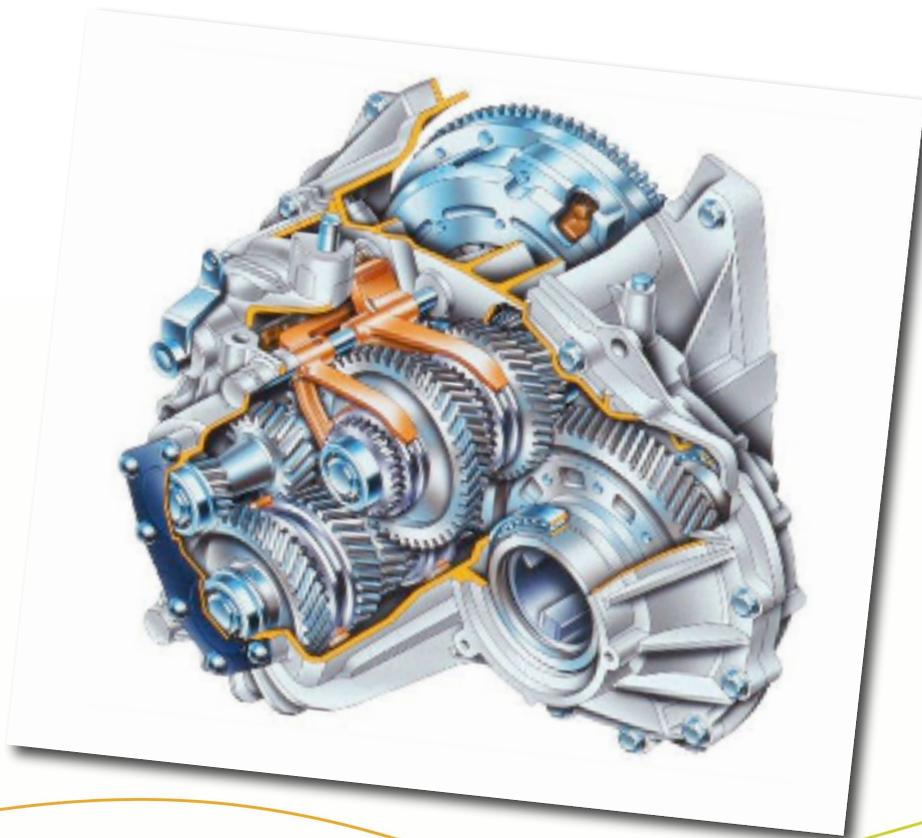


Réalisation d'une boîte de vitesses de voiture didactitielle



Etudiants :
Yibing CUI
Jonathan HERVIEUX
Handi ZHANG

Elise HERMENIER
Xavier VAREILLE

Enseignant-responsable du projet :
Thomas BRETEAU

Date de remise du rapport : 13/06/2016

Référence du projet : STPI/P6/2016 – 49

Intitulé du projet : *Réalisation d'une boîte de vitesse de voiture didacticielle*

Type de projet : (*expérimental, simulation*)

Objectifs du projet :

Le but de ce projet va être de comprendre le fonctionnement d'une boîte de vitesses afin d'en créer une version didacticielle grâce au logiciel SolidWorks.

Dans un premier temps, nous allons devoir étudier une boîte de vitesses mise à notre disposition. Pour cela, nous devons la démonter afin d'analyser le rôle de chaque pièce qui la compose. Ce n'est qu'après que nous comprendrons la marche globale de la boîte de vitesses.

Dans un second temps, il faudra modéliser ce fonctionnement sur ordinateur. Nous utiliserons SolidWorks qui nous permettra de créer des pièces en trois dimensions, mais aussi de les animer les unes par rapport aux autres. De cette manière, nous décomposerons bien le mouvement de chaque pièce avec les autres.

Mots-clefs du projet :

Boîte de vitesse

Transmission

Modélisation

Assemblage

Sommaire

1) Introduction (p5)

2) Méthodologie et organisation du travail (p6)

3) La boîte de vitesses (p8)

A) Description de la boîte de vitesses (p8)

B) Le fonctionnement de la boîte de vitesses (p9)

B-1) Le rôle de la boîte de vitesses (P9)

B-2) Le fonctionnement de la boîte de vitesses (p9)

B-3) La synchronisation (p11)

C) La géométrie des engrenages (p12)

C-1) Le rôle d'un engrenage (p12)

C-2) les engrenages à denture hélicoïdale (p12)

C-3) la géométrie des dents (p12)

C-4) La marche arrière (p13)

C-5) Calculer le rapport de transmission (p13)

4) Le réducteur et le différentiel (p14)

A) Le réducteur (p14)

B) Le différentiel (p14)

B-1) La nécessité du différentiel (P14)

B-2) Le fonctionnement du différentiel (p14)

B-3) Différentiel autobloquant (p15)

5) Conclusion et perspectives du projet (p16)

6) Sources (p17)

7) Annexes (p18)

1) Introduction

Une grande majorité de personnes utilise sa voiture quotidiennement pour aller au travail. Mais combien d'entre elles connaissent le fonctionnement de la boîte de vitesses ?

Ce dispositif mécanique constitue un élément fondamental pour le fonctionnement de la voiture. Cependant son principe de fonctionnement reste difficile à comprendre sans la possibilité d'en démonter une afin d'observer ce qu'elle contient.

Par analogie, le fonctionnement d'une boîte de vitesses repose sur le même principe que les vitesses d'un vélo. En effet, lorsque l'on change de vitesse, la chaîne du vélo va se positionner sur un pignon de taille différente. Cela va permettre de changer le rapport de transmission entre les pédales et les roues. Ainsi, lorsque l'on augmente de vitesse, par exemple, la chaîne va glisser sur un pignon plus petit. Avec un tour de pédales, les roues tourneront plus vite et effectueront plus de distance.

Dans le cas contraire, si l'on diminue de vitesse, la chaîne se positionnera sur un pignon plus grand. Le rapport de la rotation des pédales par rapport à la rotation des roues sera donc plus petit. Avec un tour de pédales, les roues tourneront moins vite et effectueront moins de chemin.

