.

Masse minimale à respecter :

Caractéristiques		Centre de gravité (G)	
Volume	1,162e-004m3	Gx	14,999mm
Aire	0,038m2	Gy	38,572mm
Masse	0,144kg	Gz	38,109mm
Densité	1240kg_m3		

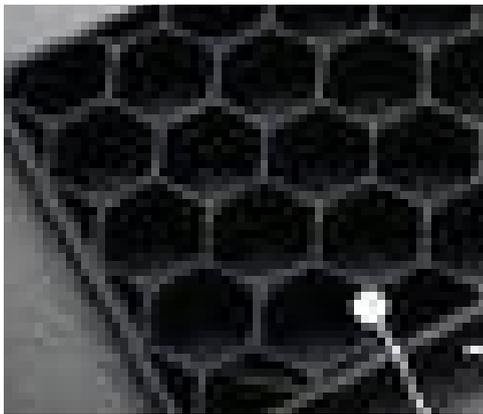
Figure 4 : Informations sur l'équerre

En modélisant notre équerre sur le logiciel Catia V5 nous avons cherché à minimiser le volume de l'équerre afin de diminuer sa masse tout en restant dans le cadre de la résistance à une masse de 50 kg répartie sur nos deux équerres.

Pour une équerre nous avons donc déterminé une masse minimale de 144 g avec la masse volumique du PLA (1240 kg/m³) à titre de comparaison, une pomme que l'on peut retrouver dans le commerce traditionnel fait environ 150g. L'équerre est donc très légère et en utilisant ce volume et donc en ayant cette masse, les propriétés de nos équerres sont conservées ce qui fait qu'elles seront toujours suffisamment résistantes à la masse que l'on va leur appliquer.

Mais en passant par de l'impression 3D, nous avons modélisé un nid d'abeille à l'intérieur de nos équerres ce qui va nous permettre de réduire la masse de la solution et de passer d'une masse d'environ 150g à une masse de 54,4g ce qui va réduire par 3 la matière nécessaire à la réalisation de nos équerres tout en conservant une bonne résistance spécifique.

Le nid d'abeille a été réalisé par le logiciel Tinkercad :



structure en nid d'abeille de l'équerre.

Prix du PLA utilisé :

On retrouve une bobine de PLA pour de l'impression 3D dans les dimensions en diamètre de la machine disponible au FABLAB de l'IUT, la bobine vient de Chine mais porte la norme EN 13432 ce qui signifie qu'il est considéré comme compostable et on la retrouve à 17,49 euros du kg soit pour deux équerres de 54,4g un prix d'environ 5,25 euros en y ajoutant 2,49 euros de frais d'envoi, soit un prix final de **0,95 euros**.



3DJAKE

ecoPLA Mat Violet, 2,85 mm / 1000 g

Filament PLA polyvalent au prix imbattable !

★★★★☆ 12 évaluations client

17,49 € ~~24,99 €~~ -30%

(17,49 € / kg, Prix TTC dont 20% de TVA - Hors frais d'envoi)

Couleur:



Afficher plus d'options

Si l'on prend l'exemple d'un PLA fabriqué en France, on le retrouve 29,94 euros du kg soit environ **1,62 euros** pour nos deux équerres, il porte aussi la norme EN 13432 et il n'est pas vraiment plus cher que le PLA fabriqué en Chine de plus en le sélectionnant en France notre PLA voyagera moins et limitera sa participation aux émissions de GES et réduira son bilan carbone.

Le PLA Chinois est donc plus intéressant sur un aspect seulement financier que le PLA français mais de peu (seulement 1,26 euros).



● 1.75 mm | M 1kg | Fabrication 

PLA Noir 1.75mm Francofil 1kg - Fabriqué en France

Fabrication française, Très bon rendu de couleurs et de détails, S'imprime facilement, Biosourcé

Référence : **FRF140012** | Marque : Francofil
Voir toute la gamme : [PLA Francofil](#)

Imprimons français ! Faites le choix d'un matériau qualitatif fabriqué à partir de **matières premières soigneusement sélectionnées**.

Le filament **PLA Francofil**, extrudé en France, assure des impressions d'une grande qualité aussi bien en terme de **profondeurs des couleurs** que de **finesse des détails**.

Facile à imprimer et hautement qualitatif, le **PLA Francofil** convient aux **professionnels** soucieux de travailler avec des matériaux sûrs et de haute qualité.

Soutenons la fabrication française !

- Matériau : PLA
- Diamètre : 1.75 mm
- Masse : 1kg
- Coloris : Noir

Comment l'imprimer en bref : 
buse : 190-220 °C | plateau : 20-50 °C | vitesse : 30-100 mm/s

29,94 € 1.0kg | 29,94 € / kg

4.9/5
7555 avis clients

Si maintenant, on établit le bilan carbone d'une équerre allant de sa production jusqu'à son acheminement jusqu'à Talence on pourra à nouveau comparer le PLA Chinois au PLA français.

Bilan Carbone :

Pour réaliser l'équerre, il nous faut uniquement du PLA.

En se basant sur les plus grands producteurs de PLA dans le monde et en se basant sur les propos des enseignants responsables du FABLAB, on constate que le PLA utilisé généralement au FABLAB est commandé sur des sites Chinois de plus selon Polyvia une entreprise spécialisée dans les polymères le PLA serait majoritairement produit Asie-Pacifique. Il faut compter que 55% de la production nationale de PLA provient de Chine en 2021 (données les plus récentes trouvées) et que le marché du PLA représente à lui seul 520 millions d'euros sur l'année 2020.

C'est pour cela que nous avons fait commander par l'IUT une bobine de PLA produite par Arianoplast en Moselle. Nous allons ensuite réaliser un comparatif du bilan carbone d'une pièce fabriquée avec du PLA venant de Chine, moins chère, avec une pièce fabriquée avec du PLA français dont le prix est légèrement supérieur.. De ce fait, nous allons pouvoir établir un tableau comparatif et évaluer quelle est l'option la plus intéressante.

Bilan carbone équerre avec du PLA Chinois :

Impact CO₂ de la mise en forme du PLA (extrusion) : $0,544 \text{ kg} \times 0,738 \text{ kg CO}_2 \text{ éq. / kg} = 0,1062 \text{ kg CO}_2 \text{ éq.} = 40,1 \text{ g CO}_2 \text{ éq.}$

En ce qui concerne les transports liés à une usine directement, l'usine dont la production de PLA est la plus importante se situe au pays à Bengbu, dans la province d'Anhui (centre), en Chine. La revue de l'institut polytechnique de Paris "Polytechnique insights"⁴ nous renseigne : un camion émet 80 grammes soit 80×10^{-6} tonnes de CO₂ équivalent par tonne par kilomètre et qu'un porte conteneur émet 3 grammes 3×10^{-6} tonnes de CO₂ équivalent par tonne par kilomètre. Le voyage en camion est de 491 kilomètres de Bengbu à Shanghai, en bateau de 10048 miles soit 18608 kilomètres de Shanghai à Marseille puis de 641 kilomètres de Marseille à Talence en camion à nouveau. Soit une distance totale de 4722 kilomètres en camion et de x km en bateau.

Impact CO₂ du trajet total en camion : $80 \times 10^{-6} \times 54,4 \times 10^{-6} \times (491 + 641) = 1,03 \times 10^{-5}$ tonnes CO₂ éq. soit 7.3g de CO₂ eq.

Impact CO₂ du trajet total en bateau : $3 \times 10^{-6} \times 144 \times 10^{-6} \times 18608 = 0.42 \times 10^{-5}$ tonnes CO₂ éq. soit 5,32 g de CO₂ eq.

L'impact CO₂ de la fabrication de l'équerre par impression 3D est quasiment nul, on ne va donc pas la considérer.

On se retrouve donc avec un impact total en CO₂ émis approximativement pour la formation de cette pièce de **52,72 g CO₂ éq** composé de 85,43 % dû à la formation des bobines de PLA, 14,57% provenant du transport (56,28% par camion contre 43,72% par bateau).

