

MATH0001 : COMMUNICATION GRAPHIQUE

Université de Liège - Faculté des sciences appliquées

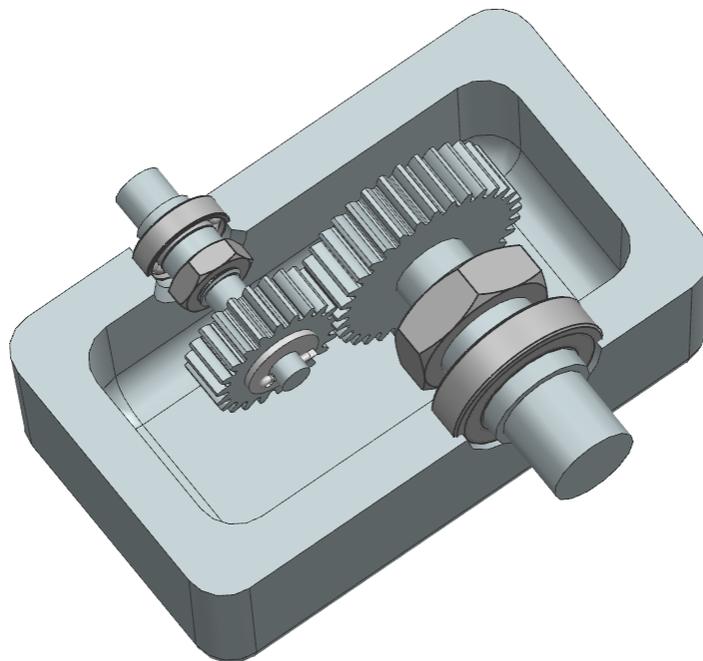
Professeur : Éric Béchet

Assistants : Alex Boly

Benjamin Moreno

Séance 10 : Éléments normalisés

Boîte de vitesses



Objectifs

Voici les points principaux abordés lors de la séance. En fin de séance, vérifiez que vous connaissez ou que vous savez faire les éléments de cette liste.

- Importer des pièces depuis la bibliothèque (librairie) et les utiliser.
- Utilisation de relations de couplage en simulation.

1. Introduction

Dans beaucoup de domaines de l'ingénierie, il existe des pièces dont la géométrie et le fonctionnement sont régis par des normes. La raison principale de l'existence de ces normes est l'homogénéisation de ces pièces souvent employées. Cela a de nombreux avantages comme :

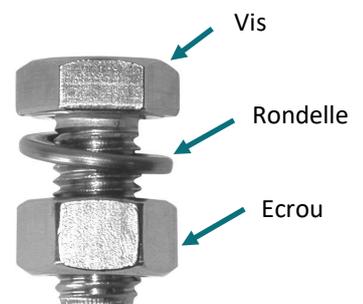
- La simplification de la conception : les normes agissent comme des catalogues de références pour choisir rapidement des pièces.
- La réduction des coûts de conception : les pièces normalisées étant souvent employées, elles sont produites en grande série, ce qui les rend faciles à trouver et ce, à faible coût.

Etant souvent employées, il existe des librairies de modèles CAO permettant de rapidement créer un assemblage contenant des pièces normalisées sans devoir consulter les normes.

Pour cette séance, nous allons réaliser un réducteur de vitesses à partir d'engrenages. Le principe de ce genre de mécanisme est de réduire la vitesse entre l'entrée et la sortie (qui sont des arbres tournants). Il s'agit du même principe qu'une boîte de vitesses (comme celle des voitures), mais il n'y a ici qu'une seule "vitesse".

1.1. Pièces normalisées

En ingénierie mécanique (principalement mais les autres domaines ont aussi leurs normes), il existe de nombreuses pièces normalisées : vis, écrou, rondelle, goujon, clavette, goupille, etc. sont toutes pièces couramment utilisées pour les mécanismes et les machines (exemple du vocabulaire ci-contre¹). Les engrenages, aussi, font l'objet de normes, mais principalement pour définir le profil des dents (ces parties transmettant la force par contact entre les engrenages).



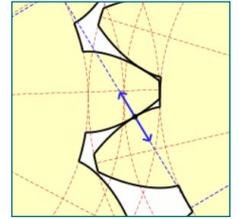
Il faut cependant faire attention qu'il n'existe pas une seule norme par type de pièce. Il faut en réalité comprendre cela dans l'autre sens : il se peut que plusieurs normes aient défini un type de produit de manières différentes. Par exemple, il existe des vis suivant la norme NF (norme française), la norme DIN (norme allemande) ou encore ANSI (norme américaine). Il existe également la norme ISO (norme internationale) mais, étant arrivée plus tard dans l'histoire que les autres, elle a été construite en se basant sur les autres (il existe donc des pièces similaires entre les normes). En Belgique, nous nous basons le plus souvent sur les normes ISO.

1.2. Introduction aux engrenages

Le principe des engrenages est très simple : la puissance mécanique est transmise d'un engrenage à un autre par la force de contact agissant entre les dents des deux engrenages. C'est pourquoi les engrenages

1– Pour le reste, nous laissons cela au cours "MECA0444-1 Conception mécanique".

sont utilisés depuis longtemps pour transmettre des mouvements de rotation (moulins, etc.). Dû à leur principe de fonctionnement, les engrenages peuvent également servir à faire varier la vitesse de rotation. En effet, nous pouvons démontrer mathématiquement que le ratio des diamètres des engrenages est égal au ratio des vitesses de rotation de ceux-ci. Cela se comprend facilement : si un petit engrenage doit faire tourner un autre de deux fois sa taille, le petit engrenage (appelé pignon) aura fait deux tours lorsque le gros (appelée roue) n'en aura fait qu'un.



