

1. Introduction

La commande d'une direction traditionnelle sur les véhicules automobiles impose au conducteur de vaincre par l'intermédiaire du volant un couple de pivotement dû en grande partie à l'action de résistance du sol sur les roues directrices. L'appareillage constituant une bonne direction doit alors lui permettre d'agir sans fatigue excessive et en toute sécurité.

C'est pour améliorer ces deux derniers points qu'ont été développés les systèmes qualifiés de "directions assistées". Celles-ci permettent :

- d'une part de **limiter l'effort** que le conducteur exerce sur le volant afin de faire tourner les roues, grâce à un système d'assistance ;
- d'autre part d'assurer quelques autres fonctions utiles telles que **le durcissement de la direction** lorsque la **vitesse** du véhicule augmente, ou à contrario une **résistance** à la rotation du volant presque **nulle** à très faible vitesse, de manière à faciliter les **manœuvres** pour un stationnement.

Ces fonctions de bases, toutes assurées par les directions assistées typiques présentées ci-dessous, sont caractéristiques de systèmes asservis.

2. Cahier des charges d'une direction automobile

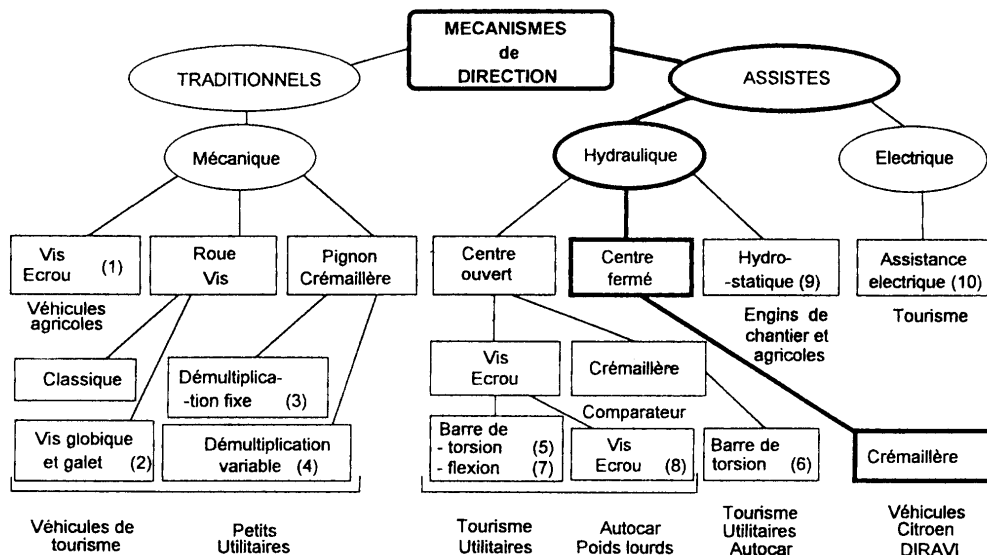
Pour être parfaite, une direction doit répondre aux impératifs suivants : sécurité, douceur, précision, irréversibilité, stabilité et compatibilité de la direction avec la suspension.

Pour pouvoir envisager la fabrication de cette direction "parfaite", il faut que celle-ci s'intègre dans l'environnement du véhicule, et qu'elle soit d'un coût raisonnable dans le contexte industriel pour le constructeur automobile. Les critères de choix fondamentaux qui en résultent peuvent être :

- *fiabilité, tenue aux chocs et aux efforts exceptionnels ;*
- *temps de réponse, précision angulaire et progressivité de l'effort, autour de la position neutre ;*
- *niveau de démultiplication angulaire puis retour du volant assuré ;*
- *niveau moyen et gradient d'effort sur toute la course angulaire du volant ;*
- *silence du système et filtration des irrégularités de la route ;*
- *encombrement minimal mais accessibilité et démontabilité assurées ;*
- *prix de revient et faible consommation du système.*

3. Mécanismes de direction courants

Les différentes classes de directions assistées ou non, peuvent se résumer de la manière suivante :



4. Quelques notions sur les directions traditionnelles

Les directions dites "traditionnelles" sont les directions mécaniques non assistées, toute l'énergie nécessaire au pivotement des roues directrices est alors fournie par le conducteur.

Ce type de mécanisme, de conception assez simple, convient lorsque l'action de résistance appliquée aux roues directrices du véhicule est relativement faible. Il faut savoir que les directives concernant la vérification des ensembles de direction pour véhicules stipulent que la force de manœuvre sur le volant ne doit pas dépasser 250 N. Ceci est valable en roulant dans un cercle ayant un rayon de 12 m, et il faut obtenir ici le braquage nécessaire en 4 s à partir de la conduite en ligne droite, à une vitesse d'environ 10 km/h (toutes ces valeurs sont d'ailleurs susceptibles de modification d'après les données ZF).

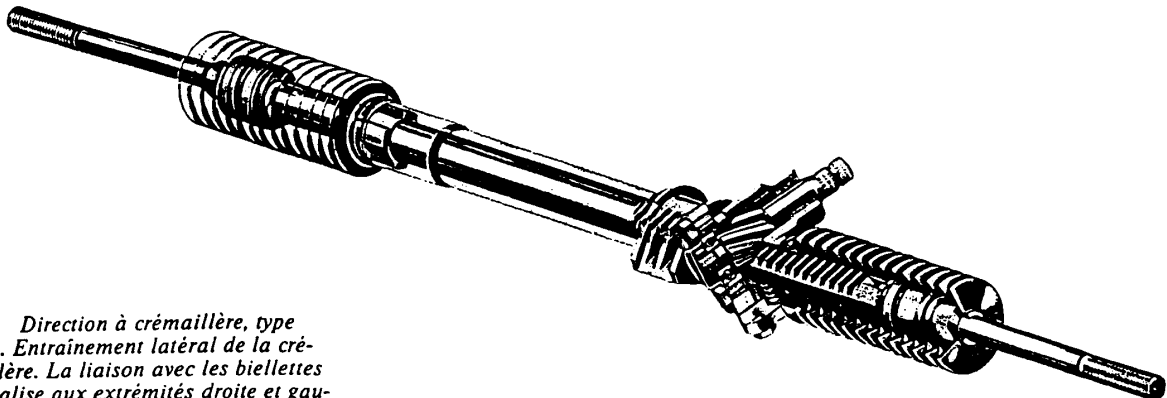
Nota : les différentes descriptions ainsi que les graphes associés qui suivent, proviennent d'une documentation ZF, principal constructeur européen de systèmes de direction pour véhicules routiers.

Cas des systèmes "pignon-crémaillère" :

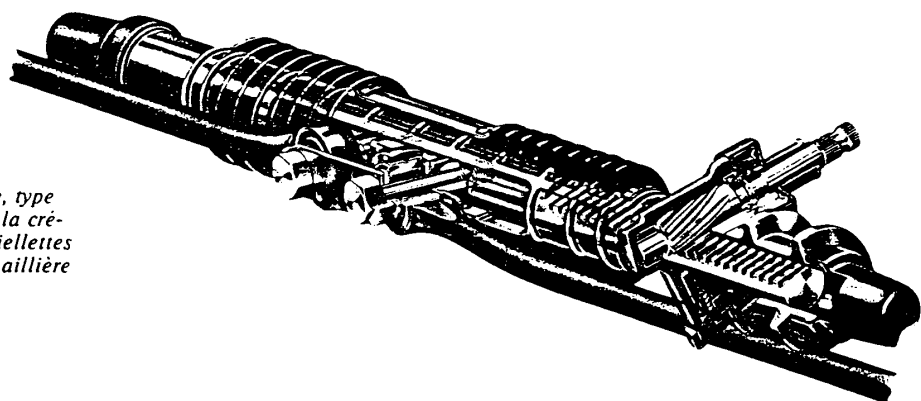
C'est le système de direction standard que l'on retrouve dans le domaine des voitures particulières et des camions légers.

Une démultiplication directe, une grande rigidité et un bon rendement représentent les caractéristiques principales de cette direction mécanique.

La liaison entre la direction et les roues directrices n'exige qu'un petit nombre de pièces : une biellette (commande de la tringlerie de pivotement des roues) est assemblée à chaque extrémité de la crémaillère, ou en son milieu. La crémaillère peut donc être entraînée aussi bien latéralement que par son milieu :



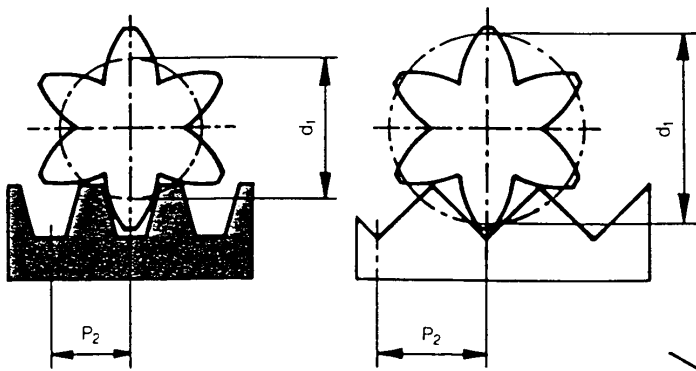
Direction à crémaillère, type 7820. Entraînement latéral de la crémaillère. La liaison avec les biellettes se réalise aux extrémités droite et gauche de la crémaillère



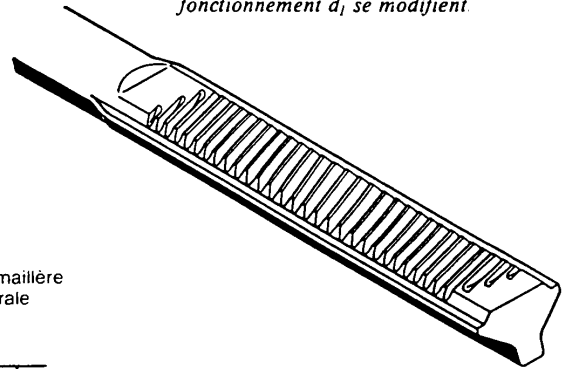
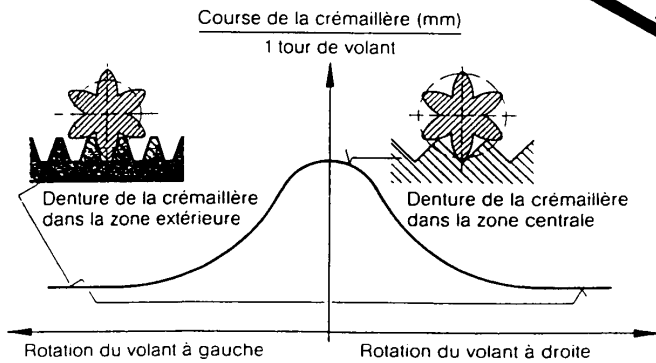
Direction à crémaillère, type 7824. Entraînement latéral de la crémaillère. La liaison avec les biellettes se réalise au milieu de la crémaillère

Le mouvement de rotation imposé au volant par le conducteur se transmet au pignon d'entraînement par la colonne de direction. L'engrènement de ce pignon sur la crémaillère engendre un déplacement axial de cette dernière, et par conséquent le braquage des roues directrices.

Certains dispositifs sont dits à "démultiplication variable" : la denture de la crémaillère est réalisée avec un module et un angle de pression variables tandis que le pignon qui engrène comporte une denture normale :



Allure schématisée de la démultiplication variable et pignon à denture normale. Du fait du module différent, le pas P_2 et le diamètre primitif de fonctionnement d_1 se modifient.

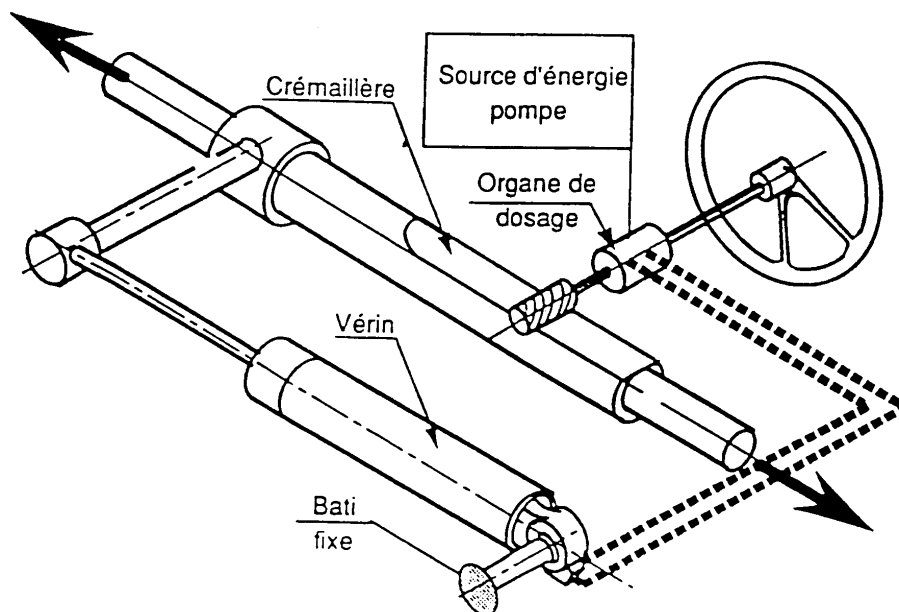


Dans la plage centrale de la crémaillère (déplacement en ligne droite), on peut obtenir une démultiplication très directe se traduisant par des angles de braquage réduits du volant. Lorsque l'on amène le volant vers la gauche ou vers la droite jusqu'en butée (pour les manœuvres de stationnement), on obtient grâce à la variation continue de démultiplication de la denture, une diminution progressive de la force nécessaire pour braquer quand on la compare à celle qui est nécessaire dans le cas où la démultiplication serait constante.

