Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 1, Automne

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 9 unités et 4 travaux pratiques. Ce sont les vrais totaux, pas un programme plus long raccourci.

Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur une page de cours qu’un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.

> Ceci est le plan d’un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n’est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n’y participe.
>
> Son contenu suit les cours de dessin technique et de conception de première année comme MIT 2.007 et 2.00b, les cours d’ingénierie et d’infographie de Purdue, le ME 1770 de Georgia Tech et la séquence de dessin technique d’Embry-Riddle, avec des outils gratuits : l’offre Onshape Free et FreeCAD. Nous renvoyons partout à des ressources gratuites. Aucune de ces organisations ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque unité relie les choix de conception à la matière, à l’énergie et aux déchets, chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant publication, et quatre TP pratiques vous mènent d’un croquis à une pièce imprimée plus légère.
>
> Suivez-le dans l’ordre. Chaque unité comporte des objectifs, des notions clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices corrigés en détail, des erreurs fréquentes, des cartes mémoire et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

L’essentiel de la matière, de l’énergie et des déchets d’un produit est figé dès la planche à dessin. Les ingénieurs qui modélisent et dessinent bien peuvent retirer la matière qui ne travaille pas, choisir des pièces durables et réparables, et spécifier des tolérances pas plus serrées que nécessaire.

Chaque unité se termine par une courte section sourcée montrant comment ses idées aident les gens et la planète.

Pour les enseignants

Vous pouvez enseigner ce cours, ou laisser un élève le faire seul. Il est gratuit. Saving Planets ne donne ni note ni crédit scolaire.

- Cette page est le cours entier : 9 unités et 4 travaux pratiques (ENGR 120).
- Prévoyez 15 semaines, environ 6 à 9 heures par semaine, y compris les semaines de travaux pratiques.
- Suivez le calendrier de 15 semaines. Lisez l'unité, faites les exercices sur papier, puis ouvrez la réponse. La semaine d'un TP, faites le TP ou la version à la maison.
- Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur la page qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.
- Utilisez Imprimer cette page, ou téléchargez le guide d'étude PDF. La feuille de formules est vers la fin.
- Demandez : en quoi cette unité aide-t-elle les gens et la planète ? Chaque unité a un encadré vert avec un fait sourcé.
- Copiez le modèle de guide enseignant et écrivez le nom de votre classe, le temps dont vous disposez et les questions que vous poserez. Ouvrir le modèle de guide enseignant

Avant de commencer

Prérequis

- Géométrie et trigonométrie du lycée.
- Être à l'aise avec un ordinateur et une souris ; une souris à trois boutons aide pour la 3D.
- Aucun talent de dessin requis : le croquis est une compétence que vous allez pratiquer.

Comment étudier

- Faites un croquis à la main avant de modéliser. Cinq minutes sur papier font gagner une heure en CAO.
- Refaites vous-même chaque exemple résolu en CAO.
- Nommez vos esquisses et fonctions ; votre futur vous remerciera.
- Vérifiez chaque plan comme si vous deviez fabriquer la pièce à partir de lui seul.
- Faites chaque exercice avant d'ouvrir la réponse.
- Refaites les quiz quelques jours plus tard. La pratique espacée vaut mieux qu'une longue séance.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur avec un navigateur web (Onshape fonctionne dans le navigateur ; un compte gratuit est nécessaire) ou FreeCAD installé.
- Papier quadrillé ou isométrique, un crayon, une gomme et une règle.
- Un pied à coulisse (un modèle numérique bon marché suffit).

- Facultatif : accès à une imprimante 3D dans une bibliothèque, une école ou un makerspace.

Programme suggéré sur 15 semaines

Environ 6 à 9 heures par semaine : lecture, exercices et, les semaines de TP, le TP.

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
1	Croquis et visualisation	Croquis, types de traits, échelle	MIT 2.00b
2	Projection orthogonale et isométrique	Projection orthogonale ; premier et troisième dièdre	Conventions ASME Y14
3	Projection orthogonale et isométrique	Dessin isométrique ; vraie grandeur	Onshape Learning Center
4	Coupes et vues auxiliaires	Coupes et vues auxiliaires	FreeCAD TechDraw
5	Cotation et bases du GD&T	Règles de cotation ; références	ASME Y14.5
6	Cotation et bases du GD&T	GD&T : forme, orientation, position ; MMC	ASME Y14.5
7	Tolérances et ajustements	Limites, ajustements ISO, chaînes de cotes ; exercices de mi-parcours	ISO 286
8	Modélisation 3D paramétrique	Esquisses, contraintes, extrusion et révolution	Onshape / FreeCAD
9	Modélisation 3D paramétrique	Fonctions, variables, propriétés de masse ; TP A	Onshape Learning Center
10	Assemblages et mises en plan	Assemblages, liaisons, mécanismes	Wiki FreeCAD
11	Assemblages et mises en plan	Plans de détail et d’ensemble, nomenclature ; TP B	FreeCAD TechDraw
12	Impression 3D et conception pour la fabrication	Procédés de fabrication ; DFM/DFA	MIT 2.007
13	Impression 3D et conception pour la fabrication	Conception et estimations pour l’impression 3D ; TP C	NIST AM
14	Conception durable et allègement	Allègement et conception durable ; TP D	DOE; EPA

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
15	Révision	Révision et série d’exercices finale	Toutes les unités

Votre progression

Cochez les unités et les TP à mesure que vous les terminez, et faites les quiz. La progression et les scores sont enregistrés uniquement dans ce navigateur et ne nous sont jamais envoyés.

Unités

Croquis et visualisation

Le croquis à main levée comme outil d'ingénieur : lignes, cercles, proportions, et voir des objets 3D dans sa tête.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Tracer à main levée des droites, des cercles et des arcs bien proportionnés.
- Utiliser des boîtes de construction pour dessiner des objets en proportion.
- Lire et dessiner des objets simples en vues pictographiques obliques et isométriques.
- Expliquer le rôle du croquis dans le processus de conception.

Notions clés

- Les ingénieurs dessinent pour réfléchir, explorer vite de nombreuses idées et communiquer. Un croquis rapide coûte quelques minutes ; un mauvais modèle CAO peut coûter des heures.
- Placez d'abord l'encombrement général avec une boîte de construction légère, puis ajoutez les détails, puis repassez les traits définitifs.
- Dans un croquis, les proportions comptent plus que les dimensions exactes : estimez des rapports comme largeur : hauteur.
- La visualisation spatiale, la capacité de faire tourner et de couper mentalement des objets, est une compétence qui progresse avec la pratique.
- Les épaisseurs de trait ont un sens : traits forts pour le visible, traits fins interrompus pour le caché, traits fins mixtes (long-court) pour les axes.

Équations clés

$$\text{scale} = \frac{\text{drawing size}}{\text{real size}}$$

`scale= sizereal size`

Échelle du dessin

$$\frac{w}{h} = \frac{w'}{h'}$$

`w/h=(w')/(h')`

Conserver les proportions à l'échelle

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un bloc mesure 120 mm de large et 80 mm de haut. Vous dessinez sa largeur à 60 mm. Quelle hauteur doit avoir le croquis ?

1. Échelle = 60/120 = 0.5.
2. Hauteur = 80 × 0.5.

Réponse : 40 mm (un croquis à 1:2).

Exemple 1.2 Une pièce mesure 450 mm de long. Quelle échelle normalisée la fait tenir dans une zone de dessin de 250 mm : 1:1, 1:2 ou 1:5 ?

1. 1:1 → 450 mm (trop grand).
2. 1:2 → 225 mm (ça tient).

Réponse : 1:2, la plus grande échelle qui tient, pour que les détails restent lisibles.

Exemple 1.3 À l'échelle 2:1, quelle taille a un trou de 3 mm sur le dessin ?

1. 3 × 2.

Réponse : 6 mm sur le papier (la cote indique toujours la vraie valeur, 3 mm).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. À 1:5, quelle longueur a sur le papier une poutre de 1200 mm ?

   240 mm.

2. Un croquis est fait à 1:2. Un trait mesure 35 mm. Quelle est la longueur réelle ?

   70 mm.

3. Quel type de trait représente une arête cachée ?

   Un trait fin interrompu.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le croquis, c'est seulement pour les artistes.

En réalité : C’est une compétence d’ingénieur qui s’apprend et progresse vite avec la pratique.

Idée reçue : Les cotes d’un dessin à l’échelle indiquent la taille dessinée.

En réalité : Elles indiquent toujours la taille réelle.

Idée reçue : Commencer par les détails.

En réalité : Placer d’abord l’encombrement général, puis ajouter les détails.

Cartes mémoire

Traits de construction

Traits guides légers, effacés ou laissés pâles.