Dans une voiture, le principe est le même. La boîte de vitesse a comme objectif de maximiser le rendement de la rotation du moteur en utilisant un système d'engrenages. Chaque engrenage représentant un rapport de vitesse, la boîte de vitesse propose ainsi différents coefficients de démultiplication du mouvement et donc différents rapports de transmission. Le but va être d'adapter ce rapport de transmission en fonction de la vitesse de la voiture.

Comme évoqué précédemment, les avantages vont être de maximiser le rendement du couple moteur et d'avancer plus ou moins vite en fonction de celui-ci.

Un autre avantage notable va être la réduction des émissions de pollution. En effet, un rapport bien choisi par rapport à la vitesse de la voiture permettra de moins solliciter le moteur et donc de consommer moins d'essence.

Le but de ce projet va être de comprendre le fonctionnement de la boîte de vitesses en profondeur. Pour cela, nous analyserons chaque pièce qui la compose. A la suite de cela, nous modéliserons ce fonctionnement sur ordinateur.

Dans ce rapport, nous détaillerons toutes les démarches que nous avons suivies. Ainsi, dans un premier temps, nous indiquerons la méthodologie que nous avons adoptée et l'organisation de notre travail. Ensuite nous parlerons du travail que nous avons réalisé et des résultats obtenus. Enfin nous conclurons sur les apports personnels que nous avons apportés à ce projet.

2) Méthodologie et organisation du travail

Pour mener ce projet, nous avons établi une méthodologie à suivre. En effet, notre but étant de comprendre puis modéliser une boîte de vitesses, nous avons organisé notre travail de manière chronologique.

Lors des premières séances, nous avons décidé de nous documenter sur la boîte de vitesses afin d'avoir une connaissance générale du mécanisme avant de le démonter.

C'est donc dans un deuxième temps que nous avons commencé à démonter la boîte à notre disposition. Ce démontage nous a d'ailleurs permis de comprendre comment les pièces étaient liées car il a fallu trouver des solutions pour les séparer.

Une fois le démontage terminé, nous avons listé chaque composant et défini son rôle.

Enfin, dans un troisième temps, nous avons modélisé le système sur ordinateur. Pour cela, nous avons mesuré ensemble la taille des pièces à représenter. En effet, il nous est apparu important de se mettre d'accord sur les mesures de chaque pièce, préalablement à leur modélisation. Cela a permis d'éviter des erreurs lors de leur assemblage.

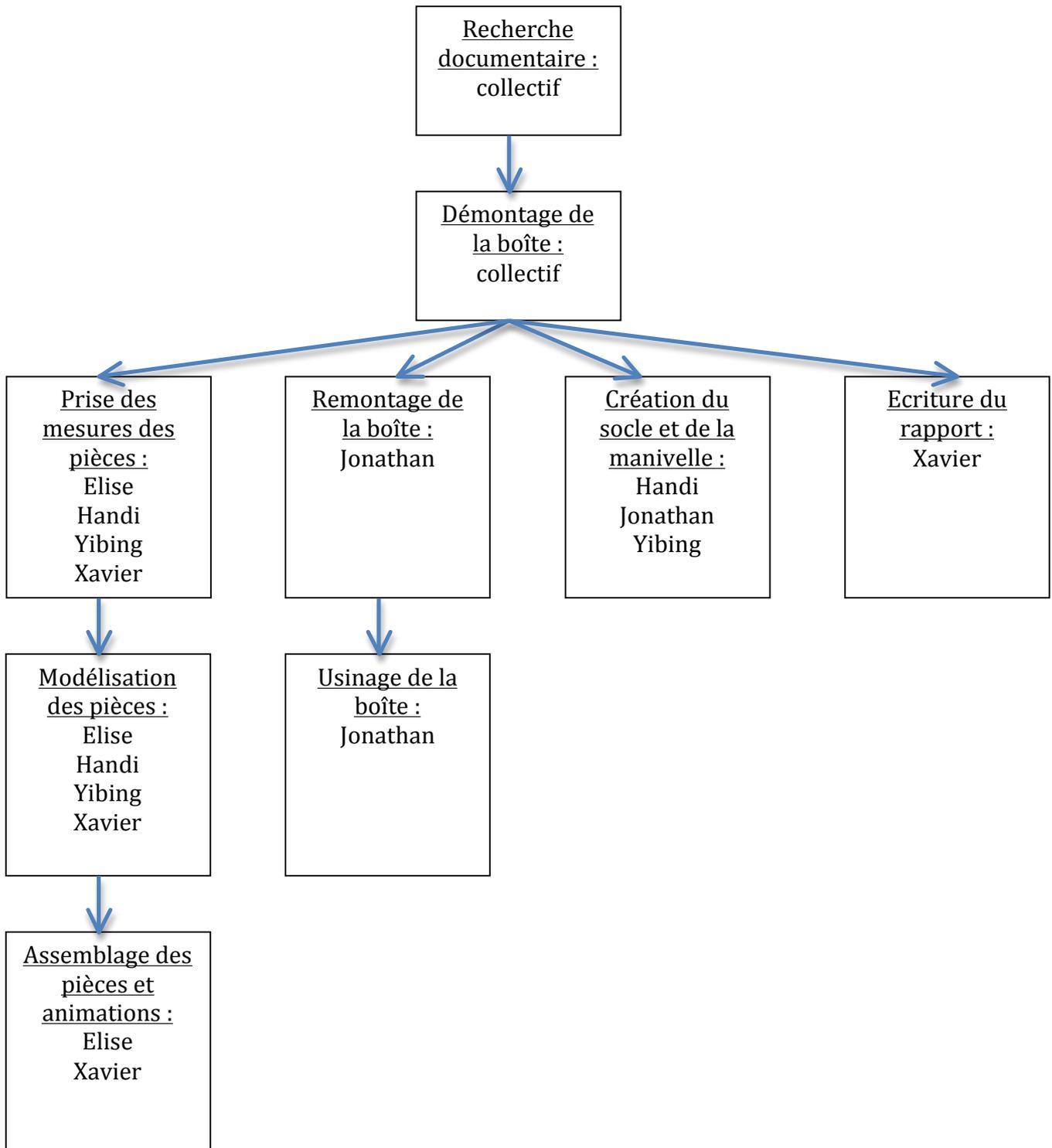
Afin d'avancer de manière cohérente et efficace, nous avons dû organiser le travail au sein du groupe. Effectivement, au vu des nombreuses tâches que nous devions effectuer, il est vite apparu nécessaire de se répartir le travail.