La différence entre la démultiplication la plus forte et la plus faible de la crémaillère peut atteindre jusqu'à 30%.

5. Les directions à assistance hydraulique

Les directions à assistance hydraulique peuvent être associées à deux grands types de directions mécaniques : à vis-écrou et à pignon-crémaillère. Le schéma global représentatif d'une direction assistée hydraulique est le suivant (dans le cas présent, dispositif avec crémaillère) :

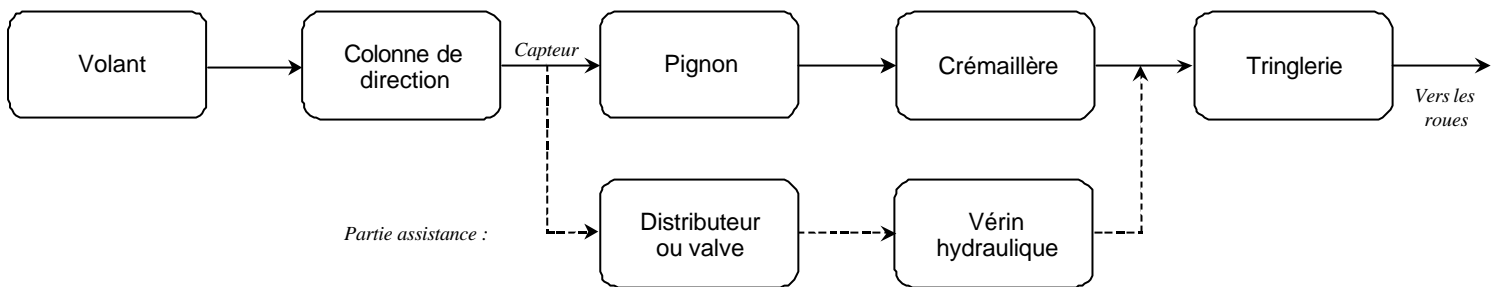


Trois éléments de base caractérisent ce type de direction :

- **Une source d'énergie hydraulique**, à savoir un réservoir contenant de l'huile qui est véhiculée et mise sous pression par une pompe volumétrique (en général : 18 MPa = 180 bar au maximum) ;
- **Un actionneur** réalisant l'assistance, à savoir un vérin, généralement de comportement linéaire et implanté en parallèle ou en bout de crémaillère (coaxial) ;
- **Un organe de dosage**, présent sous la forme d'un distributeur ou d'une valve, qui permet de diriger l'huile sous pression vers le côté correspondant du cylindre de vérin, lorsque l'on fait tourner le volant et qu'une force vient stopper le braquage des roues.

Un boîtier de direction mécanique, contenu dans la direction hydraulique, doit permettre de satisfaire également à la contrainte de sécurité : à savoir que les véhicules restent manœuvrables, même en cas de défaillance de l'assistance hydraulique. Dans ce cas, l'action du volant (effort) doit être transmise directement à la crémaillère par l'intermédiaire de la colonne de direction et de son pignon associé.

Nous pouvons alors représenter la structure générique d'une direction hydraulique sous la forme :



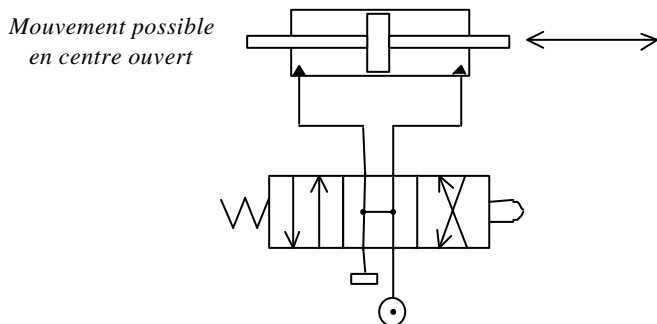
Principe de fonctionnement d'une direction assistée hydraulique :

- **Un capteur**, qui détecte l'action du volant, transforme cet effort en un angle ou une course qui sont utilisés par le distributeur ou la valve pour définir la pression P et le débit Q nécessaires au fluide d'assistance ;
- **Le vérin** transforme cette pression hydraulique P en une force mécanique transmise à la crémaillère pour déplacer les roues ;
- **Le déplacement de la crémaillère** résultant de l'effort directif ou de l'effort d'assistance F est enfin retranscrit en angle par le pignon qui assure le retour de l'information vers le distributeur ou la valve, fermant ainsi la boucle d'asservissement.

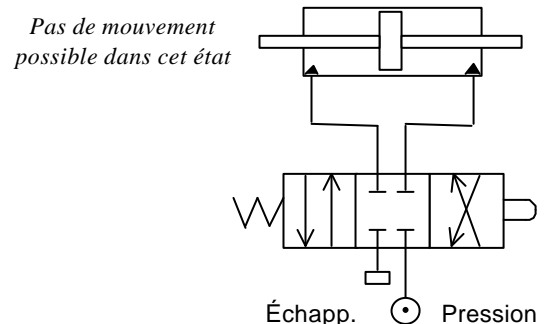
Plusieurs familles d'assistances hydrauliques peuvent être définies en fonction de deux critères : suivant le principe d'utilisation de l'énergie (en centre ouvert ou centre fermé) ou suivant le principe de commande du distributeur (asservissement en angle ou en effort). Développons d'abord le premier critère :

a) Directions assistées à centre ouvert :

En position neutre, le fluide circule librement : le distributeur est dit à "centre ouvert", et la pompe débite directement vers le retour, sans pression.



Distribution à centre ouvert



Distribution à centre fermé

En position travail, la pompe débite dans le circuit d'utilisation, et la pression dans ce circuit est alors réglée en faisant varier le débit à l'aide d'un régulateur dont le rôle est double :

- assurer un débit à peu près constant quelque soit le régime du moteur ;
- permettre une assistance importante pour les manœuvres à grand débattement angulaire.

Pour ce type de directions à centre ouvert, l'asservissement est réalisé généralement en effort. Il faut remarquer que c'est le débit qui est prépondérant dans ce type de direction.

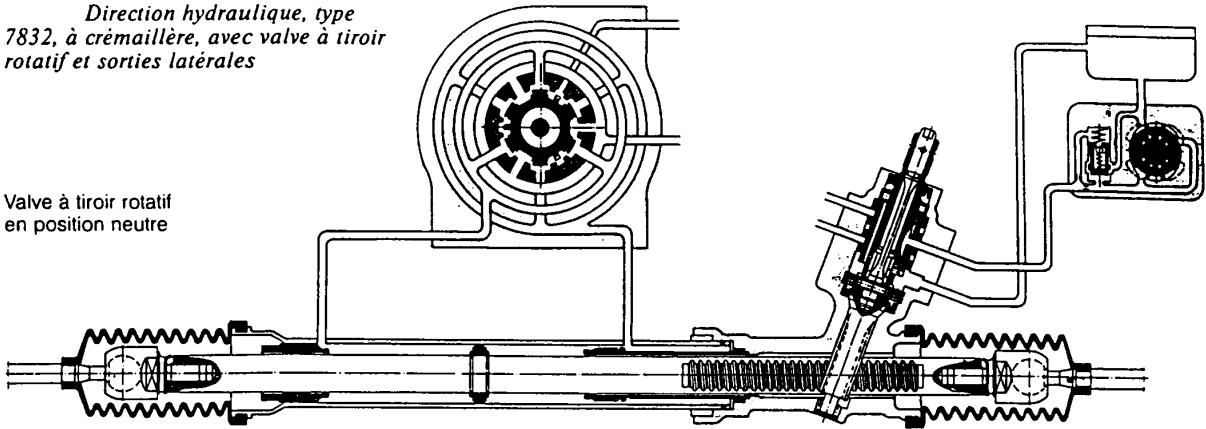
Ces mécanismes, de conception assez simple et d'un prix relativement bas, présentent l'inconvénient de transmettre au volant les actions néfastes de la route sur les roues, si aucun dispositif supplémentaire n'est prévu. Diverses solutions sont possibles comme par exemple :

Directions assistées à pignon-crémaillère et comparateur par barre de torsion :

Ces directions peuvent comporter un distributeur à tiroir rotatif et se rencontrent surtout dans les voitures de tourisme, mais conviennent aussi aux petits camions et autocars.

Direction hydraulique, type 7832, à crémaillère, avec valve à tiroir rotatif et sorties latérales

Valve à tiroir rotatif en position neutre



La valve employée ici comprend un tiroir rotatif avec six rainures sur le pourtour ainsi qu'une douille en une seule pièce constituée également de six rainures correspondant à celles du tiroir rotatif. Le centrage de la valve est assuré par une barre de torsion. Les avantages d'une telle disposition sont son encombrement réduit et sa fiabilité.

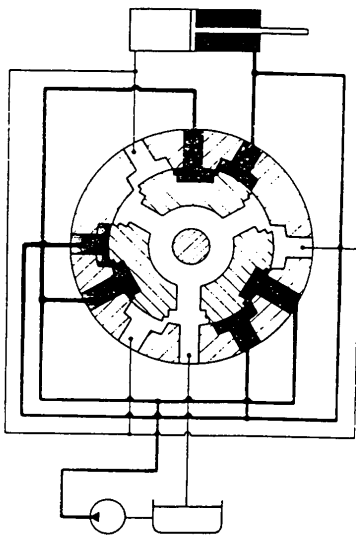
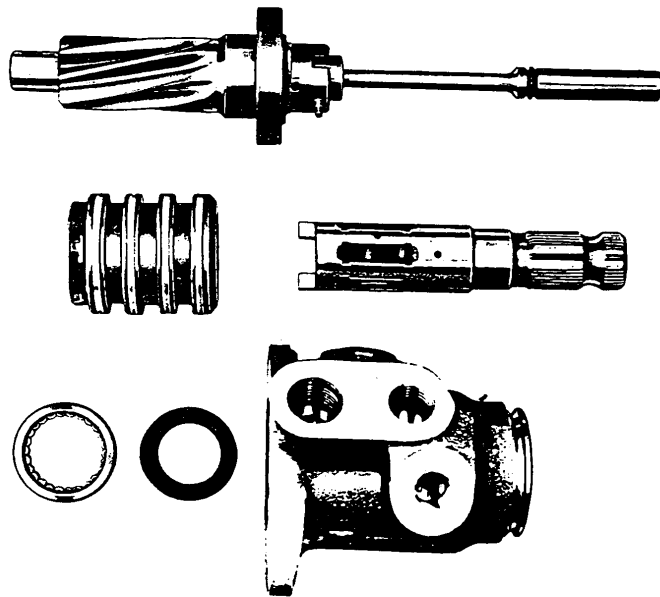


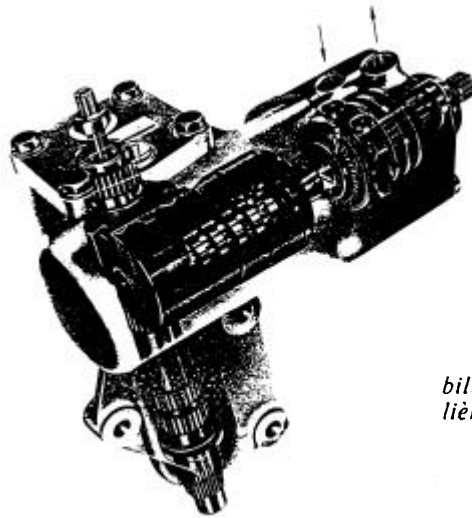
Schéma du fonctionnement de la valve à tiroir rotatif en position de travail



Pièces constitutives d'une valve à tiroir rotatif de la direction hydraulique à crémaillère du type 7832

Directions assistées à vis-écrou et comparateur par barre de torsion :

Ce type de direction est surtout employé dans les voitures particulières. Le boîtier de la direction hydraulique à écrou à billes renferme la valve de commande et le vérin ainsi que le boîtier de direction mécanique complet.



Direction hydraulique à écrou à billes, type 8052, pour voiture particulières

Le boîtier de direction est conçu sous la forme d'un cylindre dans lequel se déplace le piston dans le sens axial, lors de la rotation de la colonne de direction, sa denture étant en prise avec l'arbre de direction qui tourne alors d'un angle correspondant. La liaison sans jeu entre le piston et la vis sans fin est assurée par des billes à la chaîne.