Trait visible

Fort, continu.

Trait caché

Fin, interrompu.

Trait d’axe

Fin, mixte long-court.

Échelle

Taille dessinée ÷ taille réelle.

Visualisation spatiale

Faire tourner et couper mentalement des objets 3D.

Quiz d’autocontrôle

1. Un trait d’axe se dessine…

fort continu

fin interrompu

fin mixte long-court

en zigzag

fin mixte long-court. Convention normalisée des traits.

2. À 1:2, une pièce de 100 mm est dessinée…

200 mm

50 mm

100 mm

25 mm

50 mm. À moitié de sa taille.

3. La première étape pour dessiner un objet est de…

foncer les arêtes

placer une boîte de construction légère

ajouter les cotes

l’ombrer

placer une boîte de construction légère. L’encombrement d’abord.

4. Les arêtes cachées utilisent…

des traits interrompus

des traits forts

aucun trait

des traits rouges

des traits interrompus. Des traits fins interrompus.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L’endroit le moins coûteux pour économiser de la matière, c’est le croquis. Des idées comme moins de pièces, des fixations standard et des assemblages réparables sont faciles à explorer sur papier et coûteuses à changer une fois l’outillage fabriqué.

L’approche de gestion durable des matériaux de l’EPA considère les matériaux sur tout leur cycle de vie, à commencer par la conception.

Sur Saving Planets : Introduction à l’ingénierie aérospatiale

Sources : EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics) · MIT OpenCourseWare 2.00b: Toy Product Design (https://ocw.mit.edu/courses/2-00b-toy-product-design-spring-2008/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 2.00b: Toy Product Design (https://ocw.mit.edu/courses/2-00b-toy-product-design-spring-2008/): Le cours de conception de produits du MIT, riche en croquis.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): Conception et fabrication au MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Projection orthogonale et isométrique

Le langage du dessin technique : projection multivue (orthogonale) et vues isométriques.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Créer des vues de face, de dessus et de droite correctement alignées.
- Connaître les symboles de projection du premier et du troisième dièdre.
- Dessiner des vues isométriques de pièces simples.
- Trouver la vraie grandeur et le raccourcissement.

Notions clés

- La projection orthogonale représente un objet avec des projetantes parallèles, perpendiculaires à chaque plan de vue. Trois vues (face, dessus, droite) décrivent généralement entièrement une pièce.
- La projection du troisième dièdre (États-Unis, ASME) place la vue de dessus au-dessus de la vue de face ; celle du premier dièdre (une grande partie de l’Europe et de l’Asie, ISO) la place en dessous. Un symbole dans le cartouche indique laquelle.
- Les vues restent alignées : la largeur est commune à la face et au dessus, la hauteur à la face et au côté, la profondeur au dessus et au côté.
- Une vue isométrique incline l’objet pour que ses trois axes soient à 120° les uns des autres. Les arêtes selon les axes sont raccourcies de √(2/3) ≈ 0.816 ; un dessin isométrique l’ignore et les trace en longueur réelle.
- Une ligne n’apparaît en vraie grandeur que dans une vue qui lui est parallèle.

Équations clés

$$k = \sqrt{2/3} \approx 0.816$$

`k=2/3≈0.816`

Facteur de raccourcissement isométrique

$$L_{true} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

`L_true=Δ x^2+Δ y^2+Δ z^2`

Vraie longueur d’une arête à partir des coordonnées

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 L'arête d'un cube mesure 100 mm. Quelle longueur a-t-elle en projection isométrique vraie, et dans un dessin isométrique ?

1. Projection : 100 × 0.816.
2. Dessin : longueur réelle par convention.

Réponse : 81.6 mm en projection ; 100 mm dans un dessin isométrique.

Exemple 2.2 Une arête va de (0, 0, 0) à (30, 40, 0) mm. Quelle est sa vraie longueur, et dans quelle vue apparaît-elle en vraie grandeur ?

1. $\sqrt{(30^2 + 40^2)} = 50$.

Réponse : 50 mm ; en vraie grandeur dans la vue selon z (elle est dans le plan x–y).

Exemple 2.3 Une arête va de (0, 0, 0) à (20, 20, 10). Trouvez sa vraie longueur.

1. $\sqrt{(400 + 400 + 100)} = \sqrt{900}$.

Réponse : 30 mm. Aucune vue principale ne la montre en vraie grandeur ; il faut une vue auxiliaire (unité 3).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. En projection du troisième dièdre, où place-t-on la vue de droite ?

   À droite de la vue de face.

2. Quelles deux vues partagent la profondeur ?

   Le dessus et le côté.

3. Trouvez la vraie longueur d'une arête de (0, 0, 0) à (12, 16, 0).

   20.

4. En projection isométrique vraie, quelle longueur paraît avoir une arête de 50 mm selon un axe ?

   ≈ 40.8 mm.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les dessins isométriques sont tracés à 81.6%.

En réalité : Les dessins isométriques utilisent la longueur réelle ; seule la projection isométrique est raccourcie.

Idée reçue : Premier et troisième dièdre ne sont que des styles différents.

En réalité : Ils inversent la position des vues ; mal lire le symbole donne une pièce symétrique.

Idée reçue : Plus de vues, c'est toujours mieux.

En réalité : Utilisez le moins de vues possible qui décrivent entièrement la pièce.

Cartes mémoire

Projection orthogonale

Projetantes parallèles et perpendiculaires ; plusieurs vues.

Troisième dièdre

Dessus au-dessus de la face (États-Unis).

Premier dièdre

Dessus sous la face (ISO dans une grande partie du monde).

Isométrique

Axes à 120° les uns des autres.

Raccourcissement

L'arête paraît plus courte que sa vraie longueur.

Vraie grandeur

Visible seulement dans une vue parallèle.

Quiz d'autocontrôle

1. En projection du troisième dièdre, la vue de dessus est...

sous la vue de face

au-dessus de la vue de face

à gauche de la vue de face

inutilisée

au-dessus de la vue de face. Convention ASME.

2. Les axes isométriques sont séparés de…

90°

120°

45°

60°

120°. Angles égaux.

3. Facteur de raccourcissement isométrique ≈

0.5

0.707

0.816

1

0.816. √(2/3).

4. Les vues de face et de dessus partagent…

la hauteur

la largeur

la profondeur

rien

la largeur. Elles sont alignées verticalement.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Des plans clairs évitent les rebuts. Un symbole de projection mal lu peut produire une pièce symétrique, et chaque pièce mise au rebut gaspille la matière et l'énergie qu'elle a consommées.

Les normes internationales de projection et de tolérancement permettent de fabriquer correctement un même plan partout, si bien que les pièces peuvent être produites localement et les pièces de rechange s'ajuster.

Sur Saving Planets : Analyse I

Sources : ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing) · EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): Cours de dessin et de modélisation.
- ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing): La norme de dessin américaine.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Coupes et vues auxiliaires

Ouvrir les pièces pour montrer leur intérieur, et tourner la vue pour voir les faces inclinées en vraie grandeur.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Dessiner des coupes complètes, des demi-coupes, des coupes brisées et des coupes partielles avec hachures.
- Appliquer les conventions de coupe (nervures, arbres et fixations non hachurés dans le sens de la longueur).
- Construire une vue auxiliaire primaire d’une surface inclinée.
- Trouver la vraie grandeur et la vraie longueur.

Notions clés

- Une vue en coupe imagine un plan de coupe qui tranche la pièce ; la moitié retirée laisse voir les formes intérieures en traits visibles au lieu de traits cachés déroutants.
- La matière coupée est hachurée de traits fins, généralement à 45°. Les nervures fines, arbres, boulons et goupilles coupés dans leur longueur ne sont, par convention, pas hachurés.
- Une ligne de plan de coupe avec flèches et lettres (A–A) indique où se trouve la coupe et dans quel sens on regarde.
- Une surface inclinée est raccourcie dans les vues principales. Une vue auxiliaire projette sur un plan qui lui est parallèle, montrant sa vraie grandeur.
- Longueur inclinée = √(horizontale² + verticale²) dans la vue où elle apparaît comme une arête.

Équations clés

$$L = \sqrt{a^2 + b^2}$$

L=^2+b^2

Vraie longueur d’une arête inclinée

$$A_{true} = \frac{A_{proj}}{\cos\theta}$$

A_true=_projθ

Aire vraie d’une face inclinée de θ par rapport au plan de vue

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Une face inclinée apparaît comme une arête dans la vue de face, montant de 30 mm sur 40 mm. La pièce a 25 mm de profondeur. Trouvez la vraie grandeur de la face.