Le démontage et l'analyse du fonctionnement de la boîte de vitesse se sont faits collectivement. Par la suite, nous avons partagé les pièces à modéliser dans le groupe. Chacun a choisi une pièce et a été en charge de sa création sur SolidWorks. Certaines pièces ont cependant nécessité un travail entre plusieurs personnes. La communication dans le groupe a permis de créer un ensemble de pièce cohérent.

Parallèlement à cela, il a fallu remonter la boîte de vitesses. Il a également fallu faire usiner la boîte de vitesses afin d'ouvrir certaines parties du carter. Le but était de montrer les zones actives et importantes de la boîte de vitesses.

Une fois les pièces terminées, nous avons divisé le reste du travail en deux. D'une part, certains devaient s'occuper de l'assemblage des pièces et des modifications éventuelles à apporter. Il a également fallu s'occuper de créer les animations d'utilisation. D'autre part, les autres devaient s'occuper de la création de la manivelle et du socle de la boîte de vitesse pour la présentation orale du projet.

Organigramme des tâches :



3) La boîte de vitesses

A) Description de la boîte de vitesses

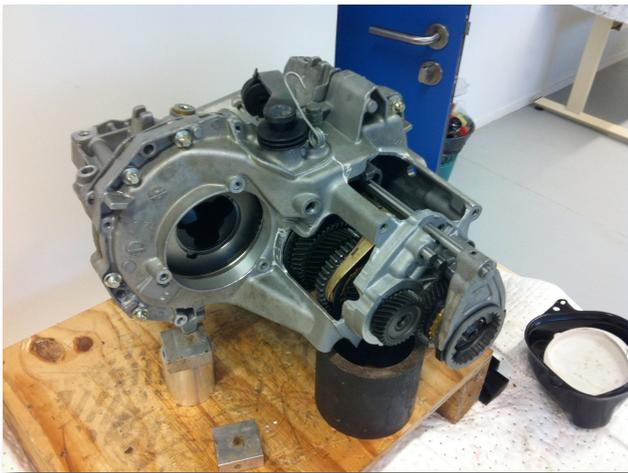
Lors de notre projet, nous avons pu observer et travailler avec une vraie boîte de vitesses. Nous avons ainsi constaté que celle-ci est disposée dans un carter avec le réducteur et le différentiel. Le carter est étanche et est rempli avec de l'huile afin de faciliter le mouvement des pièces. Il est fermé avec des vis et possède aussi un joint collant.

La boîte de vitesses se compose d'un arbre d'entrée recevant un couple de la part du moteur. Sur cet arbre se situe différentes roues dentées de différentes tailles. Chacune représente un rapport de transmission de vitesse : la 1^{ère}, la 2nd, la 3^{ième}, la 4^{ième} et la 5^{ième}. Ces roues dentées sont en liaisons engrenage avec d'autres roues, situées sur un arbre parallèle : c'est l'arbre de sortie. C'est ce dernier qui va transmettre la rotation aux roues.

On remarque également la présence d'un troisième arbre parallèle aux deux autres et situé entre eux. C'est l'arbre de la marche arrière qui comporte une seule roue dentée.

En plus de cela, on remarque la présence de fourchettes. Celles-ci sont en liaisons avec des anneaux, les baladeurs, eux-mêmes situés sur l'arbre de sortie. Ce sont-elles qui sont liées au levier de vitesses et qui vont permettre de sélectionner un roue dentée et ainsi un rapport de transmission.

Pour finir, on remarque également la présence de petits anneaux près de chaque roue dentée sur l'arbre d'entrée, les bagues de synchroniseur, dont nous expliquerons l'utilité plus tard.



B) Le fonctionnement de la boîte de vitesses

B-1) Le rôle de la boîte de vitesses

Le rôle de la boîte de vitesses est de transmettre la puissance du groupe motopropulseur aux roues motrices (les roues avant). Cette transmission s'effectue à l'aide du conducteur qui va gérer les rapports en fonction de la vitesse du véhicule. En effet, c'est l'action combinée de l'automobiliste sur le levier de vitesse et la pédale d'embrayage qui permettra d'effectuer cette transmission.

Ainsi, la boîte de vitesse va permettre d'adapter le rapport de transmission entre le moteur et les roues. Et ceci grâce à la modification de la démultiplication de la rotation.

La boîte de vitesses permet aussi de rouler en marche arrière en inversant le sens de la rotation de l'arbre de sortie, et à fortiori des roues.

Il est également important de noter de que la boîte de vitesses est réversible. En effet, les roues peuvent entraîner le moteur lorsque l'on veut utiliser le frein moteur.