Il faut cependant avouer que la construction des dents de l'engrenage est très spécifique et cela ne rentre donc pas dans le cadre du cours de communication graphique (il existe cependant le cours de "MECA0444 -1 Conception mécanique" qui aborde notamment ce sujet en profondeur). Nous nous contenterons ici d'utiliser un modèle paramétrique.

Nous devons toutefois noter que le nombre de dents d'un engrenage est un paramètre indépendant de son diamètre. Cependant, pour une paire d'engrenages (A et B), il existe une relation entre ces deux paramètres : le ratio du nombre de dents des deux engrenages est égal au ratio de leurs diamètres, ce qui correspond également au ratio de leurs vitesses de rotation (ω). Durant ce tutoriel, nous devons donc porter attention aux paramètres suivants : d (diamètre de l'engrenage), Z (le nombre de dents) et b (la longueur de l'engrenage).

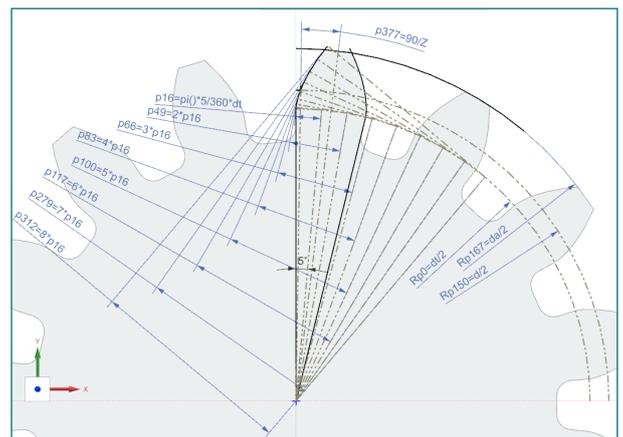
$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{d_A}{d_B} = \frac{Z_A}{Z_B}$$

2. Réaliser des engrenages

Dans les fichiers mis à votre disposition se trouve le fichier "engrenage_cylind.prt" qui est un modèle paramétrique d'un engrenage. En regardant le deuxième sketch, qui sert à dessiner le profil des dents, vous remarquerez que la construction est particulière puisque ces dents sont dites à développantes de cercle^a.

Vous ne devez rien éditer dans la pièce puisque, comme nous l'avons vu en séance 5 lorsque nous avons créé un modèle paramétrique, un modèle paramétrique est conçu pour être modifiable par ses paramètres principaux via le module *Expressions* dans l'onglet *Tools*.

Ouvrez *Expressions*, vous y remarquerez qu'il n'y a que trois paramètres de design pour l'engrenage (tous les autres étant verrouillés car ils en dépendent mathématiquement, ne servent qu'à la construction ou ne nous concernent pas pour cet exercice) :



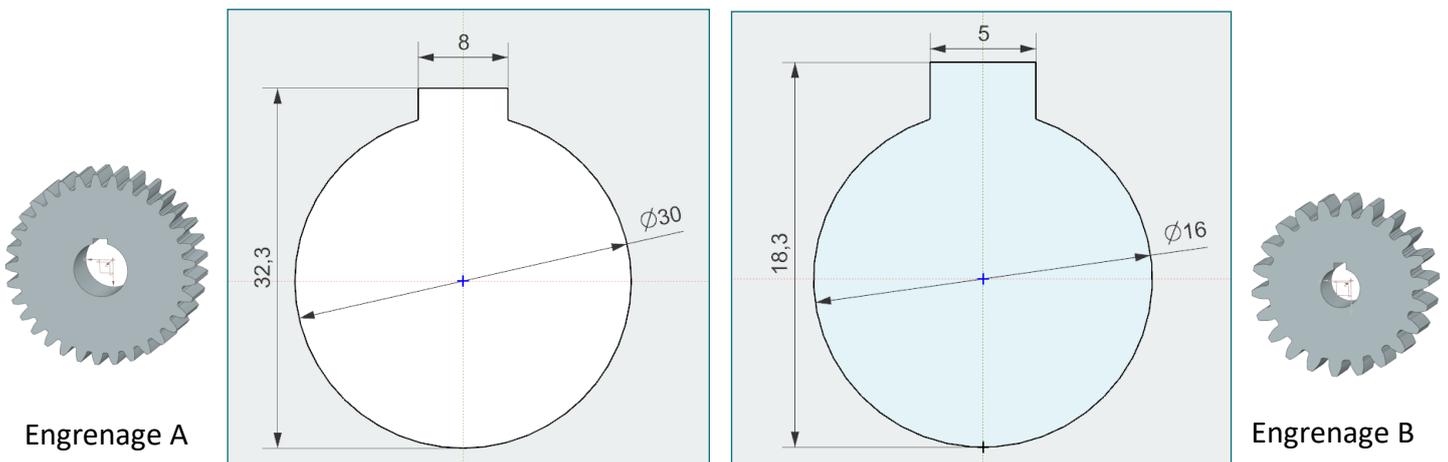
- b : la largeur de l'engrenage
- Z : le nombre de dent
- d : le diamètre de l'engrenage

a - Pour votre information : <https://mathcurve.com/courbes2d/developpantedecercle/developpantedecercle.shtml>

