

Les différentiels à glissement limité

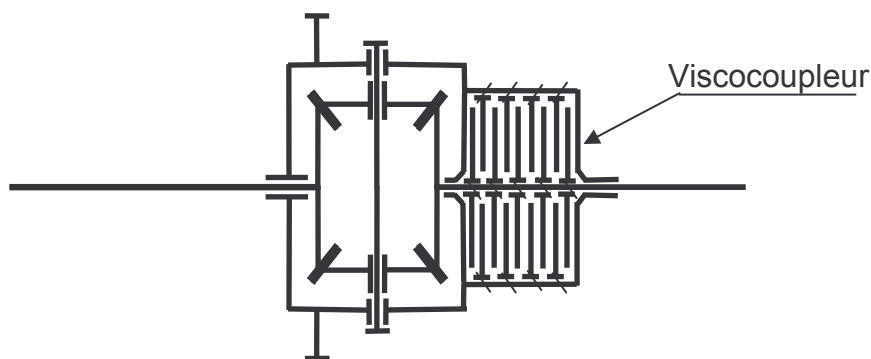
(Fait suite à l'INFOTECH n°13)

L'INFOTECH précédente concluait sur la nécessité de faire appel aux différentiels auto-bloquants pour certaines applications et sur leurs effets perturbateurs pour le comportement dynamique du véhicule.

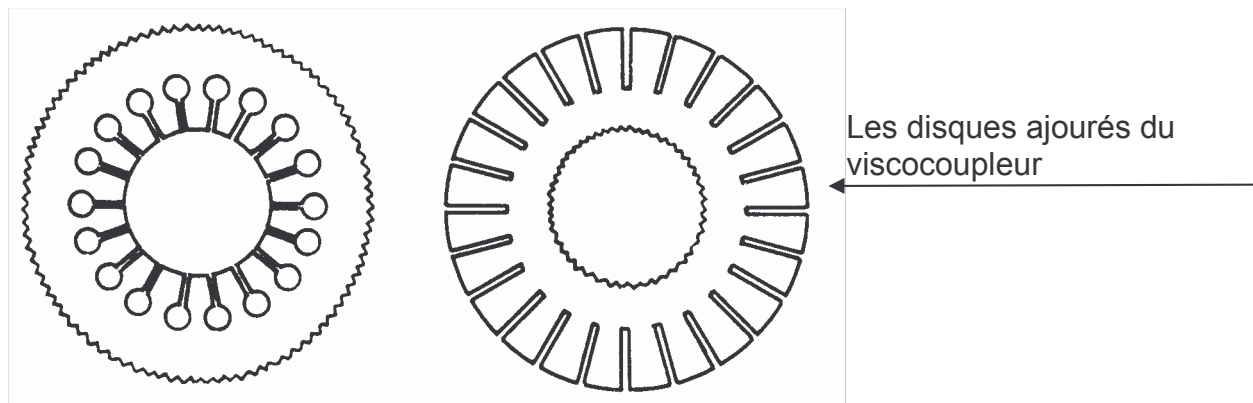
Une autre famille de systèmes, où le frottement solide est remplacé par des frottements visqueux, permet d'atténuer en grande partie ces défauts tout en conservant les effets bénéfiques sur la motricité.

Le différentiel Fergusson à viscocoupleur

Le viscocoupleur est un embrayage mutidisques fonctionnant grâce à la viscosité de son huile de remplissage (aucun effort presseur n'est ajouté). Les réalisations actuelles sont dérivées des brevets déposés par la société Harry Fergusson (spécialisée dans les transmissions 4 roues motrices) en 1954.