La tête de la vis sans fin sert de logement à deux pistons de valve perpendiculaires à l'axe de la vis. Ces pistons tournent dans le corps de valve de la direction, avec la vis sans fin et la colonne de direction, avec laquelle ils sont assemblés sans jeu.

Une autre liaison existe entre la vis sans fin et la colonne de direction, par la présence d'une barre de torsion qui les traverse toutes deux, et qui joue le rôle de comparateur dans le schéma global d'asservissement. Par ce dispositif, une certaine distorsion se produit entre ces deux pièces lors de la transmission d'un couple de rotation sur la vis sans fin ou sur la colonne de direction. Les pistons de valve sont alors déplacés et ne dirigent plus l'huile que dans une des deux chambres du vérin, si bien que le mouvement de rotation de l'arbre de la colonne de direction est assisté ou bien s'oppose aux secousses de la chaussée.

- 1 Boîtier de direction
- 2 Piston
- 3 Colonne de direction
- 4 Arbre à secteur denté
- 5 Vis sans fin
- 6 Billes
- 7 Tube de circulation des billes
- 8 Valve de limitation du débit
- 9 Piston de valve
- 10 Piston de valve
- 11 Rainure d'admission
- 12 Rainure d'admission
- 13 Rainure radiale
- 14 Rainure radiale
- 15 Rainure de retour
- 16 Rainure de retour
- 17 Réservoir d'huile
- 18 Barre de torsion
- 19 Pompe à huile à haute pression
- 20 Clapet de décharge

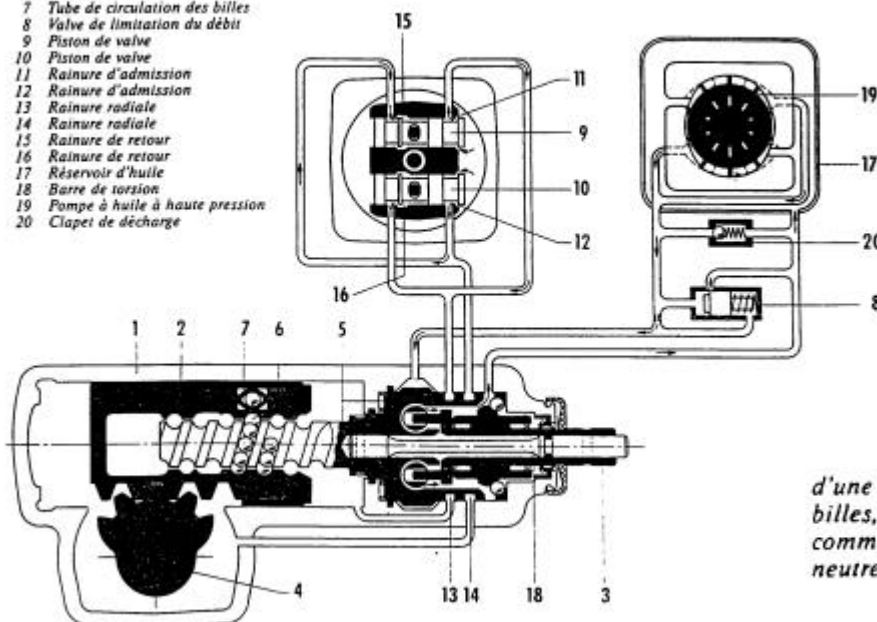
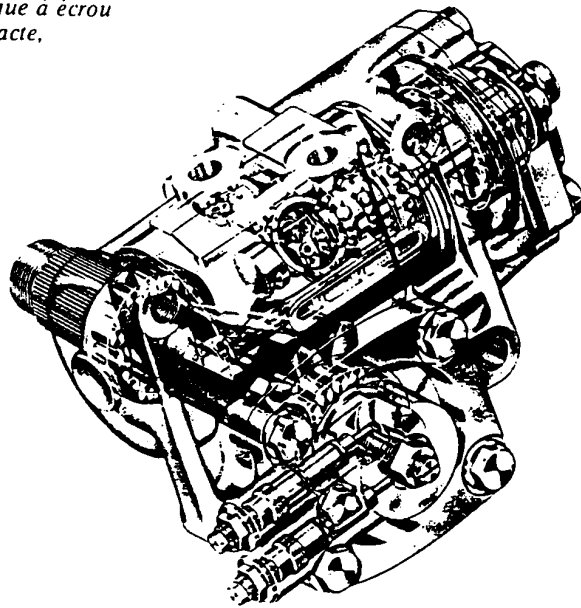


Schéma de fonctionnement d'une direction hydraulique à écrou à billes, avec pompe à palettes, valve de commande de la direction en position neutre

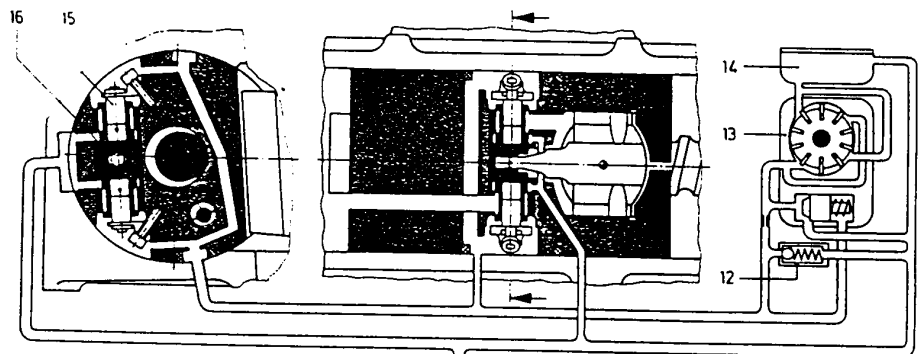
Directions assistées à vis-écrou et comparateur par barre de flexion :

Le modèle présenté par ZF a pour but de réduire au maximum l'encombrement du dispositif. Il est ainsi employé dans le cas de véhicules avec cabine à l'avant basculante.

*Direction hydraulique à écrou
à billes, construction compacte,
type 8043*

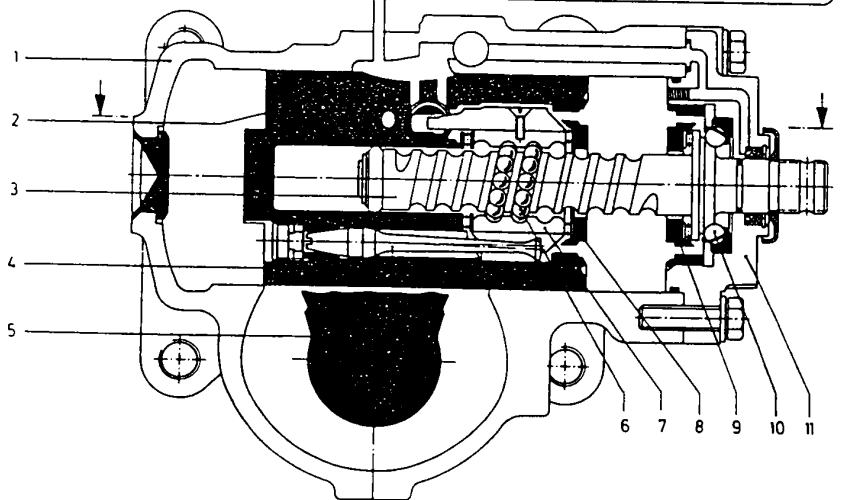


Comme pour les directions précédentes, cette version possède une chaîne de billes qui sert à transformer le mouvement de rotation de la vis sans fin en un déplacement rectiligne du piston ; la denture prévue sur le piston engendre la rotation de l'arbre à secteur denté. Le piston de travail contient un tiroir de valve disposé perpendiculairement à son axe. Il est commandé par un doigt qui est logé dans l'alésage de ce tiroir avec des tolérances très serrées. Le doigt se fixe sur l'écrou de direction qui peut se déplacer très facilement mais sans jeu dans le piston. Le centrage de l'écrou de direction, et par conséquent aussi de la valve, est effectué par une barre de flexion.



*Direction hydraulique à écrou
à billes, construction compacte,
type 8043, réalisation avec barre de
flexion, valve de direction en position
neutre*

- 1 Boîtier
- 2 Piston
- 3 Vis sans fin
- 4 Barre de flexion
- 5 Arbre à secteur denté
- 6 Billes
- 7 Ecrou de direction
- 8 Bague filetée
- 9 Bague filetée
- 10 Roulement butée à billes
- 11 Couvercle
- 12 Clapet de décharge
- 13 Pompe à palettes avec limiteur de débit
- 14 Réservoir d'huile
- 15 Piston de réaction hydraulique
- 16 Piston de valve

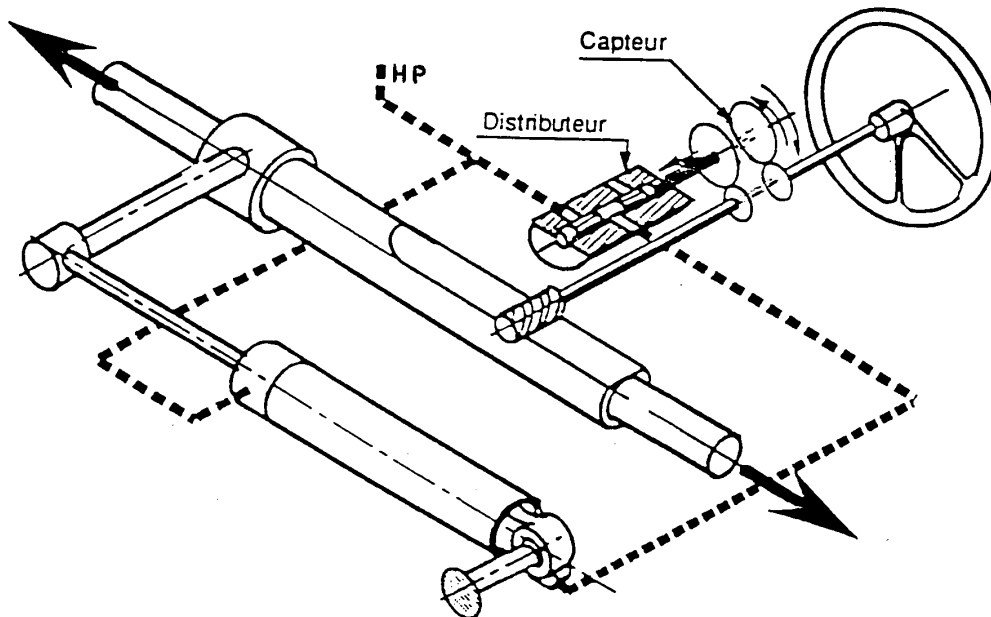


b) Directions assistées à centre fermé :

En position neutre, le fluide ne peut pas circuler car le distributeur est à "centre fermé" (cf. schématisation présentée précédemment). La direction est dite verrouillée hydrauliquement, ce qui donne au véhicule une grande stabilité directionnelle car le conducteur ne ressent pas les effets de l'action de la route sur la direction.

Par contre, elle présente l'inconvénient en configuration normale de conduite, de ne pas faire ressentir au conducteur la "sensation de la route" qui doit donc être reproduite artificiellement (durcissement de la direction alors ajoutée au circuit, en fonction de l'angle de rotation du volant mais aussi de la vitesse du véhicule).

Ce dispositif impose un vérin différentiel pour lequel une chambre est toujours alimentée par la haute pression ; dans ce cas, c'est la pression qui est prépondérante : elle est fournie à l'aide d'une pompe débitant dans un accumulateur qui est chargé de fournir en toutes circonstances le fluide à une pression à peu près constante (environ 170 bar). En voici un schéma global représentatif (avec crémaillère) :



Un exemple de ce type de direction est la DIRAVI qui équipe certains véhicules Citroën : c'est une direction assistée hydraulique à centre fermé, pignon-crémaillère et asservissement mécanique angulaire. C'est une description en détail de ce système qui est présentée dans la seconde partie de ce dossier.