Notre boîte de vitesses a deux engrenages, nous allons donc utiliser ce modèle pour générer deux engrenages. Pour chacun d'eux, après avoir modifié les paramètres et mis à jour le modèle (avec les données du tableau ci-dessous), enregistrez-les sous le nom proposé via *Save As* dans le menu *File/Save/Save As* afin que vous ayez bien les deux engrenages différents pour l'assemblage. Comme vous pouvez le constater avec ces données, le ratio du réducteur de vitesses est de 2/3.

Nom	engrenage_A	engrenage_B
b (mm)	30	25
d (mm)	100	66
Z (-)	33	22

Une fois que les deux engrenages sont créés, nous devons les modifier afin qu'ils puissent être montés dans la boîte de vitesses. Pour ce faire, réalisez un *Extrude Subtract* avec les géométries présentées ci-dessous pour les engrenages correspondants (centré à chaque fois sur l'origine). A noter que ces dimensions sont issues de normes également.



Nos engrenages sont maintenant terminés. Nous allons maintenant passer à l'assemblage du réducteur, mais nous le ferons par sous-assemblage pour avoir plus facile. Notez que pour utiliser des sous-assemblages, il faut qu'ils soient considérés comme tenant d'un seul corps rigide, c'est-à-dire qu'il ne peut pas y avoir de mouvements possibles dans chacun des sous-assemblages.

Dans le dossier de cette séance figure une partie des pièces utilisables pour l'assemblage, les pièces manquantes seront, elles, obtenues via les bibliothèques NX.

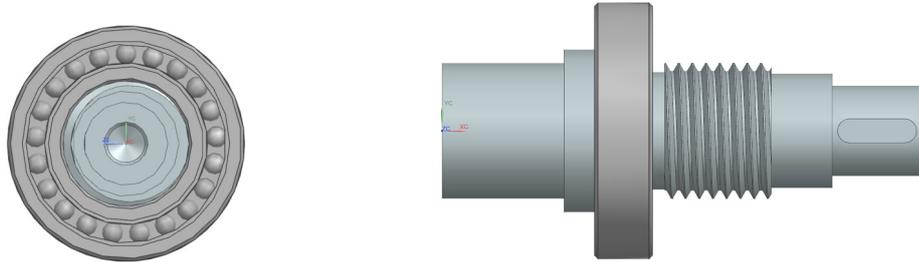
3. Assemblage de l'arbre A

L'arbre A disponible dans le fichier "arbre_A.prt" est l'arbre sur lequel se trouve l'engrenage A. Nous allons commencer l'assemblage de notre boîte de vitesses par l'assemblage de cet arbre, puis nous passerons au deuxième avant de tout rassembler dans l'assemblage final.

Créez un fichier assemblage portant le nom "assemblage_A" et importez-y l'arbre correspondant en indiquant pour "Assembly Location" l'option "Absolute - Displayed Part" ce qui placera votre pièce sur l'origine de l'assemblage. Ici, il ne faut pas fixer la pièce puisqu'elle est supposée tourner : cela n'a pas d'importance puisque toutes les autres pièces seront définies par rapport à l'arbre et il sera "fixé" dans

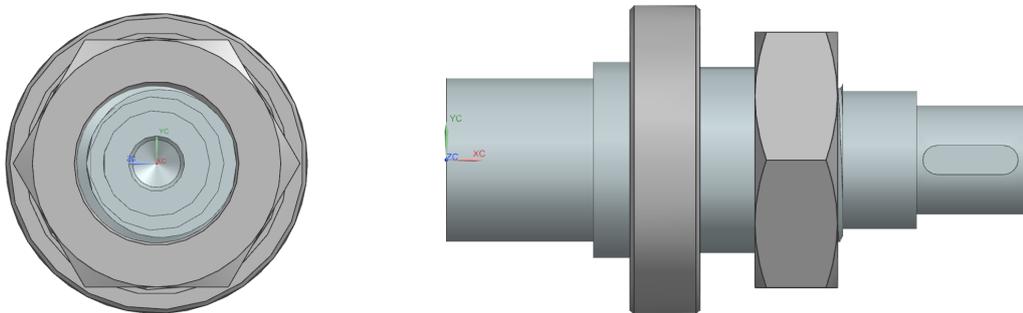
l'assemblage final (c'est le roulement qui assure la fixation de l'arbre par rapport au carter).

Le premier élément à placer est le roulement à bille ("roulementBille_A.prt") qui est placé contre un épaulement, conformément au schéma ci-dessous. Les roulements à bille sont des éléments normalisés permettant à l'arbre d'avoir un support tout en permettant à celui-ci de tourner sur son axe. Pour placer ce roulement, assurez-vous qu'il soit aligné sur l'axe de l'arbre et qu'il touche l'épaulement.