1. Longueur de l'arête = $\sqrt{(30^2 + 40^2)} = 50$ mm.
2. Vraie grandeur = 50 × 25.

Réponse : 50 mm × 25 mm = 1,250 mm².

Exemple 3.2 Cette face est projetée dans la vue de dessus. Quelle aire semble-t-elle y avoir ?

1. La vue de dessus voit le parcours horizontal de 40 mm × 25 mm.

Réponse : 1000 mm², soit 1250 × cos θ avec cos θ = 40/50 = 0.8.

Exemple 3.3 Un tube a un diamètre extérieur de 40 mm et des parois de 3 mm. En coupe complète, quelle largeur a chaque bande hachurée ?

1. Épaisseur de paroi = 3 mm de chaque côté.
2. Diamètre intérieur = 40 − 6 = 34 mm.

Réponse : Deux bandes hachurées de 3 mm, avec un alésage vide de 34 mm entre elles.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Pourquoi ne hachure-t-on pas les nervures coupées dans leur longueur ?

   Les hachures feraient passer une nervure fine pour une masse pleine et représenteraient mal la pièce.

2. Une face monte de 5 mm sur 12 mm. Vraie longueur de son arête ?

   13 mm.

3. Une face de 60 mm de long est inclinée de sorte que cos θ = 0.6 dans la vue de dessus. Quelle longueur montre la vue de dessus ?

   36 mm.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les coupes montrent aussi les traits cachés.

En réalité : Normalement, les traits cachés sont omis dans les coupes.

Idée reçue : Les vues auxiliaires doivent montrer toute la pièce.

En réalité : Les vues auxiliaires partielles ne montrant que la forme inclinée sont courantes.

Idée reçue : Toute surface coupée est hachurée.

En réalité : Les nervures, arbres et fixations coupés dans leur longueur restent, par convention, non hachurés.

Cartes mémoire

Vue en coupe

Coupe imaginaire pour montrer l’intérieur.

Ligne de plan de coupe

Trait fort avec flèches et lettres.

Hachures

Traits fins sur la matière coupée.

Demi-coupe

Un quart retiré ; une moitié montre l’intérieur.

Vue auxiliaire

Vue parallèle à une face inclinée.

Vraie grandeur

Forme et aire non déformées.

Quiz d’autocontrôle

1. Les hachures montrent…

les arêtes cachées

la matière coupée

les filetages

l’état de surface

la matière coupée. La matière que traverse le plan de coupe.

2. Une vue auxiliaire est parallèle…

à la vue de face

à la surface inclinée

au sol

au cartouche

à la surface inclinée. Pour montrer la vraie grandeur.

3. Une demi-coupe montre…

la moitié de la pièce retirée

un quart retiré

seulement l’extérieur

une vue tournée

un quart retiré. L’intérieur et l’extérieur à la fois pour les pièces symétriques.

4. La vraie longueur d’une arête montant de 9 sur 12 est…

21

15

10.5

3

15. √(81 + 144).

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les coupes permettent aux concepteurs de vérifier les épaisseurs de paroi, et des parois plus minces là où les charges le permettent signifient moins de matière. C’est l’allègement dès la planche à dessin (unité 9).

Le DOE indique que remplacer des pièces en acier lourdes par des matériaux plus légers peut réduire le poids des composants de 10–60% à court terme.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing)

Ressources d’apprentissage gratuites

- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): Coupes dans FreeCAD TechDraw.
- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): Cours de mise en plan Onshape.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Cotation et bases du GD&T

Dire exactement quelle taille et quelle forme une pièce doit avoir : règles de cotation, références et tolérances géométriques.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Coter clairement des pièces selon les conventions ASME Y14.5.
- Choisir les références en fonction de la fonction.
- Lire les cadres de tolérance pour la planéité, la perpendicularité, la position et le profil.
- Calculer l’erreur de position et la tolérance bonus au MMC.

Notions clés

- Chaque élément est coté une seule fois, dans la vue qui le montre le mieux, sans cotes redondantes ou en chaîne qui cumulent les erreurs.
- Le tolérancement géométrique (GD&T), normalisé dans ASME Y14.5 (édition actuelle 2018), contrôle la forme, l’orientation, la position et le profil par rapport aux références, les surfaces de référence qui s’accouplent à l’assemblage.
- Un cadre de tolérance se lit : symbole | tolérance (avec Ø pour une zone cylindrique) | modificateur | références, p. ex. ⌖ Ø0.1 Ⓜ A B C.
- Erreur de position d’un trou = 2√(Δx² + Δy²) ; elle doit se trouver dans la zone de tolérance cylindrique.
- Au maximum de matière (MMC), un trou reçoit un bonus : à mesure qu’il s’éloigne du MMC (qu’il grandit), sa tolérance de position admise augmente d’autant.

Équations clés

$$\varnothing_{pos} = 2\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

```
_pos=2Δ x^2+Δ y^2
```

Erreur de position mesurée (diamètre)

$$t_{allowed} = t_{MMC} + (d_{actual} - d_{MMC})$$

```
t_allowed=t_MMC+(d_actual-d_MMC)
```

Tolérance bonus pour un trou au MMC

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Un trou doit être en (50, 30). Il mesure (50.03, 29.98). La tolérance de position est Ø0.1. Est-il conforme ?

1. $\Delta x = 0.03$, $\Delta y = 0.02$.
2. $\text{Ø} = 2\sqrt{(0.0009 + 0.0004)} = 0.072$.

Réponse : Ø0.072 ≤ Ø0.1 : conforme.

Exemple 4.2 Le trou fait Ø10.0–10.2 avec une position Ø0.1 au MMC. Il mesure Ø10.15. Quelle tolérance de position est admise ?

1. MMC d'un trou = plus petite dimension = 10.0.
2. Bonus = 10.15 − 10.0 = 0.15.
3. Admis = 0.1 + 0.15.

Réponse : Ø0.25.

Exemple 4.3 Trois cotes en chaîne de 20 ± 0.1 chacune positionnent un élément. Quelle est la variation du total dans le pire des cas ?

1. Les tolérances s'additionnent : 3 × 0.1.

Réponse : ± 0.3 mm. Coter chacune depuis une seule référence la limiterait à ± 0.1.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un trou est décalé de 0.04 en x et de 0.03 en y. Erreur de position ?

   Ø0.10.

2. Avec Ø0.1 au MMC, quelle tolérance de position est admise pour un trou Ø10.0–10.2 mesuré à Ø10.05 ?

   Ø0.15.

3. Que représente une référence ?

   Une référence théoriquement exacte, généralement là où la pièce s'accouple ou est bridée.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L’erreur de position est égale au décalage.

En réalité : La zone de tolérance est un diamètre, donc l’erreur = 2 × le décalage radial.

Idée reçue : Des tolérances plus serrées font toujours de meilleures pièces.

En réalité : Elles augmentent le coût et les rebuts ; ne tolérancez que ce que la fonction exige.

Idée reçue : Le MMC d’un trou est sa plus grande dimension.

En réalité : Le maximum de matière pour un trou, c’est le plus petit trou.

Cartes mémoire

GD&T

Tolérancement géométrique et dimensionnel.

Référence

Élément de référence exact.

Cadre de tolérance

Symbole | tolérance | modificateurs | références.

Position

Tolérance de localisation, généralement une zone en diamètre.

MMC

Condition du maximum de matière.

Tolérance bonus

Tolérance supplémentaire quand un élément s’éloigne du MMC.

Quiz d’autocontrôle

1. ASME Y14.5 couvre…

le soudage

la cotation et le tolérancement

les symboles électriques

les matériaux

la cotation et le tolérancement. La norme GD&T.

2. Un trou décalé de 0.03 et 0.04 a une erreur de position de…

Ø0.05

Ø0.07

Ø0.10

Ø0.14

Ø0.10. 2 × 0.05.

3. Le MMC d’un arbre est…

la plus petite dimension

la plus grande dimension

la cote nominale

zéro

la plus grande dimension. Le plus de matière.

4. Les cotes en chaîne…

réduisent l’erreur

cumulent les tolérances

sont obligatoires

suppriment les références

cumulent les tolérances. Les erreurs s’additionnent le long de la chaîne.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Bien tolérancer est un outil de réduction des déchets. Le GD&T fonctionnel et la tolérance bonus au MMC acceptent des pièces qui s’assembleront et fonctionneront, au lieu de les mettre au rebut

pour des valeurs arbitrairement serrées.

Le NIST travaille sur la définition fondée sur le modèle, qui place les tolérances directement dans le modèle 3D pour qu'elles soient lues correctement par les machines et les contrôleurs, ce qui réduit les erreurs et les reprises.

