

Fabrication additive

Sujet de TP

Contexte :

Les procédés de fabrication additive sont une famille de procédés dont le principe consiste à réaliser une pièce couche par couche par ajout localisé de matière. Ne nécessitant pas d'outillages particuliers, ils permettent un lancement en fabrication très rapide dès lors qu'un modèle géométrique au format approprié (STL, AMF, ...) est disponible. En général, l'étape de fabrication/post-traitement des pièces est assez lente, cependant ces procédés peuvent être compétitifs vis à vis des procédés conventionnels lorsque le besoin comprend une ou plusieurs de ces caractéristiques :

- Pas d'outillage - évolution intégrée en temps réel : personnalisation / service après-vente (O stocks) / Conception agile
- Géométrie complexe (canaux internes, matériaux architecturés, multi-fonctionnalité)
- Fabrication directe de systèmes assemblés

Les procédés de fabrication additive offrent des possibilités énormes en termes de formes réalisables. Cela a débouché, par exemple, sur l'émergence de logiciels d'optimisation topologique qui, à partir de la définition géométrique des surfaces/volumes fonctionnels, calculent l'habillage des pièces en répartissant de manière optimisée la matière afin de répondre aux contraintes fonctionnelles en service (chargement mécanique, poids, raideur...). Cela débouche sur des géométries bio-inspirées ou de type treillis irréalises par des procédés conventionnels (Figure 1).



(a)



(b)

Figure 1 : pièces optimisées topologiquement (a) type treillis, (b) géométrie bio-inspirée

Cependant, les contraintes liées aux procédés restent à prendre en considération lors de la conception (y compris en sortie d'optimisation topologique si cet outil a été utilisé). C'est ce que l'on appelle la DFAM (design for additive manufacturing). Les règles de conception dépendent du procédé choisi. **Nous nous intéresserons dans ce TP au procédé d'extrusion de matière autrement appelé FDM (Fused Deposition Modeling), procédé thermoplastique le plus répandu.** Il consiste en la création d'une pièce par dépôt d'un polymère thermoplastique couche par couche par extrusion d'un fil chauffé à l'intérieur d'une buse.

Objet :

On se propose de concevoir et réaliser par FDM un produit réalisant une mobilité en rotation autour d'un axe de type « charnière ». La « charnière » ne doit pas être assemblée après fabrication mais fabriquée directement assemblée. L'assemblage, non démontable, doit permettre la rotation d'une pièce (rouge sur Figure 2) par rapport à l'autre (bleue) d'au moins 150°. Les surfaces fonctionnelles servant à l'assemblage vissé de la charnière sont prédéfinies. Il reste à concevoir la liaison pivot et l'habillage de chaque pièce de l'assemblage en optimisant la conception vis à vis des contraintes de production liées aux machines de FDM utilisées (Figure 2).

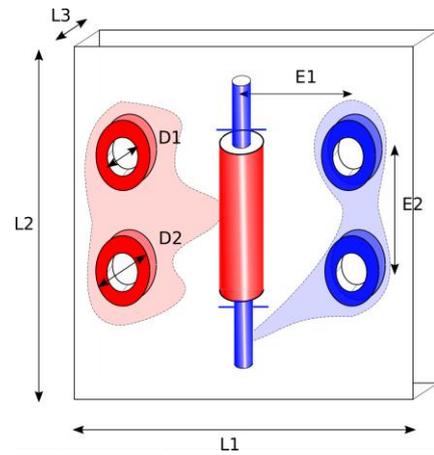


Figure 2 : Assemblage de type charnière à réaliser

Méthodologie :

Dans un premier temps, nous mettrons en œuvre des fabrications de pièces test afin de déduire quelques-unes des règles de conception du procédé FDM :

- **Étape 1** : Etude de l'influence de la **stratégie de fabrication** sur la **tenue mécanique et le coût** d'une éprouvette de flexion.
- **Étape 2** : Etude de l'influence de la **longueur** et de l'**angle** d'une partie de pièce en **porte à faux** sur la nécessité de **support** lors de la fabrication.
- **Étape 3** : Etude de l'influence du **choix de l'orientation lors de la fabrication d'une équerre** sur le **temps de fabrication, la matière consommée, l'état de surface et la tenue mécanique**.
- **Étape 4** : Définition du **Jeu radial minimal** nécessaire aux **liaisons pivots**.