Bilan carbone équerre avec du PLA Français :

Impact CO₂ de la mise en forme du PLA (extrusion) : $0,544 \text{ kg} \times 0,738 \text{ kg CO}_2 \text{ éq. / kg} = 0,1062 \text{ kg CO}_2 \text{ éq.} = 40,1 \text{ g CO}_2 \text{ eq.}$

En ce qui concerne les transports liés à une usine directement, l'usine avec la production de PLA se situe à Sarrebourg en Moselle soit à 974 km de Talence. On considère que le trajet va se faire en camion.

Impact CO₂ du trajet total en camion : $80 \times 10^{-6} \times 54,4 \times 10^{-6} \times 974 = 1,01 \times 10^{-5}$ tonnes CO₂ éq. soit 6,93 g de CO₂ eq.

On se retrouve donc avec un impact total en CO₂ émis approximativement pour la formation de cette pièce de **47,03 g CO₂ éq** composé de 91,31 % dû à la formation des bobines de PLA et 8,69% provenant du transport.

On remarque que sur ce point aussi, la différence entre le PLA Chinois et le PLA français est moindre néanmoins ici on remarque quand même que le PLA français est plus intéressant que le PLA Chinois au niveau de son émission de carbone.

Minimiser le prix du PLA ainsi que minimiser son empreinte carbone sont tous deux des points prioritaires dans le cahier des charges. Néanmoins, il faut aussi respecter la norme

ISO 14067 qui reste un point important du cahier des charges ce qui va plutôt nous faire pencher sur l'utilisation du PLA français. [1]

De plus, en choisissant un PLA Français, nous participons à l'économie nationale et évitons par la même occasion un surplus de pollution marine émise lors du transport en bateau de notre bobine si celle-ci venait de Chine.

2.2 Choix du procédé de fabrication

Le PLA étant un biopolymère qui appartient à la famille des plastiques biodégradables et des polymères biodégradables est limité dans les procédés utilisables pour le mettre en forme.

En effet, nous avons retenu 2 procédés possibles et réalisables avec l'équipement mis à disposition par l'IUT pour fabriquer nos deux équerres : le moulage par injection ou l'impression 3D. Le moulage par injection est réalisable dans la salle dédiée aux fabrications de pièces en polymère située à l'étage -1 du département SGM et l'impression 3D, quant à elle, est réalisable au FABLAB de l'IUT qui a bien voulu accepter que nous utilisions leurs machines dans le cadre de ce projet.

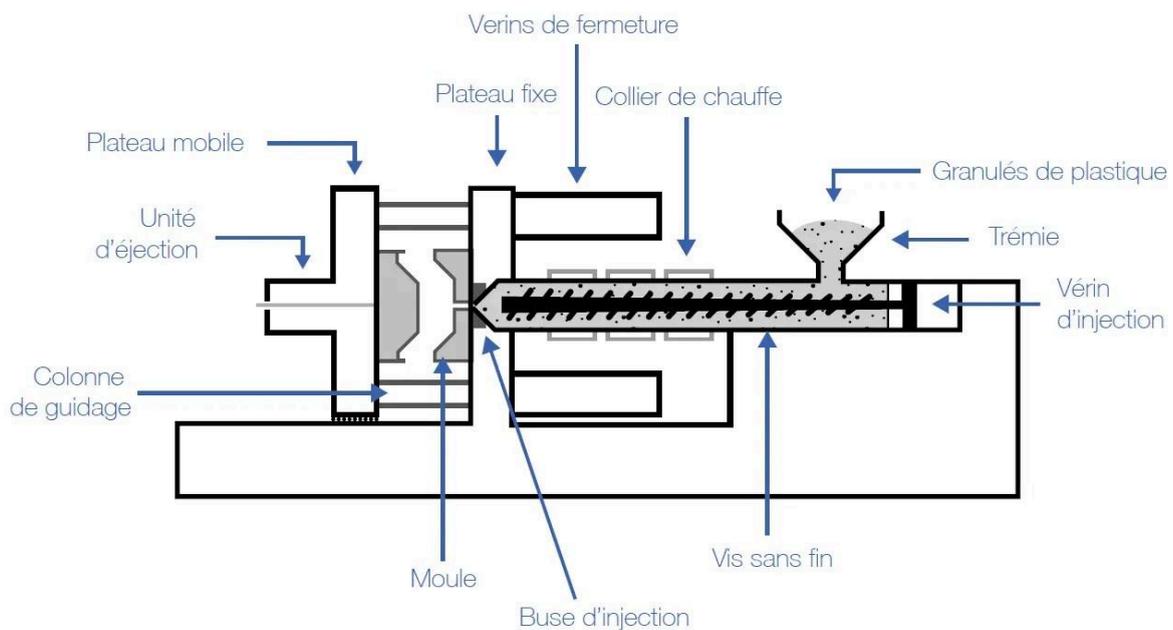


Figure 4 : Schéma du moulage par injection de thermoplastique (PLA)

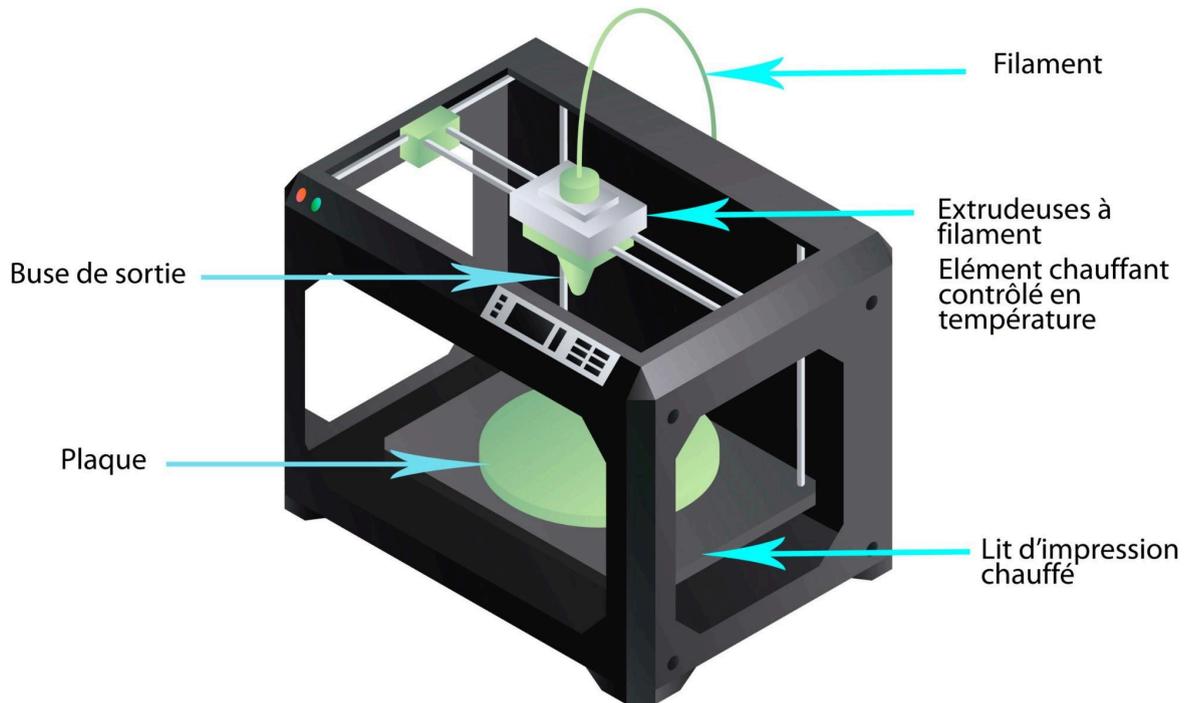


Figure 5 : Schéma d'une imprimante 3D pour la mise en forme d'objets en thermoplastique (PLA)

Sur un tableau comparatif mis en dessous, nous avons comparé le moulage par injection (figure et l'impression 3D sur la base du matériau utilisé : le PLA.

Jean Dela...