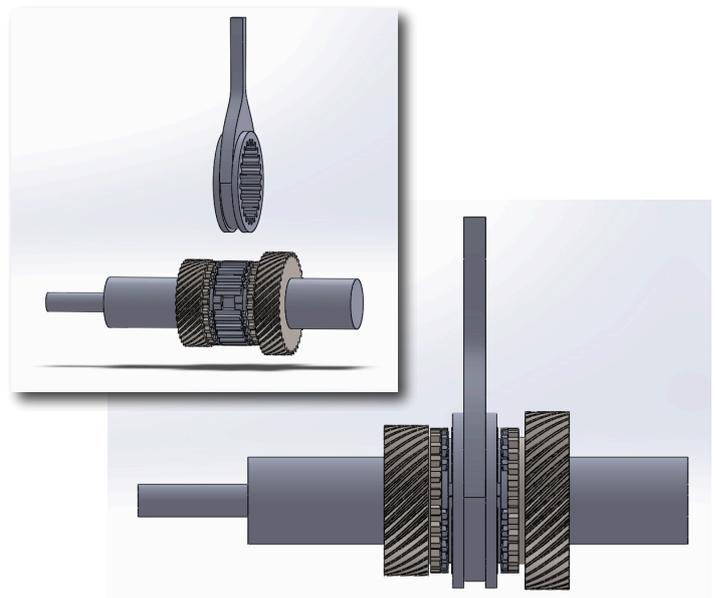
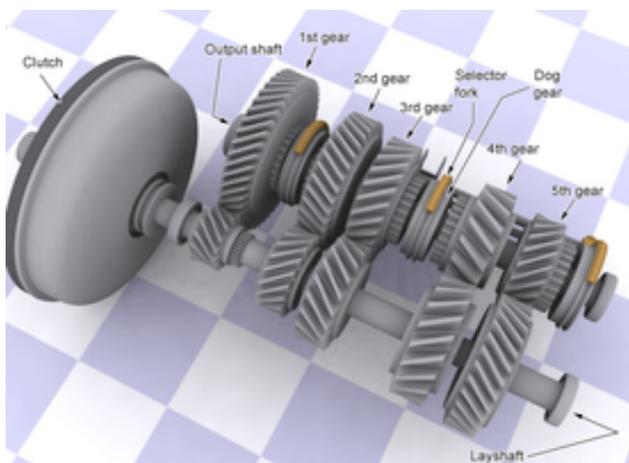
La boîte de vitesses est également capable d'interrompre la transmission de rotation : c'est lorsque que le levier est au point mort.

B-2) Le fonctionnement de la boîte de vitesses

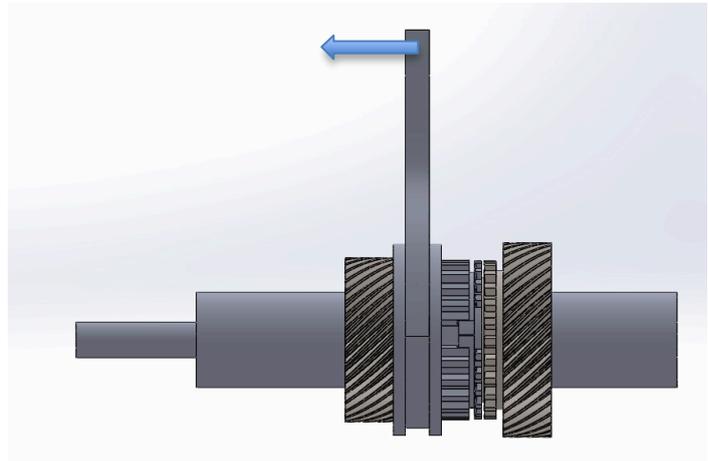
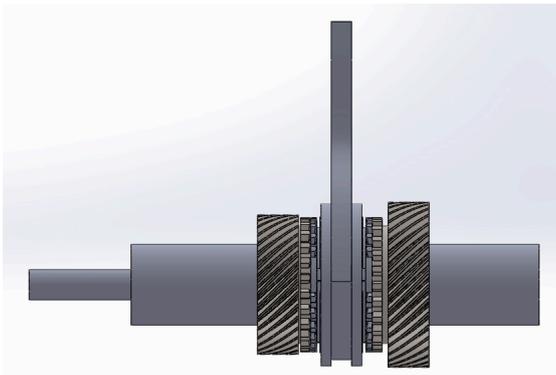
Lorsque le conducteur met en marche sa voiture, le moteur se met à tourner. Celui-ci va entraîner l'arbre d'entrée qui se met donc en rotation.

Cet arbre est en liaison avec l'arbre de sortie. En effet, chacun de ses engrenages caractérisant un rapport de vitesse engrène avec son homologue sur de l'arbre de sortie. Néanmoins, les engrenages ne sont pas fixés sur l'arbre de sortie mais tournent librement autour de celui-ci. Ainsi, l'arbre d'entrée n'entraîne pas l'arbre de sortie.

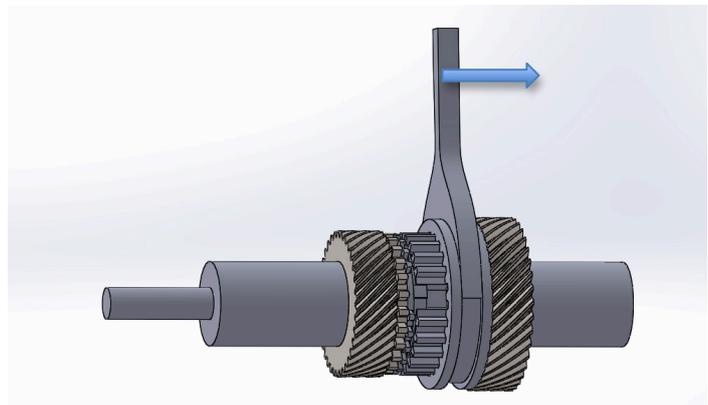
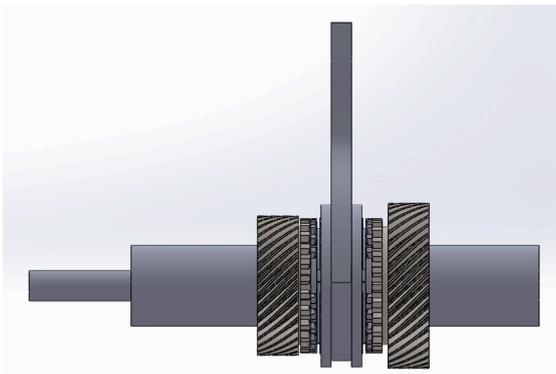
Rappelons que la boîte de vitesse est commandée par le conducteur qui agit sur celle-ci à l'aide du levier de vitesses. Celui-ci est relié aux fourchettes grâce à un système de tringlerie.



