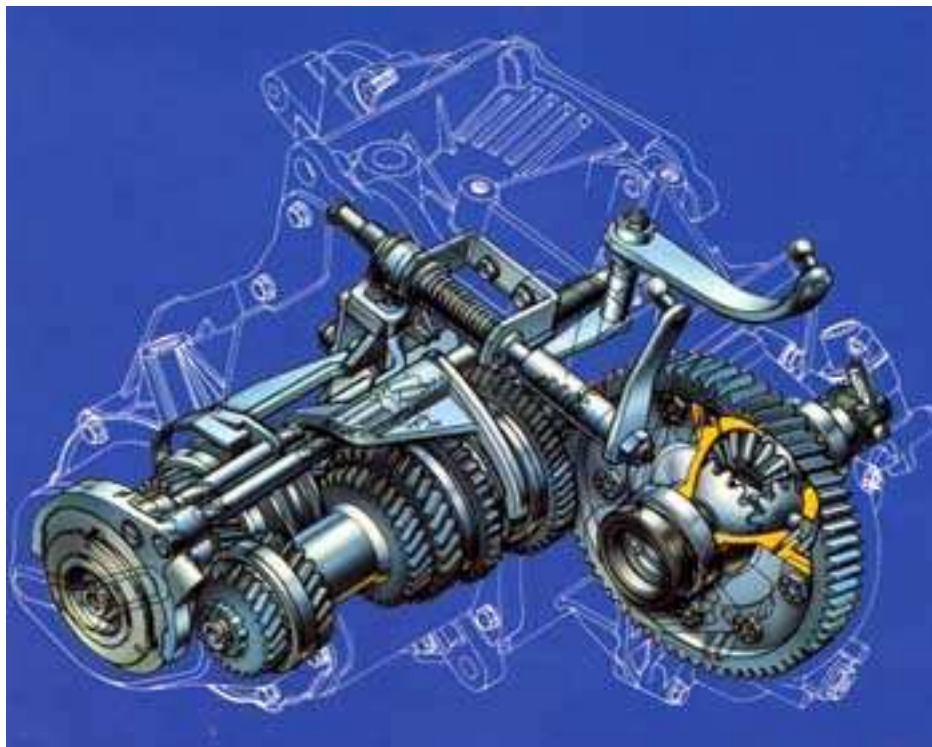




IG2k/GMU1

CONCEPTION DES SYSTÈMES

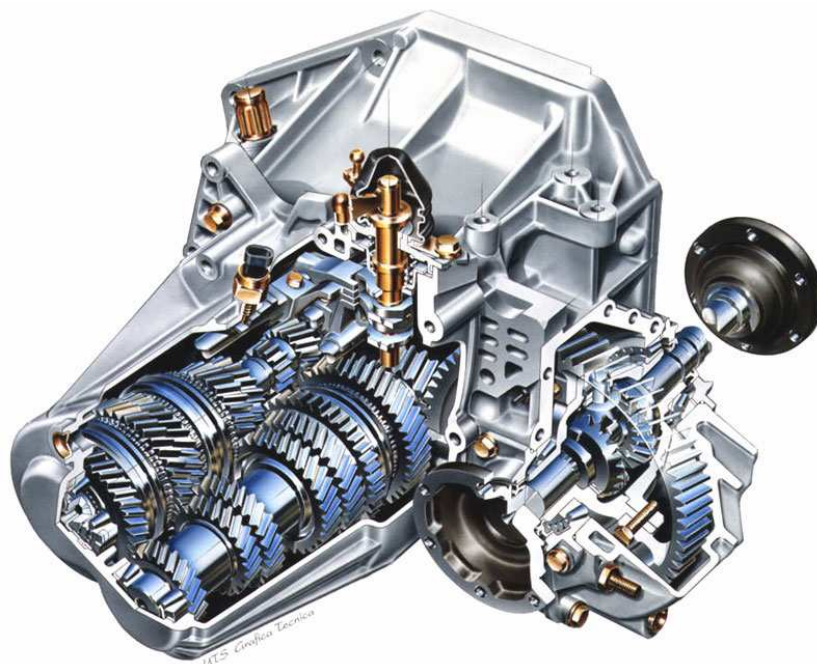
TRAVAUX PRATIQUES – DOCUMENTATION BOITE DE VITESSES MANUELLE



LA BOÎTE DE VITESSES MANUELLE

Organe existant pratiquement depuis le début de l'automobile, la boîte de vitesses manuelle est à l'automobile ce que le dérailleur est au vélo.

I. RÔLE



La transmission à 6 rapports des Alfa Roméo 147, 156 et 166

Un moteur alternatif à combustion interne tourne toujours beaucoup plus vite que les roues du véhicule qu'il propulse. La vitesse de ce véhicule est en général éminemment variable alors que le régime de rotation de son moteur doit non seulement rester à l'intérieur d'une zone comprise entre un maximum et un minimum, mais aussi le plus près possible de son point de rendement le plus favorable - point qui se déplace en fonction de la puissance requise. Il est donc nécessaire de prévoir un système qui permette de varier le rapport des vitesses de rotation entre les roues et le moteur.

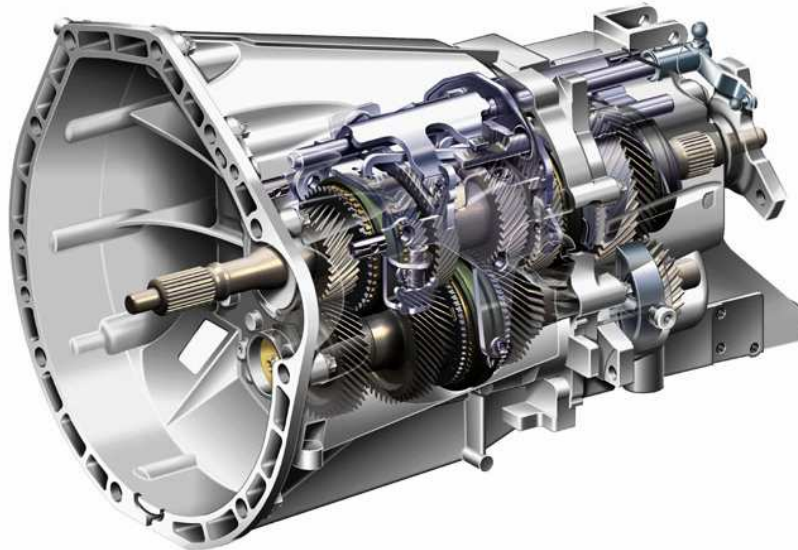
La solution qui a été et qui reste encore (tout au moins en Europe) la plus courante consiste à prévoir une série d'engrenages de nombres de dents respectifs différents enclos dans un carter étanche partiellement rempli d'huile. Un de ces rapports est sélectionné en fonction des circonstances par le conducteur après que la liaison moteur - boîte de vitesse ait été coupée en débrayant. Ce procédé archaïque a été si bien développé et amélioré au cours du siècle passé qu'il donne encore satisfaction aujourd'hui... à condition que le conducteur soit convenablement formé.



Une boîte à vitesses montée par GM USA sur des véhicules à propulsion

II. PRINCIPE

Une boîte à vitesses moderne d'automobile comporte 5 ou 6 rapports alors que les poids-lourds en ont jusqu'à 16. Ces rapports, engendrés par des engrenages qui constituent des systèmes de leviers rotatifs, sont dits de démultiplication (réduction) ou de surmultiplication. Un pignon de 10 dents entraînant une roue de 40 dents réalise un rapport de démultiplication de 4, c'est à dire que la roue dentée tournera 4 fois moins vite que le pignon. Comme la puissance est le produit du couple multiplié par la vitesse de rotation, il en résulte que le couple de la roue de 40 dents sera, si l'on néglige les pertes par friction, 4 fois plus important que le couple appliqué sur le pignon de 10 dents.

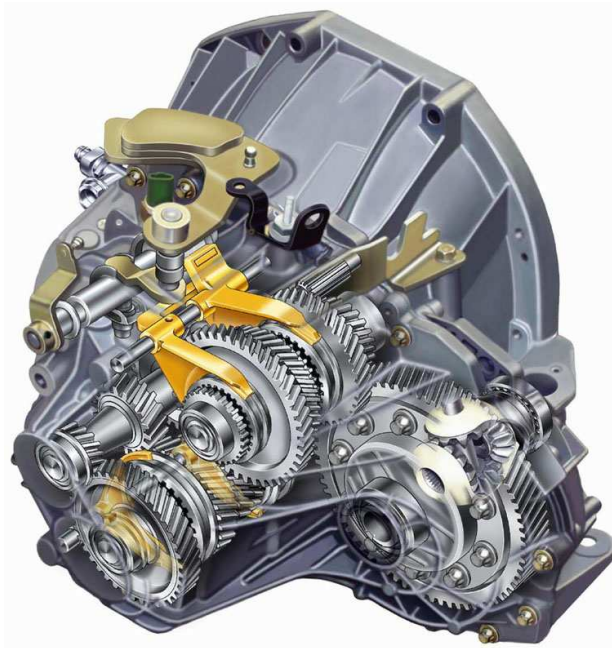


Transmission à 6 rapports de la Mercedes Classe C

Pour clarifier, laissons les roues motrices convertir ce couple en force de traction. Cette force est proportionnelle au couple exercé sur lesdites roues. Donc, toutes conditions étant égales par ailleurs, la force de traction est proportionnelle au rapport de boîte. On en déduit qu'à régime moteur égal la vitesse du véhicule est inversement proportionnelle au rapport de démultiplication - ou réciproquement.

Pour démarrer un lourd véhicule en montée une grande force de traction est nécessaire, donc un rapport de démultiplication important (dit "court"). Afin que le moteur ne mouline pas lorsque le véhicule est lancé en vitesse de croisière et que la force de traction nécessaire est réduite, il faut au contraire un rapport dit "long". Ce besoin est d'autant plus grand que le véhicule est aérodynamique.

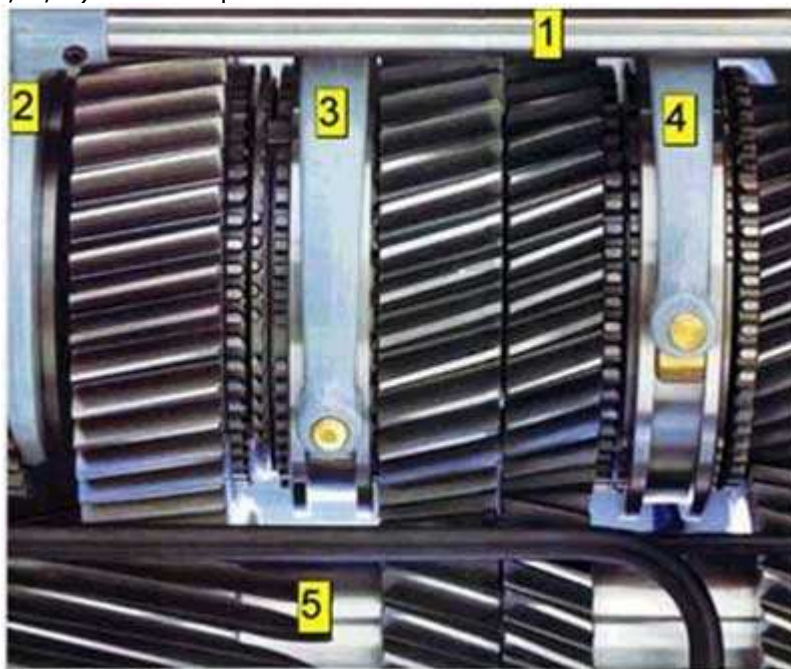
Et entre ces deux extrêmes, toutes sortes de conditions surviennent et chacune nécessiterait un rapport différent. En pratique, on se contente de compromis car on ne peut multiplier à l'infini le nombre de rapports d'une transmission à engrenages, ne serait-ce que du fait que les nombres de dents doivent nécessairement être entiers.