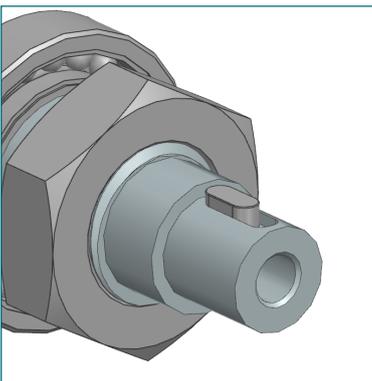
Note—Afin de limiter sa consommation (et donc d'éviter de ralentir l'ordinateur), NX charge les pièces sous forme simplifiée, comme vous le voyez pour le roulement à bille (approximation de courbes par des droites, etc.). Si vous souhaitez le voir avec le rendu d'origine, faites clic droit sur la pièce puis *Show Exact* dans la liste déroulante (mais attention aux capacités de votre ordinateur).

Placez maintenant "entretoise_A.prt" contre le roulement à bille de la même manière que le roulement avant et ensuite placez l'écrou "écrou_A.prt" contre l'entretoise. Normalement, l'écrou coïncidera avec le filet sur lequel il serait monté en réalité. Pour votre information, ce type de montage permet grâce à l'écrou, de caler le roulement à bille sur l'arbre (en "vissant" l'écrou sur l'arbre, l'entretoise sert la bague intérieure du roulement contre l'épaulement). A ce stade, vous devriez avoir le montage présenté ci-dessous.

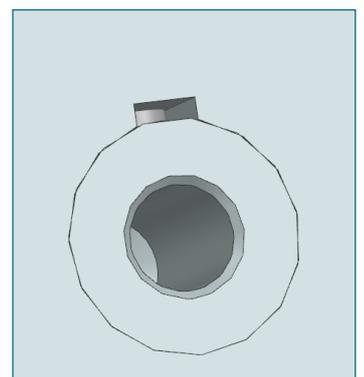


Il nous reste maintenant à placer l'engrenage avec le système adéquat de fixation.

Le premier élément à placer est la clavette ("clavette_A.prt"), cette pièce normalisée permettra de transmettre la rotation entre l'arbre et l'engrenage et doit donc se placer dans la rainure prévue dans l'arbre. Pour la placer correctement dans la rainure, veillez à ce que les surfaces de la rainure et de la clavette soient en contact et que sa position soit déterminée le long de la rainure (par exemple une distance entre deux arêtes ou l'utilisation de *fit*).



Placez maintenant l'engrenage en assurant que la rainure prévue dans celui-ci pour la clavette reste bien parallèle à la clavette et qu'il soit contre l'épaulement prévu à cet effet.

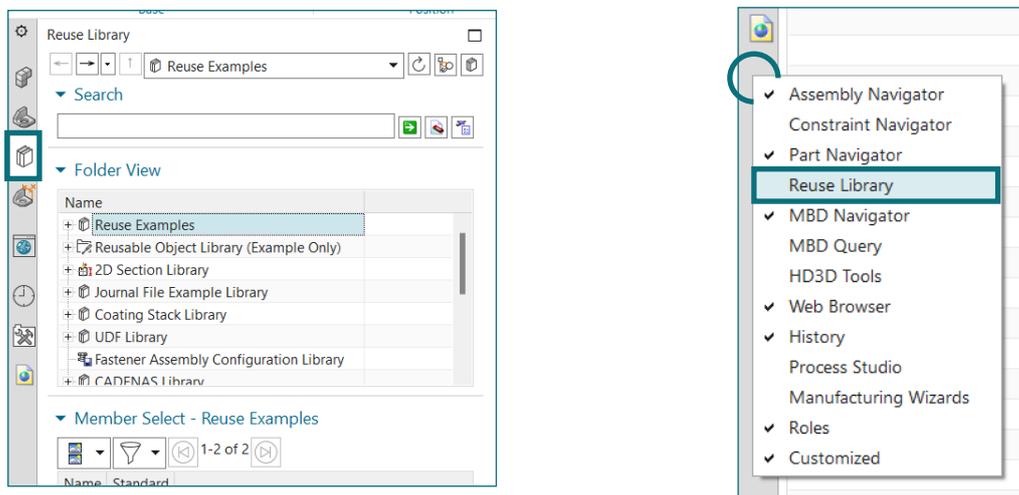


Comme la clavette ne sert qu'à faire tourner l'engrenage avec l'arbre, il est nécessaire d'avoir un système qui empêche l'engrenage de glisser sur l'axe de l'arbre. Il est prévu de placer une vis avec une rondelle, comme le montre l'image en page suivante. Même si la vis se trouve dans les fichiers qui vous sont donnés ("vis_A.prt"), la rondelle, par contre, n'y est pas, nous devons donc la chercher dans la librairie de NX.

4. Importation depuis la bibliothèque

Les bibliothèques permettent d'importer dans un assemblage des modèles déjà conçus : certaines sont déjà disponibles sur votre ordinateur parmi les fichiers installés de NX mais d'autres sont disponibles en ligne au travers de NX. Les librairies, dans le cadre de cette séance, permettront d'importer des éléments normalisés mais le catalogue est plus vaste que cela. Il contient en effet des assemblages entiers de machine, de plomberie, de meubles, de robots, etc.