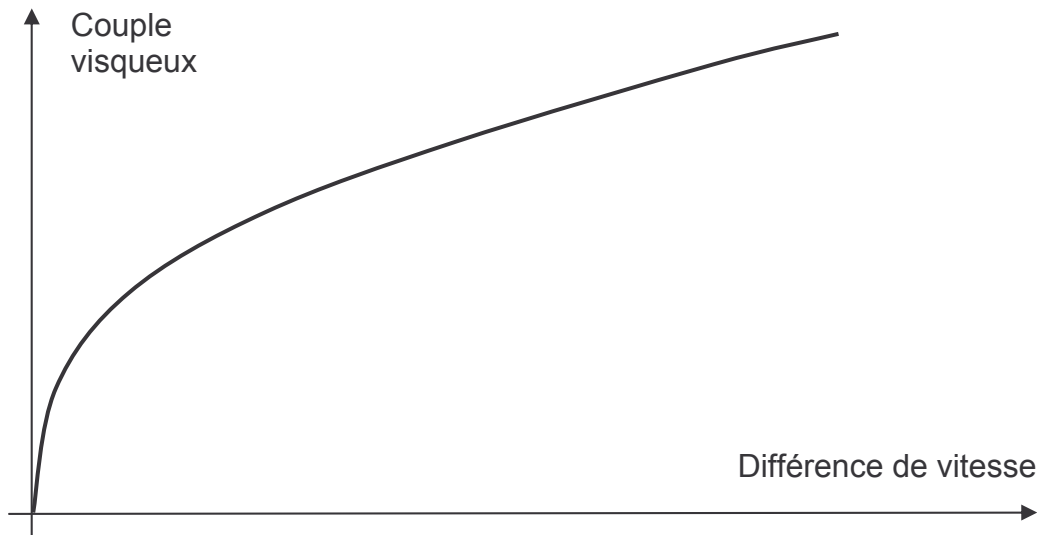


Il se présente sous la forme d'une cartouche compacte et étanche pouvant être facilement intégrée dans le boîtier différentiel. Des disques sont alternativement solidaires de l'arbre central et du carter grâce à des cannelures, ils sont empilés en quantité (40 à 50 couramment) et un faible jeu est conservé entre eux (de l'ordre de 0,2 mm).



Le volume de la cartouche est parfaitement étanche et rempli partiellement (de 75 à 95 %) par un fluide silicone à forte viscosité. Lorsqu'une différence de vitesse apparaît entre l'arbre et le carter, un couple est généré entre les deux groupes de disques. Sa valeur dépend des dimensions de l'appareil, du nombre de disques, des

jeux entre disques, de la forme des perforations des disques, du taux de remplissage de la cartouche, de la viscosité du fluide, de la température, de la pression interne, ..., mais le facteur le plus important pour nous est **la différence de vitesse**. La forme générale de la caractéristique [couple visqueux/différence de vitesse] présente cette allure :



La forme générale de cette courbe s'explique par le **comportement non newtonien**⁽¹⁾ du fluide de remplissage.

Rappel : Un comportement newtonien suppose que la contrainte de cisaillement entre deux couches de fluide en mouvement varie proportionnellement au gradient de vitesse entre les deux couches. Le rapport entre ces deux grandeurs est alors constant et nommé viscosité dynamique du fluide (souvent noté μ).