Dans un premier temps, le conducteur va débrayer pour passer le premier rapport de vitesse. Ensuite, il va sélectionner la vitesse grâce au levier. Cela va avoir pour effet de translater la fourchette, et à fortiori, le baladeur, vers l'engrenage sur l'arbre de sortie correspondant à la vitesse voulue. Or, le baladeur est guidé en rotation avec l'arbre. Cela signifie que les deux ne peuvent pas tourner indépendamment. De cette manière, la roue dentée va devenir solidaire à l'arbre. C'est ainsi que l'arbre d'entrée va entraîner l'arbre de sortie avec le premier rapport de vitesse.



Lorsque le conducteur veut passer au second rapport de vitesse, il repasse au point mort. La fourchette pousse le baladeur qui revient au milieu, à sa place initiale. L'utilisateur passe ensuite la seconde vitesse et la fourchette se translate de l'autre côté et solidarise la roue dentée du deuxième rapport avec l'arbre de sortie. L'arbre d'entrée entraîne donc l'arbre de sortie avec le deuxième rapport de vitesse.



C'est le même fonctionnement lorsque que le conducteur passe les autres vitesses. Seulement, le levier va faire translater la fourchette associé à la vitesse choisie. De la même manière, celle-ci va pousser le baladeur vers la roue dentée du rapport voulu. Cet engrenage va devenir solidaire de l'arbre et entraîner l'arbre de sortie.

Pour finir, la marche arrière fonctionne sur le même principe. Sauf que la fourchette va pousser le pignon de l'arbre de la marche arrière entre l'arbre d'entrée et l'arbre de

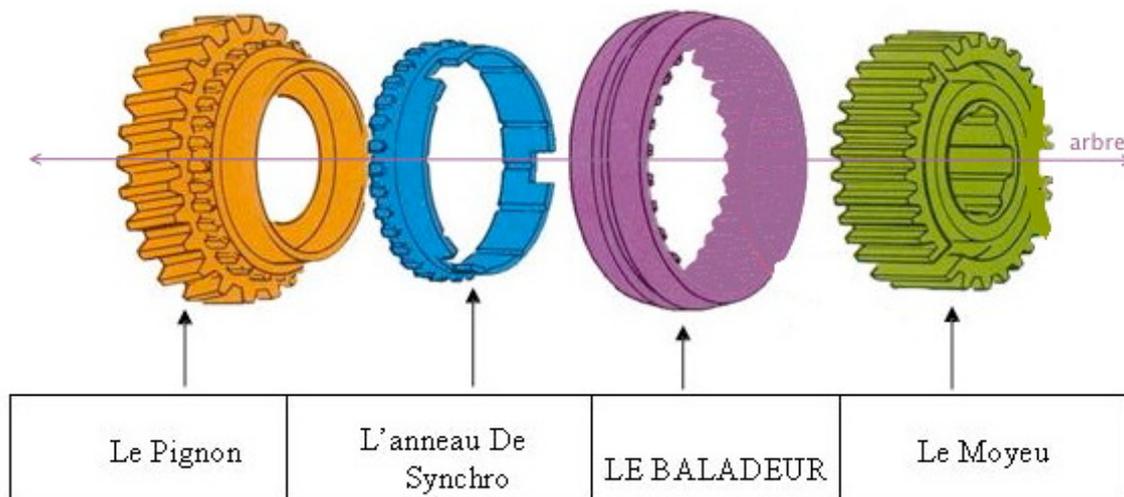
sortie. La transmission va donc passer par ce pignon supplémentaire, ce qui aura pour effet d'inverser le sens de rotation de l'arbre de sortie.

B-3) La synchronisation

Pour assurer une bonne transmission entre le passage de deux vitesses, chaque engrenage dispose d'un synchroniseur. C'est un système qui permet de faciliter le passage du baladeur de l'engrenage du rapport de vitesse inférieur à celui de rapport supérieur.

Le principe du synchroniseur va être d'égaliser la vitesse de rotation de la roue dentée avec celui de l'arbre et donc du baladeur. L'objectif étant d'éviter tout chocs et efforts de passage de vitesse. Cela va permettre de réduire l'usure des baladeurs mais aussi de rendre le passage des vitesses silencieux.

Le synchroniseur se compose donc de plusieurs pièces.



La première est un moyeu qui est fixé sur l'arbre et qui tourne donc à la même vitesse. Ce moyeu a une denture extérieure et est en liaison avec le baladeur. En effet, il le guide en rotation à la même vitesse que l'arbre et lui permet également de se translater sur l'axe de l'arbre.

Des petits anneaux dentés, appelés bagues de synchroniseur, sont en liaisons entre chaque engrenage et le moyeu. Celles-ci sont guidées en rotation avec le moyeu. Cependant, elles peuvent effectuer une petite rotation et une petite translation par rapport à celui-ci.

Ainsi lors du passage du baladeur, la bague de synchroniseur va se déplacer vers l'engrenage du rapport de vitesse sélectionné et il va y avoir friction. La bague va donc permettre de synchroniser la vitesse de rotation du baladeur avec celle du pignon qui tourne dans le vide. Lorsque la différence de vitesse est nulle, le baladeur peut s'emboîter dans le pignon. Cela permet donc faciliter le passage du baladeur.

C) La géométrie des engrenages

C-1) Le rôle d'un engrenage

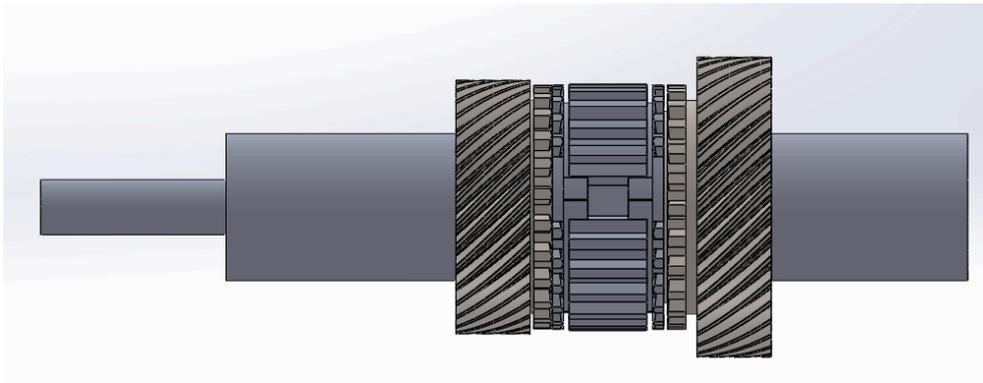
Les engrenages ont le rôle de transmettre un mouvement de rotation entre deux arbres. Ce mouvement doit être transmis sans glissement. La transmission de puissance s'effectue ainsi par obstacle, grâce aux dents.