Boîte Renault PK4

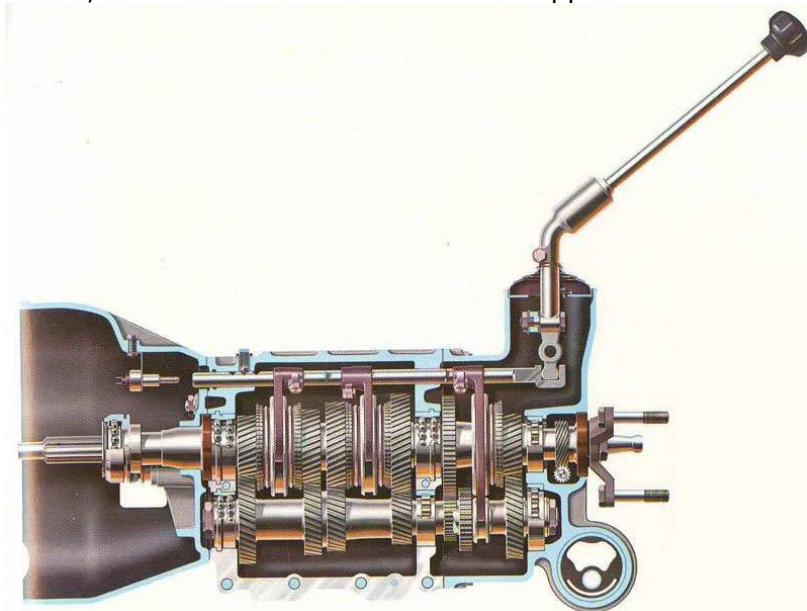
III. FONCTIONNEMENT

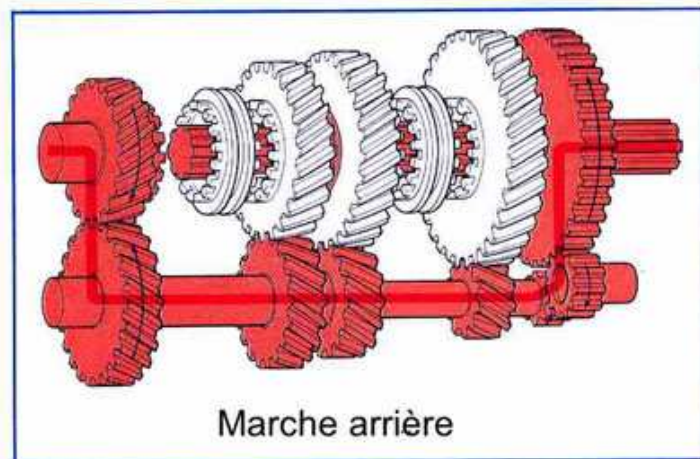
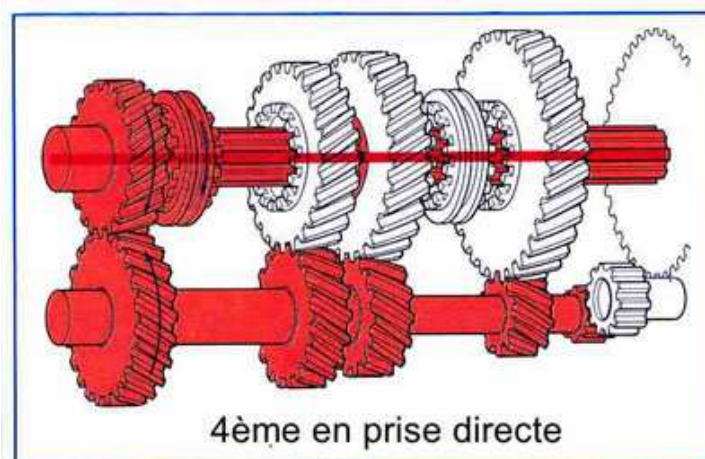
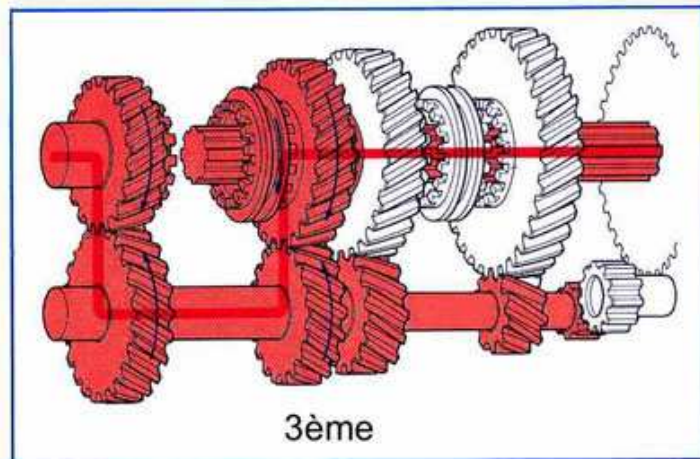
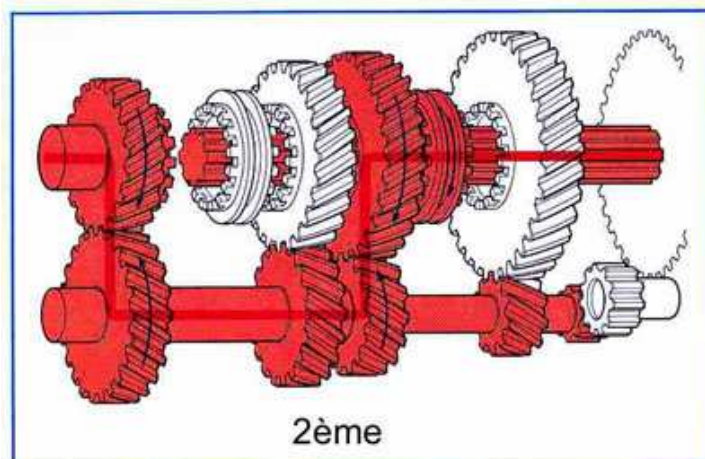
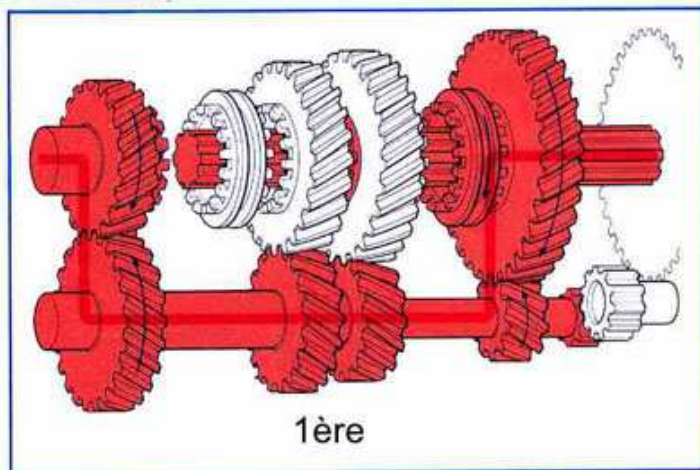
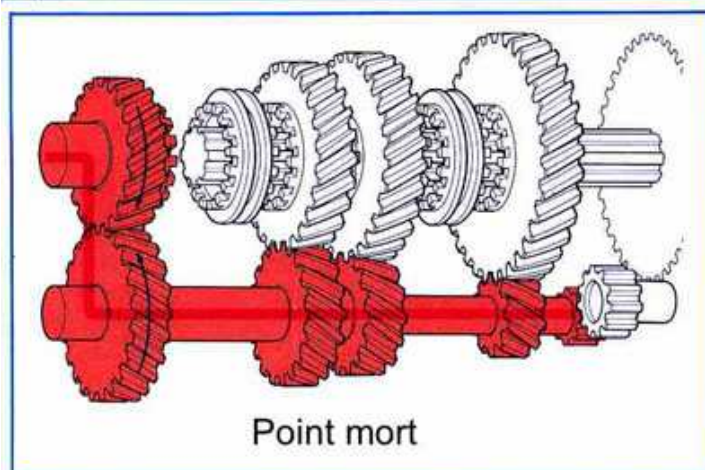
Les boîtes à vitesses automobiles ont des engrenages constamment en prise, mais dont l'un des deux pignons est monté fou (il peut tourner indépendamment) sur son arbre. Au point mort, aucun des engrenages n'est solidarisé avec deux arbres. Les baladeurs sont, eux, entraînés par leur arbre tout en pouvant coulisser axialement sur celui-ci. Le levier de vitesses actionne les axes (1) sur lesquels sont fixées les fourchettes (2, 3, 4) dans lesquelles tournent les baladeurs.



Chaque fourchette est actionnée par un axe différent, et lorsqu'on déplace le levier transversalement au point mort, on passe d'un axe de fourchette à l'autre et on se met ainsi en position de commander un autre baladeur. Sur l'image, les baladeurs (2) et (4) sont au point mort alors que le (3) a été engagé en déplaçant le levier longitudinalement. Avant d'engager un baladeur il faut nécessairement dégager l'autre, donc ramener le levier au point mort.

Les pignons de l'arbre 5 sont tous solidaires dudit arbre, qui pourrait être sur cette figure soit le primaire (d'entrée) s'il s'agissait d'une boîte sans prise directe, soit l'intermédiaire (dit aussi "train fixe") s'il s'agit d'une boîte avec prise directe, comme ci-dessous la boîte à 5 rapports Alfa-Roméo des années 60-70.



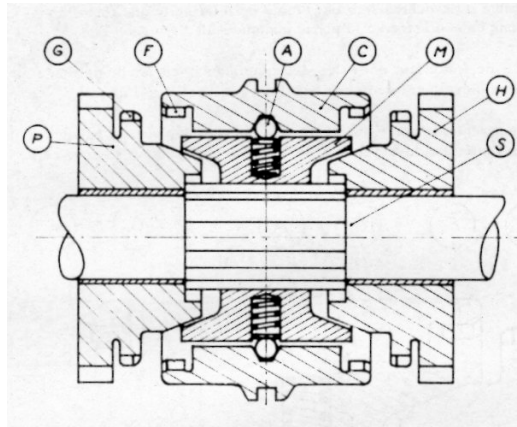
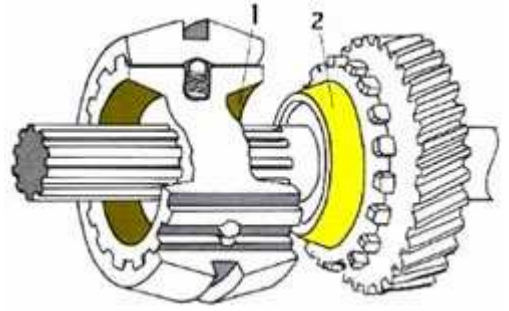


Dans ce cas, la boîte comporte 3 arbres:

- le primaire entraîné par son extrémité cannelée qui s'insère dans le disque d'embrayage.
- l'intermédiaire, ou train fixe, qui est un arbre de renvoi.
- le secondaire (ou arbre de sortie) sur lequel tous les pignons fous et baladeurs sont montés.

IV. SYNCHRONISATION

Les pignons fous sur leur arbre tournent à des régimes différents. Pour pouvoir engager les dents d'un baladeur dans les dents latérales d'un pignon, il faut synchroniser ces régimes, et c'est là le rôle des anneaux de synchronisation, dits "synchros", sortes de petits embrayages à cônes montés de chaque côté des baladeurs (1 et 2 ci-contre).



Ces synchros freinent ou accélèrent les arbres intermédiaire et primaire ainsi que le disque d'embrayage. Si la boîte est dépourvue de synchros ou s'ils sont très usés, c'est au conducteur de synchroniser les régimes au moyen d'un double débrayage. Il existe plusieurs types de synchroniseurs : Borg-Warner, Porsche, Peugeot, Renault (ci-contre).

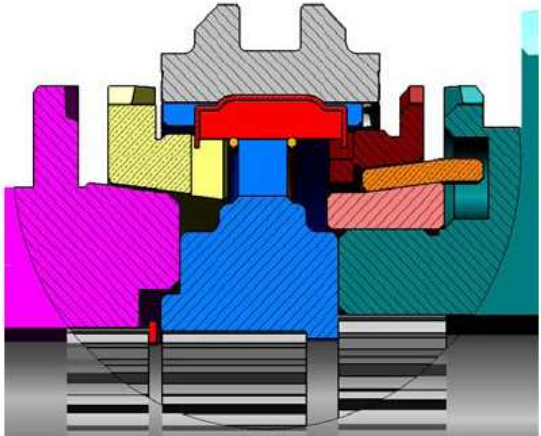
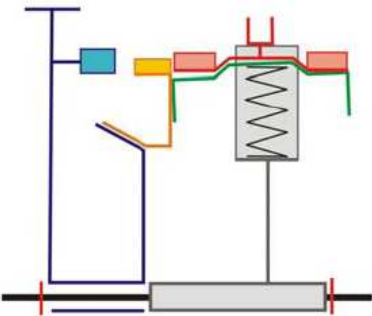
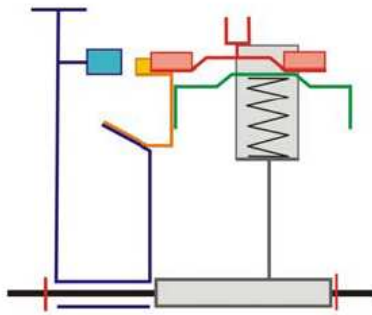
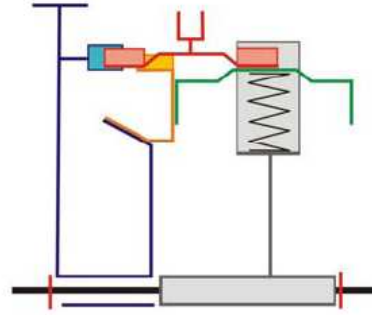


En montant les rapports, l'accélérateur est en principe relâché. Si la durée du changement de vitesse correspond au temps nécessaire au moteur pour ralentir jusqu'au régime auquel le disque d'embrayage tournera après que le nouveau rapport ait été enclenché, aucune secousse ni aucun patinage de l'embrayage ne surviennent.

Par contre, en rétrogradant, le moteur devrait être accéléré pendant le changement pour égaliser sa vitesse de rotation avec celle à laquelle a été porté le disque d'embrayage. Il n'est pas nécessaire d'exécuter un double débrayage pour cela: il suffit d'appuyer brièvement sur l'accélérateur.

Remarques :

- Le changement de rapport doit se faire sans couple dans la boîte car si l'on maintenait le couple, des efforts de retenues s'opposeraient au dégagement du rapport que l'on souhaite quitter. La commande du moteur lors d'un changement de rapport doit être alors en position débrayé et ralenti (pour pas que celui-ci s'emballe). D'où l'existence d'un embrayage entre le moteur et la boîte de vitesse.
- Par ailleurs, lors d'un changement de rapport, il y a passage par un « point mort » (aucun lien entre les deux arbres de la boîte) pendant lequel le moteur, s'il était toujours accéléré et débrayé, n'ayant plus de liaison avec les roues, s'emballerait et rendrait totalement impossible l'engagement d'un nouveau rapport.