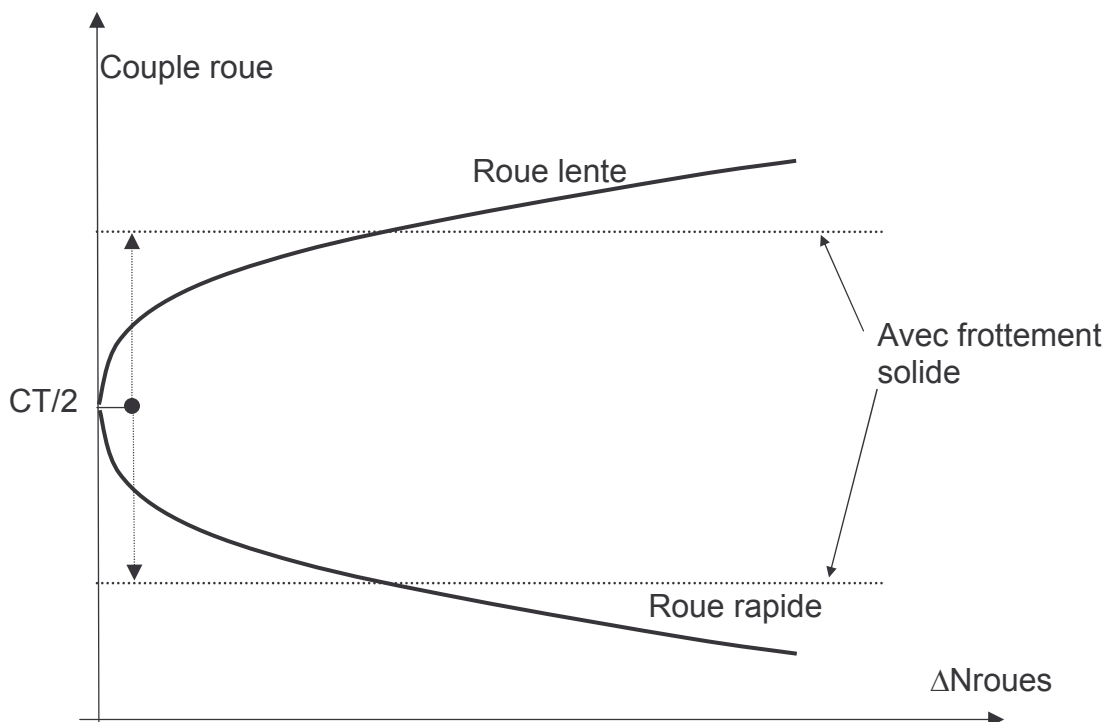
Un fluide non newtonien voit sa viscosité évoluer avec la vitesse de cisaillement (et présente éventuellement une contrainte minimale d'écoulement différente de zéro). Cette non linéarité explique la courbure de la caractéristique ci-dessus.

Il faut signaler que la viscosité augmente également avec la pression interne du fluide (la contrainte normale due à la pression agit sur la contrainte tangentielle) pratiquement de manière exponentielle, cette propriété n'est pas spécifique au fluide silicone car elle est effective pour la majorité des liquides.

Lors de la rotation des disques un effet de pompage, dû aux découpes des disques, crée une circulation de l'huile dans le boîtier : l'air est émulsionné dans l'huile. Le degré d'émulsion dépend du remplissage initial et aura une importance sur le comportement du viscocoupleur en fonction de la température (voir plus loin).

⁽¹⁾ Ce comportement non newtonien ne lui donne pas de propriété particulière vis-à-vis de la température, sa viscosité diminue avec l'échauffement (contrairement à ce qu'affirment quelques documentations techniques largement diffusées). On peut noter tout de même que la stabilité de sa viscosité vis-à-vis de la température est bien supérieure à toutes les huiles traditionnelles (y compris multigrades) ce qui est également intéressant dans ces applications où l'échauffement sera toujours important.

Action sur la motricité



Avec cette application l'évolution des couples droite et gauche ne dépend en rien du couple moteur appliqué au boîtier de différentiel, la seule grandeur ayant une action est la différence de vitesses de rotation des roues droite et gauche (nous la noterons ΔN). Voici les couples roues résultants :

Les pointillés reprennent le tracé du graphe de la page 8 de l'INFOTECH n°13 ; nous observons que la dissymétrie de couple s'installe progressivement avec le viscocoupleur et continue d'augmenter si le patinage n'est pas maîtrisé. Les systèmes à frottement solide installent brutalement une dissymétrie même pour un ΔN faible qui ne demanderait aucune action de blocage (en virage par exemple).