Dans un second temps, vous devrez proposer une conception de la pièce charnière à partir d'un cahier des charges fourni et lancer sa fabrication (**Étape 5**).

Veillez à respecter les consignes de sécurité pour les futures manipulations.

1. Etape 1 - étude de la stratégie de dépose du filament sur la tenue d'une éprouvette lors d'un essai de flexion 3 points – Réalisation sur machine Fortus 250mc

1.1.Principe

Le logiciel **Insight** permet à partir des fichiers *.stl généré par CAO de réaliser le fichier *.cmb nécessaire à la machine pour réaliser la pièce. Ce fichier *.cmb comporte notamment le nombre de couches (slices) mais aussi tous les détails du parcours de la buse matière ou support pour chacune de ces couches.

INFO : de nombreux paramètres sont réglables dans ce logiciel dit ouvert : épaisseur de couche, orientation de remplissage, orientation slicing, remplissage, contour, support



L'objectif est de connaître l'impact de quelques paramètres en réalisant des éprouvettes qui seront ensuite testées en flexion 3 points afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques de la poutre tels que la raideur en flexion 3 points K, l'effort à rupture F_{max} et la flèche à rupture δ_{rupt} ainsi que le mode de ruine (rotule plastique, délamination entre couches) ...

1.2.Essai de flexion 3 points

Un essai de flexion 3 points est schématisé en Figure 3. Il consiste en l'application d'un effort centrée F sur une poutre posée sur 2 appuis distants de la longueur L. L'effort appliqué entraîne un déplacement δ de la poutre dont la déformée est représentée en vert sur le schéma. Le diagramme des moments fléchissants induits par la sollicitation est représenté en bleu.

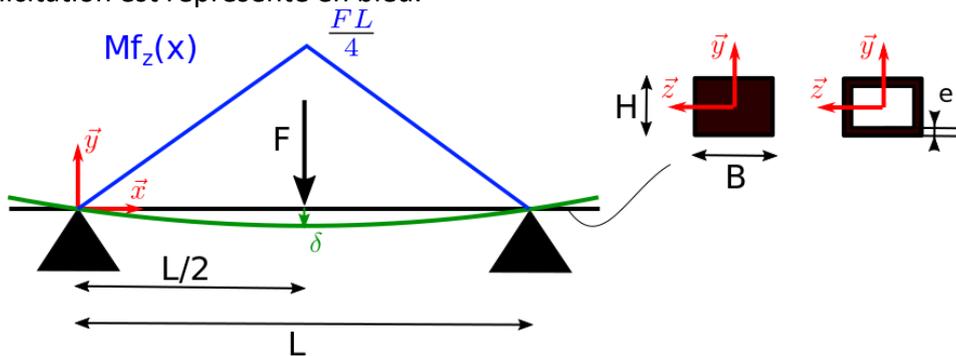


Figure 3 : Schématisation d'un essai de flexion 3 points.

Suivant les hypothèses de la théorie poutre (cf poly CONAN) :

- Petits déplacements
- Hypothèse d'Euler Bernoulli : la section de la poutre reste droite et orthogonale à la ligne moyenne
- Elasticité linéaire du matériau de module d'Young E,

Il est possible de lier le moment fléchissant autour de z Mf_z à la courbure de la poutre v'' par l'équation :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = v'' = -\frac{Mf_z}{EI_{Gz}}$$

avec I_{Gz} le moment quadratique autour de l'axe z de la section de la poutre.

Afin de lier l'effort appliqué à la flèche pour en déduire la raideur de la poutre, nous écrivons le principe de conservation de l'énergie qui s'écrit en statique :

$$W_{ext} + W_{int} = 0,$$

Avec W_{ext} le travail des forces externes et W_{int} le travail des forces internes (énergie de déformation).