CRITÈRES	INJECTION PLASTIQUE	IMPRESSION 3D
PRIX	MOULE TRÈS CHER (PLUSIEURS MILLIERS D'EUROS) ADAPTÉ POUR DE GRANDES SÉRIES	PRIX DE L'IMPRESSION TRÈS BAS ET PEU ENERGIVORE POUR DE PETITES PIÈCES
CAPACITÉ DE CHARGE	PEUT SUPPORTER DES CHARGES ÉLEVÉES ET CONSTANTES.	PEUT SUPPORTER DES CHARGES MODÉRÉES À ÉLEVÉES,
EMPREINTE CARBONE	PLUS ÉLEVÉE EN RAISON DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET DES DÉCHETS GÉNÉRÉS PAR LE PROCESSUS D'INJECTION PLASTIQUE.	PLUS FAIBLE EN RAISON DE L'UTILISATION DIRECTE DU MATÉRIAU SANS GASPILLAGE ET DE LA RÉDUCTION DES TRANSPORTS.
RESPECT DE L'ISO 14067	PEUT ÊTRE CONFORME SI L'ON UTILISE DES MATÉRIAUX RECYCLÉS.	PEUT ÊTRE CONFORME SI LE FILAMENT PLA UTILISÉ EST CERTIFIÉ ET QUE L'IMPRIMANTE 3D EST ÉCO-RESPONSABLE.
MATÉRIAU RENOUVELABLE	PEUT ÊTRE RÉALISÉ EN PLA, UN MATÉRIAU BIODÉGRADABLE ET DÉRIVÉ DE RESSOURCES RENOUVELABLES COMME LE MAÏS OU LA CANNE À SUCRE.	UTILISE DIRECTEMENT DU PLA, UN MATÉRIAU RENOUVELABLE DÉRIVÉ DE SOURCES VÉGÉTALES.
RESPECT DU STYLE DES ÉQUERRES	DIFFICILE À OBTENIR AVEC PRÉCISION.	MOTIFS PRÉCIS ET COMPLEXES GRÂCE À LA LIBERTÉ DE CONCEPTION

- Point(s) fort(s) du procédé
- Bon(s) point(s) du procédé
- Mauvais point(s) du procédé

Figure 6 : Tableau comparatif des procédés sélectionnés (moulage par injection et impression 3D)

Sur le tableau de la figure 6, on remarque que le moulage par injection a trois catégories en rouge qui représentent des points négatifs et gênants par rapport au cahier des charges donné. Le moulage par injection engendre un prix très élevé car il faut construire un moule de notre équerre pour y injecter le PLA. Un moule de ce type peut coûter des milliers d'euros surtout pour une pièce aussi complexe ce qui d'une part est un point négatif pour le prix d'une équerre à l'unité mais aussi pour le respect du style floral à utiliser. Le moulage par injection est très rapide, on compte qu'une pièce est injectée toutes les 3 minutes ce qui en fait un procédé adapté pour de la grande série (> 500 pièces pour amortir le coût) néanmoins notre cahier des charges ne fait pas mention d'un besoin en grande série. De plus, ce procédé engage des pertes de matière à chaque injection mais aussi une quantité d'énergie importante ce qui ne va pas dans le sens d'une équerre avec une empreinte carbone basse et qui respecte l'environnement ainsi qu'un prix.

C'est pour ces raisons là que nous ne choisirons pas le moulage par injection pour réaliser nos deux équerres.

L'impression 3D semble être un bon compromis par rapport aux points positifs et négatifs du moulage par injection. Car en passant par l'impression 3D nous nous assurerons un procédé moins énergivore, moins coûteux, plus précis pour réaliser les motifs d'art floraux. L'impression 3D va nous permettre de limiter les pertes de matières lors de la mise en forme mais aussi de respecter une empreinte carbone basse pour une résistance mécanique quasiment identique à celle obtenue en utilisant du moulage par injection.

Le seul défaut que l'on pourrait noter pour de la fabrication par impression 3D est le temps alloué à la réalisation d'une équerre. En effet, comparativement au moulage par injection qui en 3 minutes peut nous réaliser une équerre, l'impression 3D en demandera 50 minutes mais aura la chance d'être plus précise. Comme nous ne souhaitons pas faire de grandes séries, il nous sera inutile de chercher à optimiser le temps de fabrication d'une équerre et donc l'impression 3D restera toute aussi intéressante.

C'est pour toutes les raisons énoncées précédemment que nous allons opter pour **l'impression 3D comme procédé de fabrication.**

Il faudra compter en moyenne entre 3h et 5h pour la réalisation d'une pièce de 250g en impression 3D, celle-ci en fait environ 150 mais il y a différents détails qui vont rallonger le temps de fabrication.

2.3 Partie renouvelable de l'équerre

En se basant sur la documentation fournie par "techniques de l'ingénieur", on peut considérer le PLA comme étant un matériau renouvelable car il est constitué de composants issus de sources naturelles.

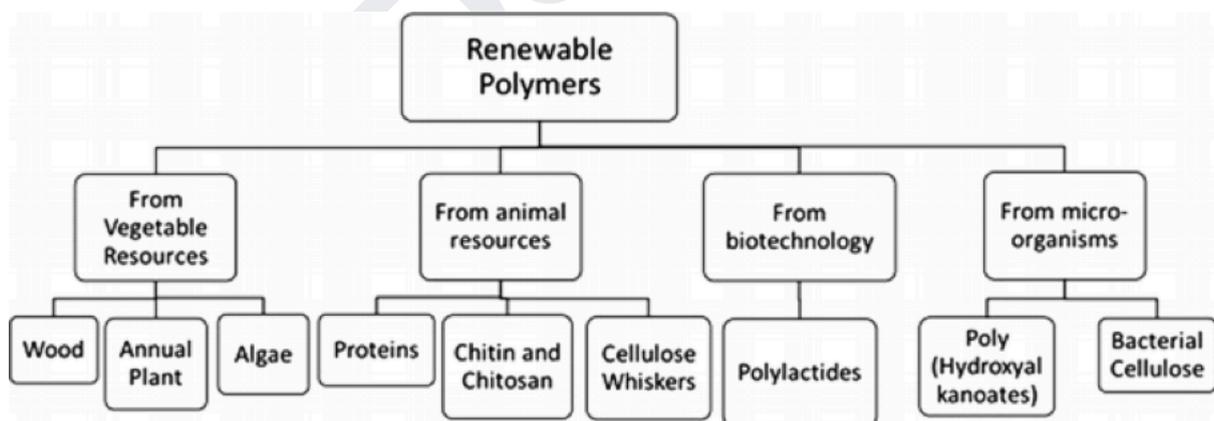


Figure 7 : Organigramme des sources de matériaux renouvelables par "techniques de l'ingénieur"

Le PLA est fabriqué à base d'acide lactique, lui-même fabriqué sur la base de fermentation de glucides naturels tels que le maïs, la canne à sucre, la betterave à sucre ou d'autres sources riches en sucres. Ces éléments étant naturels, ils conduisent donc à un polymère renouvelable en se référant à la figure 7.

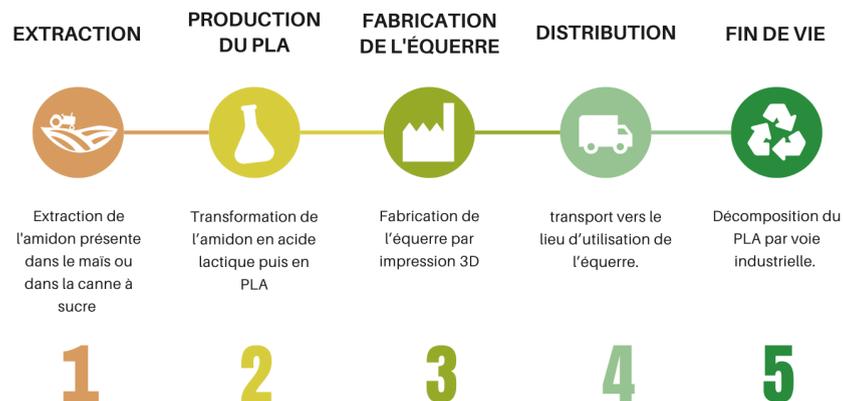
De plus, le PLA est considéré comme compostable, on le retrouve surtout dans cette filière par voie industrielle car pour le composter efficacement il faut le placer dans les températures avoisinant 50 à 60 degrés celsius [1] néanmoins il est possible de le composter dans des conditions de compostage domestique même si cela reste très long car le compostage du PLA dépend directement de la température de son environnement.