Sur Saving Planets : Introduction à l'ingénierie aérospatiale

Sources : ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing) · NIST: Model-based enterprise and PMI testing (https://www.nist.gov/el/systems-integration-division-73400/mbe-pmi-validation-and-conformance-testing)

Ressources d'apprentissage gratuites

- ASME Y14.5: Dimensioning and Tolerancing (https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing): La norme.
- NIST: Model-based enterprise and PMI testing (https://www.nist.gov/el/systems-integration-division-73400/mbe-pmi-validation-and-conformance-testing): Les tolérances dans les modèles 3D.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Tolérances et ajustements

De combien la taille des pièces peut varier tout en s’assemblant : limites, ajustements ISO et chaînes de cotes.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer les limites, le jeu et le serrage.
- Lire des ajustements ISO à alésage normal comme H7/g6 et H7/p6.
- Faire des chaînes de cotes au pire des cas et en somme quadratique (RSS).
- Choisir un ajustement selon la fonction.

Notions clés

- Les limites sont les dimensions maximale et minimale admises. Tolérance = limite supérieure − limite inférieure.
- Les ajustements avec jeu laissent toujours un espace ; les ajustements serrés se chevauchent toujours (emmanchés à force) ; les ajustements incertains peuvent faire l’un ou l’autre.
- L’ISO 286 code les ajustements par lettre/chiffre de l’alésage sur lettre/chiffre de l’arbre. Les alésages H commencent à la cote nominale ; le chiffre est la qualité IT. Pour les dimensions de 18–30 mm, IT7 = 21 µm et IT6 = 13 µm.
- La chaîne au pire des cas additionne toutes les tolérances ; la RSS suppose des variations aléatoires indépendantes : √(Σtᵢ²), plus petite et plus réaliste quand les pièces sont nombreuses.

Équations clés

$$c_{\max} = H_{\max} - s_{\min}, \quad c_{\min} = H_{\min} - s_{\max}$$

`c_=H_-s_, c_=H_-s_`

Limites du jeu

$$T_{wc} = \sum t_i$$

`T_wc= t_i`

Chaîne au pire des cas

$$T_{RSS} = \sqrt{\sum t_i^2}$$

`T_RSS= t_i^2`

Chaîne en somme quadratique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Un ajustement Ø25 H7/g6 : alésage 25.000–25.021, arbre 24.980–24.993. Trouvez la plage de jeu.

1. c_min = 25.000 − 24.993 = 0.007.
2. c_max = 25.021 − 24.980 = 0.041.

Réponse : Jeu de 0.007–0.041 mm : un ajustement glissant précis.

Exemple 5.2 Un ajustement Ø25 H7/p6 : alésage 25.000–25.021, arbre 25.022–25.035. Trouvez l'ajustement.

1. Plus petit chevauchement = 25.022 − 25.021 = 0.001.
2. Plus grand = 25.035 − 25.000 = 0.035.

Réponse : Serrage de 0.001–0.035 mm : un ajustement à la presse.

Exemple 5.3 Des pièces de 20 ± 0.10, 30 ± 0.05 et 10 ± 0.05 mm s'empilent. Trouvez la tolérance au pire des cas et en RSS.

1. Pire des cas : 0.10 + 0.05 + 0.05 = 0.20.
2. RSS: √(0.01 + 0.0025 + 0.0025) = 0.122.

Réponse : 60 ± 0.20 mm au pire des cas ; 60 ± 0.12 mm en RSS.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un alésage fait 12.000–12.018 et un arbre 11.984–11.995. Plage de jeu ?

   0.005–0.034 mm.

2. Quelle est la tolérance de l'alésage H7 ci-dessus ?

   0.021 mm = 21 µm.

3. Quatre pièces à ± 0.05 chacune : pire des cas et RSS ?

   ± 0.20 et ± 0.10.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La RSS est toujours sûre.

En réalité : Elle suppose des variations indépendantes et centrées ; pour les ajustements critiques pour la sécurité, utilisez le pire des cas.

Idée reçue : Les ajustements serrés ne demandent aucun calcul.

En réalité : Trop de serrage peut fissurer les pièces ; calculez la plage.

Idée reçue : Le chiffre de tolérance est en millimètres.

En réalité : Les qualités IT correspondent à des valeurs en micromètres qui dépendent de la dimension.

Cartes mémoire

Limites

Dimensions maximale et minimale admises.

Ajustement avec jeu

Toujours un espace.

Ajustement serré

Toujours un chevauchement.

Ajustement incertain

Espace ou chevauchement.

Chaîne au pire des cas

Σt_i.

Chaîne RSS

$\sqrt{\Sigma t_i^2}$.

Quiz d’autocontrôle

1. H7/g6 est un…

ajustement serré à la presse

ajustement avec jeu

ajustement incertain

filetage

ajustement avec jeu. Les arbres g sont en dessous de l’alésage H.

2. La RSS pour ±0.3 et ±0.4 vaut…

±0.7

±0.5

±0.35

±0.1

±0.5. √(0.09 + 0.16).

3. IT7 pour les dimensions de 18–30 mm vaut…

7 µm

13 µm

21 µm

0.7 mm

21 µm. Tableau ISO 286.

4. La limite inférieure d’un alésage H est…

au-dessus du nominal

exactement le nominal

en dessous du nominal

du hasard

exactement le nominal. Système de l’alésage normal.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

De bons ajustements rendent les produits réparables : les ajustements ISO normalisés permettent de remplacer roulements, goupilles et bagues par des pièces du commerce des années plus tard, ce qui garde une machine en service plutôt qu'en décharge.

Choisir la RSS quand c'est approprié permet des tolérances individuelles plus larges, donc des procédés moins chers et moins de rebuts pour la même qualité d'assemblage.

Sur Saving Planets : Analyse II

Sources : ISO 286-1: ISO code system for tolerances and fits (https://www.iso.org/standard/45975.html) · EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- ISO 286-1: ISO code system for tolerances and fits (https://www.iso.org/standard/45975.html): Le système d'ajustements ISO.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): Les ajustements en conception de machines.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Modélisation 3D paramétrique

Construire des modèles volumiques à partir d’esquisses contraintes et de fonctions dans Onshape ou FreeCAD, et les rendre faciles à modifier.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Créer des esquisses 2D entièrement contraintes.
- Utiliser les fonctions extrusion, révolution, congé, chanfrein, perçage, coque et répétition.
- Piloter les modèles par des variables et des équations (intention de conception).
- Calculer les propriétés de masse et les utiliser en conception.

Notions clés

- Un modèle paramétrique est une recette : des esquisses plus des fonctions dans un arbre de construction. Changez une cote et le modèle se reconstruit.
- Une esquisse est entièrement contrainte quand les contraintes géométriques (parallèle, tangent, coïncident) et les cotes fixent chaque degré de liberté. Chaque point 2D libre a 2 degrés de liberté.
- Intention de conception : cotez selon le fonctionnement de la pièce. Si des trous doivent rester centrés, contraignez-les au milieu, pas à une arête.
- Les variables (Onshape) et les feuilles de calcul ou expressions (FreeCAD) permettent à un seul nombre de piloter de nombreuses fonctions.
- La CAO calcule le volume, la masse, le centre de masse et les moments d’inertie à partir de la masse volumique du matériau.

Équations clés

$$m = \rho V$$

`m=ρ V`

Masse à partir du volume

$$\mathrm{DOF}_{sketch} = 2n_{pts} - \sum \text{constraints}$$

`DOF_sketch=2n_pts-`

Degrés de liberté d’une esquisse (points seulement)

$$V_{rev} = 2\pi \bar{r} A$$

`V_rev=2π r A`

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Une plaque d'aluminium mesure 100 × 60 × 5 mm avec quatre trous débouchants Ø6. Trouvez sa masse (ρ = 2.70 g/cm³).

1. V = 100 × 60 × 5 − 4 × π × 3² × 5 = 30,000 − 565.5 = 29,434.5 mm³.
2. m = 29.43 cm³ × 2.70.

Réponse : ≈ 79.5 g.

Exemple 6.2 Un rectangle tracé avec l'outil rectangle a 4 sommets (8 DDL) et arrive avec 2 contraintes horizontales et 2 verticales. Combien de cotes ou contraintes de plus le contraignent entièrement ?

1. Il reste 8 − 4 = 4 DDL : largeur, hauteur, et position en x et en y.
2. Ajoutez la largeur et la hauteur, puis rendez un sommet coïncident avec l'origine (en retire 2).

Réponse : 4 de plus : deux cotes plus deux pour la position (p. ex. un sommet coïncident avec l'origine).

Exemple 6.3 Un anneau est obtenu par révolution d'un rectangle de 10 × 4 mm dont le centre de gravité est à 25 mm de l'axe. Trouvez son volume.