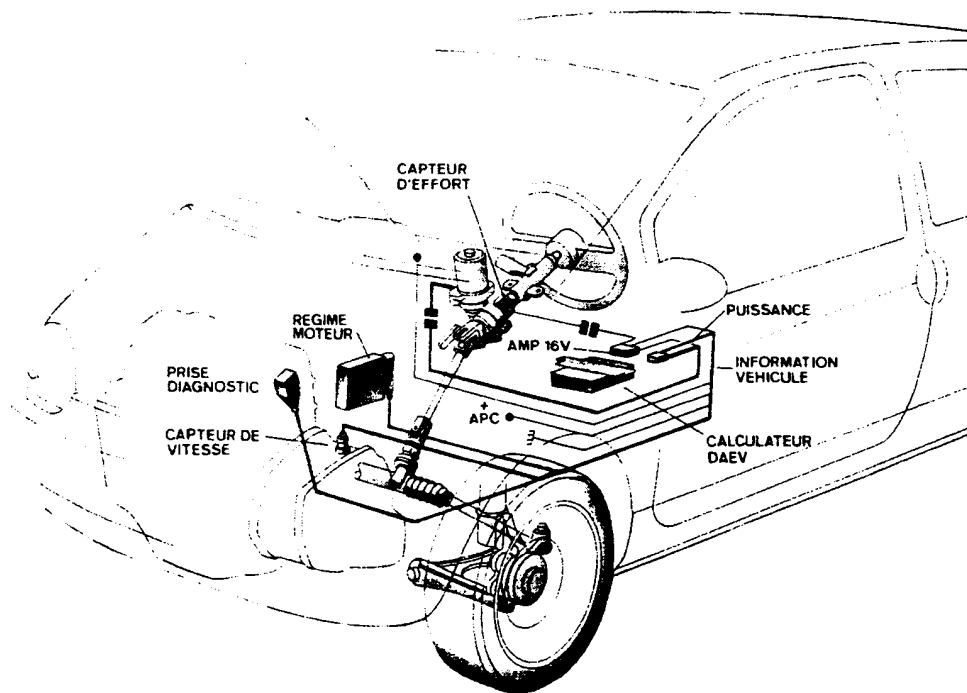
6. Les directions à assistance électrique

Les directions assistées électriquement (DAE), développées dans un premier temps au Japon, ont fait leur apparition en Europe au début des années 90, et devraient connaître un développement très important dans les années à venir pour les véhicules chargés sur l'avant de moins de 800 kg. Ces systèmes offrent l'avantage de puiser leur énergie indépendamment de celle fournie par le moteur thermique du véhicule. Ils sont indépendants également pour ce qui concerne leur entraînement, et permettent une relative liberté d'implantation. Enfin, les directions électriques ont comme principal atout de ne consommer de l'énergie que lorsqu'elles sont sollicitées.

Cas de la direction assistée de la Renault TWINGO :

C'est une direction entièrement électrique : ce type de solution, adaptée à une crémaillère standard, présente un poids et un encombrement faibles, et diminue le coût d'utilisation du véhicule car la consommation d'énergie est réduite, en moyenne d'environ 0,2 l aux 100 km, par rapport à un modèle hydraulique. De plus, techniquement, la solution électrique permet d'avoir une variation de l'assistance en fonction de la vitesse du véhicule plus facile à réaliser que sur les directions assistées hydrauliques.

L'ensemble d'assistance est constitué d'un motoréducteur accouplé à la colonne de direction par l'intermédiaire d'un embrayage électromagnétique. Cette assistance est réalisée :



- en fonction du couple au volant :

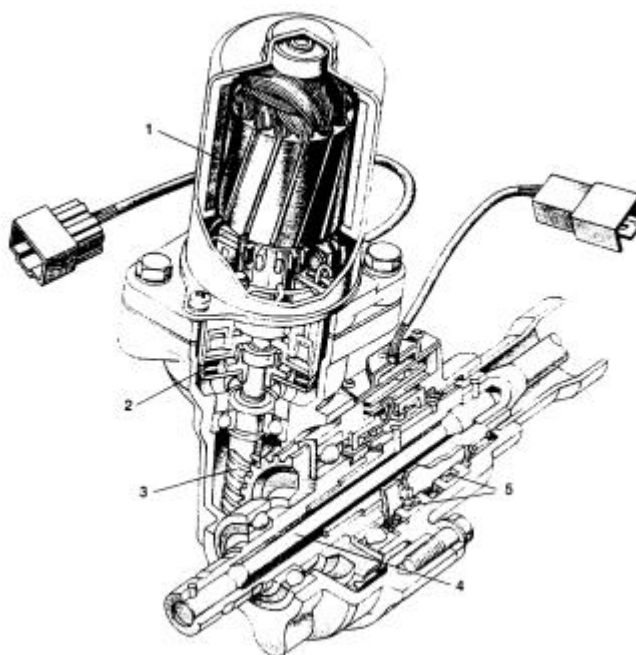
Le système doit assister le conducteur dès l'apparition d'une action sur le volant : un capteur situé sur la colonne de direction informe le calculateur de l'intensité du couple exercé sur le volant ; le couple exercé par le motoréducteur est alors fonction du couple exercé par l'utilisateur.

Il est intéressant de préciser que ce n'est pas le fait que le volant tourne qui met en action l'assistance, mais la résistance exercée par les roues-avants au braquage, provoquant la déformation de la barre de torsion montée sur la colonne : si les roues ne rencontrent pas de résistance (sur de la glace, par exemple), l'assistance n'agit pas.

- en fonction de la vitesse du véhicule :

Une assistance élevée doit offrir une facilité de manœuvre à l'arrêt ou à faible vitesse. Elle n'est plus nécessaire à haute vitesse car les braquages sont réduits et l'effort au volant ne doit pas être trop assisté pour des raisons de sécurité et de précision de conduite.

Ainsi sur ce système, à partir de 70 km/h, le moteur électrique n'est plus alimenté, et est désaccouplé mécaniquement de la colonne grâce à l'embrayage électromagnétique, pour encore plus de souplesse.



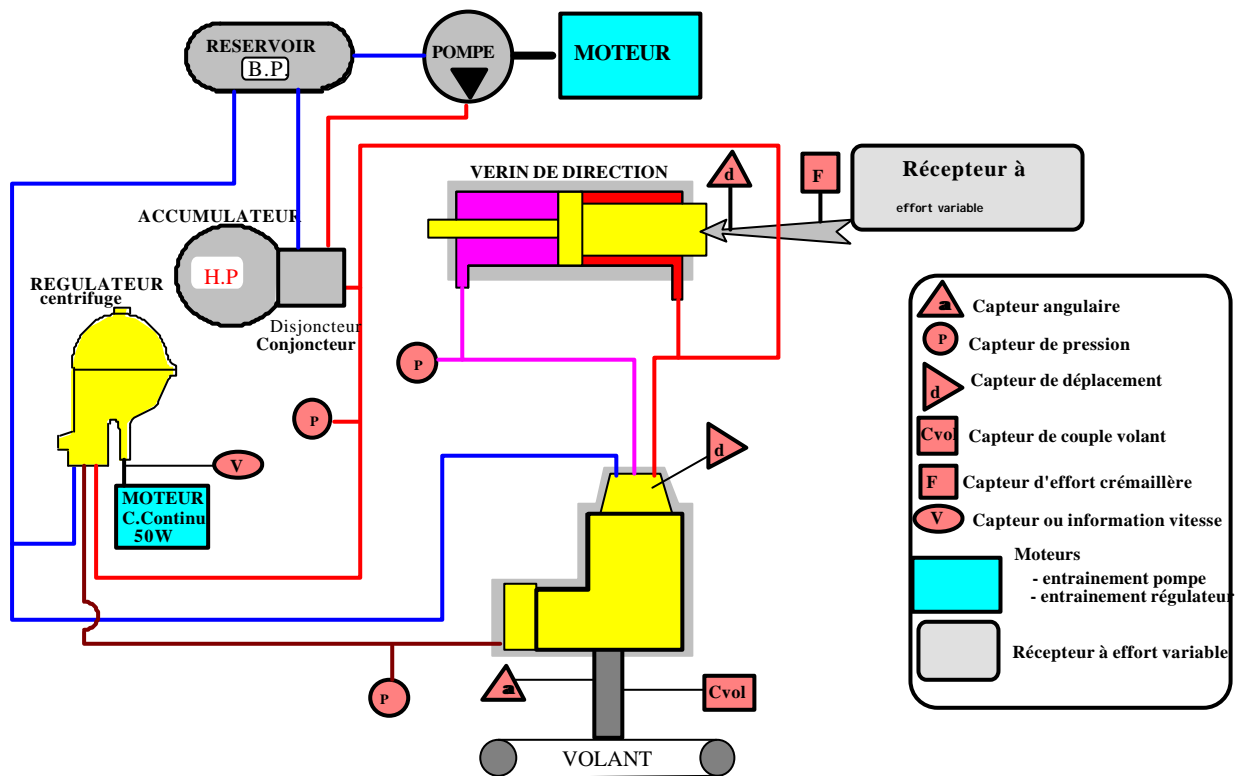
1. Présentation

La DIRAVI (Direction à Rappel Asservi) fait partie de la famille des directions assistées hydrauliques à centre fermé. Elle est présente en particulier sur les Citroën XM mais sa conception originelle date de la fin des années 60, où elle a pu équiper en premier lieu le modèle haut de gamme de l'époque : la Citroën SM.

Par rapport au schéma global d'installation d'une direction assistée hydraulique étudié précédemment, elle comporte trois parties principales :

- **Une mise en pression** du fluide hydraulique, constituée d'un réservoir fermé sous pression, d'une pompe à pistons axiaux, et d'un accumulateur dont la pression de stockage du fluide est comprise entre 14 et 17,5 MPa grâce à un disjoncteur-conjoncteur associé ;
- **Un bloc de commande** comprenant un distributeur, une came et un galet de durcissement ainsi qu'un système comparateur constitué de biellettes associées à des pignons, la partie durcissement de ce bloc de commande se trouvant couplée à un régulateur centrifuge ;
- **Un vérin de direction** double effet, monté en bout de crémaillère, dont une chambre est toujours reliée à la haute pression.

Schéma global d'implantation, sur le système didactisé :



2. Caractéristiques et performances

La DIRAVI présente trois caractéristiques principales :

- La première fonction est bien sûr **l'assistance** qui permet de manier plus aisément le véhicule en facilitant la rotation des roues, surtout lors des manœuvres nécessaires pour le stationnement, à faible vitesse ;
- La seconde fonction est **le durcissement** de la direction qui permet, lors d'une **vitesse élevée**, d'augmenter le couple résistant au niveau du volant, afin d'empêcher le conducteur de réaliser des changements de direction trop brusques, qui seraient dangereux à cette vitesse ;

- La troisième fonction est **l'asservissement du rappel** qui permet d'obtenir un retour du volant en **douceur** et **dégressif** vers la position neutre, lorsqu'on lâche ce dernier, afin d'éviter trop de secousses dans la direction.

Performances et modes de défaillance prépondérants, évalués sur :

- La conjugaison et la précision des mouvements (temps de réponse de l'assistance) ;
- La stabilité de la direction, ainsi que du mécanisme d'asservissement lié à l'assistance ;
- La qualité du durcissement, fonction de la vitesse du véhicule et de l'angle du volant ;
- La gestion du retour du volant ;
- Le système de sécurité, en cas de rupture de l'assistance ;
- La gestion des fuites.

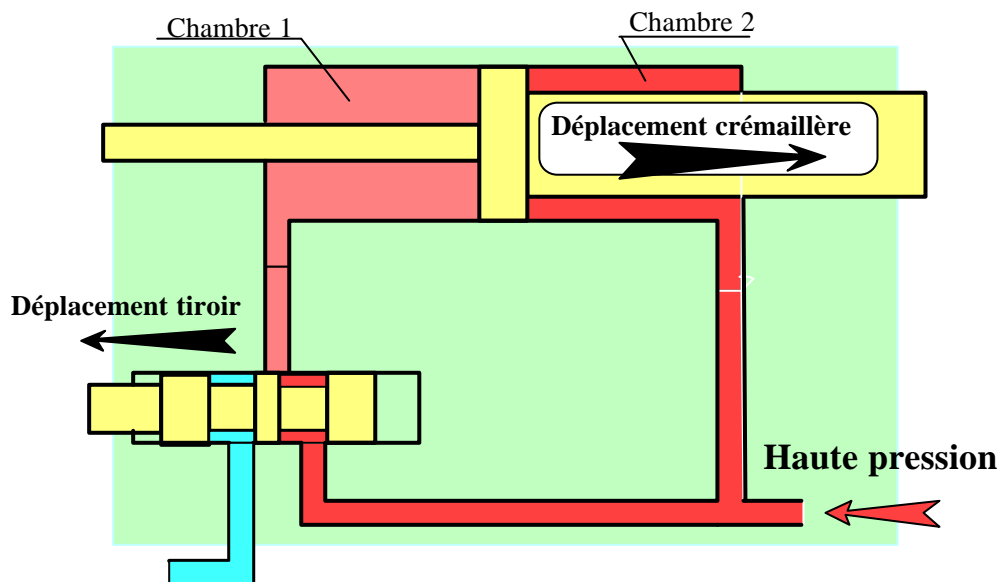
3. Étude de la fonction : ASSISTER

Principe de l'assistance hydraulique :

L'assistance est réalisée dans ce mécanisme grâce à l'action du vérin de commande hydraulique monté coaxialement sur la crémaillère de direction. Lors de la phase normale de fonctionnement, c'est une assistance à 100 %, c'est à dire que la colonne de direction liée au volant n'a plus de contact mécanique avec le pignon de commande de la crémaillère. Le vérin est donc l'unique actionneur de cette crémaillère.

Si le circuit hydraulique venait à être défaillant pour une raison quelconque, la sécurité mécanique est assurée grâce à un doigt de commande du pignon de crémaillère, situé à l'extrémité de la colonne de direction, et repéré sur le plan en coupe du bloc de commande, présenté ci-après. Un faible rattrapage de jeu angulaire est néanmoins inévitable dans ce cas.