Phases de fonctionnement	Schémas et commentaires
<p>Position point mort</p> <p><i>Le baladeur est en position centrale</i> <i>Les clavettes sont plaquées par les ressorts à fil dans les rainures du baladeur</i> <i>Les bagues de synchronisation sont libres par rapport aux pignons, n'engendrant aucun crabotage</i> <i>Les vitesses de rotation de l'arbre intermédiaire et de chaque pignon peuvent être différentes.</i></p>	
<p>Phase d'armement du passage en 4^{ème} vitesse</p> <p><i>Le baladeur est déplacé vers le pignon à craboter. Il entraîne avec lui les clavettes qui sont maintenues en pression par les deux ressorts.</i> <i>L'extrémité des clavettes pousse alors l'anneau de synchronisation vers le cône mâle du pignon, jusqu'au contact des deux cônes.</i></p>	
<p>Phase de synchronisation des vitesses de rotation</p> <p><i>Si les vitesses du baladeur et du pignon fou sont différents, l'anneau de synchronisation subit une friction pour amener le pignon à la même vitesse de rotation que celle du baladeur. Cette friction a pour conséquence, la création d'un couple sur l'anneau de synchronisation. Les encoches de l'anneau sont fortement en appui contre les faces latérales des clavettes. Tant qu'il n'y a pas égalité de vitesse, les pentes obliques des dents de l'anneau de synchronisation sont maintenues avec force en appui contre les pentes des dents du baladeur. Le baladeur ne peut donc pas continuer sa progression. Il y a interdiction.</i></p>	
<p>Phase d'indexage et de crabotage</p> <p><i>L'ensemble moyeu-baladeur et le pignon fou tournent à la même vitesse. Le couple sur l'anneau de synchronisation disparaît. Les dents du baladeur ramènent l'anneau à sa position initiale. Il n'y a plus d'obstacle, la denture du baladeur peut passer celle de l'anneau de synchronisation et se craboter avec celle du pignon fou.</i></p>	

V. DISPOSITIFS DE PASSAGE DES VITESSES

Dispositifs de commande des vitesses.

Les axes de fourchette peuvent se déplacer en translation rectiligne et sont solidaires des fourchettes qui sont en liaison pivot avec les manchons de crabotages. Pour passer une vitesse, on déplace le manchon de crabotage correspondant par l'intermédiaire de l'ensemble, fourchette, axe de fourchette, étrier situé à l'extrémité de l'axe, en agissant sur « un doigt de passage ».

Le doigt de passage est amené dans l'étrier correspondant à la vitesse sélectionnée par un mouvement de « sélection » pour mettre le doigt en face de la « ligne » puis un mouvement de passage » permet l'engagement du rapport.

Ces deux mouvements sont assurés par un mécanisme extérieur commandé par le levier de vitesse. Pour atteindre tous les rapports, le levier de vitesse doit se déplacer sur une grille. Il existe plusieurs grilles, elles correspondent à différentes architecture de boîte.

Dispositifs de sécurité.

Avec le mécanisme de doigt de passage dans les étriers des axes de fourchette, il est possible de passer deux vitesses la fois. Ce qui impliquerait une rupture de la boîte de vitesse. Pour empêcher ce dysfonctionnement, il existe des dispositifs de verrouillage. En général, les verrouillages sont de types :

- verrouillage à plaquette,
- verrouillage à bille,
- verrouillage ancre,
- verrouillage disque,

Verrouillage à disque :

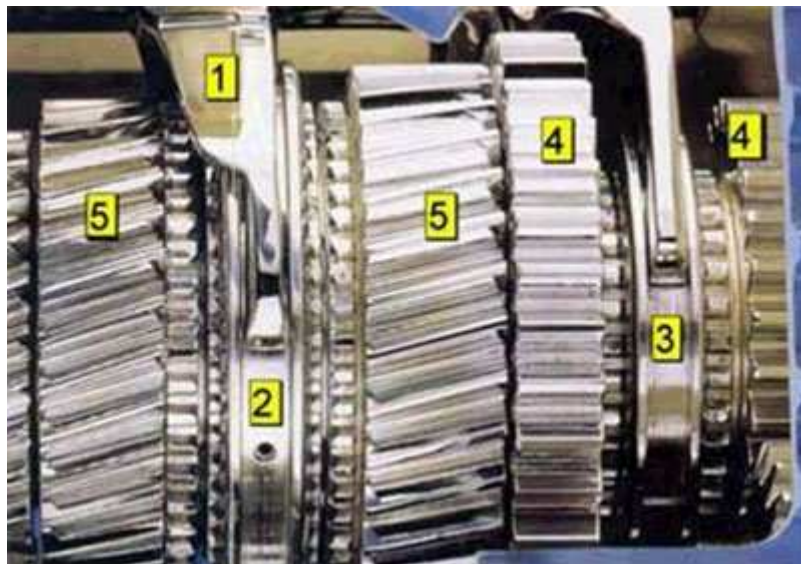
Les axes de fourchette sont disposés aux extrémités d'un triangle (voir figure ci-dessous). Dans une section transversale, un disque est assuré le verrouillage des deux axes sollicités. Pour cela, les trois axes présentent un fraisage, dans un même plan lorsque la commande est au point mort : ces fraisages sont donc en vis à vis. Entre ces trois axes et entre les fraisages est situé un disque de diamètre supérieur au cercle tangent intérieur aux sections circulaires des axes de fourchette, mais de diamètre inférieur au cercle tangent à une de ces sections circulaires et aux deux autres fraisages cylindriques en vis à vis.

Verrouillage à bille :

Le principe de verrouillage bille est le même que celui du verrouillage à disque, sauf qu'ici, c'est une bille qui coulisse dans un perçage perpendiculaire aux axes de fourchette et qui est prisonnière entre deux fraisages usinés sur les axes en vis à vis. Il y a donc interdiction de déplacer les deux axes de fourchette en même temps.

VI. ENGRENAGES

1. Fourchette
2. Baladeur avec synchroniseurs.
3. Baladeur sans synchroniseurs.
4. Pignons à taille droite de marche arrière et rampante.
5. Pignons à taille hélicoïdale de 1^{ère} et 2^{nde}.



La taille hélicoïdale des dents réduit fortement le bruit, mais génère une poussée axiale et accroît les pertes par friction. La taille droite n'est plus utilisée de nos jours que sur des voitures de course ainsi que pour la marche arrière et la rampante qui équipe certaines boîtes à vitesses de poids-lourds.



Ces deux engrenages sont plus étroits (fig. ci-dessus) parce qu'ils ne sont pas censés être utilisés fréquemment à plein couple du moteur.

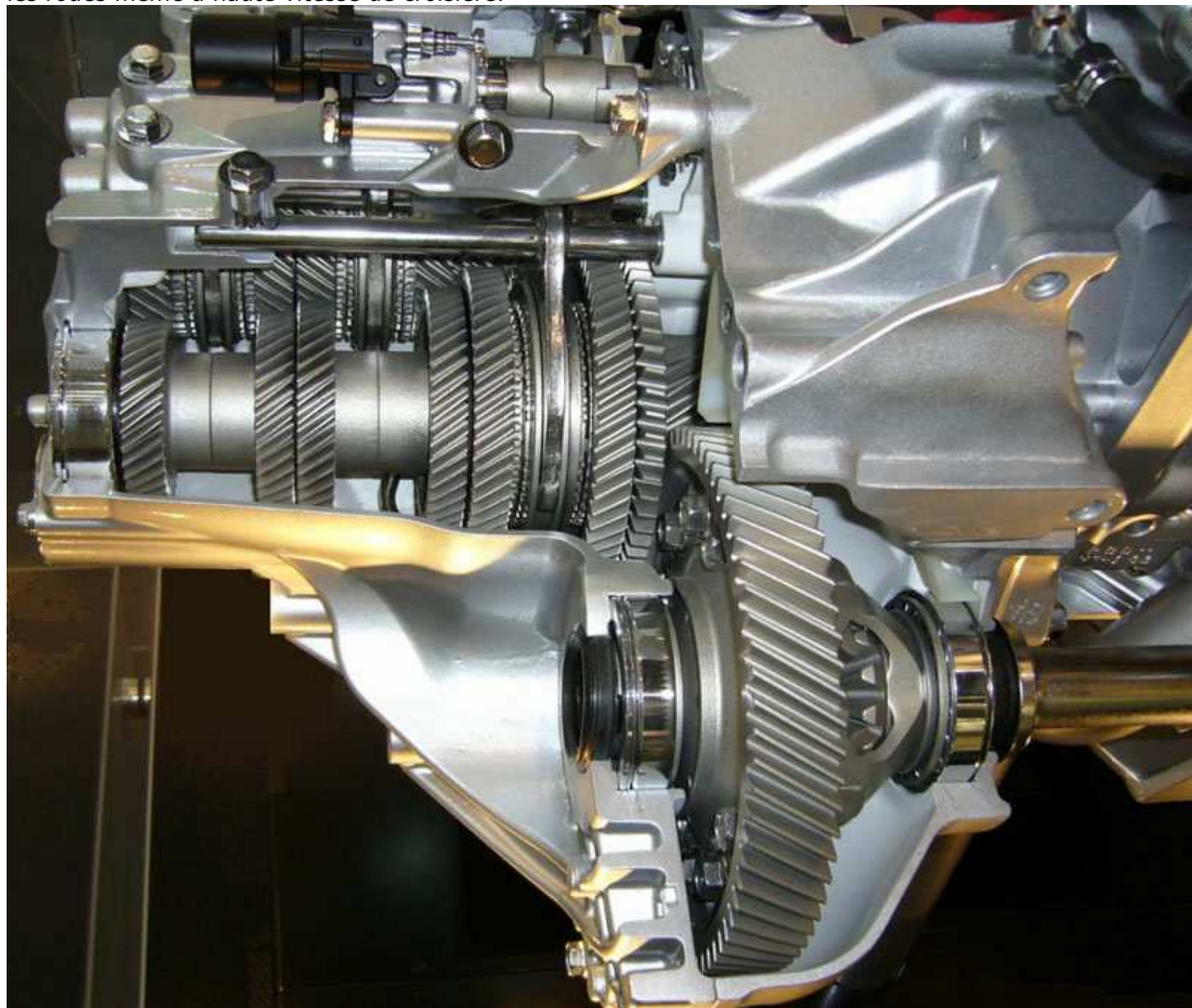
Le rendement d'un engrenage à taille hélicoïdale est d'environ 98%. Une boîte sans prise directe telle que montée dans les voitures tractions ou à boîte-pont à l'arrière à un rendement analogue sur tous ses rapports car elle ne comporte jamais qu'un seul engrenage en charge.



La boîte automatisée Ricardo de l'Audi R8 trois fois vainqueur des 24 Heures du Mans. L'arbre primaire est surbaissé pour l'aligner avec le vilebrequin du moteur lubrifié par carter sec

Par contre, une boîte avec prise directe utilise deux engrenages en série sur ses autres rapports et elle présente donc un rendement moindre sur ceux là, mais proche de 100% en prise directe. Cette prise directe peut être le dernier rapport, ce qui est avantageux car c'est le plus utilisé sur route et autoroute, ou l'avant dernier, le dernier étant alors surmultiplié.

Que l'une ou l'autre solution soit choisie ne change pas le rapport total de transmission si le rapport de pont est ajusté en conséquence. En effet les rapports finaux de transmission sont le produit des rapports de boîte par celui de pont. Ce dernier est toujours une démultiplication car le moteur tourne plus vite que les roues même à haute vitesse de croisière.



Boîte de vitesses Honda

La conception des engrenages est une affaire de compromis. Le cahier des charges d'une denture comporte les éléments suivants : la démultiplication, le volume disponible, le couple à transmettre, les contraintes admissibles par le matériau, la tenue à l'écaillage, l'acoustique et les contraintes d'industrialisation.

A titre d'exemple, la boîte de vitesses dénommée 'MA' du groupe PSA Peugeot-Citroën équipe une partie importante des véhicules d'entrée de gamme du groupe : Saxo, 106, 206, C3, etc. Elle est produite à environ 4500 exemplaires par jour. L'architecture classique des boîtes de vitesses manuelles se retrouve. La puissance est transmise à un arbre primaire équipé de 6 dentures (5 vitesses de marche avant et 1 vitesse de marche arrière). Les boîtes de vitesses automobiles manuelles à 5 rapports possèdent environ 15 systèmes de dentures différentes. Ces dentures sont le plus souvent conçues avec des modules de l'ordre de 2 à 3. Les boîtes de vitesses automatiques possèdent une architecture complètement différente, et utilisent plutôt des modules de l'ordre de 1 à 1.5. D'un point de vue plus global, la mécanique générale ou l'industrie des véhicules lourds travaillent majoritairement avec des dentures à module compris entre 2 et 6, mais certaines applications peuvent aller jusqu'à des modules de 10 (organes de transmission de

puissance de très grosses puissances, exemple : moteur de paquebot). A l'opposé de cela, il est possible de citer l'industrie de l'horlogerie qui produit des quantités très importantes de dentures dans des valeurs de modules inférieures à 0.5 dans des alliages cuivre-béryllium ou des aciers de décolletage à fort taux de carbone.

Les matériaux composant les dentures en mécanique générale sont souvent des aciers de construction du type 42 Cr Mo 4, alors que l'industrie automobile privilégie l'emploi d'aciers à cémentation ou à carbonitruration avec des taux de carbone compris entre 0.15 et 0.3 % de carbone (27 Mn Cr 5, 27 Cr Mo 4, 16 Mn Cr 5).