1. A = 40 mm².
2. V = 2π × 25 × 40.

Réponse : ≈ 6,283 mm³ (6.28 cm³).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un bloc d'acier de 50 × 50 × 20 mm (ρ = 7.85 g/cm³). Masse ?

   50 cm³ × 7.85 ≈ 392.5 g.

2. Pourquoi contraindre entièrement les esquisses ?

Pour que les modifications se reconstruisent de façon prévisible ; les esquisses sous-contraintes se déplacent quand on les modifie.

3. Un cube de PLA de 20 mm de côté, plein (ρ = 1.24 g/cm³). Masse ?

   8 cm³ × 1.24 ≈ 9.9 g.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un modèle qui a l'air juste est juste.

En réalité : Vérifiez les esquisses sous-contraintes et les références fragiles ; elles cassent lors des modifications.

Idée reçue : Cotez à partir de n'importe quelle arête pratique.

En réalité : Cotez à partir des références fonctionnelles pour traduire l'intention.

Idée reçue : Les propriétés de masse sont exactes.

En réalité : Elles ne valent que la masse volumique et le modèle que vous saisissez.

Cartes mémoire

Modèle paramétrique

Fonctions pilotées par des cotes modifiables.

Contrainte

Relation géométrique, p. ex. tangence.

Intention de conception

Le modèle se comporte comme la fonction l'exige.

Fonction

Extrusion, révolution, congé, perçage, répétition…

Arbre de construction

Liste ordonnée des fonctions.

Propriétés de masse

Volume, masse, centre de masse, inertie.

Quiz d'autocontrôle

1. Une esquisse entièrement contrainte a…

aucune cote

zéro DDL restant

seulement des contraintes

seulement des cotes

zéro DDL restant. Chaque DDL est fixé.

2. L’arbre de construction enregistre…

les e-mails

la séquence des fonctions

seulement les matériaux

les paramètres de rendu

la séquence des fonctions. La recette paramétrique.

3. La révolution d’une aire A au rayon du centre de gravité r̄ donne un volume…

πr̄A

2πr̄A

r̄A

2πA

2πr̄A. Théorème de Pappus.

4. Onshape fonctionne…

seulement sous Linux

dans un navigateur web

seulement hors ligne

seulement sur téléphone

dans un navigateur web. CAO native dans le cloud.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les modèles paramétriques rendent peu coûteux l'essai de versions plus légères : changez une variable d'épaisseur de paroi et toute la pièce se met à jour, avec sa nouvelle masse. L'allègement passe ainsi de l'approximation à une étude rapide (TP D).

L'offre gratuite d'Onshape et FreeCAD mettent la modélisation professionnelle à la portée de tous, si bien que des conceptions open source de pièces de réparation et de technologies appropriées peuvent être partagées et améliorées.

Sur Saving Planets : Introduction à l'ingénierie aérospatiale

Sources : Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free) · FreeCAD (gratuit, open source) (https://www.freecad.org/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): Cours de modélisation gratuits à votre rythme.
- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): Les bases de FreeCAD Part Design.
- Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free): Inscrivez-vous à l'offre gratuite.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Assemblages et mises en plan

Assembler des pièces avec des liaisons, vérifier les mouvements et les interférences, et produire des plans à partir desquels on peut fabriquer.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Assembler des pièces avec des liaisons (fixe, pivot, glissière) et compter les degrés de liberté.
- Vérifier les interférences et les jeux.
- Produire des plans de détail et d'ensemble avec cartouche, nomenclature et repères.
- Utiliser l'équation de Grübler pour les mécanismes plans.

Notions clés

- Un corps rigide libre a 6 degrés de liberté (3 translations, 3 rotations). Une liaison pivot en laisse 1 ; une glissière en laisse 1 ; une liaison fixe en laisse 0.
- L'assemblage ascendant insère des pièces finies ; la conception descendante dessine les pièces dans le contexte de l'assemblage.
- La mobilité d'un mécanisme plan est M = 3(n − 1) − 2j_1 − j_2 (Grübler), avec n solides y compris le bâti, j_1 liaisons complètes et j_2 demi-liaisons.
- Les plans découlent du modèle : vues, coupes, cotes et notes, un cartouche (pièce, matériau, échelle, symbole de projection, unités, tolérances) et, pour les assemblages, une nomenclature (BOM) avec repères.
- Les vérifications d'interférence détectent les pièces qui se chevauchent avant toute fabrication.

Équations clés

$$M = 3(n-1) - 2j_1 - j_2$$

`M=3(n-1)-2j_1-j_2`

Équation de Grübler (plane)

$$\mathrm{DOF}_{3D} = 6 - \text{removed}$$

`DOF_3D=6-removed`

DDL restants d'une pièce liée

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Trouvez la mobilité d'un quadrilatère articulé (4 solides y compris le bâti, 4 pivots).

1. $M = 3(4 - 1) - 2(4) = 9 - 8$.

Réponse : $M = 1$: une seule entrée le pilote.

Exemple 7.2 Un système bielle-manivelle : bâti, manivelle, bielle, coulisseau ; 3 pivots et 1 glissière.

1. $n = 4$, $j_1 = 4$ (pivots et glissière sont des liaisons complètes).
2. $M = 9 - 8$.

Réponse : $M = 1$, comme dans un moteur.

Exemple 7.3 Une nomenclature liste 4 × vis M5 à 1.2 g, 1 plaque à 79.5 g et 2 équerres à 15.0 g. Masse totale de l'assemblage ?

1. 4.8 + 79.5 + 30.0.

Réponse : 114.3 g.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Mobilité de 5 solides, 5 pivots ?

   $M = 12 - 10 = 2$.

2. Mobilité de 3 solides, 3 pivots ?

   $M = 6 - 6 = 0$: une structure rigide (un triangle).

3. Que doit indiquer tout cartouche ?

   Nom/numéro de pièce, matériau, échelle, unités, méthode de projection, tolérances générales, auteur et indice de révision.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Plus de liaisons, c'est plus sûr.

En réalité : Les liaisons redondantes surcontraignent et peuvent empêcher la résolution ou masquer des erreurs.

Idée reçue : Les plans d'ensemble ont besoin de toutes les cotes.

En réalité : Les plans de détail portent les cotes des pièces ; les plans d'ensemble montrent comment les pièces s'assemblent.

Idée reçue : Si le modèle s'assemble, les vraies pièces aussi.

En réalité : Seulement si les tolérances sont vérifiées (unité 5).

Cartes mémoire

Liaison

Relation qui positionne les pièces.

Pivot

Articulation pivot ; 1 DDL en rotation.

Grübler

$M = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2$.

BOM

Nomenclature.

Repère

Repère numéroté reliant une pièce à la nomenclature.

Cartouche

Identité du plan, échelle, unités et tolérances.

Quiz d'autocontrôle

1. Un corps rigide libre en 3D a…

3 DOF

6 DOF

1 DOF

12 DOF

6 DOF. 3 translations, 3 rotations.

2. Un quadrilatère articulé a une mobilité…

0

1

2

3

1. Grübler.

3. Une nomenclature liste…

les tolérances

les pièces et les quantités

seulement les couleurs

les liaisons

les pièces et les quantités. Nomenclature.

4. Une liaison pivot laisse…

0 DOF

1 DOF

2 DOF

6 DOF

1 DOF. Une rotation.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Un plan d'ensemble clair et une nomenclature sont un manuel de réparation. Les conceptions qui utilisent des fixations standard et se démontent sont plus faciles à réparer, reconditionner et recycler, une idée centrale de la gestion durable des matériaux.

Compter les pièces de la nomenclature est aussi un contrôle de conception pour l'assemblage : moins de pièces signifie généralement moins de matière, moins d'énergie et moins de défaillances.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics) · FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started)

Ressources d’apprentissage gratuites

- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): Assemblages FreeCAD et TechDraw.
- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): Assemblages et mises en plan Onshape.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): Les mécanismes dans MIT 2.007.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Impression 3D et conception pour la fabrication

Comment les pièces sont réellement fabriquées, et comment les concevoir pour qu'elles soient faciles, peu coûteuses et peu gaspilleuses à produire, impression 3D comprise.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Décrire les procédés additifs (impression 3D), soustractifs (usinage) et de mise en forme.
- Concevoir pour l'impression FDM : porte-à-faux, supports, épaisseur de paroi, orientation.
- Estimer la masse, la longueur de filament et la durée d'une impression.
- Appliquer les règles de conception pour la fabrication et l'assemblage (DFM/DFA).