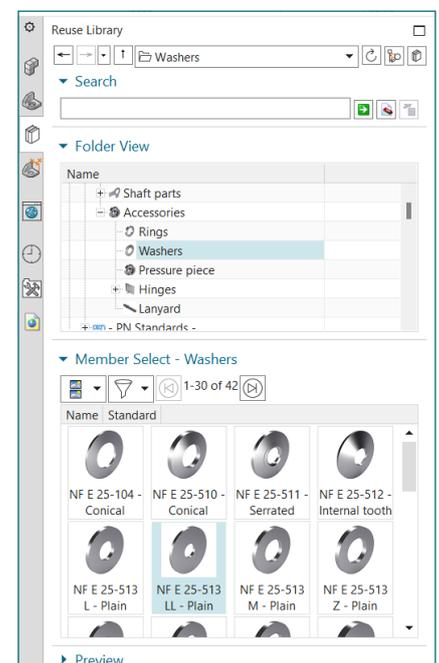
Le menu *Reuse Library* qui permet de naviguer dans les librairies disponibles est accessible dans le panneau de gauche, comme indiqué dans l'image ci-dessous à gauche. Si elle n'est pas disponible, il faut activer l'option en faisant clic droit dans la barre de gauche (voir image ci-dessous à droite).

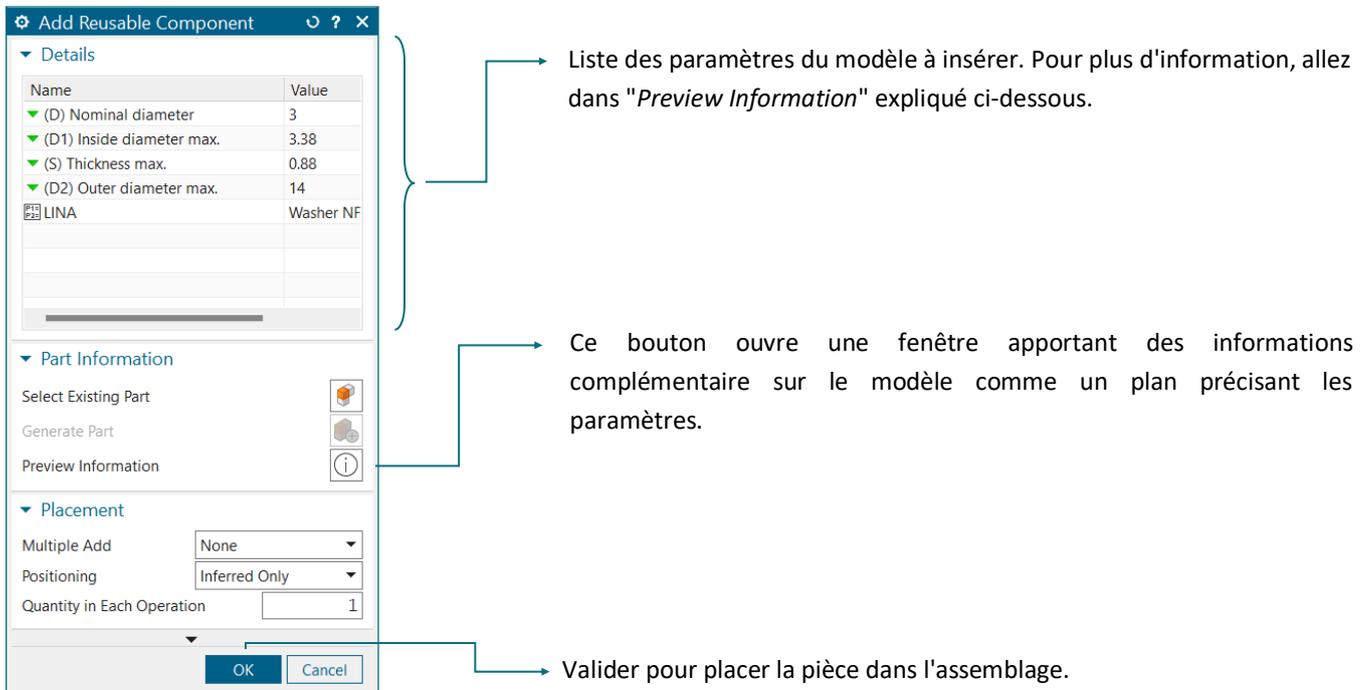


Pour notre rondelle, nous allons consulter la librairie *CADENAS* qui est une bibliothèque en ligne contenant des catalogues de produits industriels. Avant de commencer, il est important de noter que, puisqu'il s'agit d'une librairie en ligne et qu'elle contient beaucoup de modèles, la navigation dans cette librairie est lente.

La rondelle à ajouter est une *NF E 25-513 LL 12*. Pour information, ce nom est déterminé par la norme française (NF) et correspond à une rondelle catégorie 25-513 très large (LL) de diamètre 12 mm. Pour la trouver, naviguez dans la librairie en faisant dérouler les listes suivantes : *CADENAS Library > NF Standards > Accessoires* puis cliquez sur *Washers*. Vous verrez alors le catalogue de rondelles disponibles s'afficher en dessous (comme montré dans l'image ci-contre).

Afin d'ajouter notre rondelle, faites double-clic sur la catégorie qui la concerne "*NF E 25-513 LL - Plain*", une fenêtre va alors s'ouvrir pour créer la rondelle que vous souhaitez conformément à la norme *NF E 25-513 LL*.