VII. CLASSIFICATION DES BOÎTES DE VITESSES

Pour les véhicules à moteurs thermiques, on pourra distinguer les boîtes suivant trois fonctions techniques indépendantes :

- la technologie des réducteurs : par engrenages classiques, train épicycloïdal, courroie...
- le système de commande : manuelle, semi-automatique, automatique, séquentielle...
- la synchronisation : autorisant le changement de rapport en marche ou à l'arrêt seulement.
- enfin l'orientation qui n'a d'influence que sur la géométrie des liaisons avec l'arbre moteur et le différentiel.

L'architecture est différente suivant que le moteur est implanté transversalement (axe de rotation du vilebrequin parallèle à l'axe de rotation des roues) ou longitudinalement (axes orthogonaux) et que le mouvement est transmis aux roues avant, arrière, ou aux quatre roues.

À chaque combinaison correspond un type de boîte de vitesses différent.

VIII. BOÎTE MANUELLE À ENGRENAGES PARALLÈLES

1- Description

La boîte manuelle dite « à pignons toujours en prise » est la plus utilisée de nos jours; elle se distingue sur ce point avec les boîtes de machines outils qui disposent d'engrenages désaccouplés.

Ce type de boîte est constitué généralement de deux arbres portant des pignons :

- arbre d'entrée (ou primaire) lié à l'arbre moteur via l'embrayage, porte les pignons primaires fixes. Il y a autant de pignons que de rapports de boîte.
- arbre de sortie (ou secondaire) portant des pignons fous (engrenant respectivement avec un pignon de l'arbre d'entrée), les systèmes de crabotage et les synchroniseurs.
- le troisième arbre intervient pour la marche arrière uniquement. Il contient un pignon pouvant coulisser et s'intercaler entre un pignon de l'arbre d'entrée et un autre de l'arbre de sortie; ainsi on dispose d'un engrenage de plus entre les deux arbres (soit deux inversions de sens de rotation au lieu d'une), d'où la marche inversée. C'est le seul cas où l'engrenage n'est pas toujours en prise.

L'arbre de sortie est lié au couple conique du différentiel, intégré au carter de la boîte (pour les véhicules à traction avant) ou reporté sur le pont arrière (pour les véhicules à propulsion).

Le changement de rapport se fait par manipulation de coulisseaux actionnant crabots et synchroniseurs grâce aux fourchettes de commandes liées temporairement au levier de vitesses.

2- Fonctionnement

Le principe de ce type de boîte repose sur le choix de plusieurs couples de pignons (appelés engrenages) offrant des rapports de transmission différents. Chaque engrenage est constitué d'un pignon d'entrée solidaire de l'arbre primaire, et d'un autre pignon de sortie en liaison pivot avec l'arbre secondaire. Un rapport est enclenché lorsqu'un des pignons de sortie devient solidaire de l'arbre secondaire. Pendant ce temps les autres pignons tournent librement. On dit qu'ils sont fous.

Après débrayage, pour rendre un pignon fou solidaire de son arbre, il faut dans un premier temps le synchroniser avec son arbre, c'est à dire annuler la vitesse de rotation relative, puis le bloquer en rotation. La manœuvre est assurée par un synchroniseur (synchro) et un crabot montés sur des cannelures, donc en liaison glissière avec l'arbre, et commandés en translation par l'une des fourchettes. L'accouplement entre le crabot et le pignon correspondant s'effectue au moyen de dents, qui peuvent être frontales (créneaux) ou périphériques (cannelures). Les formes complémentaires des deux éléments assurent une transmission de la puissance par obstacle. Ce sont ces dents-là qui grognent lorsqu'on loupe la manœuvre, et pas les dents d'engrenage.

Le maintien du rapport enclenché se fait à l'aide d'un système de verrouillage des crabots sur l'arbre de sortie, mais aussi des coulisseaux de fourchette (entraînés par le levier de vitesses) sur le carter de boîte.

3- Engrenages

Dans ce type de boîte, on adopte généralement des engrenages à denture hélicoïdale. Ils sont plus silencieux car les dents en prise sont plus nombreuses (rapport de conduite amélioré); elles subissent chacune donc moins de charge que les pignons à dentures droites. Malheureusement, elles provoquent une poussée axiale, ce qui impose l'utilisation de roulements adaptés et un renforcement des paliers. Il faut noter que la marche arrière est obtenue avec des pignons à denture droite, ce qui explique le bruit si caractéristique. Ce même bruit est identifiable sur les voitures anciennes. Ce choix est imposé par le principe même de la marche arrière puisqu'un pignon est déplacé axialement pour relier les deux arbres (un engrenage supplémentaire pour l'inversion).

4- Prise directe

Sur certaines boîtes, lorsque les deux arbres sont en ligne, il est possible de les accoupler directement: pour la prise directe, l'un des manchons rend le pignon de sortie de l'arbre d'entrée solidaire à l'arbre secondaire. Les pignons fous ont donc 2 dentures différentes : l'une, périphérique, qui sert à transmettre le mouvement de l'arbre primaire au secondaire et l'autre, droite ou périphérique, pour le passage des vitesses. Ainsi, la denture périphérique des pignons est pas abîmée lors du passage des vitesses car les chocs lors de l'engrènement sont supportés par l'ensemble de la denture du synchro. Pour la marche arrière, l'axe tertiaire est déplacé par une fourchette et le pignon qu'il porte vient se placer entre les deux pignons du couple correspondant pour inverser le sens de rotation.

IX. BOÎTE SÉQUENTIELLE

1- Description

C'est une version dérivée de la boîte de vitesses manuelle qui reprend le même principe mécanique de pignons et crabots. Le passage de vitesses ne se fait plus mécaniquement par la manœuvre du conducteur au moyen d'un levier et d'une pédale de débrayage, mais au moyen d'un programmeur mécanique ou électro-hydraulique. Le conducteur ne peut pas choisir un rapport au hasard sinon un rapport consécutif à celui en service, ce qui constitue une séquence de passage de vitesses. C'est le cas des boîtes de motocyclettes, en particulier.

Le pilotage électronique de l'injection (ou du papillon motorisé) peut mettre le moteur au régime voulu pour le passage des vitesses, si bien que la position de l'accélérateur n'a momentanément plus d'influence pendant la durée du changement de rapport.

2- Fonctionnement

Ceux-ci sont pilotés par un système électronique expert, qui, en communiquant avec le système de contrôle du moteur, ordonne et gère le débrayage et les passages de vitesses au moment jugé optimum pour les performances requises par le conducteur et pour limiter la consommation de carburant. On trouve ce système chez différents constructeurs, sous l'appellation Sensodrive chez Citroën, Quickshift chez Renault, Selespeed chez Alfa Romeo, F1 chez Ferrari, sur les camions et les autobus. Le conducteur peut donner l'ordre du passage de vitesse au moyen d'une commande manuelle (levier ou bouton sur le volant ou palette derrière le volant) si la conception du système le permet.

X. BOÎTE À CRABOTS

1- Description

Le barillet de sélection, muni de cannelures, ou cames, provoque, en tournant, un déplacement latéral des fourchettes. Celles-ci déplacent latéralement les crabots, qui peuvent se solidariser avec un des pignons situé à leurs côtés.

Utilisé en compétition (rallye notamment) et sur les motos, cette boîte possède l'avantage de pouvoir se passer d'embrayage et d'avoir un meilleur rendement, au prix d'une usure qui peut être rapide et d'un claquement lors des passages de vitesse.

2- Fonctionnement

Une boîte manuelle (synchronisée) possède des synchros qui permettent de mettre à la même vitesse l'arbre primaire et l'arbre secondaire de boîte avant de passer le rapport. Une boîte à crabot ne possède pas ces synchros et la vitesse passe d'un coup et parfois violemment si les deux arbres n'ont pas la même vitesse. Ces boîtes ont souvent des engrenages à dentures droites qui supportent mieux les à-coups mais qui font plus de bruit et ont un meilleur rendement, car il n'y a pas de poussée latérale due aux pignons à denture hélicoïdale.

XI. BOÎTE AUTOMATIQUE

1- Description

La transmission automatique est un système capable d'assumer de manière autonome les fonctions de l'embrayage et de la boîte de vitesses. À l'identique d'une boîte de vitesses robotisée, c'est un système électro-hydraulique piloté par un calculateur électronique qui gère les passages de vitesses. Le levier de commande permet la sélection de plusieurs programmes :

- P : Frein de parking: la boîte est bloquée par l'enclenchement simultané d'au moins deux rapports.
- R : Marche arrière.
- N : Point mort (neutre).
- D : Conduite normale avec 3 ou 4 rapports (Drive).
- 2 : Conduite soit :
 - avec les seuls rapports de 1ère et 2ème, ce qui laisse le moteur prendre des tours, adapté à la conduite en montagne.
 - avec le seul rapport de 2ème (même au démarrage) pour faciliter les départ sur neige ou verglas.
- 1 ou L : Conduite en 1ère uniquement (Low), utilisée par exemple dans les fortes descentes; en position D, la voiture s'emballant très facilement.

Sur certains modèles, le conducteur peut, de plus, donner l'ordre du passage de vitesse au moyen d'une commande manuelle (levier ou bouton sur le volant ou palette derrière le volant).

Cette boîte est en général associée à un coupleur hydraulique, qui remplace l'embrayage classique à friction par un embrayage centrifuge à huile.

2- Fonctionnement

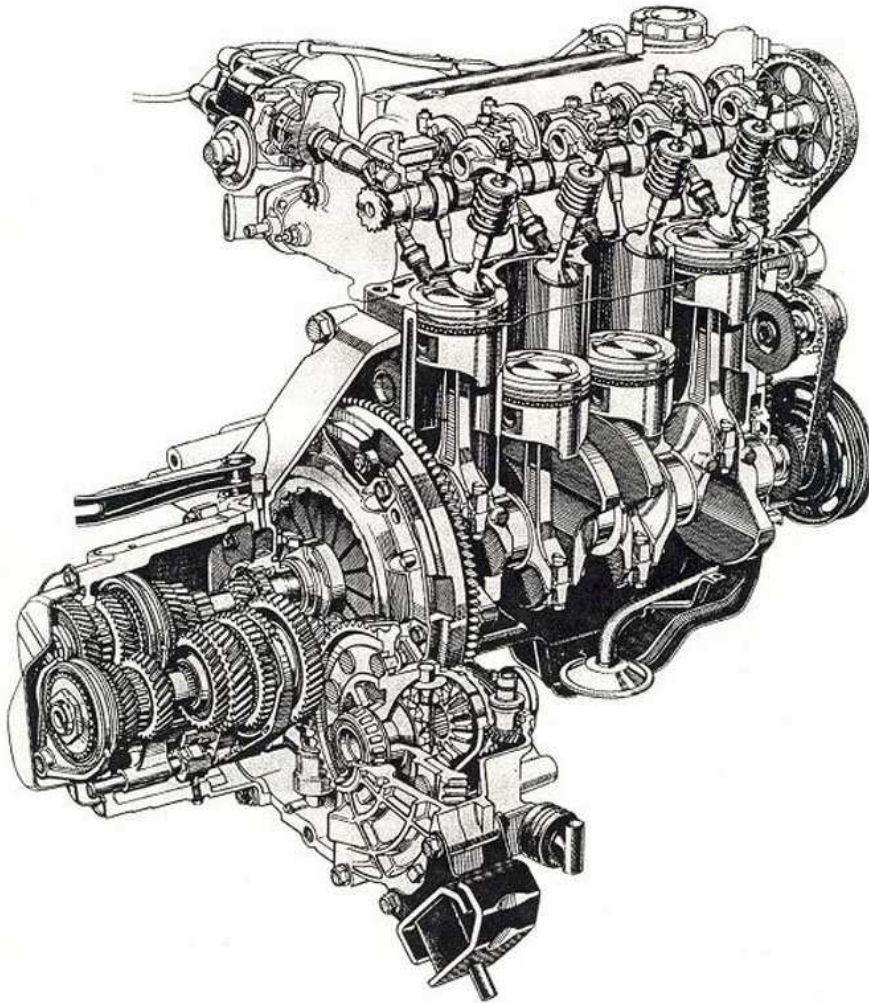
Vue de l'extérieur, cette boîte est disposée identiquement à la boîte manuelle entre le moteur et le différentiel-pont.