C-2) Les engrenages droits à denture hélicoïdale

Lors du démontage de notre boîte de vitesses, nous avons pu nous apercevoir que les engrenages qui assurent le passage des vitesses étaient des engrenages droits à denture hélicoïdale. En effet, ces engrenages ont une géométrie particulière puisque que leurs dentures sont inclinées selon un angle d'hélice. Ainsi, pour pouvoir s'engrener, les deux roues doivent avoir le même angle d'inclinaison, mais en sens inverse.

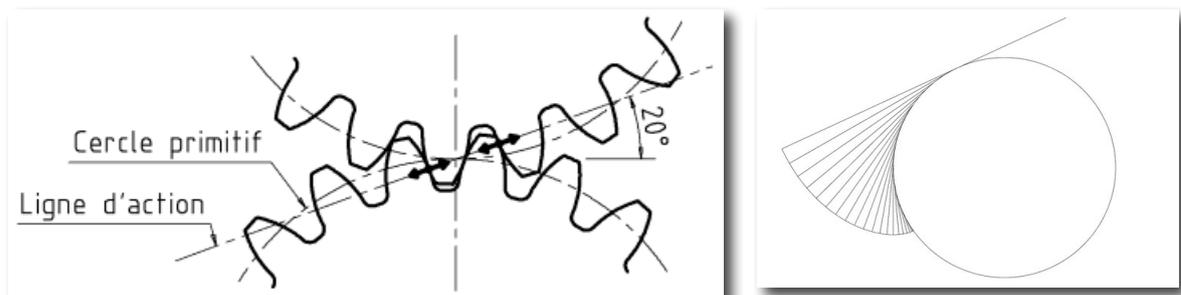
Les avantages d'une telle denture résident dans le fait que l'effort se transmettant sur chaque dent est réduit car plusieurs dents sont en prises de manière simultanée. De plus, la denture hélicoïdale permet un fonctionnement du système sans bruits puisqu'il n'y a pas de vibration.

Cependant, un inconvénient majeur est la création de poussées axiales qu'il faut gérer avec différents moyens techniques comme des épaulements.



C-3) La géométrie des dents

Pour continuer sur l'observation des engrenages, nous avons remarqué que leurs dents avaient une forme bien précise. En effet, celles-ci ont un profil en développante de cercle. Cela signifie que leur géométrie a été engendrée par le mouvement absolu d'un point appartenant à une droite tangente roulant sans glisser sur un cercle de base. Ce profil possède plusieurs avantages dont celui d'être insensible aux variations d'entraxe (distance entre le centre des deux roues en liaison). De plus, cette géométrie n'est pas difficile à obtenir en usinage. Ainsi, le mouvement va se transmettre de manière fluide, sans à-coups.



C-4) La marche arrière

Après observation de notre boîte de vitesses, nous avons constaté que l'engrenage permettant d'utiliser la marche arrière était un engrenage droit à denture droite. Cette géométrie s'explique par le fait que cet engrenage doit se translater sur son arbre afin d'engrener avec les autres pignons. Cet engrenement aurait été plus compliqué à effectuer avec une denture hélicoïdale. Avec la denture droite, il suffit de s'insérer entre les deux autres pignons.

Pour finir, la denture droite permet d'expliquer l'origine du bruit significatif de la marche arrière.

C-5) Calculer le rapport de transmission

Comme évoqué précédemment, le rapport de transmission est le rapport des vitesses de sortie et d'entrée. Ce rapport dépend des rayons des engrenages qui sont en liaison.

Pour un engrenage 1 qui entraîne un engrenage 2, on a :

$$r = \omega_s / \omega_e = D1 / D2 = Z1 / Z2$$

avec ω_e , la vitesse de rotation à l'entrée (rad/s), ω_s , la vitesse de rotation en sortie (rad/s), D1 et D2, les diamètres des engrenages (mm), Z1 et Z2, les nombres de dents des engrenages.

On peut également calculer les puissances d'entrée et de sortie du système avec les formules suivantes :

$$P_e = C_e + \omega_e \quad \text{pour l'arbre d'entrée}$$

$$P_s = C_s + \omega_s \quad \text{pour l'arbre de sortie}$$

Avec P, la puissance (W), C le couple (N.m) et ω , la vitesse de rotation (rad/s).

On rappelle que pour un engrenage, on a :

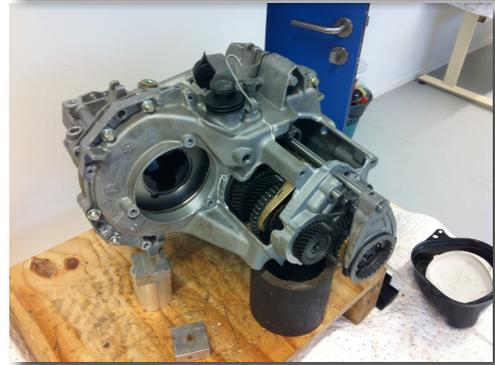
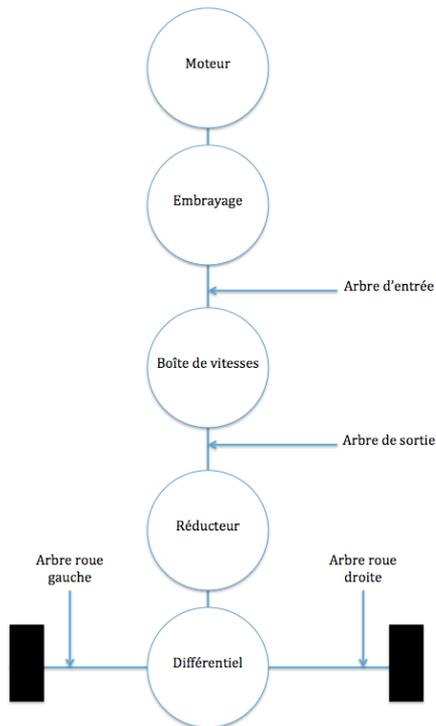
$$D = M * Z$$

Avec D, le diamètre de l'engrenage (mm), m, son module, et Z, le nombre de dents.