En France, il existe plusieurs entreprises permettant le compostage du PLA par voie industrielle, nous en avons sélectionné une qui se nomme **carbolic**. C'est une entreprise basée à Clermont-Ferrand depuis 2016 qui travaille activement dans les filières du recyclage des polymères en France. Sur leur site ils font part que grâce à CARBIOS Active, leur dernière innovation, les produits en PLA deviennent 100 % compostables, même à température ambiante.

Le PLA certifié compostable porte la norme EN 13432 dans les pays d'Europe, il faut donc vérifier attentivement que le PLA que l'on achète porte bien cette norme afin de pouvoir le composter si cela est attendu. [4]

2.4 Analyse du cycle de vie

ANALYSE DU CYCLE DE VIE POUR UNE ÉQUERRE EN PLA



1 - On sait que pour passer du maïs au PLA, il y a un rendement de 0,6, soit pour une équerre de 144 g de PLA une masse nécessaire de $144/0,6 = 240$ grammes.

Il nous faut donc 240 g de maïs initialement. [8]

On sait que pour un hectare, on réussit à extraire 8,3 tonnes de grains avec 30% d'humidité soit 6,83 tonnes en rendement net et que pour cultiver une parcelle de terrain d'un hectare, on émet 14,64 tonnes de CO₂ car l'on ne compte pas la récupération des tiges dans le sol.

[7]

Si on divise la masse de CO₂ par la masse de maïs produite on obtient que pour 1 g de maïs on a une émission de CO₂ de 1,76 g de CO₂/ g de maïs.

Donc si l'on multiplie 1,76 par 240 on obtient le bilan carbone de l'extraction du maïs nécessaire à la réalisation de l'équerre ce qui nous donne **422,4 g de CO₂**. [8]

Peut-être qu'en optant pour de la canne à sucre pour réaliser le PLA ce sera moins coûteux au niveau du bilan carbone néanmoins, nous ne disposons pas d'assez de données pour effectuer un comparatif entre le maïs et la canne à sucre vis-à-vis du bilan carbone.

2 - Nous avons déterminé lors du bilan carbone que pour mettre en forme notre PLA, il fallait compter **116,3 g de CO₂** en comptant le carbone émis par le transport et par le procédé de mise en forme du PLA.

3 - Une imprimante 3D consomme à peu près 0,1 kW par heure de fonctionnement, on a dit plus haut que pour réaliser une équerre en PLA on comptait entre 3h et 5h de travail, on effectue donc une moyenne de 4h pour une équerre. On aurait donc une consommation de 0,4 kWh en tout. Grâce au site RTE-France.com qui permet d'avoir en temps réel l'émission de CO₂ moyen en France par kWh on constate que l'on émet en moyenne 16g de CO₂ par kWh. [9]

On se retrouve donc avec pour 0,4 kWh de consommé un bilan carbone du procédé de mise en forme du PLA pour une équerre de **6,4 g de CO₂**.

4 - Nous n'allons pas compter de transport associé à l'acheminement de l'équerre chez son propriétaire car nous souhaitons l'utiliser sur le même site que celui où l'on a fabriqué l'objet. Donc ici le bilan carbone est de **0 g de CO₂**.

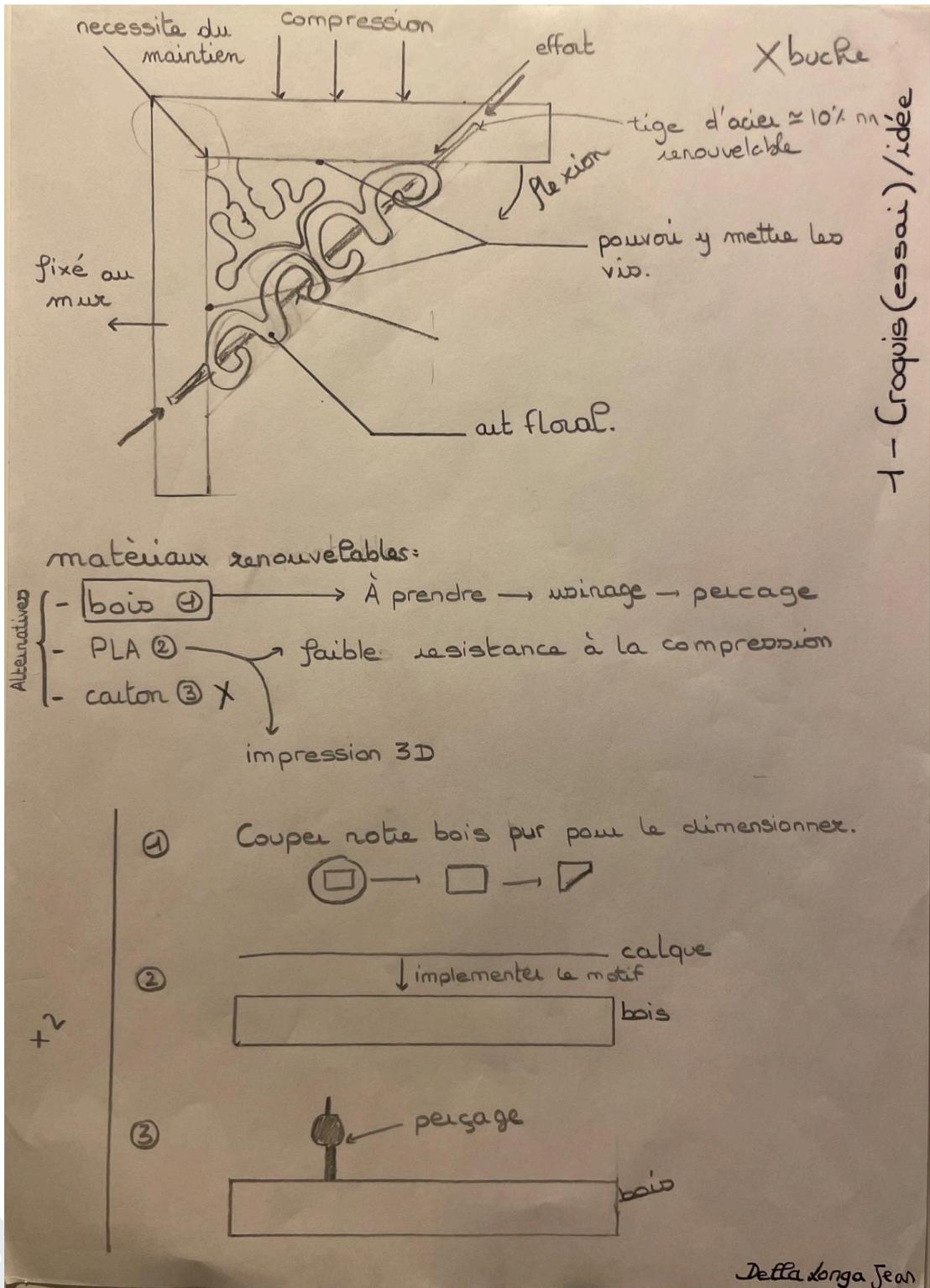
5 - L'entreprise Carbiocile n'a pas été en mesure de nous communiquer les informations nécessaires afin de calculer l'impact en carbone du compostage du PLA. Nous ne pourrions donc pas déterminer de valeur concernant la fin de vie de l'équerre.

Nous nous retrouvons donc avec un impact en carbone de **545,1 g de CO₂ émis pour la réalisation d'une équerre** en PLA.