C'est bien ce manque de progressivité du frottement solide qui amène les problèmes de comportement détaillés dans l'INFOTECH 13 : le viscocoupleur va donc permettre par sa caractéristique une certaine temporisation dans les comportements dynamiques, ce qui perturbera moins le conducteur.

De plus l'effet de blocage n'atteindra une valeur importante que si un ΔN significatif apparaît : La relation de cause à effet est donc plus adaptée à la réalité des situations rencontrées.

Par contre la dissymétrie des couples aux roues n'évolue plus avec le couple transmis au boîtier de différentiel. Ce fait constitue bien un défaut par rapport aux systèmes examinés dans l'INFOTECH n° 13 car il va falloir adopter un compromis pour le tarage de la cartouche : pas trop élevé aux faibles charges et pas trop faible aux fortes charges. Ce compromis sera difficile à réaliser pour des applications orientées sur la seule performance.

Remarque : Il existe une évolution de ce mécanisme qui pallie ce défaut. La cartouche est à volume variable grâce à une flasque mobile et étanche qui prend

place sur un côté. Elle est asservie en position par un calculateur et un vérin hydraulique ce qui permet d'obtenir une caractéristique adaptative selon les conditions d'usage par variation des jeux entre disques. Cette application a été utilisée, par exemple, chez Alfa Roméo sous l'appellation « Viscomatic » : le jeu varie alors de 0,15 mm à 0,50 mm et la flasque mobile est commandée en fonction de multiples informations (principalement capteurs rotation roues et papillon des gaz). Le surcoût de cet automatisme rend cette application assez rare.

Blocage par le phénomène de « hump »

L'effet de « hump » (gêne, entrave en anglais⁽²⁾) est un blocage qui va se produire entre les deux groupes de disques et aura un effet protecteur en cas d'échauffement.

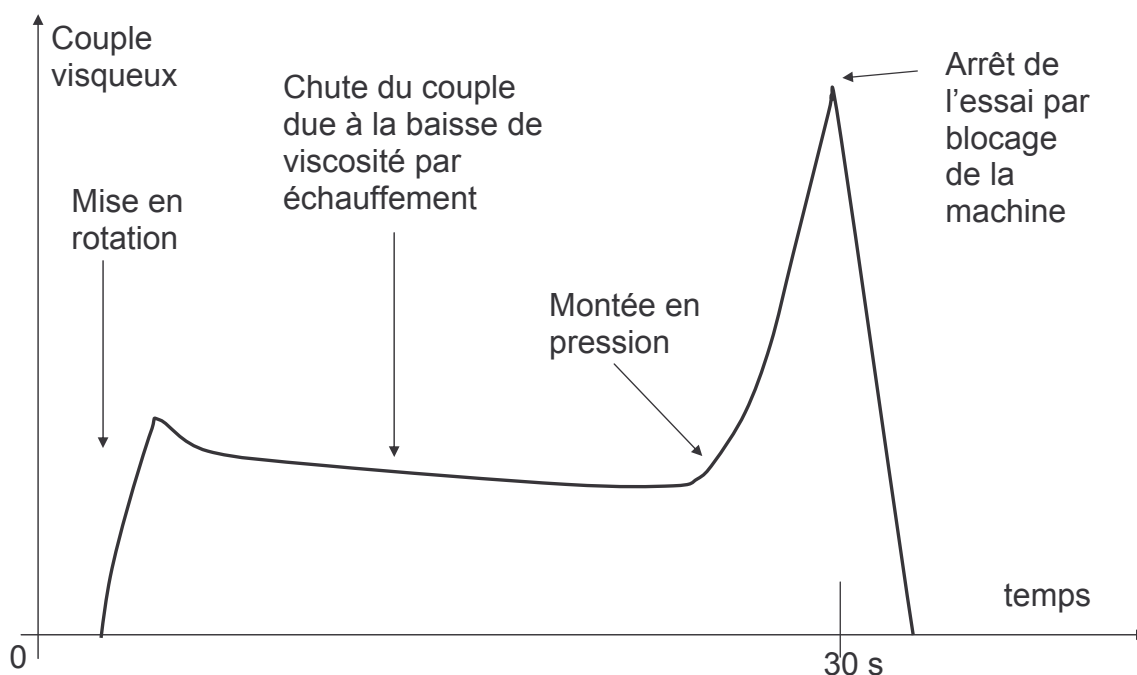
Considérons un viscocoupleur monté sur un différentiel inter-ponts ; en roulage sur un terrain très peu adhérent un patinage permanent existe sur chacune des 4 roues. La répartition des efforts moteurs et des charges font que les patinages avant et arrière ne sont jamais identiques, le travail du viscocoupleur est alors permanent tant que la situation de roulage est maintenue (imaginons la montée d'un col enneigé par exemple).