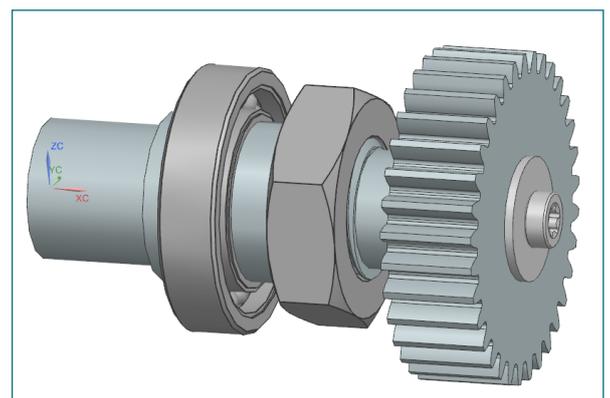
Pour notre rondelle, nous choisirons un diamètre nominal (D) de 12 mm. Vous verrez alors les autres paramètres s'adapter en fonction car, selon la norme, ceux-ci sont déterminés par le diamètre D. Cliquez sur *OK* pour placer la rondelle dans l'assemblage (n'hésitez pas à vous déplacer autour de l'assemblage pour voir où elle a été placée). Placez maintenant la rondelle de sorte qu'elle soit bien alignée sur le perçage prévu pour la vis et qu'elle soit contre l'engrenage.

Attention, la rondelle a été générée à partir de la librairie en ligne, cela signifie donc que ce modèle CAO a été créé temporairement par NX. Si vous fermez NX maintenant et que vous réouvrez plus tard l'assemblage, NX dira qu'il ne sait pas où se trouve la rondelle, car le modèle n'existe plus sur l'ordinateur. Il est donc nécessaire de sauvegarder cette rondelle avec les autres pièces de votre assemblage.

Pour ce faire, allez dans l'*Assembly Navigator* et faites clic droit sur la rondelle (portant le nom "Washer NF E 25-513 LL 12") puis cliquez sur *Make Unique...* Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquez sur *Name Unique Parts* et, dans la nouvelle fenêtre, NX demande le nouveau nom et le nouveau dossier où il doit la recréer. Sélectionnez le dossier où se trouvent toutes les autres pièces de l'assemblage (rappelez vous, il est recommandé de mettre toutes les pièces d'un assemblage dans le même dossier que celui-ci) et renommez la pièce en "rondelle_A". Puis validez toutes les fenêtres pour clôturer. Vous verrez alors que NX a bien remplacé l'ancienne pièce chargée par celle-ci dans le *Assembly Navigator*.

Conseil—Lorsque vous choisissez votre dossier pour y placer la pièce, il se trouve un bouton "Work Part Location" dans cette fenêtre. Ce bouton permet de directement accéder au dossier où se trouve l'assemblage (ou la pièce) sur laquelle vous travaillez.

Il est temps de terminer notre sous-assemblage. Placez "vis_A" à l'endroit qui lui est prévu avec les contraintes d'assemblage nécessaires. Le résultat final pour l'assemblage A est présenté ci-contre.



5. Assemblage de l'arbre B

Dans les fichiers disponibles pour cette séance, se trouve déjà l'assemblage de l'arbre B, nommé "assemblage_B". Dans celui-ci, le roulement à bille et son système de calage sont déjà placés puisqu'il s'agit du même que pour le premier arbre (si ce n'est que les diamètres sont différents). Il ne reste donc plus qu'à placer l'engrenage et son système de fixation.

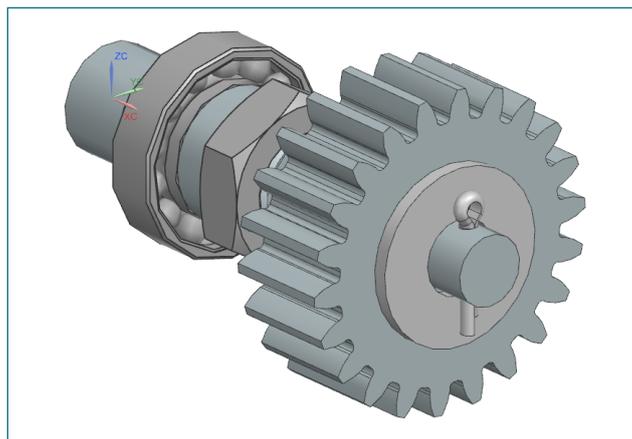
Tout d'abord, placez "clavette_B" et "engrenage_B", tout comme cela a été réalisé pour l'arbre précédent.

Ensuite, ajoutez la rondelle NF E 25-513 L 16 via la librairie *CADENAS Library > NF Standards > Accessories > NF E 25-513 L - Plain* (le paramètre pour cette rondelle étant bien un diamètre de 16 mm). Comme appliqué précédemment, assurez vous que cette rondelle touche l'engrenage.