Dans le cas de la flexion 3 points, on a :

$$W_{ext} = F\delta,$$

$$W_{int} = \int_0^L Mf_z(x)v''(x)dx = \int_0^L -\frac{Mf_z(x)^2}{EI_{Gz}} dx,$$

Il s'ensuit la raideur K :

$$K = \frac{F}{\delta} = \frac{48EI_{Gz}}{L^3}.$$

De même, les hypothèses de la théorie des poutres induisent une répartition linéaire de la contrainte axiale σ_x dans la section de la poutre :

$$\sigma_x = -\frac{Mf_z y}{I_{Gz}}.$$

On peut en déduire la force maximale à rupture F_{max} connaissant la contrainte à rupture du matériau σ_m et la hauteur de la poutre H :

$$F_{max} = \frac{8\sigma_m I_{Gz}}{LH}.$$

Dans la suite nous comparerons les résultats expérimentaux à deux types de section de poutre (cf Figure 3) :

- Section rectangulaire pleine de largeur B et de hauteur H, de moment quadratique :

$$I_{Gz,1} = \frac{BH^3}{12}.$$

- Section rectangulaire creuse de largeur B, de hauteur H et d'épaisseur e, de moment quadratique :

$$I_{Gz,2} = I_{Gz,1} - \frac{(B - 2e)(H - 2e)^3}{12}.$$

Les paramètres géométriques de l'éprouvette et du montage sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Distance entre les appuis L du montage de flexion	Largeur de la section de la poutre B	Hauteur de la section de la poutre H	Epaisseur de la section de la poutre creuse e	Longueur de la poutre L1
105mm	10mm	7.5mm	0.508mm	120mm

Tableau 1 : Paramètres géométriques des essais de flexion 3 points

1.3. Plan d'expériences

On se propose d'expérimenter l'influence des différents paramètres de réglage de la FORTUS 250 sur le résultat de la pièce prototypée. Voici les paramètres qui seront fixes :

- Epaisseur de couches : 0.254mm
- Matière ABS P430
- Buse 0.6 mm de diamètre
- Support 5 Base layers SMART
- Contour width 0.3556 mm
- Nombre de contours intérieurs : 1

« On nomme plan d'expériences la suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacun permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée pour obtenir des résultats validant un modèle avec une bonne économie (nombre d'essais le plus faible possible, par exemple).

Les autres paramètres à fixer sont les suivants (voir tutoriel de la machine Fortus) :

Fill Style		Contours		Additional settings	
Part Fill style	One contour / rasters	Contour width	0.3556	Part X shrink factor	1.007
Visible surface style	Normal	Number of contours	2	Part Y shrink factor	1.007
		Contour to air gap	0		
		Link Contour	décochée		
Raster Fill			Sparse Fill		
Part raster width	0.5080		Number of interior contours	1	
Contour to raster air gap	0		Part sparse Fill gap	2.032	
Raster to raster air gap	0		Part Sparse Solid Layers	2	

Tableau 2 : Paramètres de fabrication des éprouvettes de flexion 3 points fixés sur Insight

Le plan d'expérience repose sur trois paramètres, leurs niveaux sont modifiés suivant 6 configurations :

Eprouvette ID	S // 0°	S X 45°	S // 90°	LD // 0°	LD X 45°	LD // 90°
Part interior style	solid	solid	solid	low density	low density	low density
	normal	normal	normal			
Raster angle	0	45	90	0	45	90
Parallel	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Oui

Tableau 3 : Modalité et niveau du plan d'expérience des essais de flexion 3 points