Notions clés

- La fabrication additive construit les pièces couche par couche ; le NIST travaille sur la métrologie et les normes pour rendre fiables les pièces AM. L'usinage enlève de la matière ; le moulage et la fonderie lui donnent forme.
- Impression par dépôt de filament fondu (FDM) : les porte-à-faux de plus de 45° environ par rapport à la verticale demandent généralement des supports ; orientez les pièces pour que les charges ne séparent pas les couches, car l'adhésion entre couches est la direction faible.
- Le remplissage (souvent 10–20%) et quelques parois périphériques allègent les impressions ; les impressions pleines gaspillent matière et temps.
- Longueur de filament par gramme = 1/(ρπr²). Pour du PLA de 1.75 mm (ρ = 1.24 g/cm³), cela fait environ 33.5 cm par gramme.
- DFM/DFA : moins de pièces, formes et fixations standard, rayons généreux, éléments autocentreurs, et pas de tolérances inutilement serrées.

Équations clés

$$\ell = \frac{m}{\rho \, \pi r^2}$$

```
=(m)/(ρ π r^2)
```

Longueur de filament pour une impression de masse m

$$t \approx \frac{V}{w \, h \, v}$$

Durée d'impression à partir du volume, de la largeur de ligne w, de la hauteur de couche h et de la vitesse v

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Combien de filament PLA de 1.75 mm consomme une impression de 10 g ?

1. Section $\pi(0.0875\ \text{cm})^2 = 0.02405\ \text{cm}^2$.
2. Longueur par gramme = $1/(1.24 \times 0.02405) = 33.5$ cm.
3. $\times$ 10.

Réponse : $\approx$ 3.35 m.

Exemple 8.2 Estimez la durée d'impression de 10 g de PLA avec une ligne de 0.4 mm et des couches de 0.2 mm à 50 mm/s.

1. $V = 10/1.24 = 8.065\ \text{cm}^3 = 8{,}065\ \text{mm}^3$.
2. Débit = $0.4 \times 0.2 \times 50 = 4\ \text{mm}^3/\text{s}$.
3. $t = 8{,}065/4 = 2{,}016$ s.

Réponse : $\approx$ 34 minutes d'extrusion (les impressions réelles durent plus à cause des déplacements à vide).

Exemple 8.3 Un cube de PLA plein de 20 mm pèse 9.9 g. Avec environ 15% de remplissage et des parois, il pèse environ 3.5 g. Quelle fraction de matière est économisée ?

1. $(9.9 - 3.5)/9.9$.

Réponse : $\approx$ 65% de plastique en moins (estimation d'exemple ; votre trancheur donne le chiffre réel).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Combien de grammes pèse 1 m de PLA de 1.75 mm ?

   $100/33.5 \approx 2.98$ g.

2. Pourquoi imprimer une équerre de sorte que les couches suivent le chemin des efforts ?

   L'adhésion entre couches est plus faible que les lignes extrudées.

3. Citez deux règles DFA.

   Réduire le nombre de pièces ; utiliser des éléments autocentreurs et des fixations standard.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L'impression 3D est toujours plus écologique.

En réalité : Elle peut économiser de la matière, mais l'énergie, les impressions ratées et les déchets non recyclés comptent ; comparez pièce par pièce.

Idée reçue : Les impressions sont aussi résistantes dans toutes les directions.

En réalité : Les pièces FDM sont plus faibles entre les couches.

Idée reçue : Un remplissage de 100% est le plus résistant, donc toujours le meilleur.

En réalité : Les parois reprennent l'essentiel de la flexion ; plus de remplissage ajoute masse et temps pour peu de bénéfice.

Cartes mémoire

Fabrication additive

Construction couche par couche.

FDM

Impression 3D par dépôt de filament fondu.

Remplissage

Pourcentage de treillis interne.

Support

Structure temporaire sous les porte-à-faux.

DFM

Conception pour la fabrication.

DFA

Conception pour l'assemblage.

Quiz d'autocontrôle

1. Les pièces FDM sont plus faibles...

le long du filament

entre les couches

en surface

nulle part

entre les couches. Adhésion entre couches.

2. Les porte-à-faux au-delà d'environ 45° demandent généralement…

des supports

plus de remplissage

une vitesse plus élevée

de la peinture

des supports. Rien sur quoi imprimer.

3. Filament par gramme pour du PLA de 1.75 mm ≈

3.4 cm

33.5 cm

3.35 m

335 m

33.5 cm. $1/(\rho\pi r^2)$.

4. Une règle DFA clé est de…

ajouter des pièces

réduire le nombre de pièces

resserrer toutes les tolérances

utiliser des vis sur mesure

réduire le nombre de pièces. Moins de pièces, moins d'étapes.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les plastiques forment un flux de déchets important : l'EPA indique que la production de plastiques aux États-Unis était de 35.7 millions de tonnes en 2018, soit 12.2% des déchets municipaux solides, et que seulement 8.7% ont été recyclés. Concevoir des impressions avec peu de remplissage, peu de supports et moins d'échecs réduit directement ces déchets.

La fabrication additive peut placer la matière uniquement là où les charges l'exigent, ce qui permet des pièces plus légères ; les travaux du NIST visent à rendre ces pièces assez fiables pour des usages exigeants.

Sur Saving Planets : Introduction à l'ingénierie aérospatiale

Sources : EPA: Plastics, material-specific data (https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data) · NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing): Normes et métrologie pour l'impression 3D.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): Procédés de fabrication.
- EPA: Plastics, material-specific data (https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data): Données sur les plastiques.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Conception durable et allègement

Utiliser vos compétences en CAO pour rendre les pièces plus légères, plus durables et plus faciles à réparer et à recycler, et estimer le gain.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Comparer des sections selon la masse et la rigidité (moment quadratique).
- Estimer les économies de carburant et de CO_2 dues à l'allègement des véhicules.
- Appliquer les principes de conception pour la réparation, le démontage et le recyclage.
- Choisir les matériaux en tenant compte de tout leur cycle de vie.

Notions clés

- La rigidité en flexion dépend de EI. Éloigner la matière de l'axe neutre (tubes, poutres en I) augmente I avec moins de masse.
- Le DOE indique qu'une réduction de 10% du poids d'un véhicule peut améliorer l'économie de carburant de 6–8%, et que les matériaux légers peuvent réduire le poids des composants de 10–60% à court terme.
- L'EPA indique que chaque gallon d'essence brûlé produit environ 8887 g de CO_2 (environ 2.35 kg par litre).
- Conception pour le démontage : des vis plutôt que de la colle, des matériaux uniques si possible, et des plastiques marqués.
- Le plus léger n'est pas toujours le plus écologique : comparez les matériaux sur le cycle de vie, y compris l'énergie de production et la recyclabilité.

Équations clés

$$I_{rect} = \frac{bh^3}{12}, \quad I_{tube} = \frac{B^4 - b^4}{12}$$

```
I_rect=(bh^3)/(12), I_tube=(B^4-b^4)/(12)
```

Moment quadratique : barre pleine et tube carré

$$\Delta \mathrm{CO_2} = \Delta \mathrm{fuel} \times 2.35\ \mathrm{kg/L}$$

```
ΔCO_2=Δfuel×2.35\ kg/L
```

CO_2 d'essence économisé

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Comparez une barre carrée pleine de 20 × 20 mm avec un tube carré de 25 × 25 mm à parois de 2 mm : aire (masse) et I.

1. Barre : $A = 400\ mm^2$, $I = 20^4/12 = 13333\ mm^4$.
2. Tube : $A = 625 - 441 = 184\ mm^2$, $I = (25^4 - 21^4)/12 = 16345\ mm^4$.

Réponse : Le tube utilise 54% de matière en moins et est 23% plus rigide en flexion.

Exemple 9.2 Une voiture de 1500 kg est allégée de 10% (150 kg). Elle consomme 8 L/100 km et parcourt 15000 km par an. Avec les 6–8% du DOE, estimez le carburant économisé par an.

1. Carburant annuel = 15000/100 × 8 = 1200 L.
2. 6%: 72 L; 8%: 96 L.

Réponse : Environ 72–96 L par an.

Exemple 9.3 Convertissez cela en CO_2 avec les 8887 g par gallon de l'EPA.

1. 8.887 kg / 3.785 L = 2.35 kg/L.
2. 72 × 2.35 = 169; 96 × 2.35 = 225.

Réponse : ≈ 170–225 kg de CO_2 par voiture et par an (une estimation simplifiée).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. I d'une barre pleine de 10 × 30 mm en flexion autour de son axe de 10 mm de large (h = 30) ?

   $10 \times 30^3/12 = 22{,}500\ mm^4$.

2. La même barre posée à plat (h = 10, b = 30) ?

   $30 \times 10^3/12 = 2500\ mm^4$: 9 fois moins rigide.