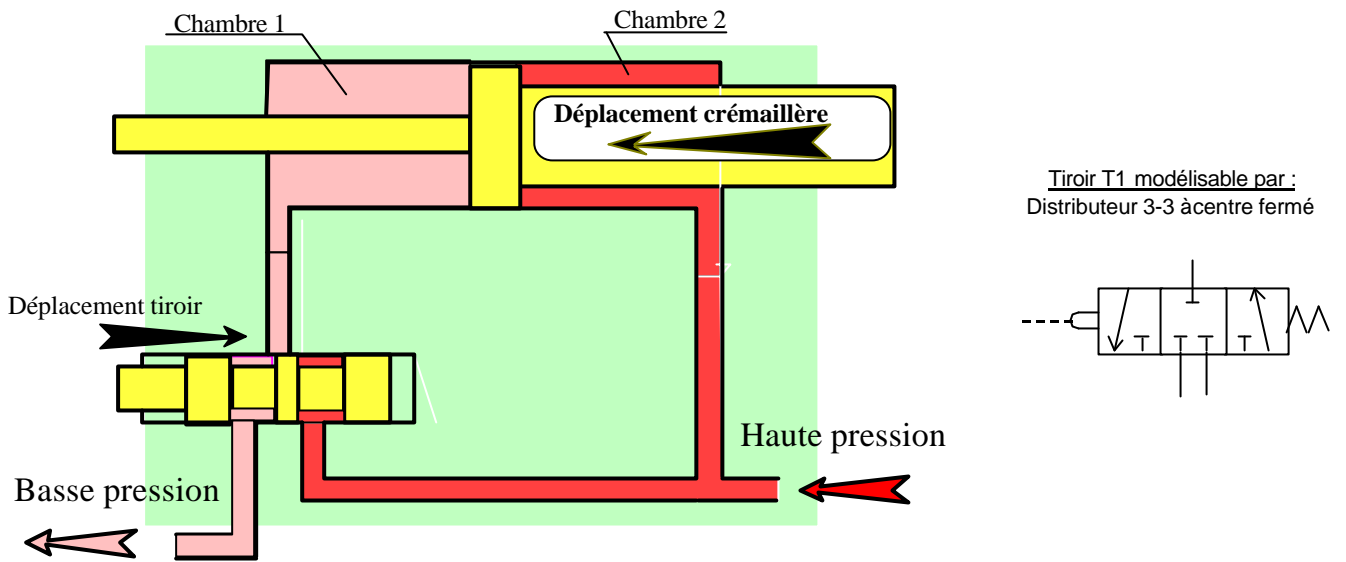
Au niveau du vérin, l'une des chambres (n°2) est constamment reliée à la haute pression HP (de manière à assurer une meilleure réactivité du système et à compenser par un gavage, les fuites qui pourraient survenir). Il est à noter également que par construction, la surface d'action S de la chambre n°1 est égale au double de celle de la chambre n°2.



Le piston du vérin est en fait constamment soumis à l'action de deux forces opposées F_1 et F_2 . L'équilibre de la direction est obtenu lorsque $F_1 = F_2$ et ceci quelque soit la position de la crémaillère, ce qui implique :

$$\frac{S}{2} \cdot HP = F_2 = F_1 = S \cdot \frac{HP}{2}$$

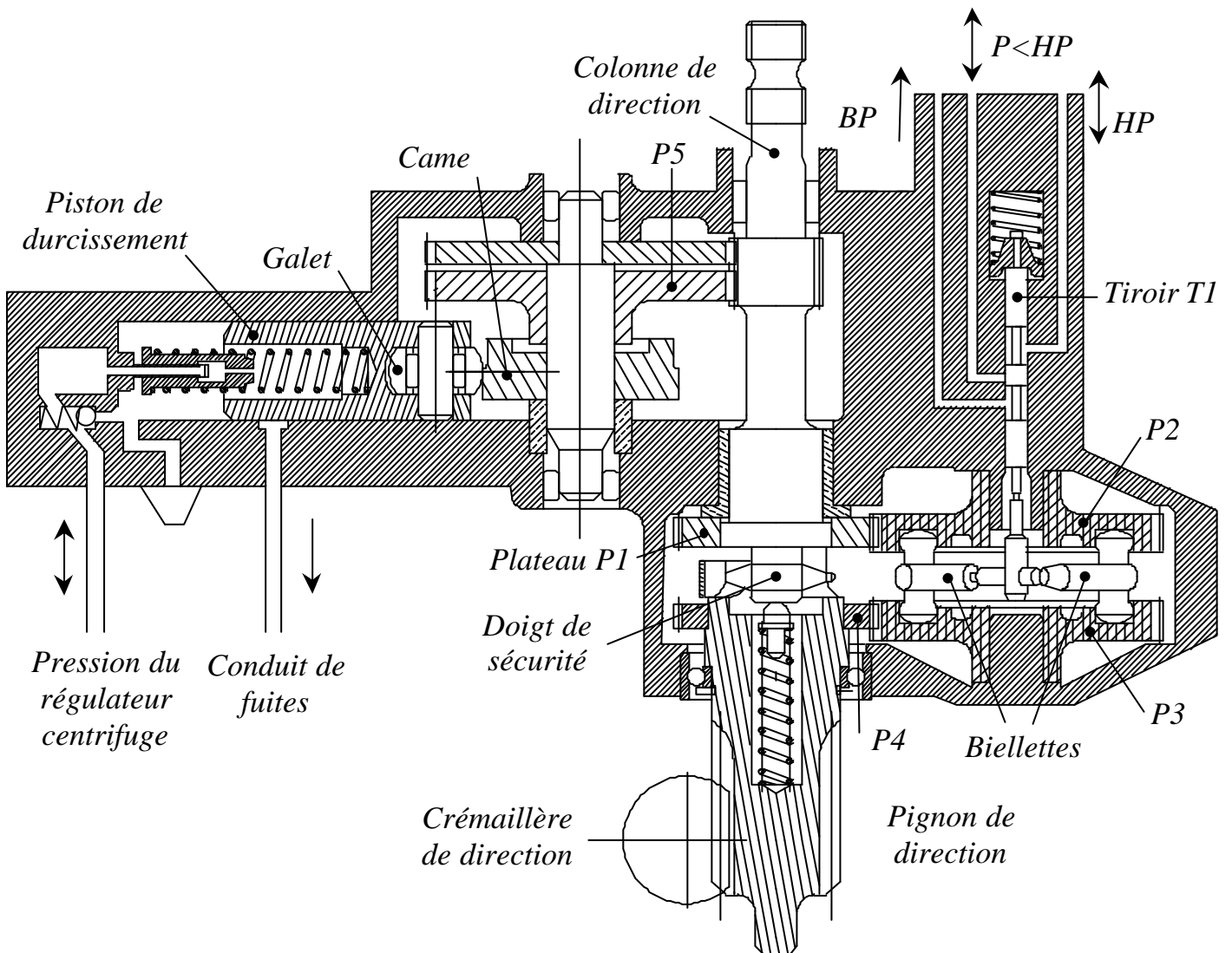
Pour provoquer un mouvement de la direction, il suffit de rompre l'équilibre, en reliant légèrement la chambre n°1 à la haute pression (en créant ainsi des pertes de charges progressives au niveau du tiroir de distribution T1) pour assister un mouvement de la crémaillère vers la droite, et à la basse pression pour assister un mouvement vers la gauche.



C'est donc le déplacement progressif du tiroir T1, schématisable par un distributeur 3-3 à centre fermé (cf. schéma hydraulique en fin de dossier), qui permet d'obtenir une pression $HP/2$ dans la chambre n°1 ou de mettre cette chambre en communication avec l'arrivée de la pression ou le retour au réservoir.

Description de la commande de l'assistance :

Le bloc de commande, situé sur le boîtier de la crémaillère, comporte dans sa partie droite un distributeur à tiroir (T1) qui, selon sa position relie la chambre 1 aux diverses pressions requises :



La partie droite du bloc de commande est constituée par :

- Une colonne de commande avec son plateau associé (P1), en liaison avec le volant ;
- Un pignon (P4) en prise avec la crémaillère de direction ;
- Deux plateaux (P2 et P3) porte-biellettes (constituant le comparateur de position angulaire) ;
- Un verrouillage de sécurité avec le doigt situé à l'extrémité de la colonne.

En phase de braquage, dans le cadre du jeu angulaire permis entre le doigt et le pignon de crémaillère, la colonne entraîne en rotation le plateau P2 par l'intermédiaire de P1, tandis que les plateaux P3 et P4 sont encore fixes à cause du verrouillage de la crémaillère réalisé par le vérin toujours à l'équilibre. Les biellettes, agissant en palonnier, se déplacent alors, et entraînent le tiroir T1 en translation :

- soit vers le bas : chambre n°1 du vérin sous HP, d'où une assistance de virage à droite ;
- soit vers le haut : chambre n°1 du vérin en communication avec le réservoir, d'où une assistance de virage vers la gauche.

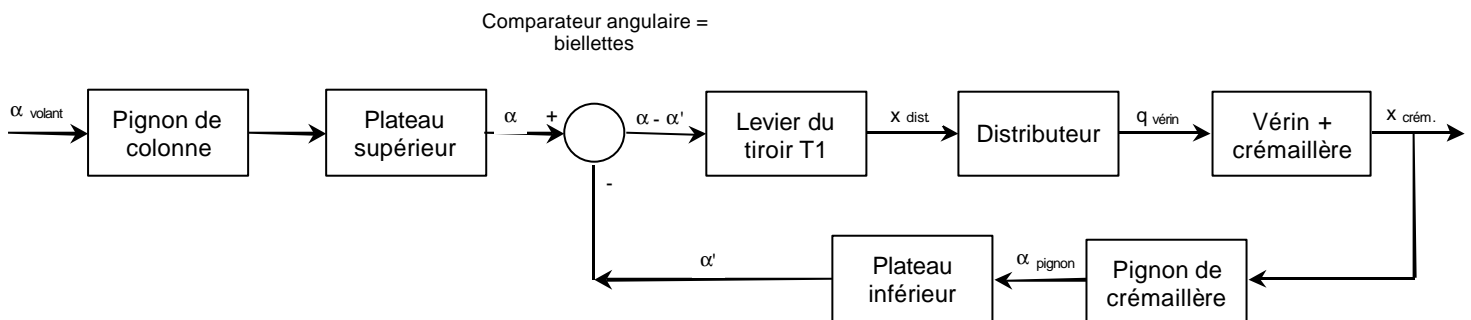
Verrouillage hydraulique :

Comme on l'a déjà évoqué dans le paragraphe traitant des directions à centre fermé, la crémaillère de la DIRAVI est verrouillée hydrauliquement en dehors de toute variation de braquage, d'où une grande stabilité directionnelle : cela est dû à la non-circulation de fluide dans le dispositif quand on est dans une position donnée.

Cette condition est évidemment importante du point de vue de la sécurité, car le braquage ne peut pas être influencé par une différence de freinage sur la roue droite et la roue gauche, ou par l'éclatement d'un pneu ou sa rencontre avec un obstacle important.

Il existe néanmoins des possibilités de défaillance du système, notamment à cause des fuites qui peuvent survenir au niveau du tiroir du distributeur ainsi que du vérin hydraulique. Des circuits de récupération des fuites ont alors été installés pour contrer ces problèmes, mais ils n'ont pas été représentés dans nos différents schémas et plans.

Schéma bloc d'asservissement en position angulaire sur la DIRAVI :



4. Étude de la fonction : DURCIR

Principe du durcissement :

Le durcissement de la direction est obtenu par un effort mécanique variable venant s'appliquer sur une came, en liaison avec la colonne de direction ; il est totalement indépendant de la fonction assistance. Cette fois-ci, c'est la partie gauche du bloc de commande, ainsi que le composant appelé "régulateur centrifuge", qui vont faire l'objet de notre étude.

La colonne de direction est constamment en prise avec un pignon intermédiaire P5, qui est solidaire d'une came sur laquelle un piston de durcissement muni d'un galet cylindrique applique un couple résistant plus ou moins important. Ce couple dépend :

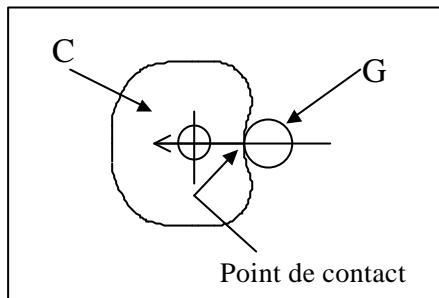
- de l'angle de rotation du pignon de commande P5 (influence de la forme de la came) ;
- de la force exercée par le piston (influence de la pression délivrée par le régulateur centrifuge).