Pour que deux engrenages s'engrènent, il faut qu'ils aient le même module.

4) Le réducteur et le différentiel

Le réducteur et le différentiel sont situés avec la boîte de vitesses, dans le carter.



A) Le réducteur

Le réducteur est un engrenage avec un rapport de vitesse constant. Son but va être d'augmenter la valeur du rapport de vitesse obtenu avec l'arbre de sortie.

Cela permet de diminuer l'encombrement de la boîte de vitesses en évitant ainsi que les engrenages sur les arbres soient très grands.

B) Différentiel

B-1) La nécessité du différentiel

Dans une voiture, le différentiel est situé à l'intersection de l'axe des roues motrices et de l'axe de la transmission (arbre de sortie de la boîte de vitesses).

Lorsqu'une voiture suit une ligne droite, ses roues droites et ses roues gauches font le même nombre de tours. Cependant, lorsque celle-ci parcourt une courbe, les roues droites et gauches n'effectuent pas le même nombre de tours. En effet, lors d'un virage, les roues extérieures vont devoir parcourir un plus grand chemin que les roues intérieures. Cela s'explique par la trajectoire que suivent respectivement les roues de chaque côté : les deux courbes à parcourir ont une longueur différente.

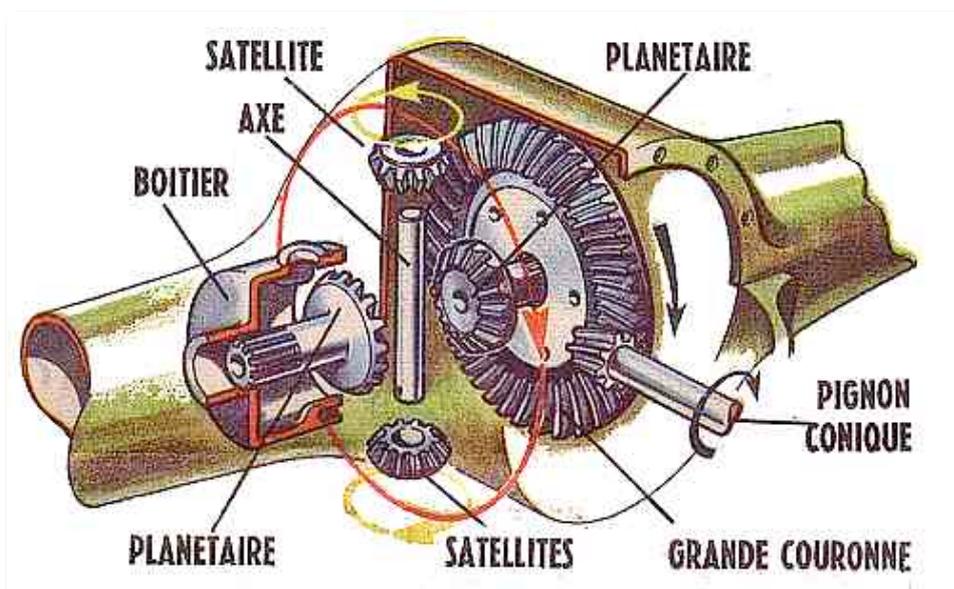
Ainsi, le rôle du différentiel va être de transmettre l'effort du moteur aux roues motrices tout en gérant cette différence de vitesse de rotation entre les roues droite et gauche.

B-3) Le fonctionnement du différentiel

A la sortie de la boîte de vitesse, un arbre de transmission met en rotation le pignon conique. Celui-ci transmet ainsi le mouvement à la grande couronne qui est lié à un boîtier. Ce boîtier va donc tourner et entraîner un axe possédant des satellites à ses extrémités. Ces mêmes satellites transmettent le mouvement aux planétaires dans lesquels ils engrènent. Enfin, chaque planétaire est relié à une roue.

Ainsi, ce système va permettre de distinguer deux cas :

- lorsque la voiture avance tout droit, les planétaires et les satellites tournent ensemble : les roues tournent donc à la même vitesse.
- lorsque la roue extérieure doit tourner plus vite que la roue intérieure, les planétaires vont se mettre à tourner l'un par rapport à l'autre. Ainsi, planétaires et satellites ne vont plus former un bloc sans mouvement.



B-4) Différentiel autobloquant

Avec le système de différentiel, une roue peut être amenée à tourner dans le vide si celle-ci est embourbée par exemple. Des disques de frictions vont donc être ajoutés au système afin de lier les planétaires au boîtier lors d'un effort provenant d'un blocage de la roue. Cela va permettre de régler le problème de la roue « folle ».

5) Conclusion et perspectives du projet

Pour conclure ce dossier, nous voulions tout d'abord remercier M. Breteau pour toute l'aide qu'il nous a apportée pour l'aboutissement de notre projet.

Ce projet nous a permis de comprendre le fonctionnement d'un système complexe en l'abordant de manière différente. Cela nous a permis d'utiliser des outils différents de ceux que l'on utilise dans notre cursus STPI.

Premièrement, nous avons dû adopter un point de vue mécanique pour comprendre le rôle des pièces. Cela nous a notamment permis de comprendre les liaisons engrenages et les transmissions de rotations.

Ensuite, le démontage de la boîte de vitesse nous a également permis d'utiliser nos connaissances de manière pratique. Il a fallu réfléchir à la manière de démonter le carter en tenant compte des pièces qu'il contenait.