1.4. MANIPULATIONS et EXPLOITATION DES RESULTATS

- Se répartir la préparation des éprouvettes entre les groupes de TP. Au moins une éprouvette sera préparée par groupe de TP.
 - Récupérer sur moodle le fichier Poutre_Flexion3points_2021.stl.
 - Lancer le logiciel Insight (raccourci sur le bureau) et à l'aide du dossier technique de la FORTUS, entrer les paramètres de votre expérience. Générer le fichier cmb.
- Se coordonner entre groupe pour lancer la fabrication des éprouvettes.
 - Lancer le logiciel Control Center (raccourci sur le bureau), importer votre cmb, et lancer la fabrication.
- Récupérer la feuille de calcul disponible sur moodle nommée 3_GM_PROFA_S2_Flexion3Points.ods. La feuille « données expérimentales » du tableur est la feuille à remplir lors de la réalisation des essais de flexion. La feuille « graphique » correspond aux courbes effort-flèches expérimentales et attendues d'après le calcul de théorie des poutres et des données fournies par stratasy. La feuille « Modèle théorie des poutres » est la mise en donnée du calcul de théorie des poutres. Analyser les résultats du modèle de théorie des poutres pour définir l'incrément d'effort entre 2 points expérimentaux à noter sur la feuille « données expérimentales » en fonction de la configuration testée (on cherchera à avoir au minimum 10 points pour représenter la courbe effort-flèche). Réaliser les essais de flexion 3 points avec l'aide de l'enseignant.
- Analyser le mode de ruine de l'éprouvette testée (rotule plastique, délamination...).

5. Partager vos résultats bruts d'essais la feuille framacalc au [lien suivant](https://lite.framacalc.org/9I32-tp_fab_add_prof) : https://lite.framacalc.org/9I32-tp_fab_add_prof.
6. Traiter les résultats de tous les essais en utilisant la feuille de calcul 3_GM_PROFA_S2_Flexion3Points.ods. En tirer la raideur, l'effort à rupture, le déplacement à rupture et le mode de ruine pour chacun.
7. Conclure sur l'influence de la stratégie de fabrication sur le comportement d'une poutre en flexion 3 points.

2. Etape 2 - étude de la longueur entre appui et de l'angle d'un déport en porte à faux sur la nécessité de support d'une pièce fabriquée par FDM – Réalisation sur machine Cetus++, Up mini ou Dood.

Contexte

En procédé FDM, la matière a besoin d'être supportée lorsque l'on dépose un filament dans le vide (Figures 4, 5 et 6).

Les logiciels de FAO gère la génération de ces supports de manière automatique à condition de paramétrer un angle entre l'horizontale et la surface à fabriquer en dessous duquel des supports seront nécessaires et éventuellement une surface minimale déportée. La règle métier communément admise place cet angle à 45°.

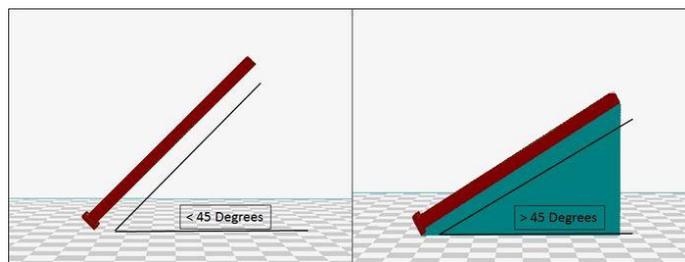


Figure 4 Règle métier de mise en place des supports



Figure 5 Supports en FDM



Figure 6 : Défauts liés à une absence de support

Les supports peuvent être fabriqués soit avec le même matériau que le matériau de la pièce dans le cas d'une machine monobuse (Dood, Cetus, Upmini) soit avec un matériau différent dans le cas d'une machine composée de deux buses (Fortus). Dans le premier cas, les supports doivent être enlevés mécaniquement après fabrication de la pièce ce qui peut être un travail fastidieux suivant la complexité de celle-ci. De même, la conception devra assurer l'accessibilité de ces supports. Dans le cas d'une machine bi-buse, les supports employés sont souvent solubles dans une solution appropriée. Les contraintes d'accessibilité sont donc beaucoup moins sévères et permettent donc une plus grande liberté de conception.

Cependant, quel que soit le type de support utilisé, la génération de ces supports nécessite un temps de fabrication non négligeable. Un des enjeux de la DFAM est de minimiser le nombre de support lorsque cela est possible.

Objectif :

Nous nous proposons à travers un plan d'expérience d'étudier de façon approfondie les limites des règles de supportage à partir de deux pièces test (Figure 7).

La première, nommée DEPORT permet de faire varier l'angle.