Cet arbre n'a pas le même système de blocage en translation que le précédent car le diamètre de l'arbre est trop petit. Nous avons plutôt opté pour une goupille : le trou dans l'arbre de part en part va accueillir une goupille (tige en métal) qui va retenir l'engrenage (avec la rondelle) s'il glisse. Celle-ci est une goupille fendue DIN 94 4x20 qui se trouve dans la librairie *CADENA Library > DIN Standards > Pins*. Double cliquez sur "Cotter Pins", la fenêtre va se recharger et proposer "DIN 94 - Split Pins" et faites à nouveau double-clic dessus pour ouvrir la fenêtre pour créer la pièce. Dans les paramètres proposés, sélectionnez un diamètre nominal (D) de 4 mm et une longueur nominale de 20 mm.

Placez la goupille dans le trou prévu à l'aide de contraintes pour le contact et une de distance pour la fixer le long de l'axe du trou. Vous pouvez également placer une contrainte parallèle entre la rondelle et l'anneau de la goupille pour ne pas que les volumes se croisent.

Votre assemblage terminé, vous devez obtenir le résultat présenté ci-contre.



N'oubliez pas de sauvegarder les modèles de la rondelle et de la goupille avec "Make Unique" pour pouvoir continuer à exploiter l'assemblage avant de le fermer. Il est à noter que, normalement, les parties des tiges de la goupille qui dépassent le trou sont pliées afin que la goupille ne se retire pas mais ce n'est pas possible de le réaliser sur le modèle. Notez aussi que la rondelle n'est pas contre la goupille dans l'assemblage, c'est normal également car il faut bien laisser de la place pour pouvoir la mettre. Cependant, cela ne pose pas de problème pour le fonctionnement du réducteur de vitesses puisque les pièces ont été dimensionnées pour que, même si l'engrenage B se déplace un peu, il y ait toujours un bon contact avec l'engrenage A (cela se verra mieux lors de l'assemblage de la boîte).

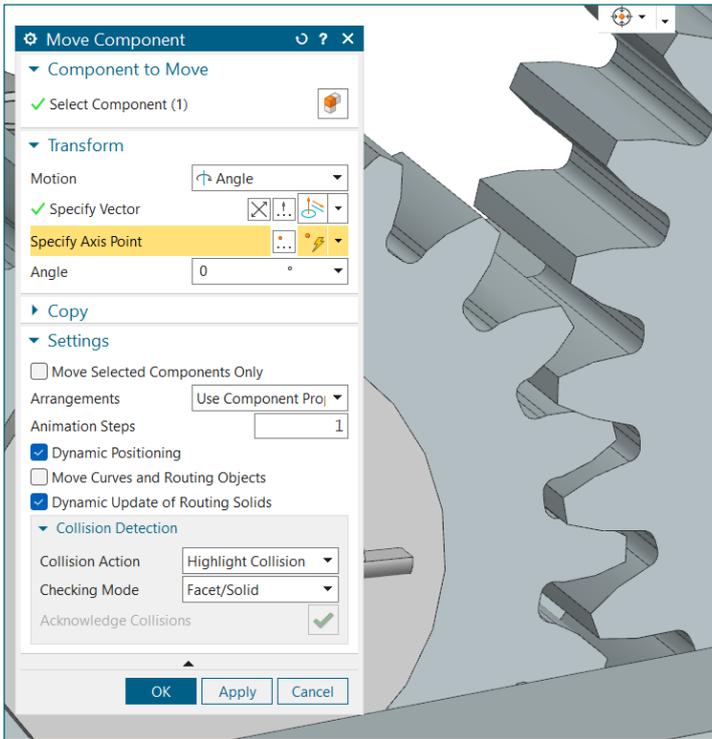
6. Assemblage du réducteur

Il est temps de terminer notre assemblage en assemblant nos deux arbres complets. Créez un nouveau fichier assemblage en l'appelant "boite.prt", ajoutez dedans la pièce "carter" (qui est en réalité une moitié de carter afin de bien voir l'intérieur de la boîte de vitesses) et fixez la.

Importez ensuite l'assemblage A (toutes les contraintes d'assemblage de ce sous-ensemble sont importées avec lui) et ajoutez une contrainte *fit* afin que la bague extérieure du roulement à bille rentre

dans l'encoche du carter prévu à cet effet (il se peut qu'une contrainte *touch* soit également nécessaire). Faites de même pour l'assemblage B.

L'assemblage est terminé, mais il reste cependant à placer les dents des engrenages de manière présentable. Représenter des engrenages est complexe et long car non seulement leur forme est particulière (comme évoqué en point 2) mais leurs positions sont difficiles à réaliser. C'est pourquoi bien souvent ils sont représentés par de simples disques pour gagner du temps. Dans le cas ici, nous accentuons le travail sur le rendu visuel, il faut donc prendre le temps d'aligner les dents correctement pour ne pas qu'elles s'entrecroisent.



En premier lieu, sélectionnez l'un des engrenages avec *Move Component* afin de le faire tourner. Il est possible de ne demander qu'une rotation en sélectionnant dans "*Motion*" de la section "*Transform*" le mode "*Angle*" et sélectionnez le vecteur autour duquel la rotation doit s'opérer. Dans ce mode de mouvement, la valeur introduite dans le champ "*Angle*" fait tourner la pièce selon la valeur donnée lorsque la fenêtre est validée (*OK* ou *Apply*).