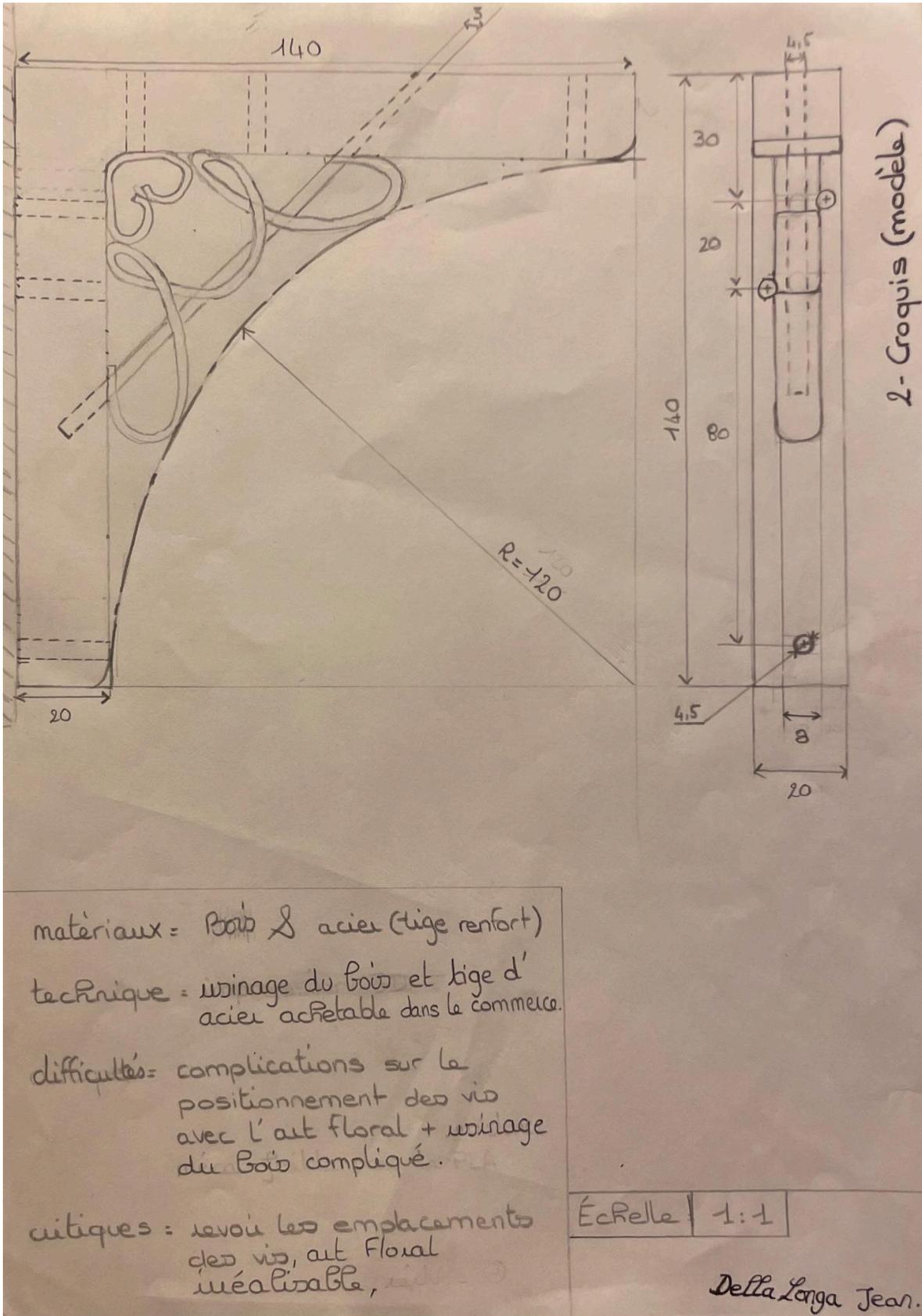
Pour se donner une idée, le ministère de la santé a établi le bilan carbone moyen d'un citoyen français, ce qui revenait à 9 tonnes de CO₂ émis/an. La réalisation d'une équerre représenterait donc une part de 0,006% de l'empreinte carbone moyenne d'un citoyen Français, ce qui est très peu.

3. Mise en plan par DAO/CAO

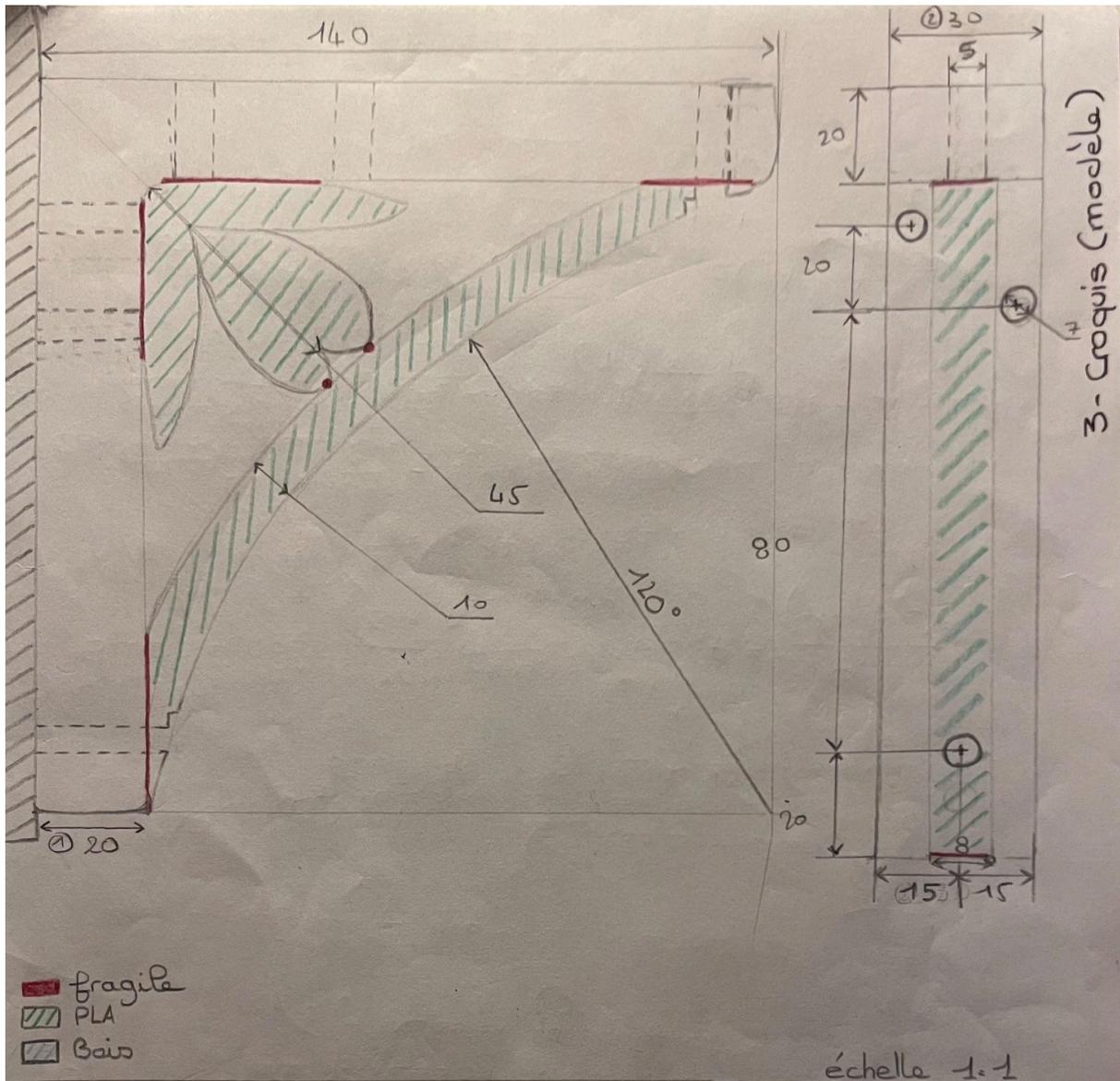
3.1 Croquis de l'équerre



Croquis 1 : Esquisse de notre idée d'équerre, réalisée lors de la première séance