La seconde, nommée PONT permet de faire varier l'écartement entre 2 appuis.

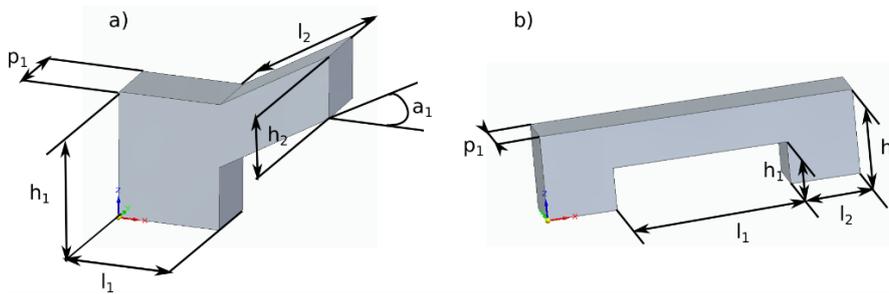


Figure 7 : pièces tests, a) DEPORT, b) PONT

DEPORT					
l_1	l_2	h_1	h_2	p_1	a_1
8	20	10	5	5	15° - 30° - 45°
PONT					
l_1	l_2	h_1	h_2	p_1	
5 - 10 - 20	8	5	10	5	

Tableau 4 : Paramètres géométriques des pièces test en mm

Matériel :

- Cetus - logiciel Upstudio - matériau PLA
- Up mini - logiciel Upstudio – matériau ABS
- Dood – logiciel Cura -matériau PLA
- CAO au format solidedge des pièces tests DEPORT.par et PONT.par

Marche à suivre :

- Télécharger les CAO sur moodle
- Vous réaliserez au moins une configuration de pont et une configuration de déport. Mettez vous d'accord avec les autres groupes pour répartir les configurations du plan d'expérience (matériau, déport a_1 , pont l_1)
- Modifier la CAO en fonction de la configuration choisie (voir tutoriel Solidedge)
- Réalisez chacune des configurations avec et sans support en utilisant un remplissage de 20% pour gagner du temps.
- Par une inspection visuelle, analyser le défaut de forme ainsi que le défaut de rugosité de la surface en porte à faux.

Exploitation des résultats

- A partir des résultats obtenus, conclure sur les règles de supportage des pièces en cours de fabrication.

3. Etape 3 - étude de la stratégie de l'orientation dans la zone de fabrication sur divers critères.

Matériel

- Logiciel Insight
- CAO équerre au format *.stl

Marche à suivre

- Télécharger l'équerre au format stl sur moodle
- Sous insight, choisir une orientation dans le repère de la machine et un paramétrage de la stratégie de fabrication de l'équerre (Figure 3), permettant
 - Cas 1 : de minimiser la matière consommée ;
 - Cas 2 : de minimiser le temps de fabrication ;
 - Cas 3 : de maximiser la résistance de l'équerre ;
 - Cas 4 : de garantir la géométrie et l'état de surface du cylindre à l'extrémité de l'équerre

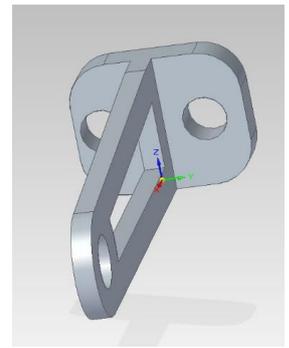


Figure 8 : Equerre

Exploitation des résultats

A partir des résultats obtenus, conclure sur les règles d'orientation de la pièce dans le volume de fabrication.

4. Etape 4 – Jeu fonctionnel d'une liaison pivot fabriquée par FDM.

Des gabarits ont été préalablement fabriqués sur les machines à disposition dans l'atelier. Le gabarit consiste en une embase avec trois alésages dont les diamètres évoluent de 20.1 à 20.4mm et un arbre de diamètre 20mm. Le but est de déterminer le jeu fonctionnel permettant d'obtenir une liaison pivot entre l'arbre et l'embase compte tenu des défauts du procédé.