Faites alors tourner un des engrenages pour que les dents ne s'entrecroisent plus. Pour vous aider, cliquez sur la flèche pour dérouler les options de la fenêtre *Move Component*, faites dérouler dans la section "*Settings*" la section "*Collision Detection*" et sélectionnez "*Highlight*

Collision" dans la liste déroulante de "*Collision Action*". Cette option coloriera en rouge les éléments qui sont en contact avec l'engrenage que l'on est en train de faire tourner. Aussi, pour vous aider, vous pouvez décocher le carter dans le *Assembly Navigator* pour ne plus le voir et ainsi mieux voir la position des engrenages l'un par rapport à l'autre.

7. Simulation

Pour réaliser l'animation du fonctionnement du réducteur, générez un fichier *sim* à partir de l'assemblage du réducteur, comme fait habituellement lors des séances précédentes.

Il n'y aura ici que deux corps : l'assemblage A et l'assemblage B. Créez donc ces deux corps en prenant bien soin d'y inclure tous les éléments fixés à l'arbre. Attention notamment aux clavettes qui ne sont pas visibles directement sans cacher certaines pièces (il est possible aussi de les trouver via le *Assembly Navigator*).

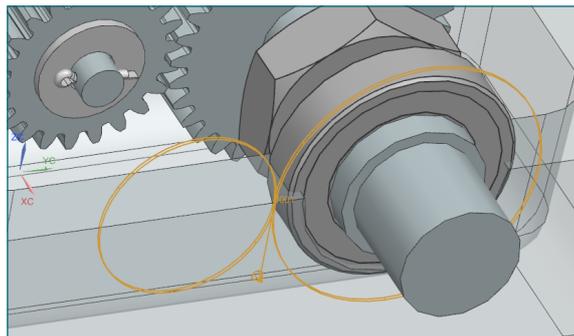
Pour les joints, il n'y en a que deux également. Chacun des arbres est tenu par un joint pivot que vous pouvez facilement réaliser en utilisant la géométrie des parties cylindriques en fin d'arbre (attention que le carter a des dépouilles, il ne faut pas l'utiliser pour les géométries).

Il ne nous reste maintenant qu'à appliquer la relation entre les engrenages. Même si, en réalité, le principe de fonctionnement des engrenages réside dans le contact entre les dents, cela est extrêmement

compliqué à modéliser sur ordinateur. C'est pourquoi NX propose plutôt de "mimer" la transmission en se basant sur le ratio de vitesses attendu : en lui donnant les rayons des engrenages, NX utilise les formules indiquées en page 3 pour calculer une vitesse d'un engrenage à partir de l'autre. Pour créer cette relation, utilisez la fonction *Gear Coupler* disponible dans l'onglet *Home*.

Dans la fenêtre *Gear Coupler*, sélectionnez chacun à son tour le joint d'un arbre et indiquez le rayon de l'engrenage qui lui est associé (pour rappel, A : 50 mm, B : 33 mm). Une fois validé, si les paramètres sont corrects, vous devriez voir en orange le tracé schématique de deux engrenages comme présenté dans l'image ci-dessous (notez que la position de ce tracé n'a pas d'importance).

A noter qu'il existe d'autres fonctions dans NX servant à représenter de manière cinématique des liaisons complexes (comme par exemple *Rack and Pinion* pour une liaison pignon-crémaillère).



Pour terminer avec les paramètres de simulation, imposez que l'arbre A tourne à une vitesse de 30 rpm (30 rev/min, 30 révolutions par minutes ou encore 30 tours par minutes). Utilisez un driver polynomial, comme déjà utilisé par le passé. Pour choisir une unité de mesure, cliquez sur l'unité de la case correspondante pour faire dérouler la liste.

Créez maintenant une solution cinématique qui doit durer 30 secondes avec 6000 pas de temps puis, faites *Solve*.

8. Animation

Une fois les calculs terminés, vous pouvez voir l'animation de la boîte de vitesses. Vous remarquerez que la représentation n'est pas fidèle à la réalité : parfois les dents se croisent, voire dans certains cas, les sens de rotation ne semblent pas corrects. Il faut bien se rappeler que le couplage utilisé est "artificiel" afin de simplifier les relations cinématiques, il est donc normal que l'animation ne soit pas correcte. Cependant, les résultats des graphiques sont corrects puisqu'ils représentent les valeurs issues des calculs, c'est pour cela que seuls eux permettent de vérifier les résultats.

A noter que si vous changez le nombre de pas (donc le temps entre chaque pas), vous pouvez avoir un effet stroboscopique. Par exemple, si vous prenez 600 pas au lieu de 6000, l'animation montrera que les engrenages tournent en sens contraire des arbres. Entre chaque pas, les engrenages auront pourtant bel et bien tourné dans le bon sens (les graphiques l'attestent) mais, sur le temps entre chaque pas, les engrenages auront pris une configuration quasi similaire à la précédente. Pour ne pas avoir cet effet, il faut choisir le nombre de pas (ou pas de temps) loin de celui déterminé par la vitesse de rotation.

Par exemple : si la roue tourne d'environ 10.9° (angle entre deux dents), l'engrenage aura bien tourné, mais, comme il est impossible de distinguer les dents, on a l'impression qu'il n'a pas bougé. Ainsi, si on impose pour une vitesse de 30 tours/min un nombre de pas de 495, la roue "ne bouge pas" dans l'animation (600 étant trop proche de 495, on a des "effets résiduels").