Cependant, la gestion des changements de vitesse requiert des adaptations technologiques :

- En amont, l'embrayage est remplacé par un convertisseur hydraulique de couple. Son rôle est de maintenir le couple d'entraînement tout en autorisant des glissements (équivalent du patinage inévitable lors du passage de rapport), et de séparer le moteur du reste de la chaîne lorsque la vitesse du véhicule s'annule.
- La constitution la plus répandue est celle de trains épicycloïdaux en cascade. En solidarisant par adhérence par le biais d'embrayages ou de freins, certaines parties de ces trains, on obtient des rapports différents. La sélection d'un rapport dépendant alors uniquement d'une combinaison d'ordre des pistons de commande. De ce fait, il n'y a aucun crabotage à piloter.
- Un étage, ou train épicycloïdal est constitué de différents composants, planétaires, satellites, porte satellites, qui tournent librement les uns par rapport aux autres (2 mobilités par étage).
- Une pompe hydraulique haute pression, intégrée dans la boîte, entraînée directement par le moteur, fournit l'énergie pour les actionneurs hydrauliques nécessaire aux embrayages et freins, et lubrifie sous pression les différents éléments.
- le système de commande prend en considération l'intention du conducteur (état des pédales d'accélérateur et frein) le régime du moteur, la vitesse du véhicule, et le couple transmis. Le meilleur rapport est alors appliqué. Un distributeur (équivalent de la carte à trous) envoie alors la pression vers les éléments concernés.
- Les premières générations de boîtes automatiques sont pilotées par des systèmes mécaniques, électromécaniques (boîte Cotal) ou hydrauliques. Un câble reliant la boîte à l'accélérateur asservit la boîte à la charge du moteur. La pression variable délivrée par la pompe donne une information proportionnelle au régime moteur. Ces paramètres permettent au système de contrôle de déclencher le passage des rapports en fonction des besoins.
- Les générations de boîtes actuelles sont pilotées par des calculateurs électroniques, lesquels, associés à de nombreux capteurs, permettent une gestion de plus en plus intelligente de la boîte.
- Note importante : le contrôle du niveau d'huile d'une boîte automatique se fait moteur tournant, la pompe à huile "remplissant" le convertisseur de couple. Ceci implique qu'une boîte automatique dispose d'une jauge.

XII. TYPES DE BOÎTE EN FONCTION DE LA DISPOSITION DU MOTEUR

Sur une voiture à propulsion, la boîte à vitesses est disposée derrière le moteur et l'embrayage, dans le tunnel de transmission, ce qui fait que le levier peut actionner directement les axes de fourchette, comme sur l'Alfa-Roméo illustrée précédemment.

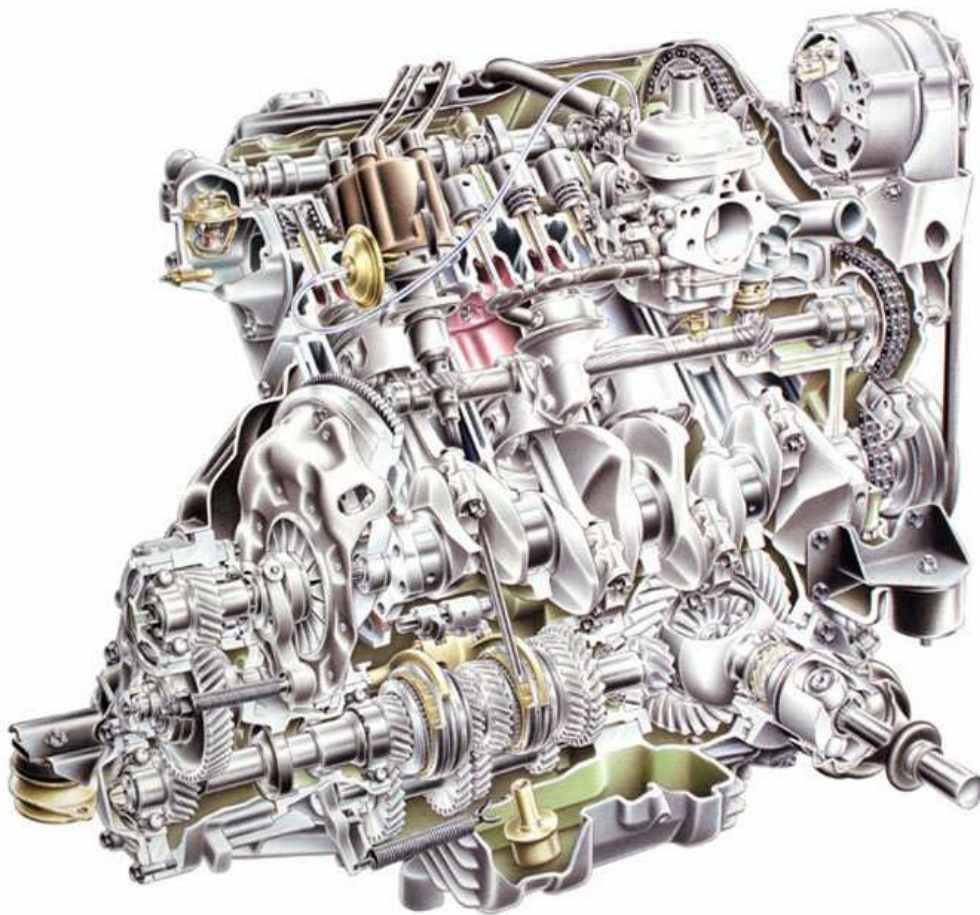
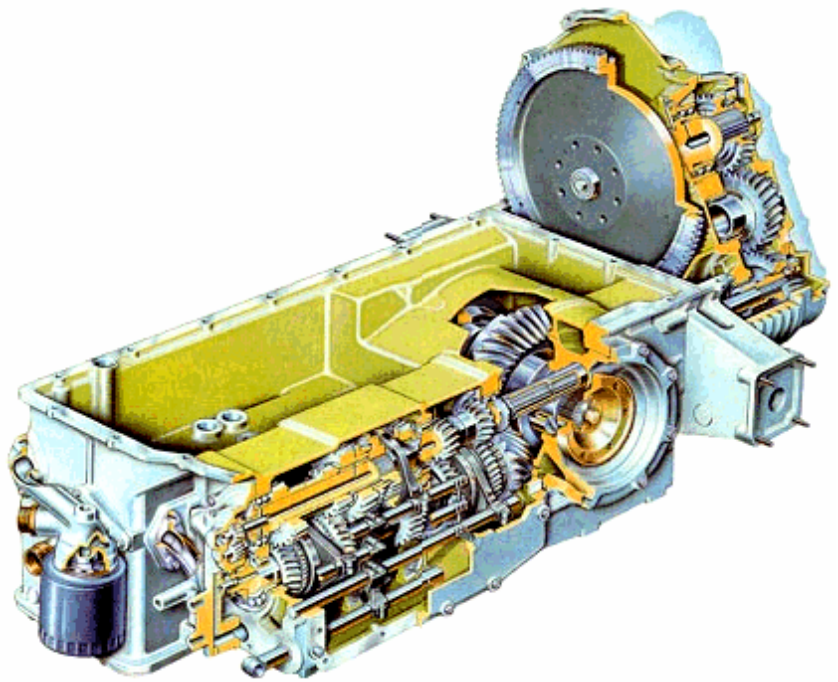


Boîte de vitesses de Mazda 626

Avec un moteur transversal, la disposition inaugurée par l'ingénieur Giacosa sur l'Autobianchi Primula en 1964 est aujourd'hui quasi universellement adoptée. Elle consiste à disposer le groupe motopropulseur de façon fortement asymétrique pour être à même de monter la boîte à vitesse en extrémité de la ligne d'arbre du moteur.

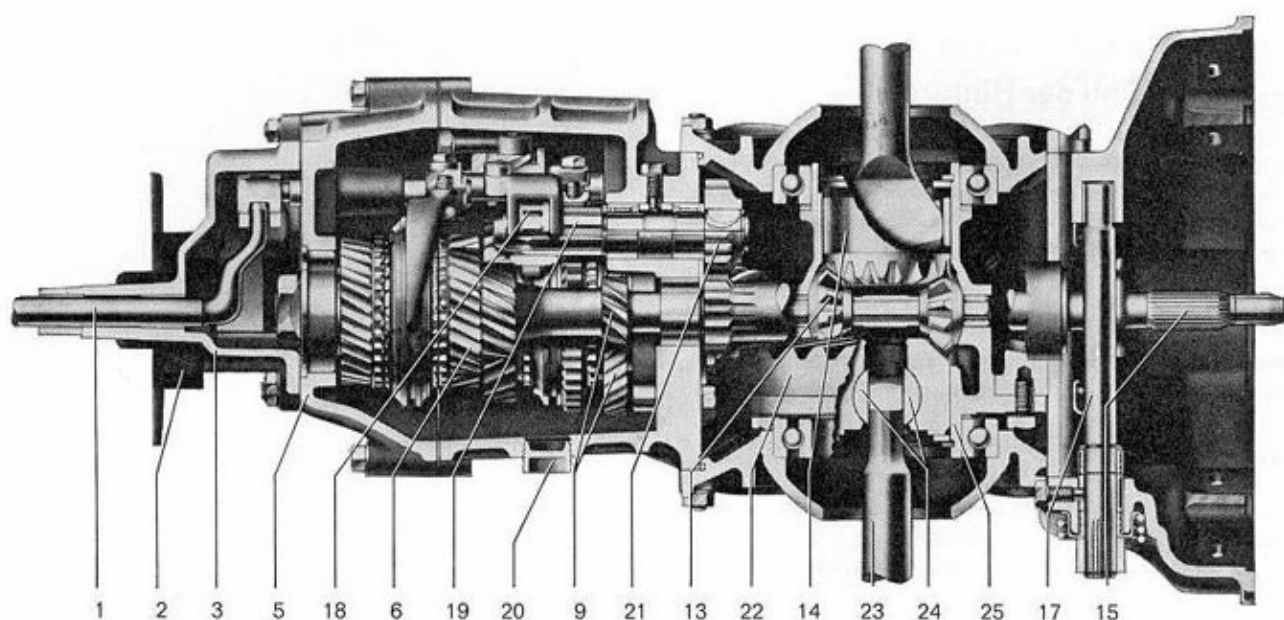
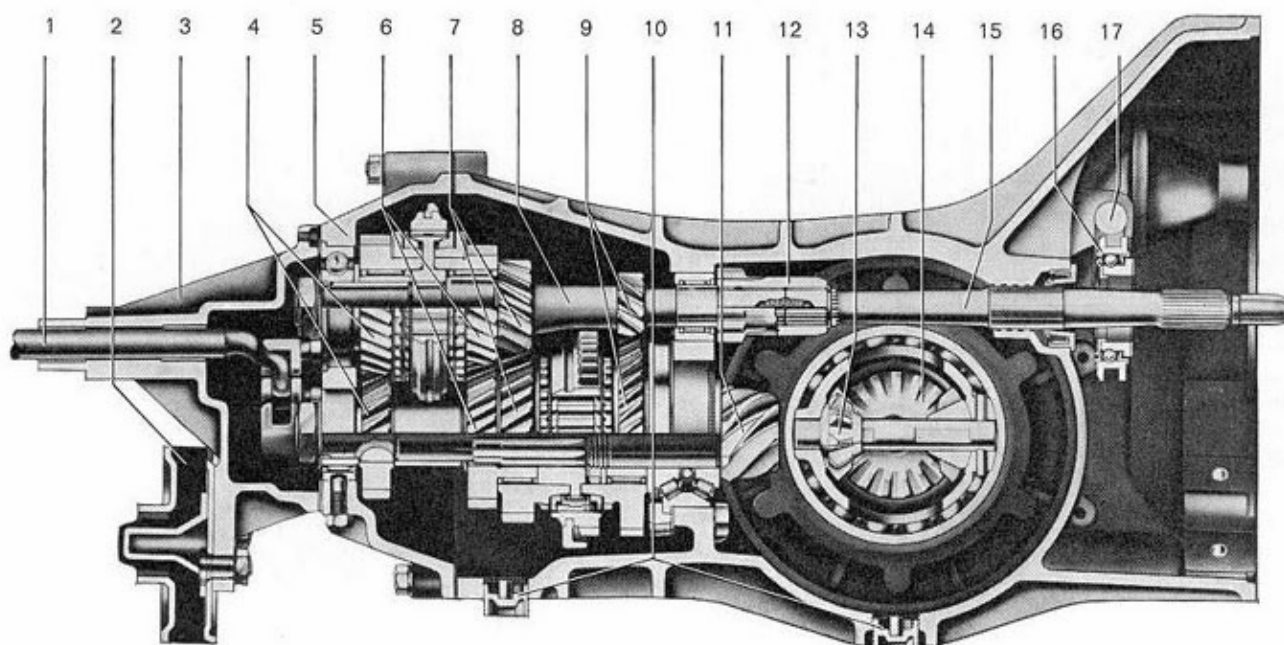
Le couple de pont et le différentiel sont alors logés dans le carter de boîte et sont lubrifiés par la même huile. Ce concept évite la cascade d'engrenages de renvoi, typiques des BMC Mini et Peugeot 104 et 204 dont la boîte était logée sous le vilebrequin et était lubrifiée par l'huile moteur.

Une solution particulière est celle que Ferrari a appliqué sur les Testarossa à moteur longitudinal arrière. Auparavant, Oldsmobile (Toronado), Triumph (1300, 1500) et Saab avaient également utilisé une architecture analogue.