Croquis 2 : Croquis de la conception d'une équerre en bois comportant une tige en acier



matériaux: Bois et PLA

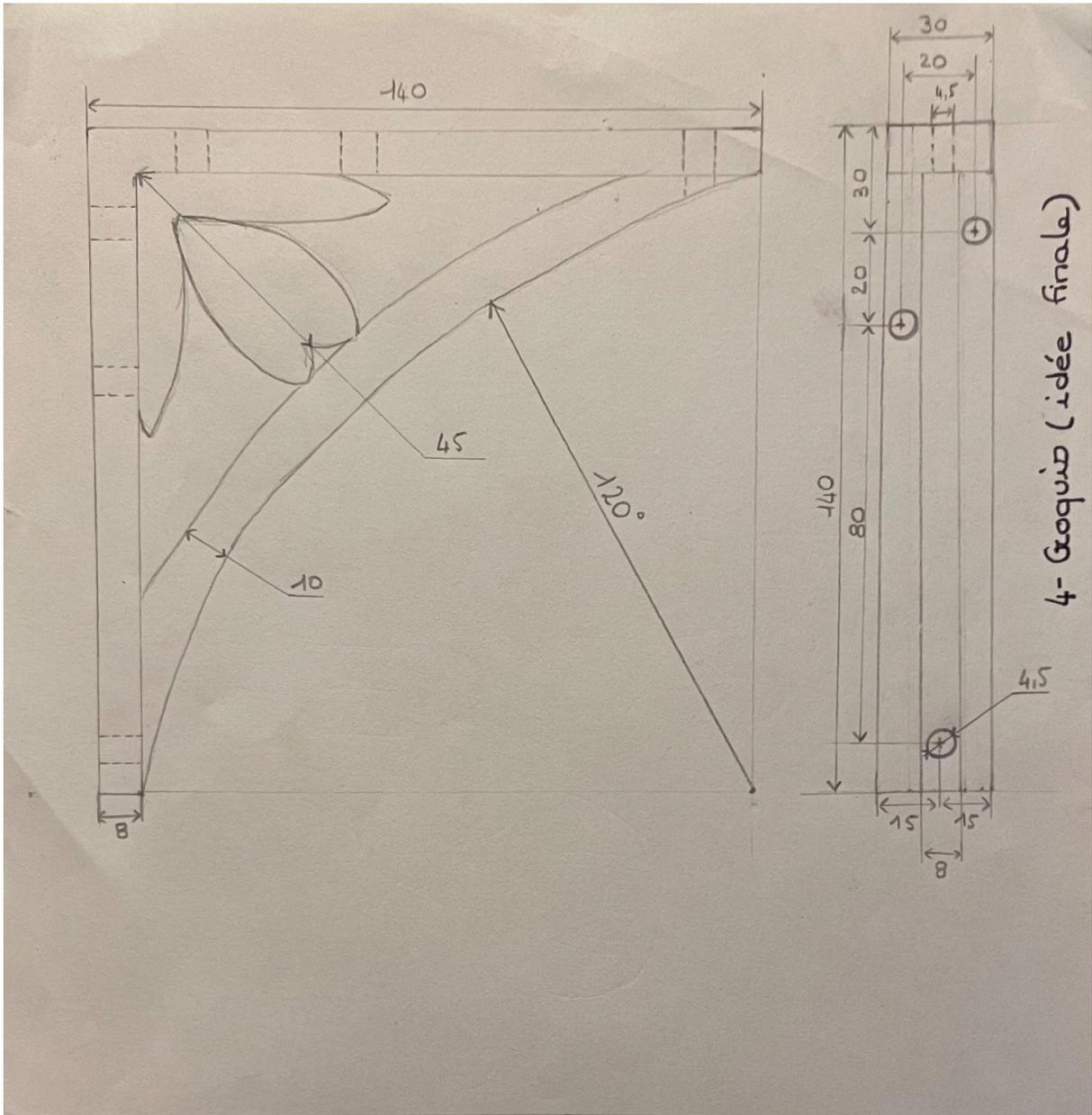
technique: impression en nid d'abeille avec une orientation verticale avec une imprimante 3D ou faïe en équerre plane.

difficultés: - résistance mécanique faible
 - collage du PLA sur le bois compliqué de l'équerre.

critiques: réduire ① pour le côté esthétique, le mettre à 8 mm et réduire ② pour le mettre à 20 mm.

Della Longa Jean

Croquis 3 : Croquis de la conception d'une équerre en Bois et en PLA



4- Croquis (idée finale)

Équerre Version finale en PLA

matériau = PLA	technique = impression 3D en une seule fois de l'entièreté de l'équerre. → impression de l'équerre à plat pour avoir une disposition des fibres dans le sens de l'étagée
échelle 1:1	
A4	difficultés : évaluer si le PLA aura une bonne résistance.

Delta Longa Jean.

Croquis 4 : Croquis de la conception de l'équerre en PLA

3.2 Conception CAO et dessin technique de l'équerre

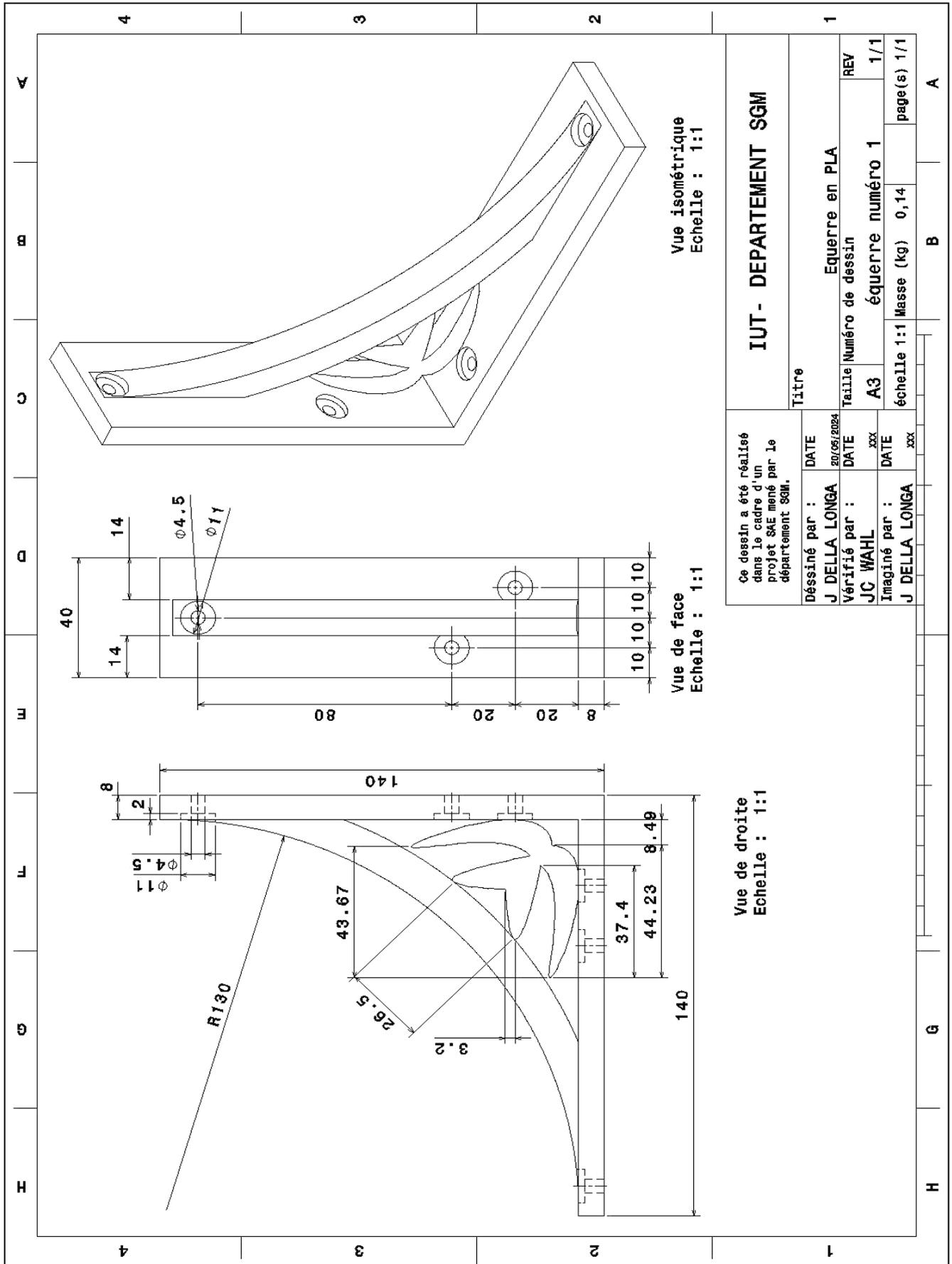


Vue isométrique de l'équerre en PLA modélisée dans CATIA V5

Pour la modélisation, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel CATIA afin de faciliter sa conception mais aussi afin de pouvoir réaliser les calculs associés à la résistance de l'équerre (voir le 3.5).