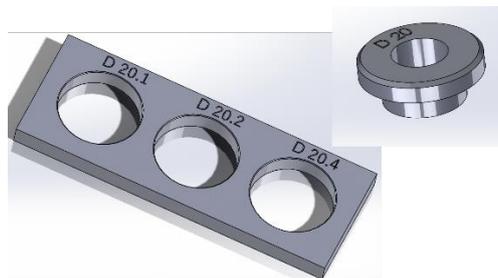


Figure 9 : Embase et arbre de la liaison pivot.

Matériel

- **Gabarit de centrage préalablement fabriqué avec un remplissage de 20% et 100%.**
 - Fortus 250mc : matériau ABS
 - UPmini : matériau ABS
 - Cetus : matériau PLA
 - Dood : matériau PLA

Marche à suivre

- Vérifier la fonctionnalité de la liaison pivot en fonction de l'ajustement arbre alésage (à mettre en relation avec résolution machine / diagramme PVT matériau).

Exploitation des résultats

A partir des résultats obtenus, conclure sur le jeu fonctionnel nécessaire pour garantir une liaison pivot en fonction du taux de remplissage et de la matière.

5. Etape 5 – Conception et optimisation d’une charnière réalisée avec le procédé FDM.

On se propose de réaliser la conception de la charnière illustrée en Figure 2. Elle sera fabriquée par le procédé de FDM. Une adaptation et une optimisation du design des pièces est nécessaire afin de profiter de toutes les opportunités offertes par ce procédé de fabrication. **« L’objectif est donc d’optimiser le design des pièces en accord avec les possibilités du procédé, intégrant le paramétrage du procédé (orientation, remplissage, support...).** »

5.1. Cahier des charges

La charnière illustrée en Figure 2 doit respecter les conditions suivantes :

- La charnière doit être fabriquée assemblée.
- Elle doit être fonctionnelle après post-traitement.
- La quantité de support doit être allégée le plus possible.
- Rotation entre les 2 pans de 150°.
- L’encombrement de la charnière en position 180° (Figure 2) doit être inférieure aux dimensions suivantes :
 - L1 = 50 mm
 - L2 = 40 mm
 - L3 = 10 mm
- Les surfaces fonctionnelles servant à l’assemblage vissée de chaque pan de la charnière sont représentées sur la Figure 2 et prennent les valeurs suivantes :
 - E1 : >12.5 mm
 - E2 : >10 mm
 - D1 : 4.2 mm
 - D2 : 8 mm

5.2. A l’aide des machines à support mécanique (Up, Dood, Cetus+).

- Réaliser un modèle 3D respectant le cahier des charges avec le modeleur de votre choix.
- Exporter votre modèle 3D au format STL.
- Fabriquer sur votre imprimante la charnière (après validation de l’enseignant).
- Enlever les supports et vérifier le bon fonctionnement de votre charnière.

5.3. A l’aide de la machine à support soluble (Fortus)

On considère que le chargement en service appliqué à la charnière est constitué d’un effort dans le plan du pan rouge de la charnière dont l’amplitude et la direction sont variables lors de l’utilisation en service de la charnière, le plan bleu étant considéré encasté (Figure 5) :

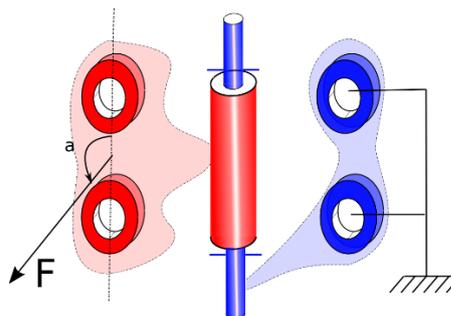


Figure 10 : Chargement de la charnière en service

- Discuter de votre conception précédente vis-à-vis de la tenue en service de la charnière.
- Proposer une nouvelle conception (modèle 3D, choix d'orientation, préparation de la fabrication sous insight) qui permet d'optimiser la tenue en service de la charnière compte tenu des libertés laissées par la génération de supports solubles.
- Discuter de vos choix sur le document réponse.