Saab

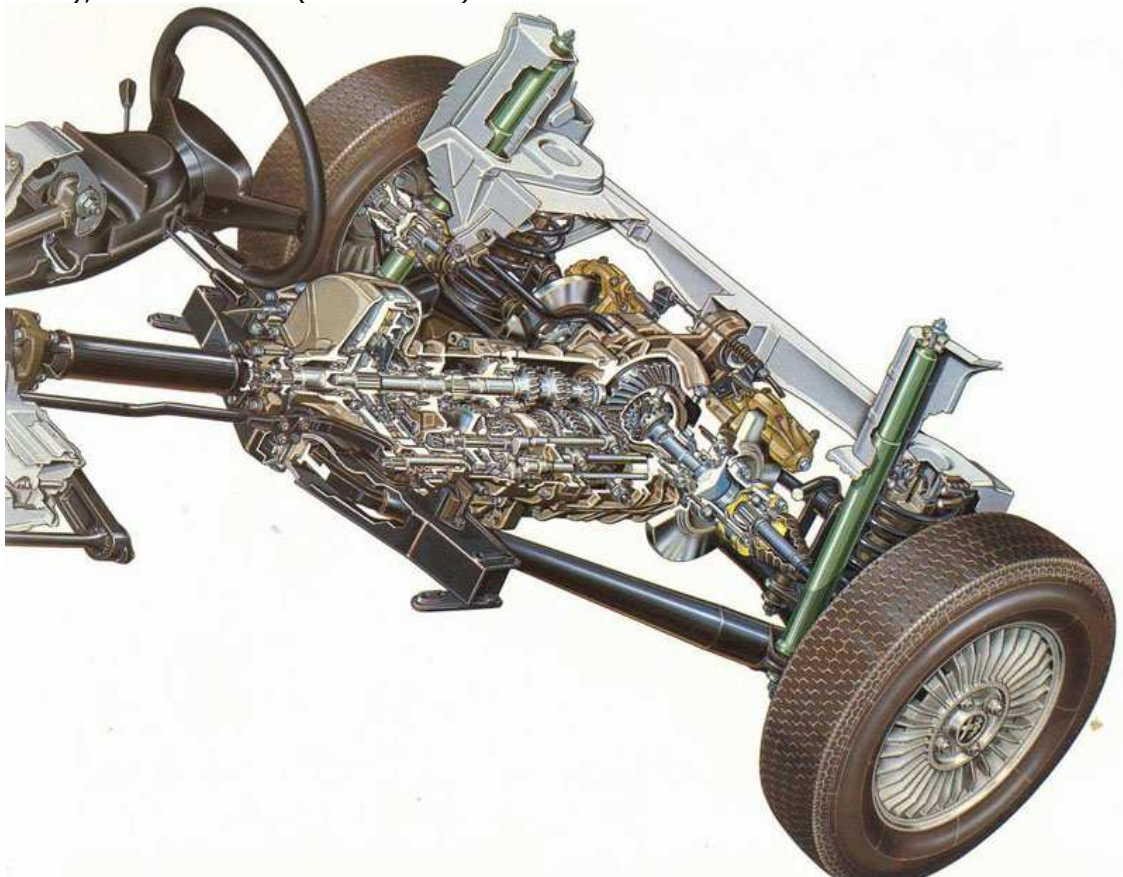
Si le moteur est disposé longitudinalement, mais près de l'essieu moteur, on adopte alors une boîte pont avec couple conique intégré, comme sur l'Audi R8 illustrée dans une page précédente. Mais en général, dans ce cas, la boîte est logée en porte-à-faux et l'arbre primaire passe par-dessus le différentiel.



- | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 1 Axe de commande | 8 Arbre primaire (partie avant) | 14 Planétaire du différentiel | 20 Bouchon de remplissage |
| 2 Support | 9 Engrenage de 1ère | 15 Arbre primaire (partie arrière) | 21 Pignon de marche arrière |
| 3 Carter | 10 Bouchons de vidange | 16 Butée d'embrayage | 22 Couronne du couple conique |
| 4 Engrenage de 4e | 11 Pignon du couple conique | 17 Axe de fourchette d'embrayage | 23 Arbre de roue |
| 5 Logement du roulement | 12 Pignon de marche arrière | 18 Pignon de marche arrière | 24 Joint articulé |
| 6 Engrenage de 3e | 13 Satellite du différentiel | 19 Arbre de marche arrière | 25 Carter de différentiel |
| 7 Engrenage de 2e | | | |

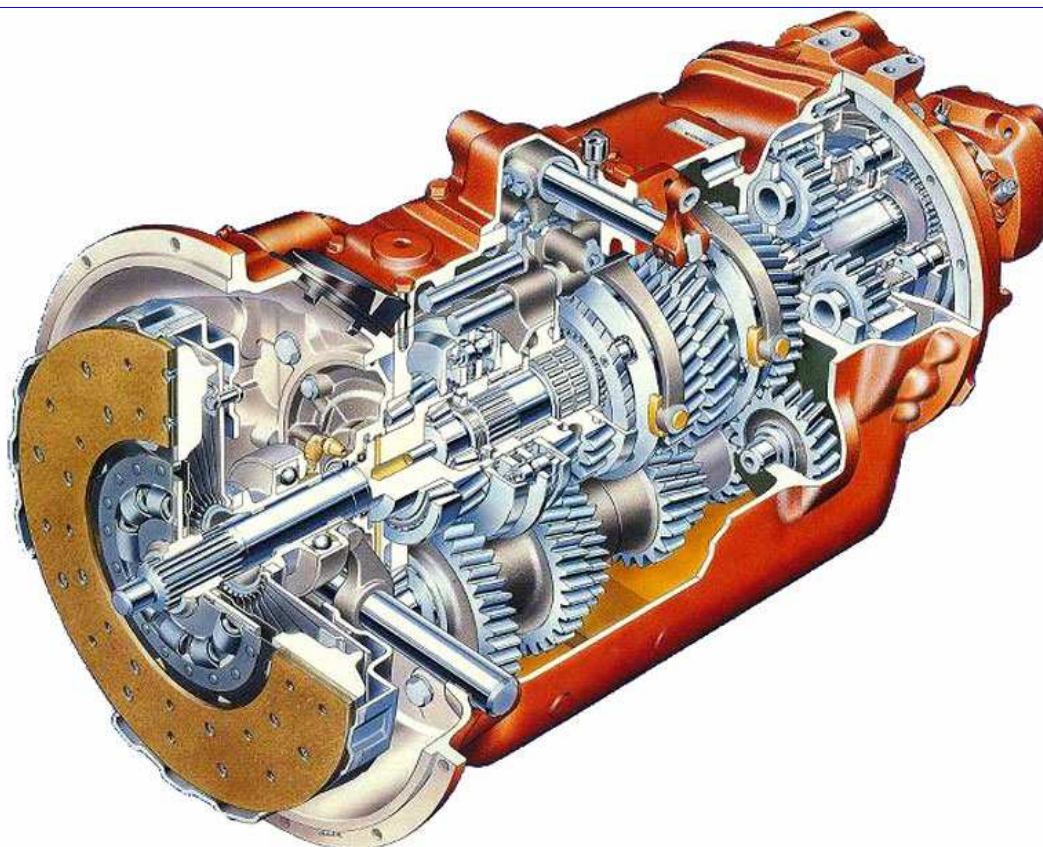
VW Coccinelle

Une telle transmission peut aussi être disposé à l'arrière d'une voiture à moteur avant pour une bonne répartition des masses entre les deux essieux, comme sur les dernières Maserati Quattroporte et Chevrolet Corvette, Alfa Romeo des années 80 (Alfetta, Giulietta, GTV, Alfa 6, 75), Porsche 924, 944, 968 et 928, Pontiac Tempest de 1961-63 et Lancia Aurelia puis Flaminia. L'embrayage est alors soit accolé au moteur (Porsche), soit à la boîte (Alfa Romeo).



Alfa-Romeo Alfetta

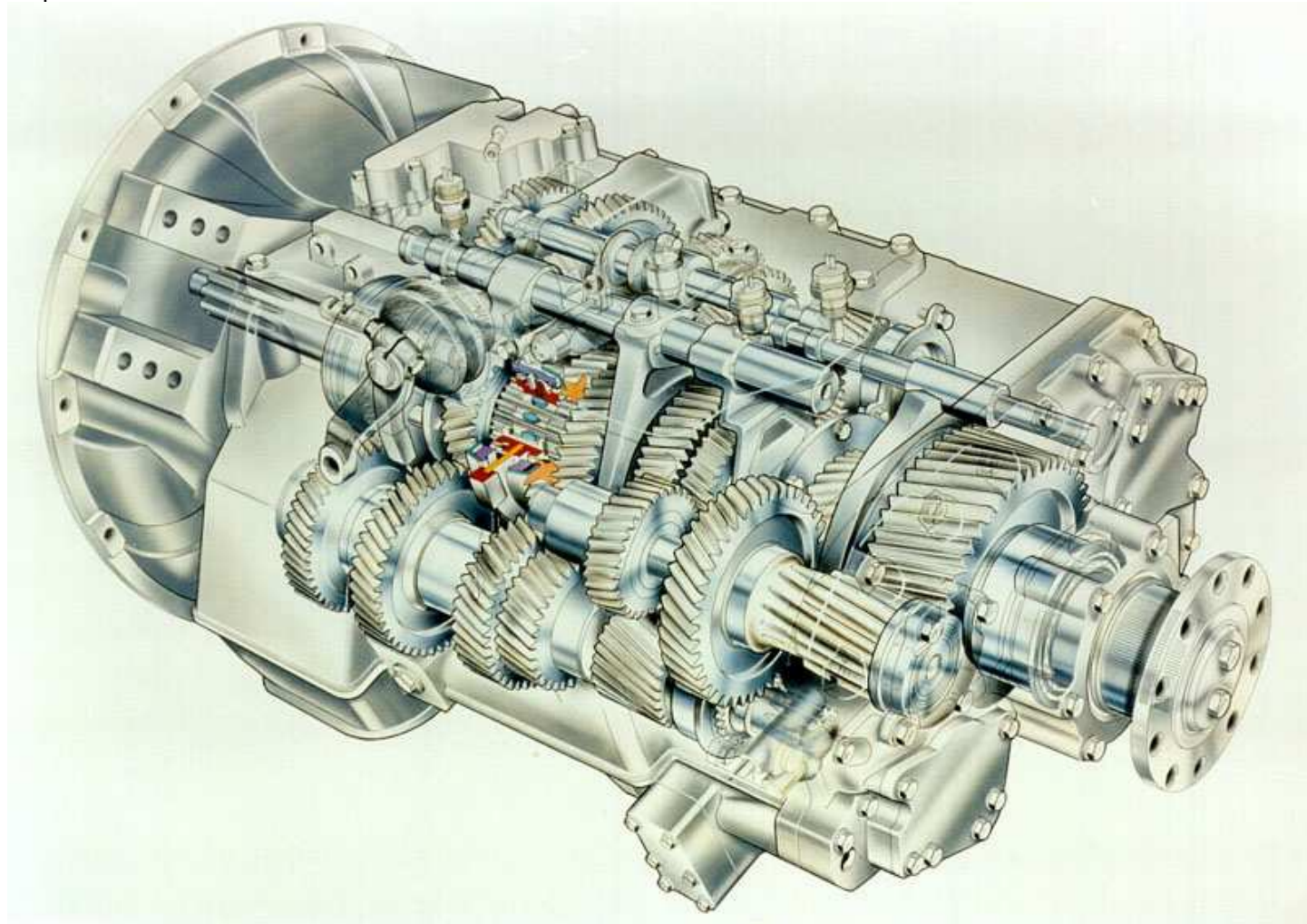
XIII. BOITES A DOUBLEURS DE GAMME



Boîtes de vitesses Scania

Les boîtes à vitesses de poids-lourds comportent un réducteur en aval qui double la gamme. La boîte Scania ci-dessus dispose de 2×5 rapports, soit les 5 premiers avec le réducteur aval enclenché et les 5 suivants avec ce dernier en prise directe. Chaque position du levier correspond donc à deux rapports, soit 1er et 6e, 2e et 7e, 3e et 8e, 4e et 9e, 5e et 10e. Le disque et le mécanisme d'embrayage à diaphragme sont en évidence. Ce dernier est solidaire du volant moteur alors que le disque entraîne l'arbre primaire de la boîte par des cannelures qui lui permettent de se dégager en position débrayée. Les boîtes poids-lourds de ZF, notamment, ont 4 rapports principaux commandés par un levier se déplaçant en H, un doubleur de gamme-réducteur aval et un médiateur amont procurant des rapports intermédiaires entre les principaux.

Le nombre total de rapports avant obtenu est dès lors égal à $2 \times 4 \times 2$, soit 16, ceci grâce à 5 engrenages seulement plus un réducteur doubleur de gamme. Ce dernier, tout comme le médiateur, est actionné par une commande présélective électropneumatique reliée à un commutateur sur le pommeau du levier de vitesse. Le médiateur change de rapport lorsque la pédale d'embrayage est enfoncée à fond alors que le réducteur-doubleur permute de gamme lorsque le levier passe au point mort. 4 marches arrière sont disponibles



Boîtes de vitesses Eaton-Fuller

Les boîtes de camion américaines Eaton-Fuller ont deux trains fixes opposés à 180° , ce qui permet de réduire la largeur des dentures de 40% et neutralise les charges radiales sur l'arbre secondaires avec ses baladeurs à crabots. Des versions synchronisées à denture hélicoïdale sont maintenant disponibles. Le réducteur-doubleur de gamme aval n'est pas planétaire, contrairement à celui des boîtes de camions européennes. Certaines versions ont un groupe aval à 3 rapports, dont un faisant office de médiateur uniquement disponible sur la gamme haute.