Le frottement interne produit un échauffement du fluide silicone et la température de la cartouche est régulièrement croissante, elle pourrait monter à des valeurs dangereuses pour le système.

L'échauffement du fluide produit une dilatation de celui-ci, la pression interne de la cartouche monte à une vitesse qui dépend de son degré de remplissage. Au-delà d'une certaine pression la viscosité, qui jusque là diminuait par la température, augmente rapidement car le paramètre pression devient prépondérant et rend l'huile très difficile à mobiliser.

Le couple entre les disques est alors multiplié par 4 à 5 ce qui annule le ΔN et amène la cessation de l'échauffement. Le phénomène de « hump » est ainsi protecteur.

Voici l'allure du couple relevé à ΔN constant sur une machine d'essai :



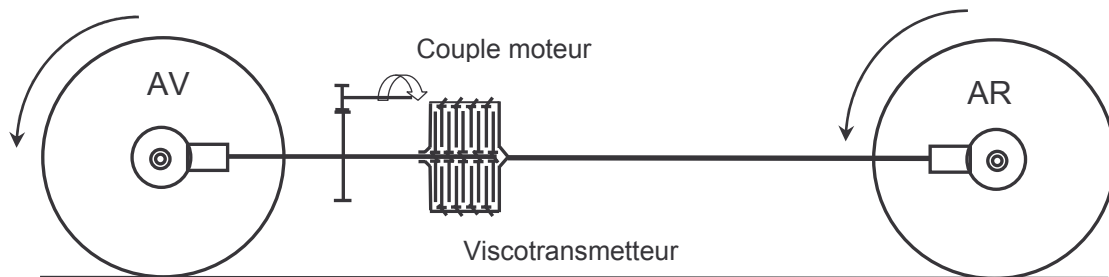
⁽²⁾ Vous trouverez des documents qui nomment ce même effet « hump » par analogie avec la bosse que dessine la courbe de couple quand il apparaît

Domaine d'application

Le montage décrit ci-dessus est utilisé majoritairement sur les **différentiels inter-ponts** des véhicules 4 roues motrices. C'est à cet emplacement que sa progressivité est appréciable car son action ne perturbe pas trop le comportement en lacet du véhicule et laisse au conducteur le temps d'adapter ses actions.

Le montage dans le différentiel **inter-roues** d'un viscocoupleur est plus rare (utilisé tout de même par exemple sur un coupé Fiat) car il est demandé alors un temps de mise en action plus faible et sa progressivité peut être un défaut. Les solutions à frottement solide restent privilégiées.

Un autre montage très répandu sur les véhicules dits à « traction intégrale » (c'est-à-dire à 4 roues motrices pour une utilisation route exclusive) est le montage de la cartouche visqueuse en **viscotransmetteur**. Ce terme est utilisé car dans ce cas le différentiel inter-ponts disparaît et la cartouche visqueuse relie directement l'essieu moteur AV à l'essieu AR.