3. Combien de litres d'essence produisent 1 tonne de CO_2 ?

   1,000/2.35 ≈ 426 L.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Plus léger signifie toujours plus écologique.

En réalité : Certains matériaux légers demandent beaucoup plus d'énergie à produire ; jugez sur le cycle de vie.

Idée reçue : La rigidité ne dépend que de la quantité de matière.

En réalité : L'emplacement de la matière (I) compte davantage.

Idée reçue : La colle rend les produits meilleurs.

En réalité : Elle empêche souvent la réparation et le recyclage.

Cartes mémoire

Moment quadratique

I ; rigidité géométrique en flexion.

Allègement

Retirer de la masse sans perdre de fonction.

Règle du DOE

10% plus léger → 6–8% de meilleure économie de carburant.

CO_2 de l'essence

≈ 8887 g/gal ≈ 2.35 kg/L.

Conception pour le démontage

Facile à démonter pour la réparation et le recyclage.

Cycle de vie

Matériaux, fabrication, utilisation et fin de vie.

Quiz d'autocontrôle

1. La rigidité en flexion dépend…

de E seulement

EI

de la masse seulement

de la couleur

EI. Module × moment quadratique.

2. DOE : un véhicule 10% plus léger → l'économie de carburant s'améliore de…

1–2%

6–8%

20–30%

50%

6–8%. Chiffre du DOE.

3. Un gallon d'essence brûlé produit environ…

889 g CO_2

8,887 g CO_2

88 kg CO_2

2 g CO_2

8,887 g CO_2. Chiffre de l'EPA.

4. Un choix de conception pour le démontage est…

de la colle partout

des vis et des matériaux uniques

des plastiques stratifiés mélangés

des capots soudés

des vis et des matériaux uniques. Réparation et recyclage plus faciles.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'allègement est l'un des leviers climatiques les plus directs dont dispose un utilisateur de CAO. Le DOE indique qu'un véhicule 10% plus léger peut gagner 6–8% en économie de carburant, et l'EPA estime chaque gallon d'essence à environ 8887 g de CO_2.

Concevoir pour la réparation et le recyclage maintient les matériaux en usage ; l'EPA décrit la gestion durable des matériaux comme une approche systématique pour utiliser et réutiliser les matériaux plus efficacement sur tout leur cycle de vie.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · EPA: Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle (https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle)

Ressources d'apprentissage gratuites

- U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks): Données sur les matériaux légers.
- EPA: Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle (https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle): Chiffres de CO_2 des véhicules.
- EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics): Pensée en cycle de vie.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

Ces exercices sont dans chaque unité. Faites-les sur papier, puis ouvrez la réponse.

1. Croquis et visualisation
   3 exercices
2. Projection orthogonale et isométrique
   4 exercices
3. Coupes et vues auxiliaires
   3 exercices
4. Cotation et bases du GD&T
   3 exercices
5. Tolérances et ajustements
   3 exercices
6. Modélisation 3D paramétrique
   3 exercices
7. Assemblages et mises en plan
   3 exercices
8. Impression 3D et conception pour la fabrication
   3 exercices
9. Conception durable et allègement
   3 exercices

Travaux pratiques

Quatre TP mènent une pièce du papier au plastique : une équerre paramétrique dans Onshape, un assemblage et un plan dans FreeCAD, une estimation et une impression 3D, et une étude d'allègement.

Les données d'exemple sont signalées comme telles. Vos propres mesures seront différentes, et expliquer pourquoi fait partie du TP.

Référence de sécurité : NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing)

TP A : une équerre paramétrique dans Onshape

SEMAINE 9

Objectif : Modéliser une équerre en L pilotée par des variables, puis changer une variable et regarder le modèle et sa masse se mettre à jour.

$$m = \rho V$$

`m=ρ V`

Masse à partir du volume

Mode opératoire

1. Créez un compte Onshape gratuit (offre Free) ou utilisez FreeCAD.
2. Définissez les variables : plaque 100 × 60 mm, épaisseur t = 5 mm, trou Ø6, retrait des trous 10 mm.
3. Esquissez, extrudez, ajoutez quatre trous par répétition, et choisissez l'aluminium comme matériau (2.70 g/cm³).
4. Notez la masse. Passez t à 4 mm et notez-la de nouveau.

Tableau de données

Épaisseur t (mm)	Volume (mm³)	Masse (g)
5	29,434	79.5
4	23,548	63.6
3	17,661	47.7

Valeurs calculées pour la plaque plane avec quatre trous Ø6 ; votre équerre complète sera différente.

Exemple de calcul

1. V = (100 × 60 − 4π × 3²) × t = 5,886.9 × t mm³.
2. Masse = V × 2.70 g/cm³ : 79.5 g à 5 mm. Chaque millimètre d'épaisseur coûte 15.9 g.

> **Sécurité**
>
> - Aucune, au-delà d'un usage normal de l'ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Fonctionne dans un navigateur web.

Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free) · Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/)

Lien avec la planète : Les études paramétriques d’épaisseur sont le moyen le plus rapide de trouver la pièce la plus légère qui fonctionne encore. U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP B : assemblage et mise en plan dans FreeCAD

SEMAINE 11

Objectif : Assembler un quadrilatère articulé, vérifier son mouvement et sa mobilité, et produire un plan avec cartouche et nomenclature.

$$M = 3(n-1) - 2j_1$$

`M=3(n-1)-2j_1`

Équation de Grübler

Mode opératoire

1. Modélisez un bâti (100 mm), une manivelle (40 mm), une bielle (120 mm) et un balancier (80 mm), chacun de 10 mm de large avec des trous Ø6 aux extrémités.
2. Assemblez avec des liaisons pivot et entraînez la manivelle.
3. Vérifiez si la manivelle fait un tour complet (Grashof : plus court + plus long ≤ somme des deux autres).
4. Faites un plan : vues, cotes, cartouche, nomenclature et repères.

Tableau de données

Vérification	Valeur
Mobilité M	1
Plus court + plus long (mm)	160
Les deux autres (mm)	180
La manivelle peut-elle faire un tour complet ?	Yes

Valeurs calculées pour les longueurs données.

Exemple de calcul

1. M = 3(4 − 1) − 2 × 4 = 1.
2. Grashof : 40 + 120 = 160 ≤ 100 + 80 = 180, et le solide le plus court est la manivelle, donc elle peut faire un tour complet.

> **Sécurité**
>
> - Aucune, au-delà d'un usage normal de l'ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- FreeCAD est gratuit pour Windows, Mac et Linux.

FreeCAD (gratuit, open source) (https://www.freecad.org/) · FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started)

Lien avec la planète : Des plans avec des nomenclatures claires rendent les produits plus faciles à réparer et à entretenir. EPA: Sustainable materials management basics (https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-basics)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP C : imprimez-le (ou estimez-le)

SEMAINE 13

Objectif : Trancher un cube de calibration de 20 mm avec différents taux de remplissage, comparer masse et durée, en imprimer un si possible, et le mesurer.

$$\ell = \frac{m}{\rho \pi r^2}$$

```
=(m)/(ρπ r^2)
```

Longueur de filament

Mode opératoire

1. Exportez votre cube en STL et ouvrez-le dans un trancheur gratuit.
2. Notez la masse et la durée données par le trancheur à 100%, 20% et 10% de remplissage.
3. Imprimez un cube si vous en avez la possibilité ; mesurez-le au pied à coulisse en x, y et z.
4. Calculez l'erreur dimensionnelle et la longueur de filament.

Tableau de données

Axe mesuré	Nominal (mm)	Mesuré (mm)
x	20.00	20.12
y	20.00	20.08
z	20.00	19.90

Mesures d'exemple pour s'entraîner, pas une vraie impression.

Exemple de calcul

1. Erreurs : +0.12, +0.08 et −0.10 mm, soit +0.6%, +0.4% et −0.5%.
2. Un cube plein pèse 9.9 g ≈ 3.32 m de filament de 1.75 mm ; les valeurs du trancheur à faible remplissage seront bien plus basses.

> **Sécurité**
>
> - Les buses et plateaux d'imprimante sont chauds (souvent 200 °C+ et 60 °C) : n'y touchez pas pendant ni juste après l'impression.
> - Imprimez dans une pièce aérée et suivez les règles de l'imprimante et du makerspace.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Une imprimante de bibliothèque ou de makerspace convient ; sinon, faites seulement la partie trancheur.