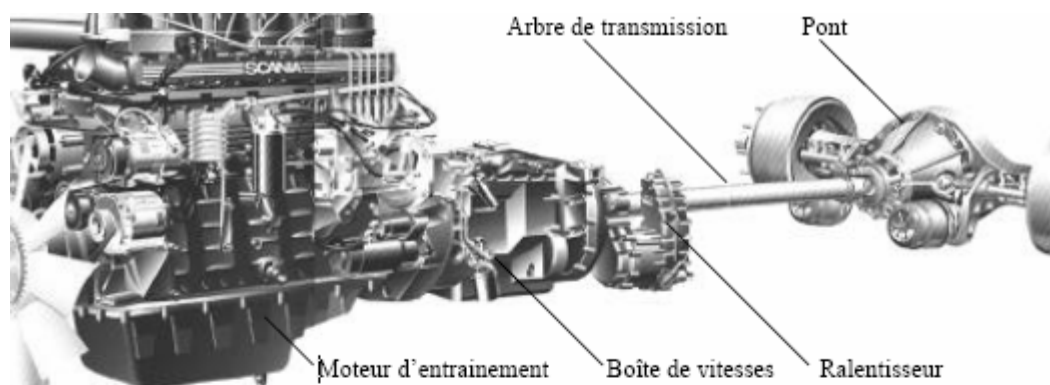


Figure 1 : Transmission de camion

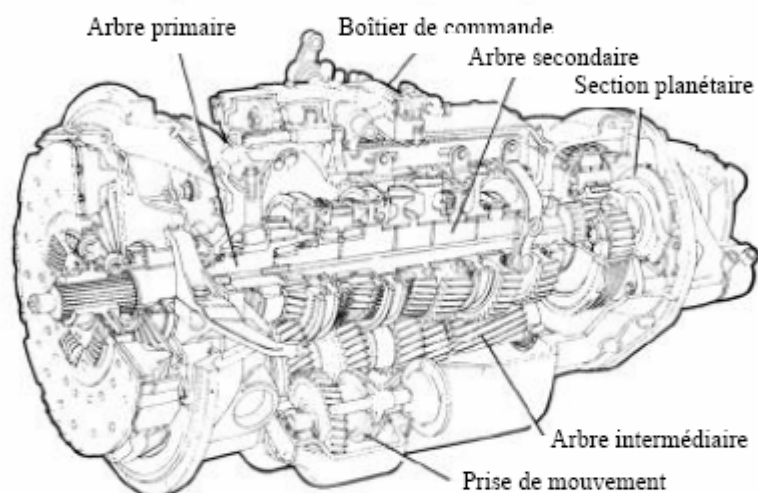


Figure 2 : Boîte Scania GRS900

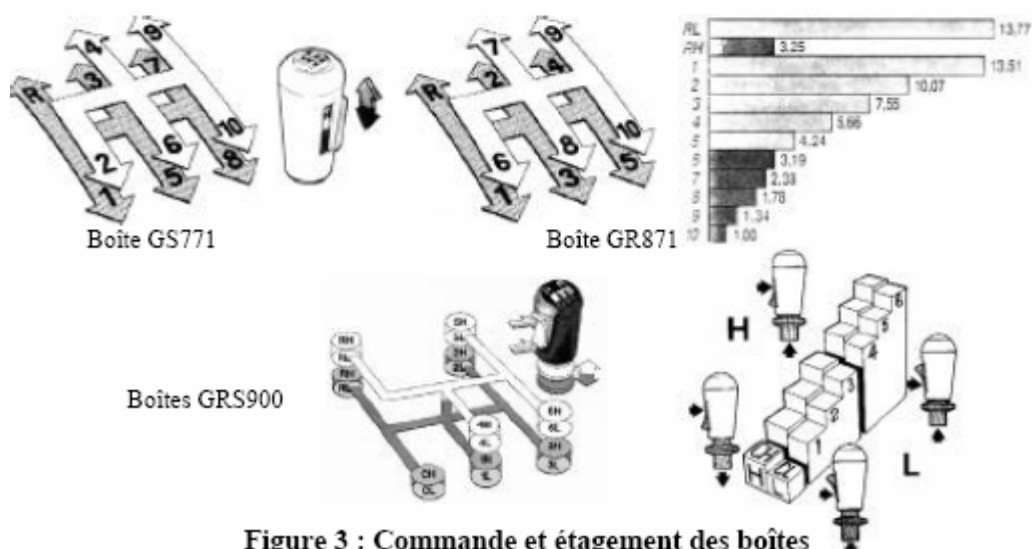
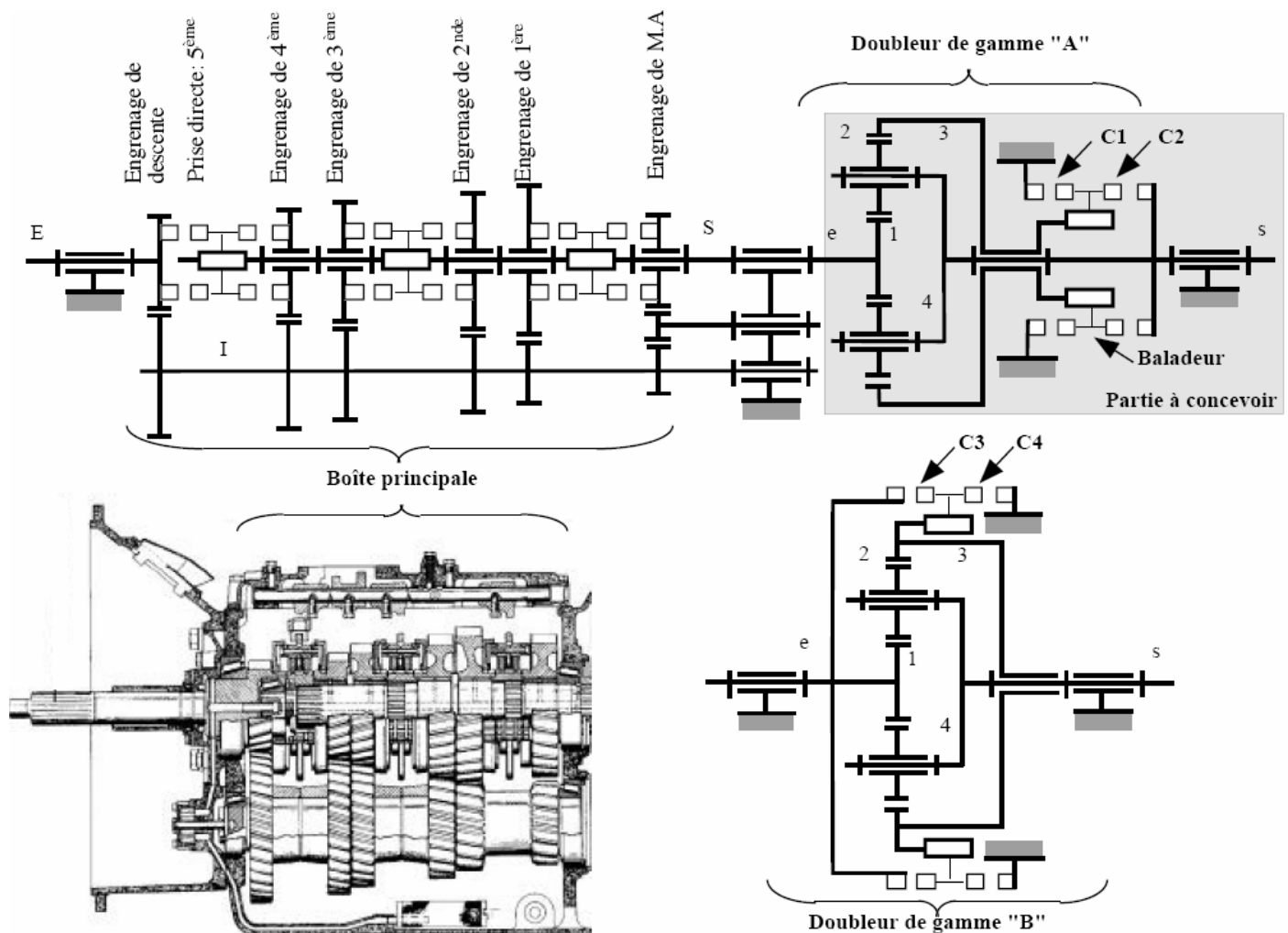
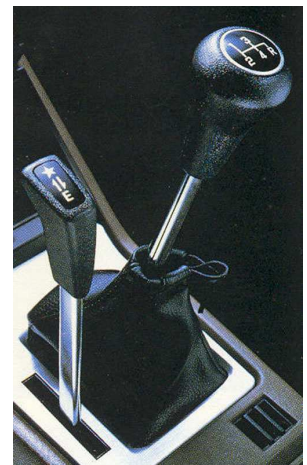
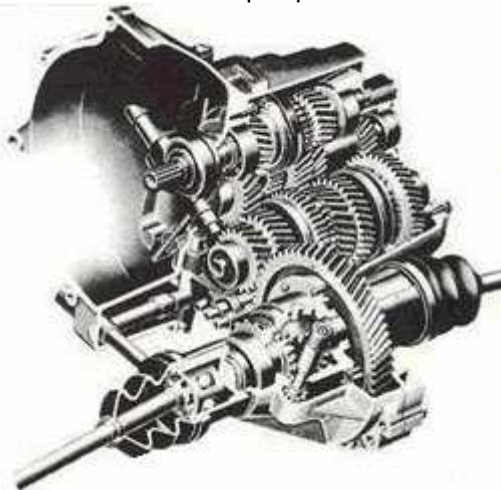


Figure 3 : Commande et étagement des boîtes



Mitsubishi a produit, à partir de 1978 pour les Colt, puis pour les Tredia et Cordia, des boîtes à 8 rapports avec deux leviers. Le second levier avait deux positions nommées respectivement "Power" et "Economy" pour les gammes courtes et longues.

Mais en fait ce second levier commandait un médiateur disposé sur l'arbre primaire, la boîte comportant trois arbres dont un intermédiaire attaqué par l'un ou l'autre des pignons du médiateur.



Mais le maniement était vraisemblablement trop compliquée pour la majorité des automobilistes: Apparemment pour parvenir à écouler le stock de ces boîtes, Mitsubishi monta en 1985 une commande électro-pneumatique du médiateur par une capsule à dépression actionnant l'axe de fourchette.

Un bouton sur le levier de vitesse et un contacteur d'embrayage aurait permis d'exploiter facilement les 8 rapports (dont deux étaient malheureusement quasiment identiques), mais on estima probablement que c'en était trop pour un conducteur moyen, si bien que les ingénieurs furent contraints de concevoir tout un système complexe afin de retrouver une grille conventionnelle avec 5 rapports seulement sur un unique levier. Le déplacement de ce levier en position de 5^e ré-enclenchait la 4^e tout en commutant le médiateur dont le seul usage n'était plus désormais que de procurer un 5^e rapport....

XIV. RAPPORTS DE TRANSMISSION

1- Rapport de transmission

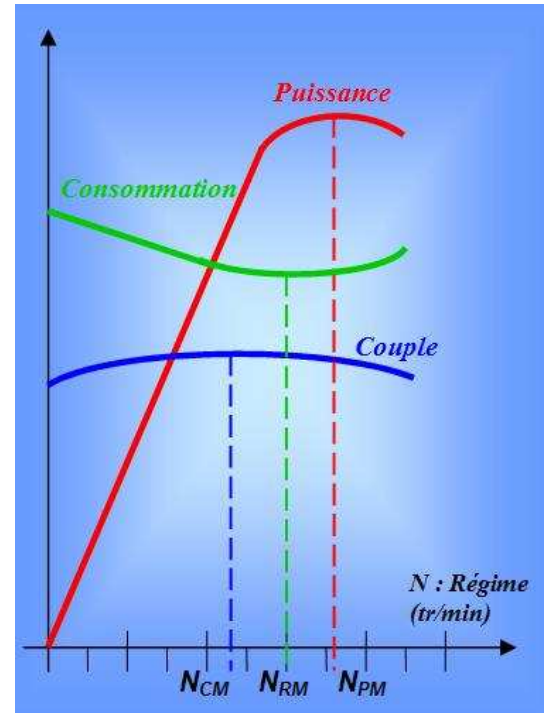
Le rapport de transmission globale (boîte (s) + pont) est un rapport entre les vitesses du moteur et des roues, mais aussi (au rendement près) entre le couple moteur et le couple disponible à la roue.

2- Courbes caractéristiques d'un moteur

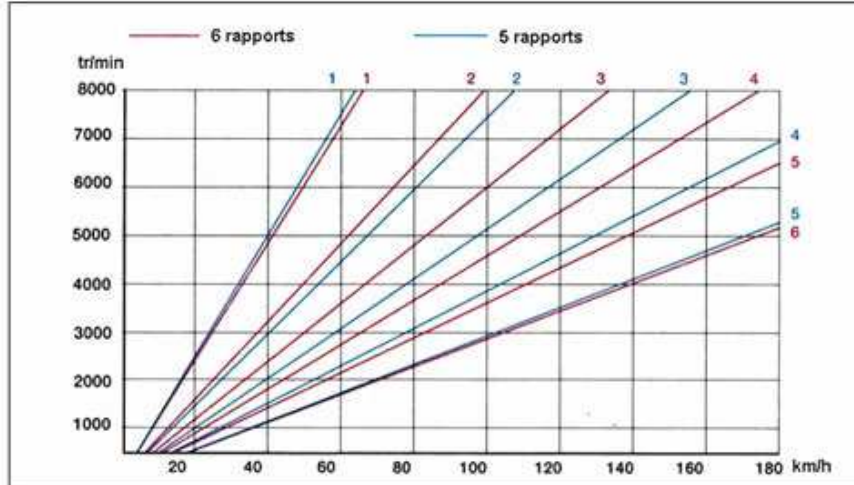
Les moteurs proposant un couple plutôt modéré et fonctionnant correctement à des régimes élevés (milliers de tours/minute), il convient donc de réduire la vitesse (centaines de tours/minute) ce qui aura pour effet d'augmenter le couple à la roue, c'est-à-dire l'effort de propulsion (au sens large) du véhicule.