L'essieu avant reçoit la totalité du couple moteur tant que le synchronisme des roues est réalisé par l'adhérence des pneumatiques sur le sol. Les deux arbres sont à la même vitesse et le couple visqueux est nul. Lorsque les conditions d'adhérence deviennent mauvaises les roues avant voient leur vitesse augmenter par patinage ; les deux arbres ne sont plus synchrones et il y a injection de couple vers l'essieu arrière.

L'intérêt de ce montage est la simplicité et le coût réduit mais aussi le fait que le typage « roue AV motrices » subsiste⁽³⁾, à l'identique d'une deux roues motrices. Le conducteur ressent des sensations habituelles ce qui n'est pas toujours le cas avec un apport de couple permanent sur les 4 roues.

Le différentiel OLSD Nissan (schéma page suivante)

Ce type de montage a été utilisé, par exemple, sur piste en formule 3000.

Le cœur du système est constitué d'une pompe hydraulique à pistons radiaux (repère 3). Le pompage est activé par la rotation entre le boîtier de différentiel (repère 1) auquel sont liés les pistons et le corps de pompe (repère 2) lié à un arbre de roue. C'est l'excentration « e » qui règle la course des pistons.

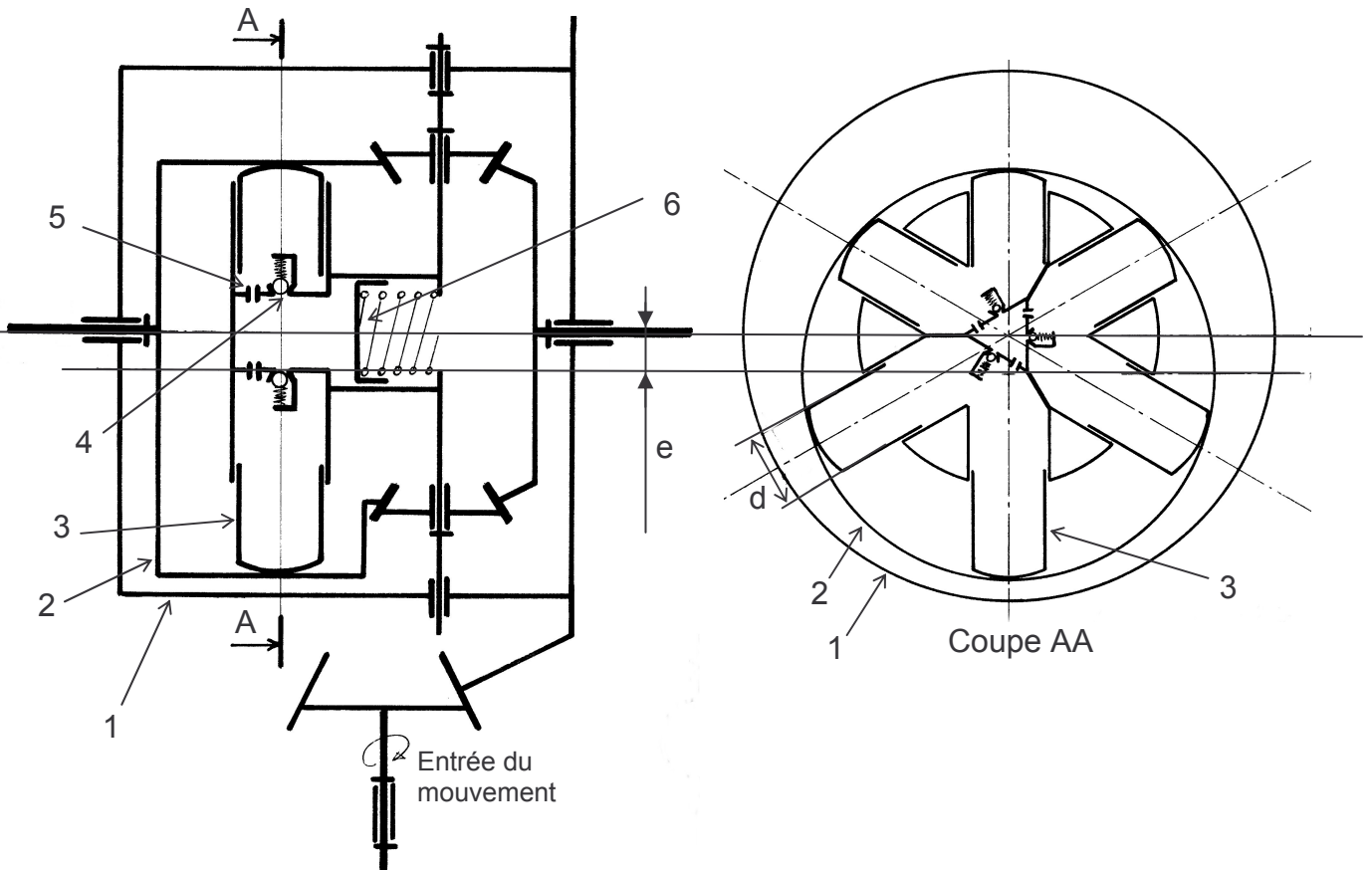
Chaque couple de pistons est doté d'un clapet de remplissage (repère 4) et d'un gicleur de sortie (repère 5) chargé de laminer le fluide débité et créant une pression de refoulement.