Enfin, nous avons aussi appris à modéliser notre système sur ordinateur avec SolidWorks. En effet, nous avons réussi à modéliser la transmission de rotation de l'arbre d'entrée à l'arbre de sortie. Nous avons créé cette animation pour deux rapports de vitesse différents.

Grâce à ce projet, nous avons pu apprendre à travailler en équipe avec des personnes que l'on ne connaissait pas. Il a donc fallu débattre sur nos idées et savoir les argumenter.

De plus, avec la présence de deux étudiantes chinoises dans le groupe, nous avons pu expérimenter le travail en groupe malgré la barrière de la langue.

Pour finir, ce projet nous a permis d'apprendre comment gérer une situation problème du début jusqu'à la fin.

Concernant les perspectives offertes par notre projet, nous pourrions continuer la modélisation de la boîte de vitesses afin d'en créer une complètement sur SolidWorks. Il serait également possible d'étudier le rôle de l'embrayage afin d'avoir une connaissance plus complète du fonctionnement d'une voiture.

6) Sources

Ressources utilisées pour comprendre la boîte de vitesses :

http://www.gecif.net/articles/mecanique/cours/TRANSMISSION_DE_PUISSANCE_PAR_ENGRENAGES.pdf

http://ww2.ac-poitiers.fr/vehicules-materiels/IMG/pdf/la_boite_de_vitesses.pdf

<http://greg.saunier.free.fr/mecanique.htm>

http://www.profauto.fr/2-Apports_theoriques/Boite_de_vitesses.pdf

Ressources images :

<http://mecaretro.free.fr/?Le-Differentiel>

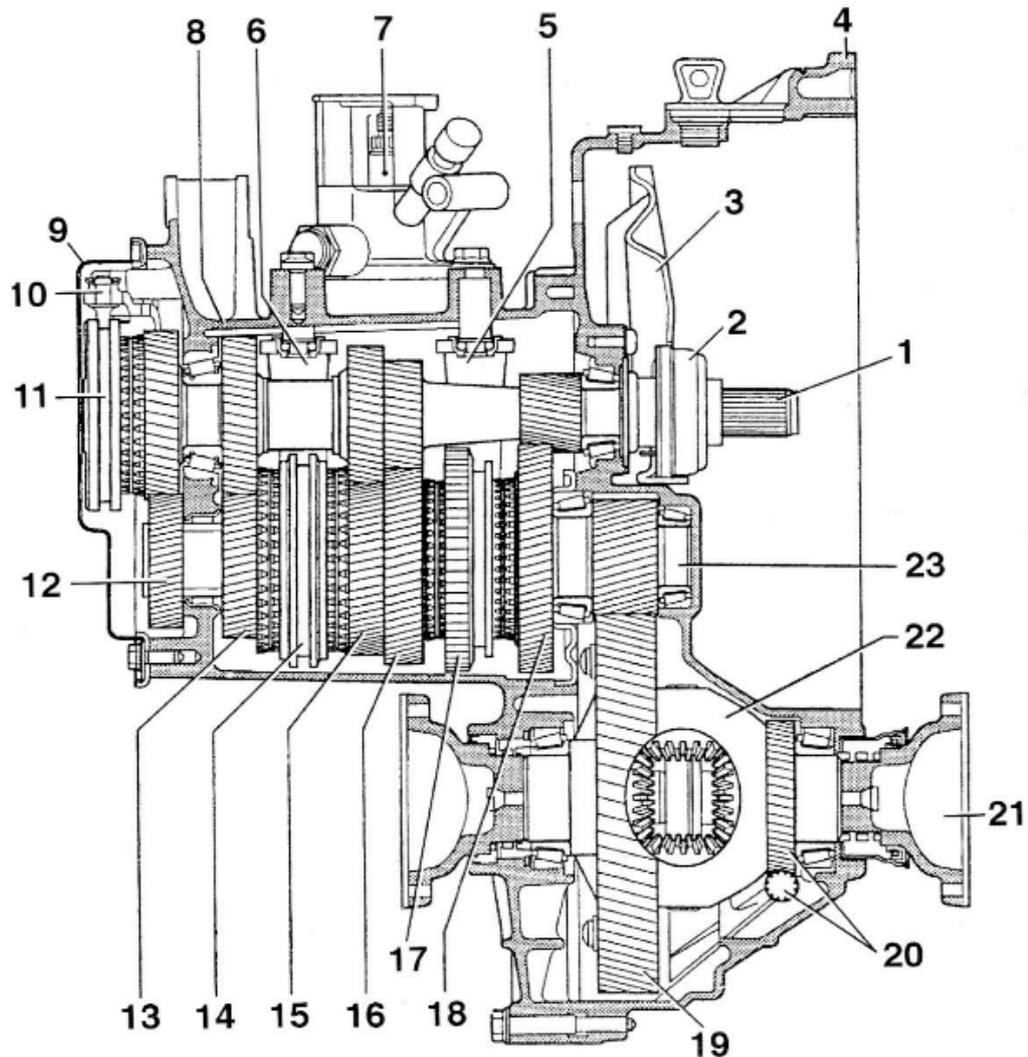
<http://www.genapart.com/2016/01/05/dessinez-vos-engrenages/>

<http://www.unevoiture.com/rudiments/le-fonctionnement-de-la-boite-de-vitesse-manuelle>

<http://boite-de-vitesse.com/foire-aux-questions/>

7) Annexes

Plan de la boîte de vitesse :



N°	Nom des pièces		
1	Arbre primaire	15	Pignon mené de 3 ^{ème}
6	Fourchette de 3 ^{ème} /4 ^{ème}	16	Pignon mené de 2 ^{ème}
8	Carter de boîte de vitesses	17	Baladeur/synchroniseur de 2 ^{ème} /1 ^{ère} avec la MA
11	Baladeur de 5 ^{ème}	19	Couronne de différentiel
12	Pignon mené de 5 ^{ème}	22	Boîtier de différentiel
		23	Arbre secondaire

http://ww2.ac-poitiers.fr/vehicules-materiels/IMG/pdf/la_boite_de_vitesses.pdf

Schéma des changements de vitesses :