La série de rapports disponibles sur une boîte est optimisée en prenant en compte les caractéristiques du moteur :

- couple, puissance et rendement (consommation spécifique) maximaux, et les régimes associés du moteur. La plupart des moteurs ont une caractéristique de fonctionnement selon le schéma ci-contre;
- mais aussi les caractéristiques du véhicule :
 - -Masse de la voiture (PTRa)
 - Taille des roues, rapport du différentiel.
 - Vitesse maximale souhaitée
 - Cx coefficient de traînée.



Une boîte à vitesses doit comporter une plage de rapports (dite "ouverture") assez large pour assurer à la fois un pouvoir en côte suffisant et un régime moteur pas trop élevé en vitesse de croisière. Le compromis usuel était de faire coïncider à peu près, sur le rapport le plus long, le régime de puissance maximum avec la vitesse maxi du véhicule. C'est un compromis car, bien qu'il permette d'atteindre la plus haute vitesse, ce rapport est alors trop long pour des reprises optimales et trop court pour permettre au moteur de tourner à un régime économique dans la plupart des conditions d'utilisation.



Avec l'amélioration du Cx (coefficient de pénétration dans l'air), les voitures sont devenues plus rapides tout en absorbant moins de puissance. En outre, elles se sont alourdies et les moteurs développent une puissance spécifique accrue tout en n'ayant pas davantage de couple à bas régime, si bien qu'un rapport court est encore plus indispensable qu'avant. Le résultat est qu'une voiture moderne demande une boîte de plus grande ouverture, d'autant qu'avec la généralisation des autoroutes, des moteurs de forte puissance et des faibles vitesses de croisière engendrées par les limitations de vitesse, on souhaite disposer d'un rapport très long afin de diminuer la consommation de carburant, le bruit et l'usure du moteur.

Or, en augmentant l'ouverture on accroît l'écart entre les rapports (la "raison" de la boîte à vitesses), si bien que si l'on ne veut pas accroître ces écarts il faut augmenter le nombre de rapports. On a ainsi passé sur les voitures de grande série de 3 vitesses dans les années 50 à 4, puis à 5 et maintenant à 6, et malgré tout l'étagement de ces rapports reste un compromis. Dans le même temps, sur les poids-lourds, le nombre de rapports a explosé de 5 ou 6 jusqu'à 16, voire même parfois 18.

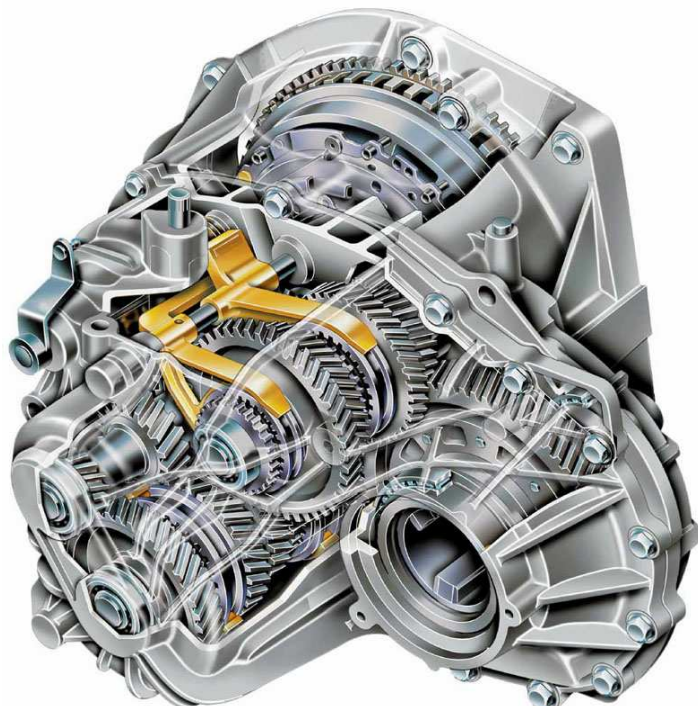
On pourrait logiquement s'attendre à ce qu'une boîte à vitesses soit étagée en progression géométrique, c'est-à-dire avec un écart identique entre chaque rapport (raison constante).

Ce fut souvent le cas autrefois et jusqu'il y a quelques décennies sur les "muscle cars" US. La récente Chevrolet Corvette CO6 dispose encore elle aussi d'un étagement en progression quasi géométrique entre les 4 premiers rapports de sa boîte 6.

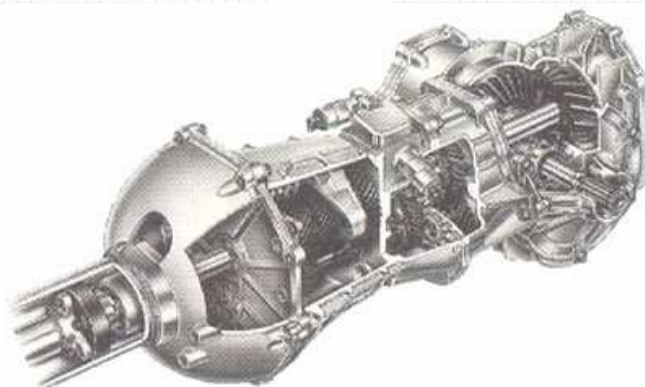
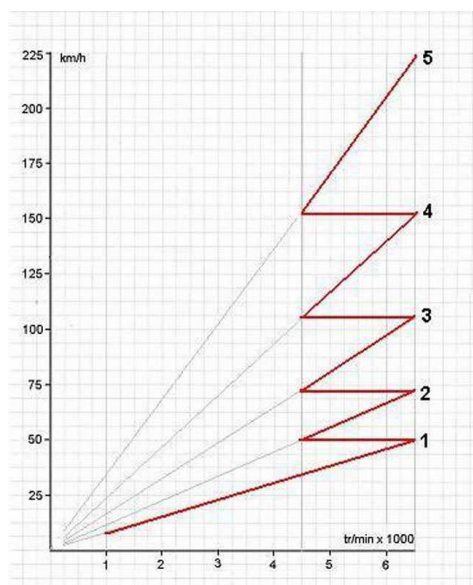
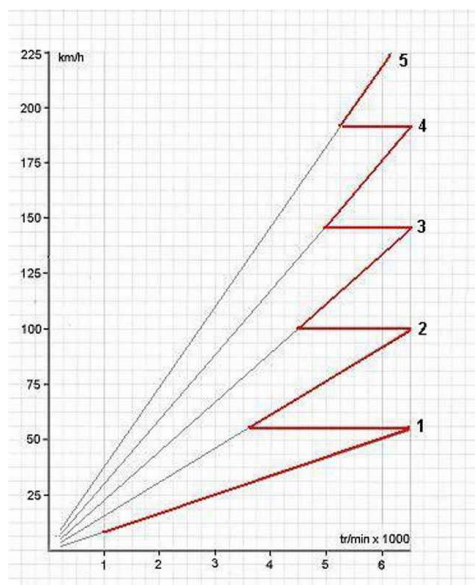
En divisant 2,97 (1e) par 2,07 (2e) et 2,07 par 1,43 (3e) on obtient en effet à peu près le même écart (colonne de droite). Les choses se gâtent ensuite entre la prise directe (4e) et les deux surmultipliées (5e et 6e) puisque la raison se met à osciller entre 1,19 et 1,5...

Boîte Renault PK6

	Rapport	Raison
1 ^{ère}	2.97	1.43
2 ^{nde}	2.07	
3 ^{ème}	1.43	1.45
4 ^{ème}	1	1.43
5 ^{ème}	0.84	1.19
6 ^{ème}	0.56	1.5



Quant à l'ouverture, elle est de 2,97 divisé par 0,56, soit 5,3.

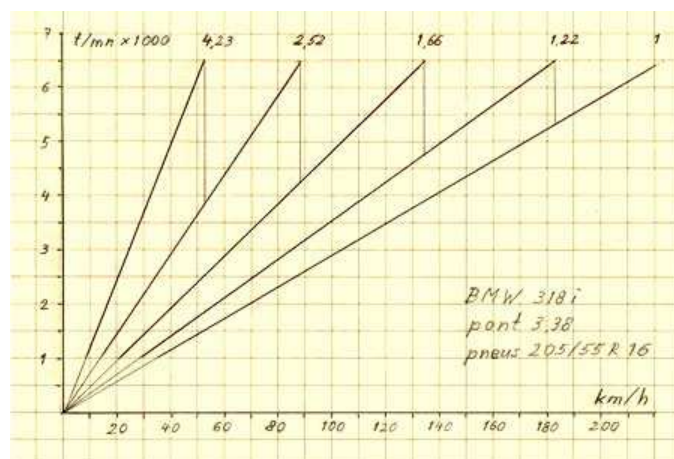


La Borg-Warner T56 en disposition transaxiale arrière des Chevrolet Corvette

Les constructeurs européens et japonais ont adopté depuis longtemps la progression dite arithmétique qui a fait ses preuves sur les voitures de course et qui consiste à éloigner les rapports courts, en principe brièvement utilisés, pour rapprocher les longs.

Par exemple une BMW série 3 dispose de l'étagement suivant :

	Rapport	Raison
1 ^{ère}	4.23	
2 ^{nde}	2.52	1.68
3 ^{ème}	1.66	1.52
4 ^{ème}	1.22	1.36
5 ^{ème}	1	1.22



L'ouverture de cette boîte avec 5e en prise directe est évidemment de 4,23.

Il suffit d'une feuille quadrillée, d'un crayon, d'une règle et d'une calculatrice pour représenter graphiquement un étagement de boîte à vitesses :

La vitesse en fonction du régime moteur sur les différents rapports se calcule aisément si l'on connaît la circonférence de roulement des pneus (donnée par leur fabricant) ainsi que le rapport de pont, et encore plus aisément si le constructeur fournit la vitesse par 1000 t/mn sur le dernier rapport.

$$V \text{ (km/h) par } 1000 \text{ t/mn} = (CdR \times 60) / (1000 \times i)$$

CdR = circonférence de roulement (en mm)

i = rapport de transmission = rapport de boîte x rapport de pont

On voit bien sur le diagramme que le moteur doit être ralenti lors d'une montée de vitesses et accéléré lors d'une rétrogradation. Il est clair que la différence de régime entre deux rapports ne peut se chiffrer en tr/min, mais plutôt en % : une raison de 1,22 correspond à un écart de 22%. L'écart en tr/min est donc important à haut régime et réduit à faible régime, si bien que dans le dernier cas le changement de vitesse peut être effectué plus rapidement - également parce que les synchros ont alors moins de travail.

Comme les boîtes d'automobiles sont désormais quasiment toutes étagées en progression arithmétique, l'écart est plus élevé entre 1e et 2e qu'entre 4e et 5e. Il en résulte que le passage entre 4e et 5e devrait être effectué plus vite qu'entre 1e et 2e afin de ré-embrayer au moment exact où le régime du moteur est synchrone avec celui du disque d'embrayage. La disposition des grilles du levier des boîtes 5 est à cet égard illogique, sauf sur les Porsche où la 5e est en face de la 4e, la 1e faisant face à la marche arrière.

Une autre critique concerne le maintien de cet étagement en progression arithmétique sur les voitures turbodiesel modernes qui disposent d'une imposante réserve de couple. Il semblerait logique dans ce cas d'adopter un étagement en progression géométrique avec une ouverture encore plus grande et un dernier rapport allongeant quelque 65 km/h par 1000 t/mn qui permettrait un régime moteur fortement abaissé en vitesse de croisière. La vitesse maximum serait alors atteinte sur l'avant dernier rapport et la consommation en croisière abaissée, au prix toutefois de plus fréquentes rétrogradations.

XV. CARTER

Le carter constitue l'enveloppe étanche à l'intérieur de laquelle est placée la chaîne cinématique. Il est constitué d'une ou plusieurs pièces et doit globalement satisfaire les exigences suivantes :

Rigidité : le carter constitue la liaison physique entre les parties actives de la boîte, le moteur et la structure du véhicule, et en tant que tel doit être quasiment indéformable. Sous la charge maximale, les déformations doivent rester d'un niveau tel que les conditions normales de fonctionnement des dentures ou d'alignement des paliers soient conservées.

Étanchéité : le carter contient le lubrifiant nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble du mécanisme ; il doit être étanche vis à vis du milieu extérieur dans le quel fonctionne la boîte.

Évacuation de la chaleur : la transformation de couple à l'intérieur de la boîte se fait avec une légère perte que l'on retrouve sous forme calorifique. Cela se traduit par une augmentation de la température et il est nécessaire, tant pour le lubrifiant lui même que pour les matériaux, que la température se stabilise à un niveau raisonnable. Si la ventilation naturelle n'est pas suffisante en plus des ailette de refroidissement, la boîte peut être équipée d'un dispositif spécifique de refroidissement par pompe et échangeur.

Isolation phonique : les vibration qui excitent les arbres, paliers et carters dans le domaine audible se propagent par une voie aérienne ou solidienne. Le carter doit être conçu pour les filtrer ou du moins ne pas les amplifier. Afin que les fréquences d'excitation soient en dehors des résonances du carter, on lui ajoute des nervures pour le rigidifier et des bossages pour changer les répartitions des masses.

XVI. PISTONS



Un piston de Ferrari 312 B à quatre soupapes. Le piston à tête plate à évidemment unique de la Lancia Stratos et un piston de moto Aermacchi avec bombage prismatique pour augmenter le taux de compression

XVII. ÉNERGÉTIQUE