Action de la came :

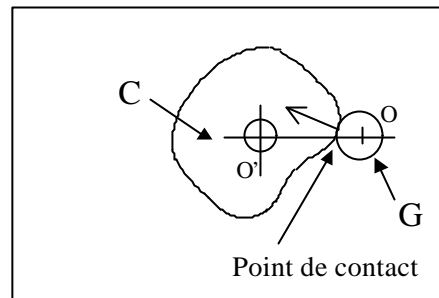
- **En ligne droite** : le point de contact du galet sur la came se trouve sur la droite reliant les centres O' et O du galet et de la came - L'effort du piston de durcissement s'exerce donc dans le creux de la came et tend à garder le véhicule en ligne droite pour laquelle cet effort ne produit aucun couple (position centrale neutre stable) ;

- **Lors d'un braquage** : si le conducteur entame un virage sur la gauche, la came tourne dans le sens indirect - Le point de contact du galet et de la came ne se trouve plus sur l'axe des centres O et O' , donc l'effort du piston transmis par le galet va provoquer un couple par rapport au centre O de la came, qui tend à la faire tourner dans le sens direct. L'action du piston s'oppose ainsi à la volonté du conducteur.

Il est à noter que le rayon de la came augmente avec l'angle polaire, donc à une vitesse donnée, plus le conducteur braque le volant, plus le couple résistant qui s'oppose à lui est important.



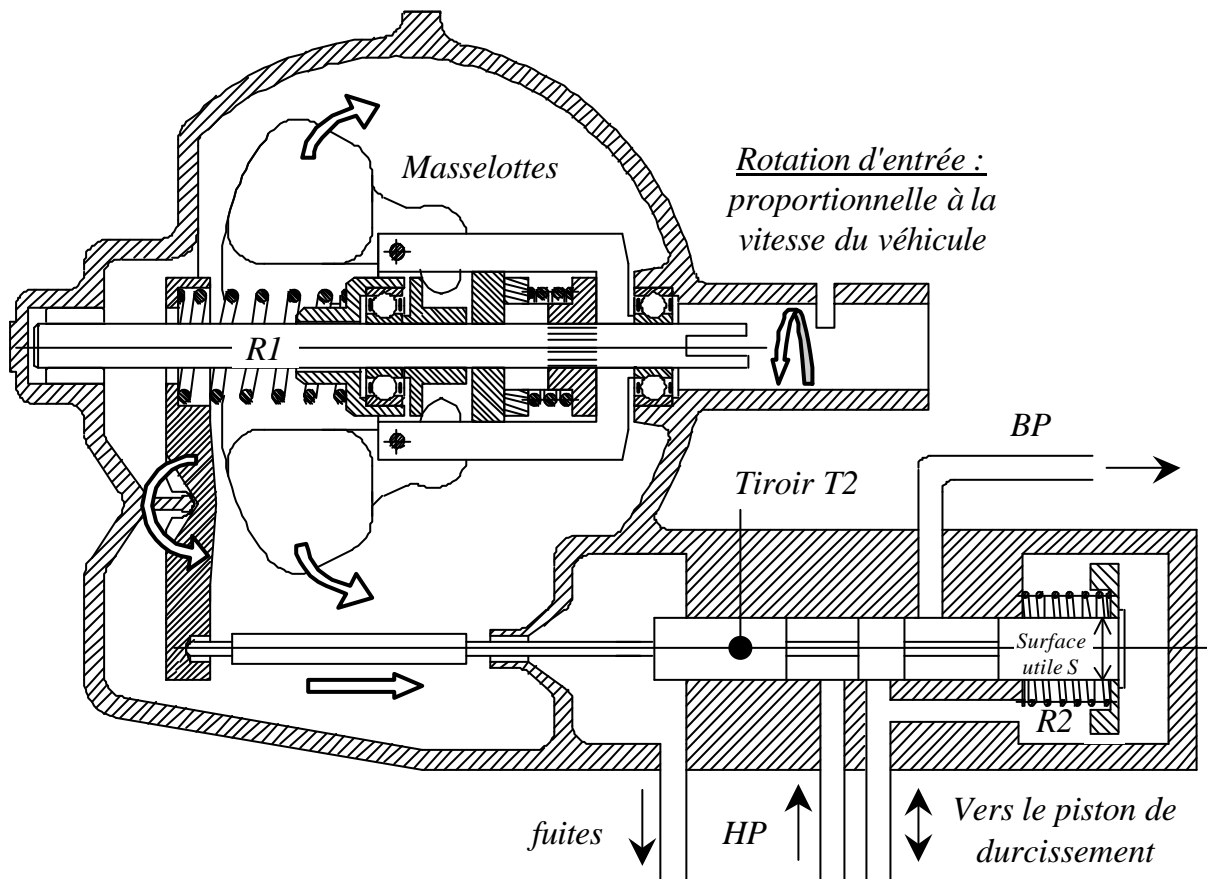
LIGNE DROITE



BRAQUAGE

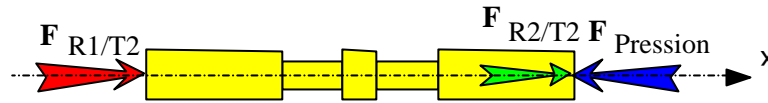
Action du régulateur centrifuge :

La direction devient de plus en plus ferme au fur et à mesure que la vitesse du véhicule croît car l'effort du piston augmente avec la pression P_u délivrée par le régulateur centrifuge. Celui-ci se compose d'un régulateur classique à masselottes et d'un ensemble tiroir-chemise régulateur de pression ; il est entraîné mécaniquement par flexible à partir du train avant du véhicule.



Le tiroir T2 se retrouve en équilibre sous l'action de trois forces :

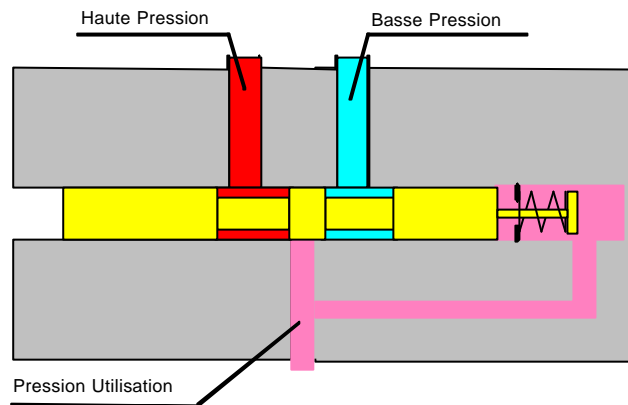
- l'action du ressort R2, comprimé et taré à 17,5 N, qui agit directement sur le tiroir ;
- l'action du poussoir, égale à l'action du ressort R1 comprimé, qui est transmise par un levier et qui dépend de la vitesse du véhicule (par l'intermédiaire de l'inclinaison relative des masselottes) ;
- l'action opposée du fluide, à la pression d'utilisation P_u , qui s'exerce sur la surface utile S à l'arrière du tiroir (cf. vue en coupe du régulateur, page précédente).



En fonctionnement stabilisé, l'équilibre du tiroir en projection sur son axe s'écrit donc :

$$F_{R1}(V) + F_{R2} - P_u \cdot S = 0$$

On peut remarquer que **tous les termes** de cette équation sont **variables**. Il n'y a donc pas qu'une seule position d'équilibre pour le tiroir T2, mais une infinité. Lorsque T2 se stabilise, il n'y a par contre plus de circulation possible (le circuit est dit fermé) entre les orifices P_u , HP et BP puisque P_u reste stable (pas de pertes de charge = plus aucun débit observé : cf. explications ci-dessous).



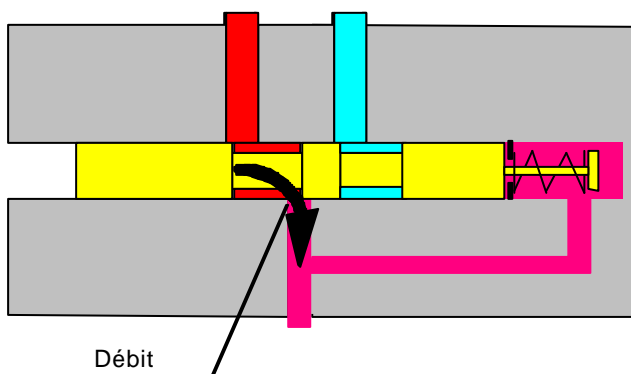
Véhicule à l'arrêt, moteur tournant :

Les masselottes M sont en position repos, le tiroir du régulateur est en équilibre sous l'action de la pression P_u et du ressort taré R2, d'où une pression d'environ 20 bars (figure ci-dessus).

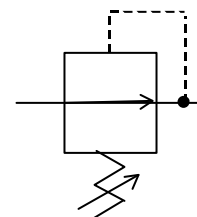
Véhicule roulant :

Les masselottes soumises à la force centrifuge vont s'écarter et le ressort R1 comprimé transmet son effort au tiroir T2 grâce au levier. Le tiroir se retrouve en équilibre lorsque la force engendrée par la pression régulée est égale à l'action des ressorts R1 et R2.

On s'aperçoit donc que c'est la pression de sortie qui commande le blocage ou non du tiroir et donc le passage ou non du fluide vers le circuit d'utilisation. Lorsque P_u atteint une certaine valeur le passage de l'huile est interrompu : nous avons affaire dans ce cas là à ce l'on appelle un **réducteur de pression** à valeur de **tarage variable** (puisque l'action de résistance des ressorts est variable selon la vitesse). La réduction de la pression lors de l'ouverture se fait simplement par **pertes de charge** au niveau de l'étranglement entre tiroir et orifice de sortie :



Fonctionnement modélisable en :
Réducteur de pression

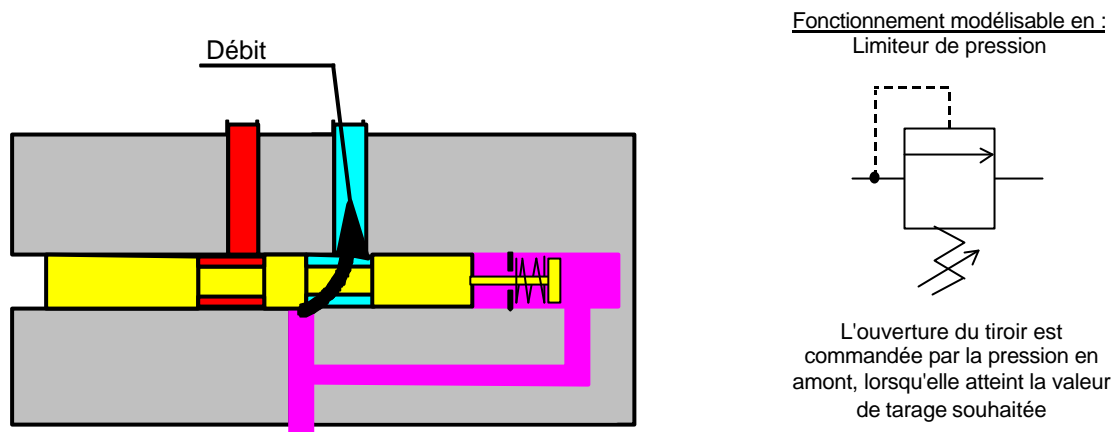


La fermeture du tiroir est commandée par la pression en aval, lorsqu'elle atteint la valeur de tarage souhaitée

Dans le cas d'une chute brutale de la pression à l'utilisation P_u dans le piston de durcissement (déplacement du volant d'une position braquée vers la position neutre, comme nous le verrons après), l'action du fluide sur le tiroir T2 diminue. Le tiroir se déplace vers la gauche et augmente la section de passage entre l'accumulation et l'utilisation. La perte de charge diminue, la pression P_u se remet à augmenter jusqu'à un nouvel équilibre du tiroir, et donc une re-fermeture du circuit.

Dans le cas contraire, si l'on observe un accroissement brusque de la pression à l'utilisation P_u dans le piston de durcissement (déplacement du volant du neutre vers une butée), l'action du fluide sur le tiroir T2 augmente et le tiroir se déplace vers la droite, mettant en communication le réservoir et l'utilisation. La section de passage augmentant, la perte de charge diminue, et la pression P_u diminue.

On s'aperçoit que le régulateur fonctionne dans cette configuration comme un **limiteur de pression** à valeur de **tarage variable**, puisque c'est la pression en amont (par rapport au sens de circulation de l'huile) qui commande l'ouverture ou non de cette "soupape de sécurité" lorsque la pression à l'utilisation est trop importante :



En pratique, les **variations de pression sont relativement lentes** du fait de la lenteur de déplacement du volant, donc la pression reste toujours voisine d'une pression en **fonctionnement statique**. La modélisation que nous avons proposé devient ainsi critiquable mais elle a le mérite d'essayer de schématiser au mieux la réalité technologique.

5. Étude complémentaire sur "l'asservissement" du rappel

Le rappel "asservi" comme le dénomme le constructeur est en fait une combinaison des deux fonctions précédentes, la fonction DURCIR commandant la fonction ASSISTER.