De plus, CATIA offre de multiples fonctionnalités intéressantes sur des aspects de la modélisation qui permettent de réaliser une équerre correspondant à nos attentes vis-à-vis du cahier des charges car le logiciel nous permet de simuler des matériaux, d'appliquer des contraintes ainsi que de réaliser des formes complexes.

La fabrication de l'équerre doit se faire par impression 3D ce qui nécessitera de passer nos fichiers de modélisation CATIA en fichier sous le format STL afin de pouvoir l'implémenter dans les modèles d'impressions présents sur l'imprimante.



Mise en plan de l'équerre réalisée sur CATIA V5

3.4 Nomenclature



Figure 8 : Inventaire par le biais d'une nomenclature des différents éléments nécessaire au montage de l'assemblage

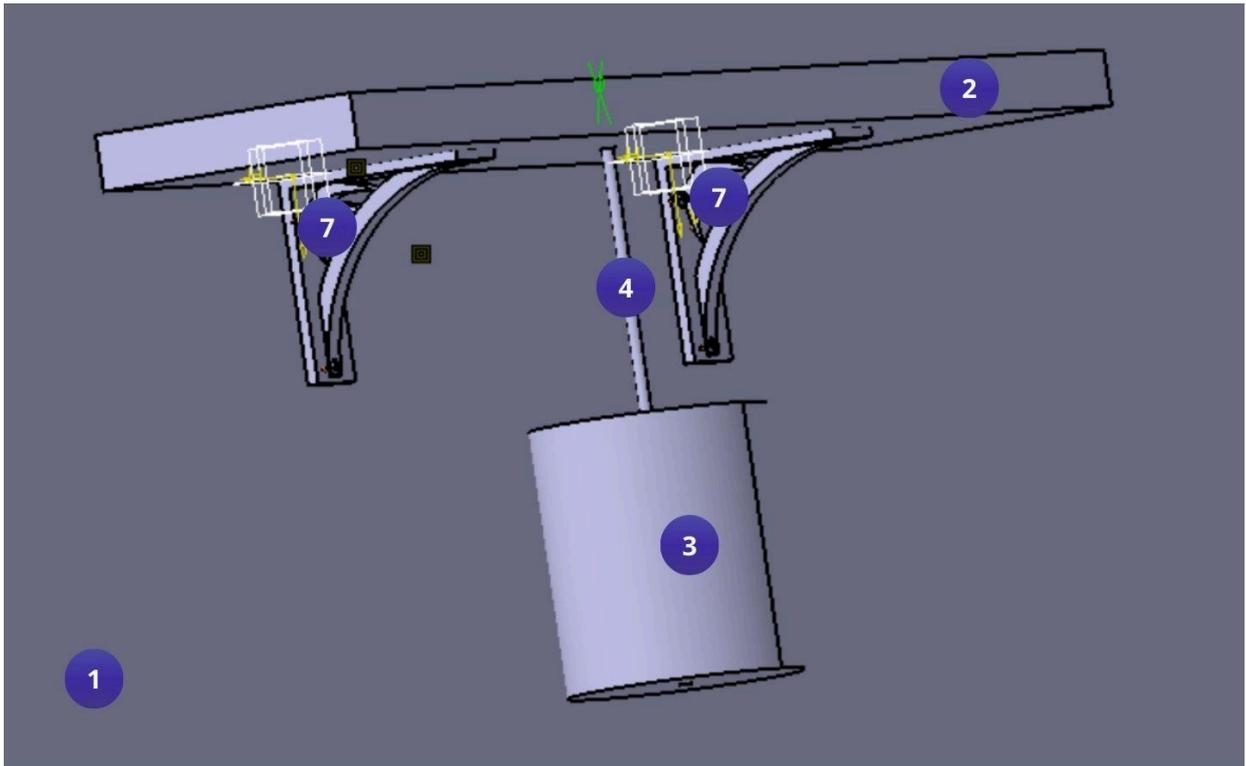


Figure 9 : Illustration du montage complet de nos équerres au sein de l'assemblage

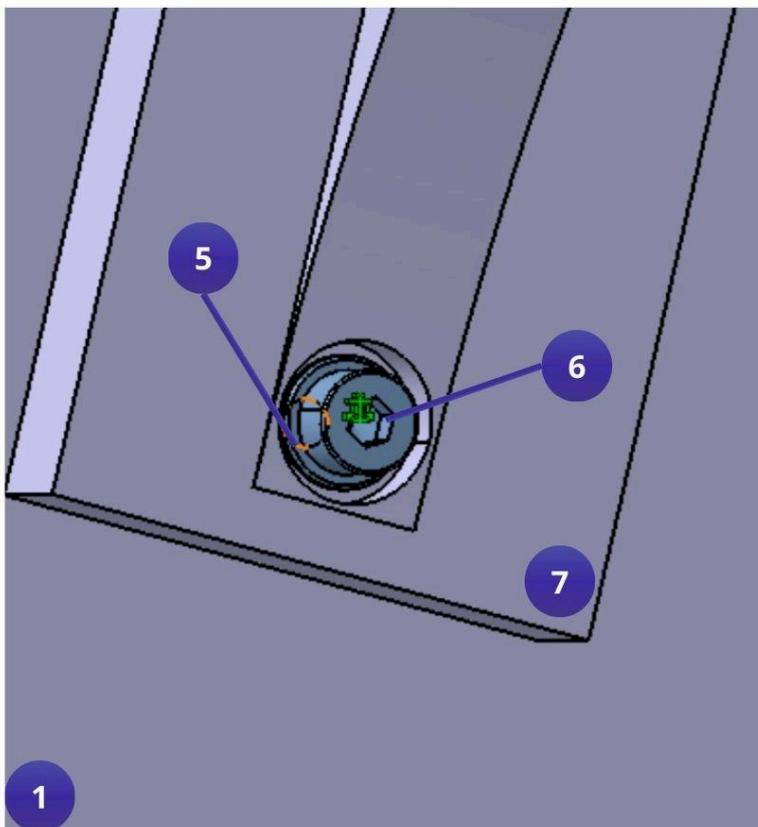
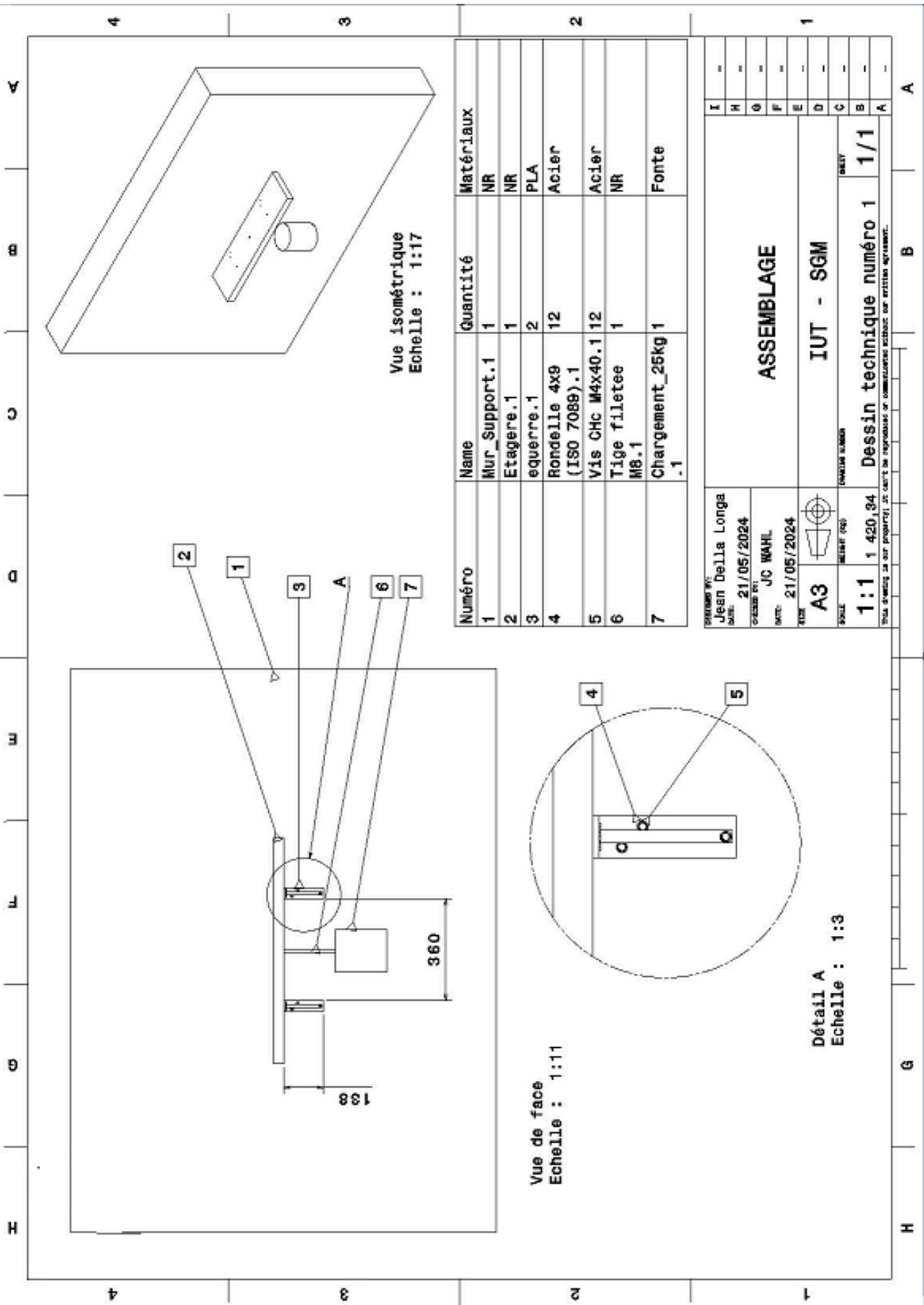