NIST: Additive manufacturing (https://www.nist.gov/additive-manufacturing)

Lien avec la planète : Un faible remplissage et une bonne orientation réduisent la consommation de plastique et les impressions ratées. EPA: Plastics, material-specific data (https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP D : étude d’allègement

SEMAINE 14

Objectif : Comparer des sections de poutre selon la masse et la rigidité en CAO et à la main, puis estimer ce que vaut l’allègement pour une voiture.

$$I_{tube} = \frac{B^4 - b^4}{12}$$

```
I_tube=(B^4-b^4)/(12)
```

Moment quadratique d’un tube carré

Mode opératoire

1. Modélisez des poutres de 500 mm : une barre pleine de 20 × 20 mm et des tubes de 25 × 25 mm à parois de 2 mm et 1.5 mm.
2. Relevez dans la CAO la masse de chaque poutre (acier, 7.85 g/cm³) et les propriétés de section.
3. Calculez I à la main et comparez.
4. Utilisez la règle des 6–8% du DOE et le chiffre de CO_2 de l’EPA pour estimer les économies annuelles pour la voiture de l’unité 9.

Tableau de données

Section	Aire (mm²)	I (mm⁴)	Masse, acier 500 mm (g)
Pleine 20 × 20	400	13,333	1,570
Tube 25 × 25 × 2	184	16,345	722
Tube 25 × 25 × 1.5	141	13,031	553

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. Le tube de 1.5 mm atteint environ 2% près la rigidité de la barre pleine (13031 contre 13333 mm⁴) pour 35% de la masse.
2. Masse = aire × 500 mm × 7.85 g/cm³ : 400 mm² → 1570 g.

> **Sécurité**
>
> - Aucune, au-delà d’un usage normal de l’ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Un tableur et une CAO suffisent.

U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks)

Lien avec la planète : DOE : un véhicule 10% plus léger peut gagner 6–8% en économie de carburant. U.S. DOE: Lightweight materials for cars and trucks (https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks) · EPA: Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle (https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

Séries d’entraînement aux examens

Chronométrez-vous : environ 10 minutes par problème. Comparez ensuite avec les solutions complètes.

Série d’exercices de mi-parcours (unités 1–5)

1. À 1:5, quelle longueur a sur le papier une poutre de 1200 mm ?

    1. 1,200/5.

    Réponse : 240 mm.

2. Trouvez la vraie longueur d’une arête de (0, 0, 0) à (20, 20, 10).

    1. √(400 + 400 + 100).

    Réponse : 30 mm.

3. Un trou est décalé de 0.04 en x et de 0.03 en y. Erreur de position ?

    1. 2√(0.0016 + 0.0009).

    Réponse : Ø0.10.

4. Alésage 25.000–25.021, arbre 24.980–24.993. Plage de jeu ?

    1. 25.000 − 24.993; 25.021 − 24.980.

    Réponse : 0.007–0.041 mm.

5. Chaîne 20 ± 0.10, 30 ± 0.05, 10 ± 0.05 : pire des cas et RSS ?

    1. 0.20; √0.015.

    Réponse : ± 0.20 et ± 0.12 mm.

Série d’entraînement finale (toutes les unités)

1. Masse d’une plaque d’aluminium de 100 × 60 × 5 mm avec quatre trous Ø6 ?

    1. V = 29,434.5 mm³; × 2.70 g/cm³.

    Réponse : ≈ 79.5 g.

2. Mobilité d’un mécanisme plan à 5 solides et 5 pivots ?

    1. 3(4) − 10.

    Réponse : 2.

3. Longueur de filament pour une impression PLA de 10 g (1.75 mm) ?

    1. 10 × 33.5 cm.

    Réponse : ≈ 3.35 m.

4. Comparez I d’une barre pleine de 20 × 20 et d’un tube de 25 × 25 × 2.

    1. 13,333 vs 16,345 mm⁴.

    Réponse : Le tube est 23% plus rigide avec 54% de matière en moins.

5. Une voiture économise 72 L d’essence par an. CO_2 économisé ?

    1. 72 × 2.35.

    Réponse : ≈ 169 kg.

Fiche de formules

$$\text{scale} = \text{drawing}/\text{real}$$

$$k_{iso} = \sqrt{2/3} \approx 0.816$$

$$L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$$A_{true} = A_{proj} / \cos\theta$$

$$\varnothing_{pos} = 2\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$t_{allowed} = t_{MMC} + |d - d_{MMC}|$$

$$c_{\min} = H_{\min} - s_{\max},\ c_{\max} = H_{\max} - s_{\min}$$

$$T_{wc} = \sum t_i,\ T_{RSS} = \sqrt{\sum t_i^2}$$

$$m = \rho V$$

$$V = 2\pi \bar{r} A$$

$$M = 3(n-1) - 2j_1 - j_2$$

$$\ell = m/(\rho \pi r^2)$$

$$t \approx V/(whv)$$

$$I = bh^3/12$$

$$I_{tube} = (B^4 - b^4)/12$$

$$\mathrm{CO_2} \approx 2.35\ \mathrm{kg\ per\ L\ gasoline}$$

Constantes

Constante	Valeur
Raccourcissement isométrique	√(2/3) ≈ 0.816
Angles des axes isométriques	À 120° les uns des autres (30° par rapport à l'horizontale)
Rapport des formats ISO série A	√2 ≈ 1.414
Feuille A4	210 × 297 mm
Masse volumique du PLA (typique)	1.24 g/cm³
Diamètre de filament courant	1.75 mm
Tolérance IT7, dimensions de 18–30 mm	21 µm
Tolérance IT6, dimensions de 18–30 mm	13 µm

Source : ISO 286-1: ISO code system for tolerances and fits (https://www.iso.org/standard/45975.html)

Outils et références gratuits

Utilisez ces outils gratuits en parallèle du cours.

- Onshape Free plan (https://www.onshape.com/en/products/free): CAO professionnelle dans le navigateur, gratuite pour les projets publics non commerciaux.
- Onshape Learning Center (https://learn.onshape.com/): Cours Onshape gratuits à votre rythme.
- FreeCAD (gratuit, open source) (https://www.freecad.org/): CAO paramétrique gratuite et open source pour Windows, Mac et Linux.
- FreeCAD wiki: Getting started (https://wiki.freecad.org/Getting_started): Le guide officiel de FreeCAD pour débutants.
- MIT OpenCourseWare 2.007: Design and Manufacturing I (https://ocw.mit.edu/courses/2-007-design-and-manufacturing-i-spring-2009/): Le cours de conception et de fabrication du MIT.

Glossaire

Vue auxiliaire

Vue projetée parallèlement à une surface inclinée.

Nomenclature
Liste des pièces et des quantités d'un assemblage.

Ajustement avec jeu
Ajustement qui laisse toujours un jeu.

Référence
Élément de référence exact pour la mesure.

Conception pour l'assemblage
Concevoir des pièces faciles à assembler.

Intention de conception
Comment un modèle doit se comporter lorsqu'on le modifie.

Cadre de tolérance
Cadre de tolérance GD&T.

GD&T
Tolérancement géométrique et dimensionnel.

Remplissage
Pourcentage de remplissage interne d'une impression 3D.

Ajustement serré
Ajustement avec chevauchement garanti.

Isométrique
Vue pictographique avec des axes à 120° les uns des autres.

Allègement
Réduire la masse tout en conservant la fonction.

MMC
Condition du maximum de matière.

Projection orthogonale
Dessin multivue avec des projetantes perpendiculaires.

Modèle paramétrique
Modèle CAO piloté par des cotes et des fonctions modifiables.

Chaîne de cotes RSS
Somme statistique des tolérances $\sqrt{\Sigma t^2}$.

Moment quadratique
Propriété géométrique I qui détermine la rigidité en flexion.

Vue en coupe
Vue d'une coupe imaginaire.

Projection du troisième dièdre
Convention américaine : vue de dessus au-dessus de la face.

Cartouche
Zone d’informations du plan.

Grille d’autoévaluation

Aucune note ni aucun crédit ne sont attribués. Utilisez cette grille pour juger honnêtement où vous en êtes dans chaque unité.

Niveau	À quoi cela ressemble
4 · Maîtrise	Les plans et modèles sont complets, sans ambiguïté et traduisent l’intention de conception ; les choix sont justifiés par des chiffres.
3 · Compétent	Travail correct avec quelques omissions.
2 · En progression	Suit les tutoriels mais les plans sont incomplets ou les modèles cassent lors des modifications.
1 · Débutant	Vues mal alignées ou cotes manquantes ; revoir l’unité.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	20%
Travaux pratiques	30%
Série d’entraînement de mi-parcours	20%
Série d’entraînement finale	30%

Visez le niveau 3 ou mieux dans chaque unité avant de passer au cours suivant.

Cours associés

- Introduction à l’ingénierie aérospatiale AERO 101
- Introduction à la programmation ENGR 130
- Chimie générale I + TP CHEM 110 + CHEM 110L
- Tous les cours