Le conducteur lâchant le volant, le couple qui s'opposait à sa volonté va s'appliquer sur la colonne de direction par l'intermédiaire du pignon intermédiaire P5 et de sa came associée. Cette colonne va agir sur la fonction ASSISTER, c'est-à-dire remplacer l'effort du conducteur sur le volant par un effort mécanique agissant directement sur l'arbre de commande, et ramener la direction en ligne droite, là où le couple ne s'exerce plus.

Phase de braquage, le conducteur lâche le volant :

Le piston de durcissement, qui exerce un couple sur la came par l'intermédiaire du galet, provoque la rotation de celle-ci.

Le pignon P5, solidaire de la came entraîne la colonne de direction et donc P1 ; la rotation du plateau de commande P1 est transmise au plateau P2, tandis que le plateau P3 est encore fixe ou presque, ce qui entraîne la translation du tiroir distributeur T1, et donc un retour assisté de la crémaillère vers sa position centrale.

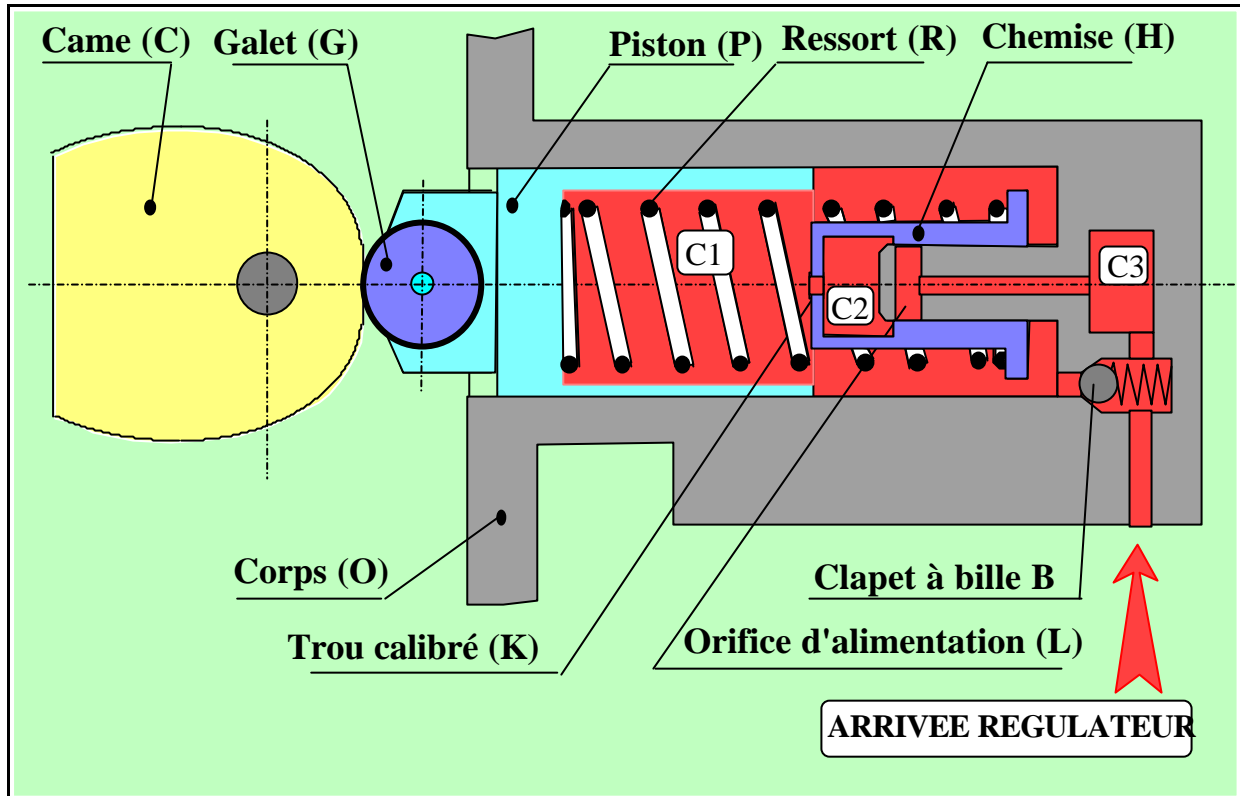
Mais la force du galet s'exerçant directement sur le piston de durcissement, on risque un retour trop rapide et trop brutal de la direction vers sa position neutre, et le volant pourrait échapper au contrôle du conducteur ou dépasser la position ligne droite.

Ainsi a-t-on installé un dispositif permettant de diminuer puis de stopper le passage du débit d'huile dans le vérin de durcissement : c'est le rôle du régulateur à débit variable couplé au piston.

Action du régulateur à débit variable :

Le régulateur à débit variable est constitué par :

- un corps fixe O dans lequel coulisse le piston de durcissement P ;
- une chemise H avec un trou calibré K coulissant sur la partie centrale du corps où sont percés deux petits orifices d'alimentation L venant du régulateur centrifuge ;
- un ressort R agissant sur le piston P et la chemise H ;
- un clapet à bille B et son ressort de retenue.



Trois chambres distinctes peuvent être repérées dans ce régulateur de débit :

- la chambre C1 est la chambre du piston ;
- la chambre C2 est la chambre de la chemise, comprise entre les orifices L et le trou calibré K ;
- la chambre C3 est la chambre liée constamment au régulateur centrifuge.

Position neutre :

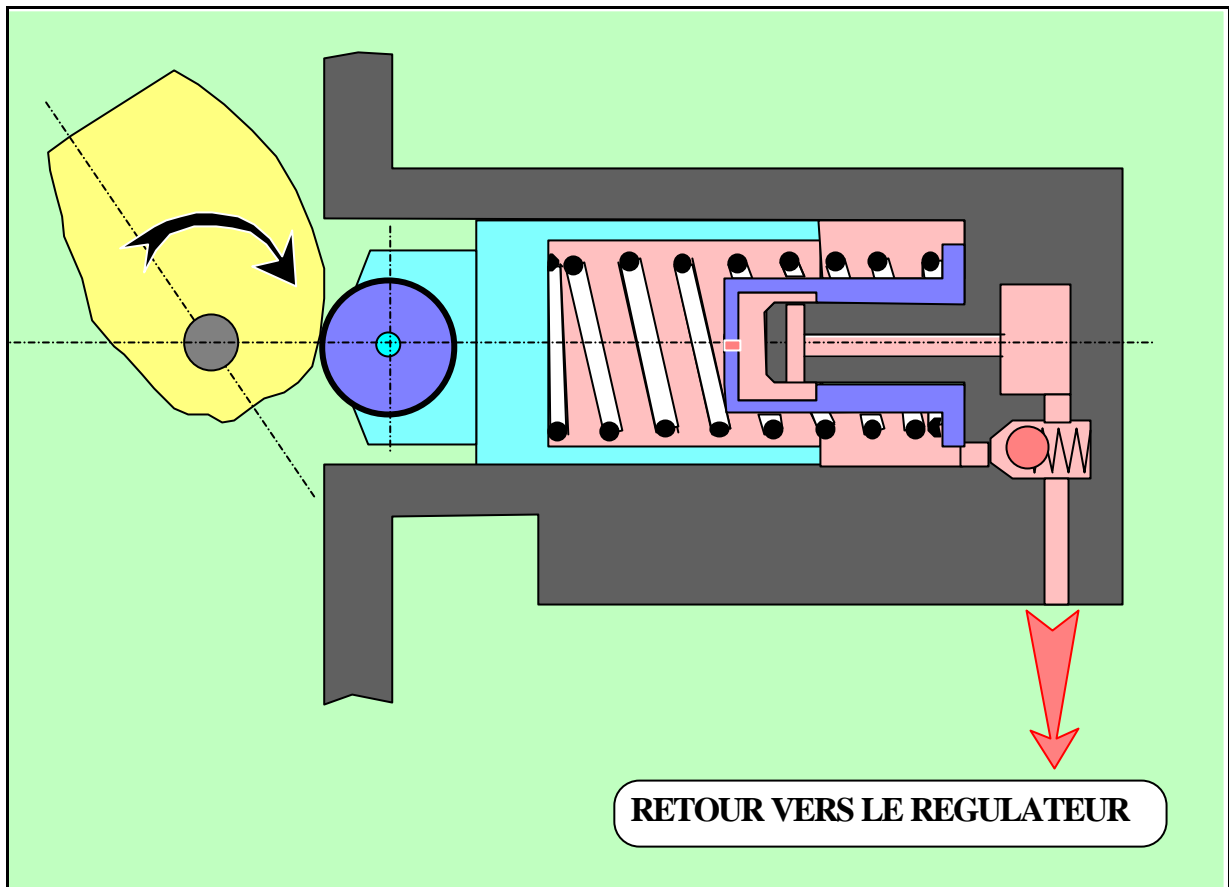
Dans cette position de repos, en ligne droite (cf. schéma ci-dessus), la pression P_u délivrée par le régulateur centrifuge règne dans les chambres C1, C2 et C3.

Le ressort R n'est pas sollicité, et la chemise H ferme les orifices L du corps ; le débit à travers le trou calibré K est donc nul.

Phase de braquage :

Lorsque le conducteur commence à tourner le volant, la came C fait pénétrer le galet G ainsi que le piston P dans le corps ; la pression augmente instantanément dans la chambre C1, ce qui induit l'ouverture du clapet à billes B et l'évacuation de l'excédent de fluide vers le régulateur centrifuge.

Le piston P dans son mouvement comprime le ressort R qui va se déplacer jusqu'à la mise en butée sur le corps O de la chemise H. Les orifices L sont alors ouverts, comme on le voit sur la figure suivante :



Phase de rappel :

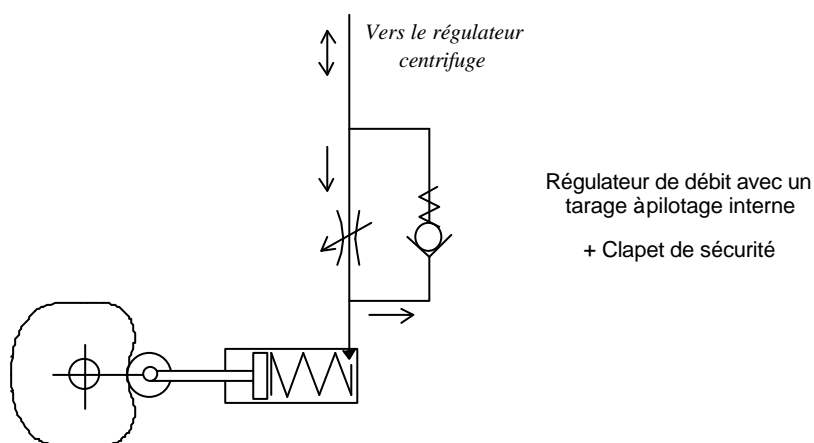
Si le conducteur lâche le volant, celui-ci va revenir vers la position neutre sous l'action de la pression agissant sur le piston P, mais aussi de la force de rappel du ressort R.

Le fluide venant du régulateur centrifuge arrive dans la chambre C2 par les orifices L : cette chambre est donc à la pression P_u du régulateur, alors que la chambre C1 est à une pression légèrement inférieure car le piston sous l'action du ressort a déjà commencé à se déplacer vers la gauche. La chemise est aussi entraînée vers la gauche, ce qui a tendance à comprimer légèrement le ressort.

Le déplacement de la chemise provoque une réduction progressive de la section des orifices L, de telle manière que le débit à travers le trou calibré K atteint une valeur qui est fonction à chaque instant de la tension du ressort.

Le ressort étant d'autant plus comprimé que le volant est braqué, la vitesse d'écoulement à travers le trou calibré, et donc la vitesse de rappel du volant, a une certaine valeur au début du rappel, et tend vers zéro lorsque le volant revient à sa position de ligne droite.