Figure 10 : zoom sur la vis au sein de l'assemblage.



Vue isométrique
Echelle : 1:17

Vue de face
Echelle : 1:11

Détail A
Echelle : 1:3

Numéro	Name	Quantité	Matériaux
1	Mur_Support.1	1	NR
2	Etagere.1	1	NR
3	equerre.1	2	PLA
4	Rondelle 4x9 (ISO 7089).1	12	Acier
5	Vis CHC M4x40.1	12	Acier
6	Tige filetee M8.1	1	NR
7	Chargement_25kg .1	1	Fonte

Dessiné par: Jean Della Longa Date: 21/05/2024		Créé par: JC WAHL Date: 21/05/2024	
Format: A3		Taille: 1 420,94	
Titre: ASSEMBLAGE		Description: IUT - SGM	
Référence: Dessin technique numéro 1		Version: 1/1	
Note: This drawing is our property. It can't be reproduced or commercialized without our written agreement.		Scale: 1:1	

3.5 Evaluation de la résistance de l'équerre

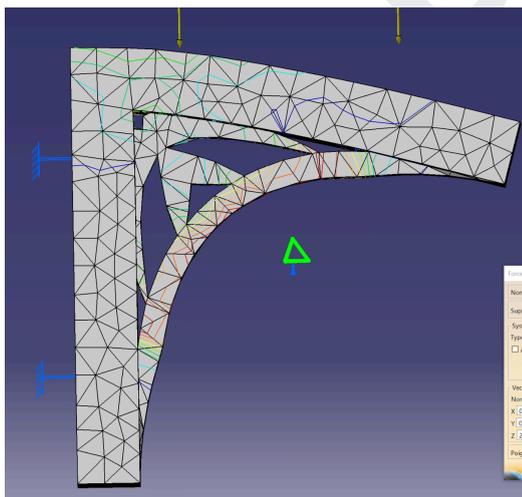
Grâce au logiciel CATIA V5, il est possible de simuler des contraintes et des forces associables à des corps modélisés sur le logiciel où l'on peut définir leurs caractéristiques techniques (matériaux avec module d'Young, densité...). Nous allons donc nous servir de ces outils afin de déterminer si une équerre sera capable d'encaisser une charge de 25kg ce qui correspond à une force de 245,75 N exercée sur l'équerre.

Pour la simulation, il faut sélectionner l'endroit où l'on va placer notre force.

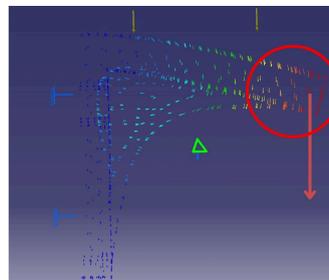
	Schéma Statique		charge...	Moment Max (kNm)	Flèche Max
poutre... sur 2 appuis		○ 1	ponctuelle	$=PL/4$	$=Pl^3/48EI$
		○ 2	répartie	$=pL^2/8$	$=5pl^4/384EI$
appuyée-encastree		○ 3	répartie	$=-pL^2/8$	$=pl^4/185EI$
		○ 4	répartie	$=pL^2/12$	$=pl^4/384EI$
encastree-libre		○ 5	ponctuelle	$=-PL$	$=Pl^3/3EI$
		○ 6	répartie	$=-pL^2/2$	$=pl^4/8EI$

Figure 11 : Schémas statiques sur la répartition des forces.

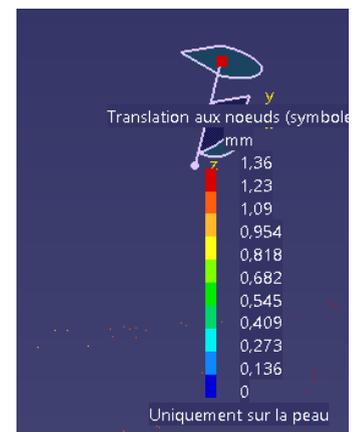
On va sélectionner un schéma statique encastree-libre à charge répartie, donc la force sera répartie sur l'intégralité de la face supérieure de l'équerre.



On obtient donc un modélisation des répartitions de contraintes de cette forme là avec une flèche verticale orientée vers le bas qui modélise la déformation maximale que l'équerre peut subir après l'application de la force.



On lit une valeur maximale de déformation sur l'axe vertical de 1,36 mm. Pour rappel, la tolérance considérée comme acceptable dans le cahier des charges était de 5 mm. Notre équerre est donc conforme au cahier des des charges et avec suffisamment de marge permettant de s'assurer que l'équerre tienne convenablement à une masse de 25 kg.



4. Conclusion sur le travail effectué

4.1 Les points forts de ce travail

La conception de l'équerre nous a permis de travailler en autonomie sur de la conception proche de celle que nous pourrions rencontrer en entreprise ce qui nous a permis dès maintenant de nous familiariser avec l'idée de respecter un cahier des charges, des dimensions spécifiques. Il nous a fallu aussi travailler avec de nouvelles fonctionnalités que nous ne connaissions pas auparavant sur Catia V5 et d'apprendre à les utiliser convenablement.

L'idée de calculer à nouveau un bilan carbone tout en suivant un cycle de vie relatif à une norme ISO est aussi un excellent moyen de nous sensibiliser à l'impact environnemental résultant de certaines façons de concevoir des objets dans l'industrie que nous pourrions changer tout en conservant des prix abordables par exemple.

Jean Della Londa

4.4 Bibliographie

Liste des documents utilisés lors de la réalisation du projet :

[1] afnor edition pour les normes

[2] greenly.earth

[3] Les Fiches techniques de l'ADEME

[4] Techniques de l'ingénieur

[5] sti.ac-versailles.fr

[6] GrantaDesign

[7] Contrepoints.org

[8] TotalEnergie

[9] rte-france

Orientation des recherches sur le caractère renouvelable du PLA avec l'aide de M. DUMON

Réalisation de la conception sur CATIA V5 avec l'aide de M. WAHL

Validation du matériau utilisé par M. MANTAUX