Schématisation possible :



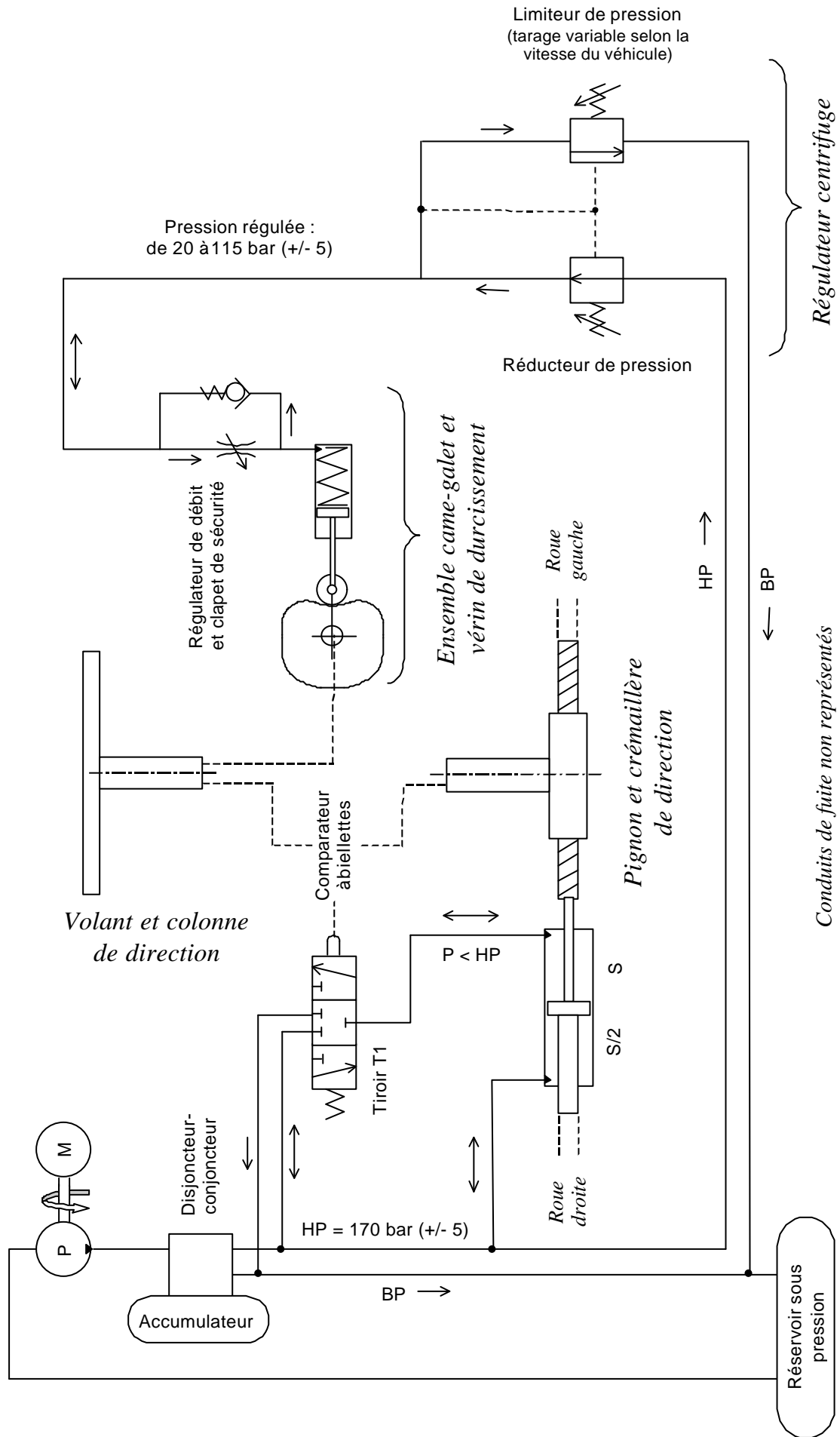
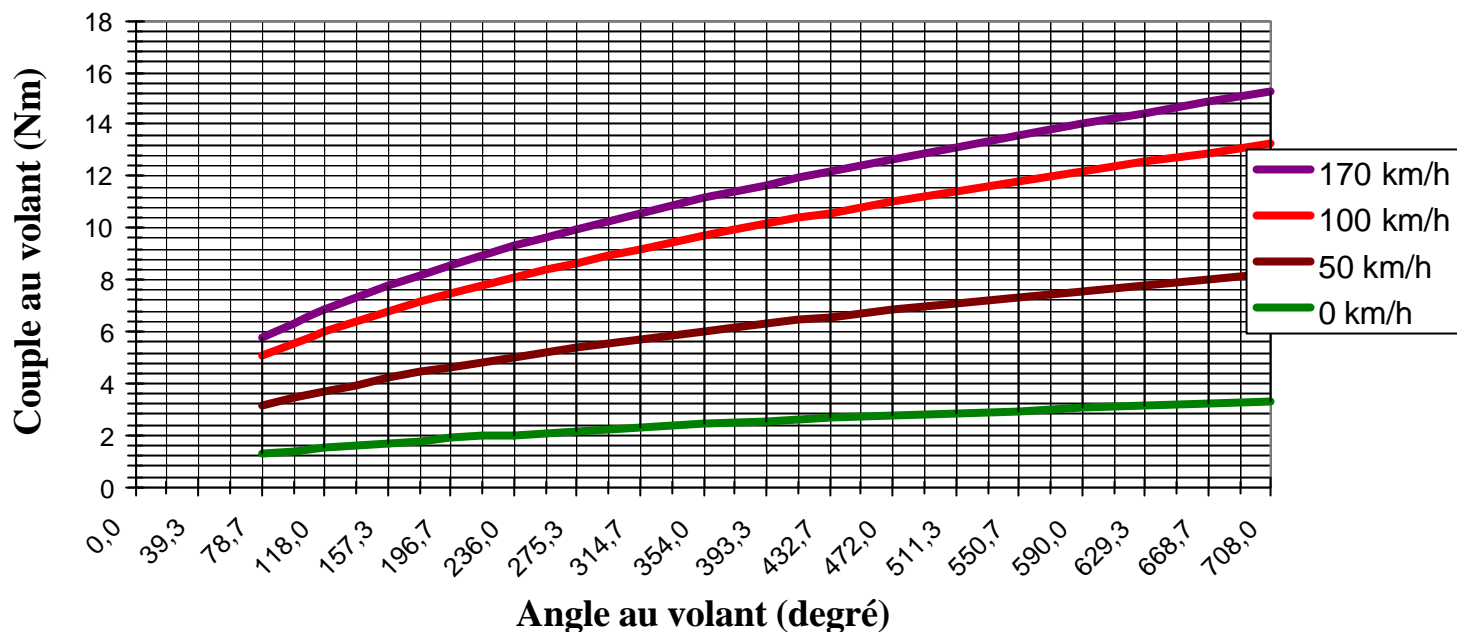
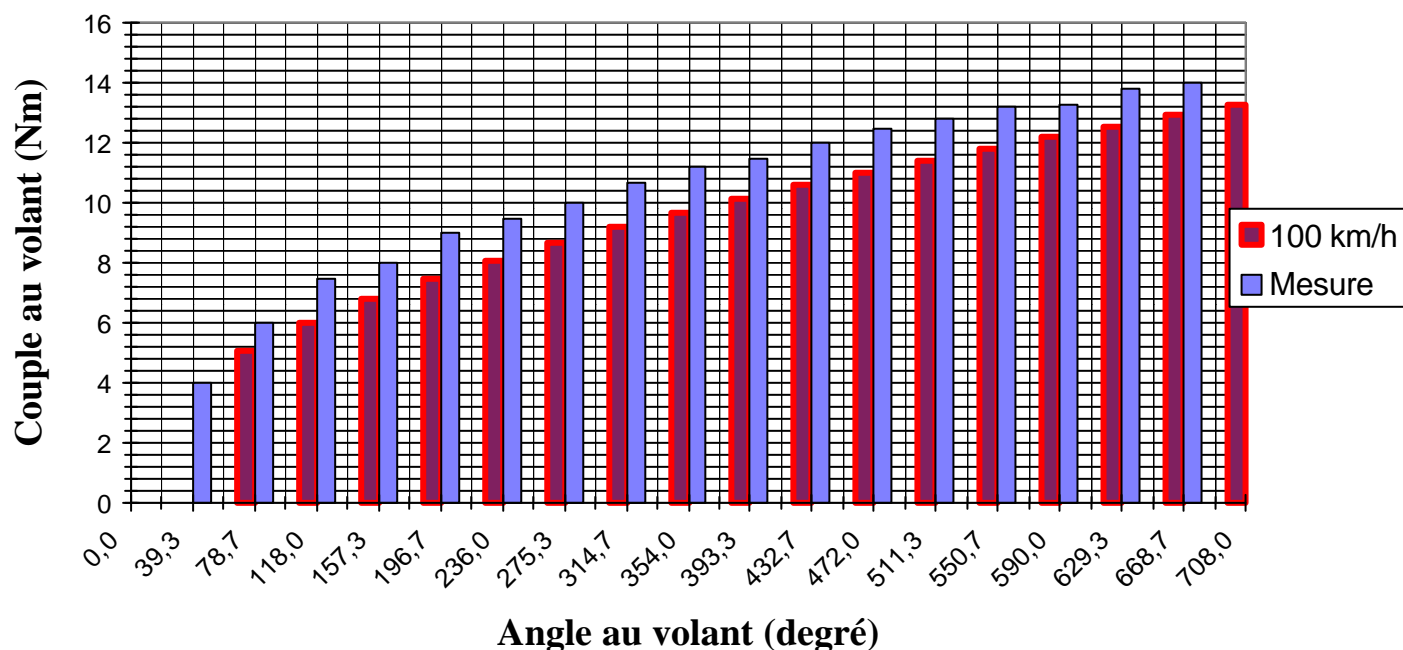


Schéma hydraulique de la DIRAVI

Couple au volant en fonction de l'angle au volant pour différentes vitesses du véhicule

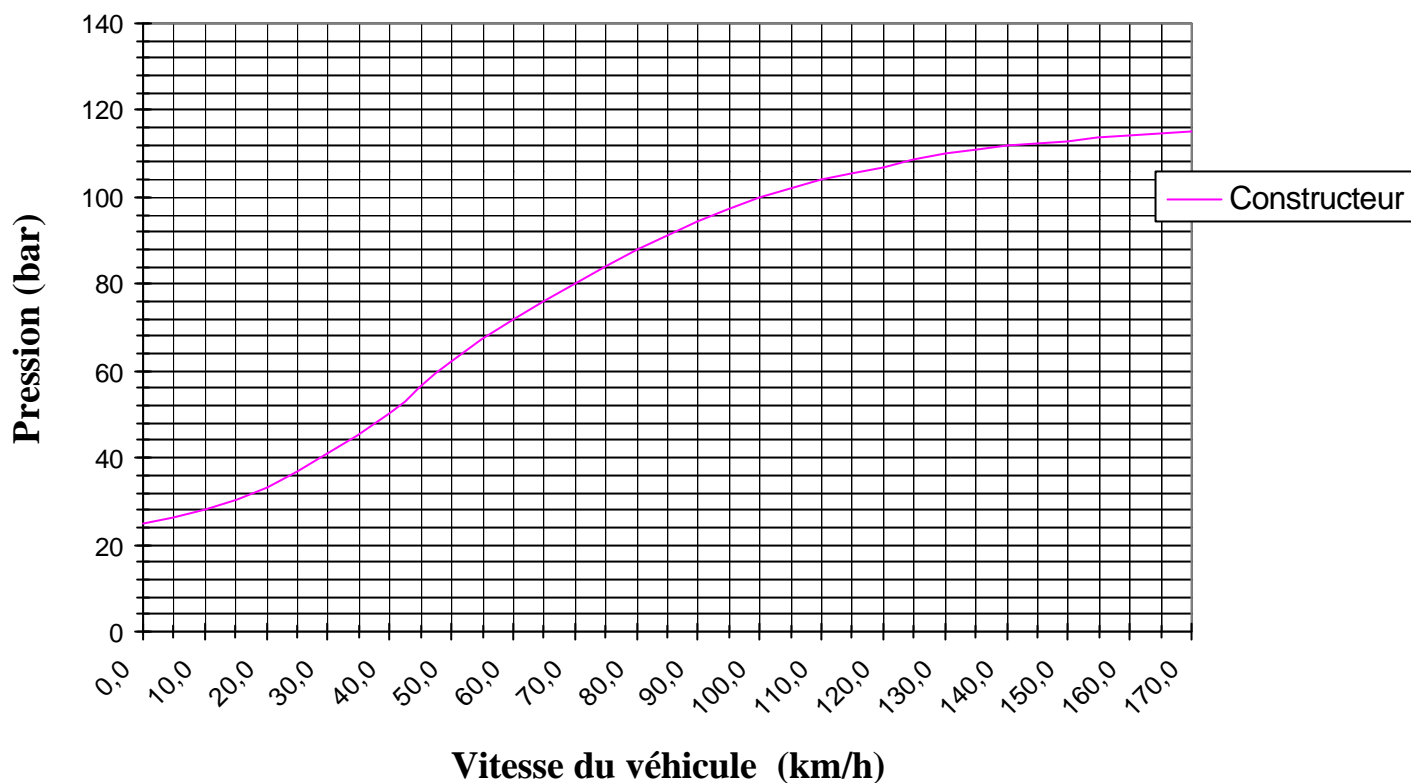


Couple au volant en fonction de l'angle au volant pour différentes vitesses du véhicule



Nota : les différences entre mesures et données peuvent s'expliquer par l'approximation des valeurs fournies par le constructeur, avec une pression P_u à ± 5 bar.

Pression du régulateur en fonction de la vitesse du véhicule



Vitesse véhicule (km/h)	Pression Constructeur (+/- 5 bar)
0,000	25,000
10,000	28,000
20,000	33,000
30,000	41,000
40,000	50,000
50,000	62,000
60,000	72,000
70,000	80,000
80,000	88,000
90,000	94,500
100,000	100,000
110,000	104,000
120,000	107,000
130,000	110,000
140,000	112,000
150,000	113,000
160,000	114,000
170,000	115,000