Le piston (repère 6) et son ressort associé sont là pour amortir les pulsations et conserver une partie de la pression en absence de rotation.

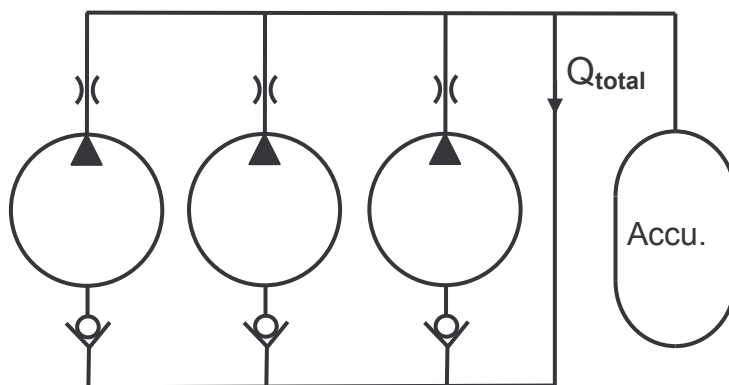
⁽³⁾ Sauf dans la situation d'un virage très serré où les roues AR « poussent » sans qu'il y ait patinage à l'AV. Ce cas se rencontre à basse vitesse.

Pour un diamètre de piston « d » le volume refoulé par tour (V_{tour}) sera de
 $V_{\text{tour}} = \pi \cdot d^2 \cdot 6 \cdot e / 4$ ce qui implique que le débit total refoulé vaut
 $Q_{\text{total}} = \Delta N \cdot V_{\text{tour}}$ (ΔN en tr/s)

Ce que nous cherchons c'est : quelle pression et ensuite quel couple de blocage va être créé par ce débit ? Nous pourrions ensuite visualiser la caractéristique Couple = $f(\Delta N)$ de cet équipement.



Voici le système ramené à un schéma de principe :



Pour le débit total les trois gicleurs en parallèle représentent une section totale de passage s_g . En considérant que la loi de Bernoulli peut s'appliquer dans ce cas, nous avons : $Q_{\text{total}} = s_g \cdot (2 \cdot Pr / \rho)^{1/2}$ ou ρ est la masse volumique de l'huile et Pr la pression de refoulement moyenne à travers les gicleurs
 Ce qui donne en reprenant l'expression du débit :

$$\Delta N \cdot V_{\text{tour}} = s_g \cdot (2 \cdot Pr / \rho)^{1/2} \quad \text{Ou} \quad (\Delta N \cdot V_{\text{tour}})^2 = s_g^2 \cdot 2 \cdot Pr / \rho$$

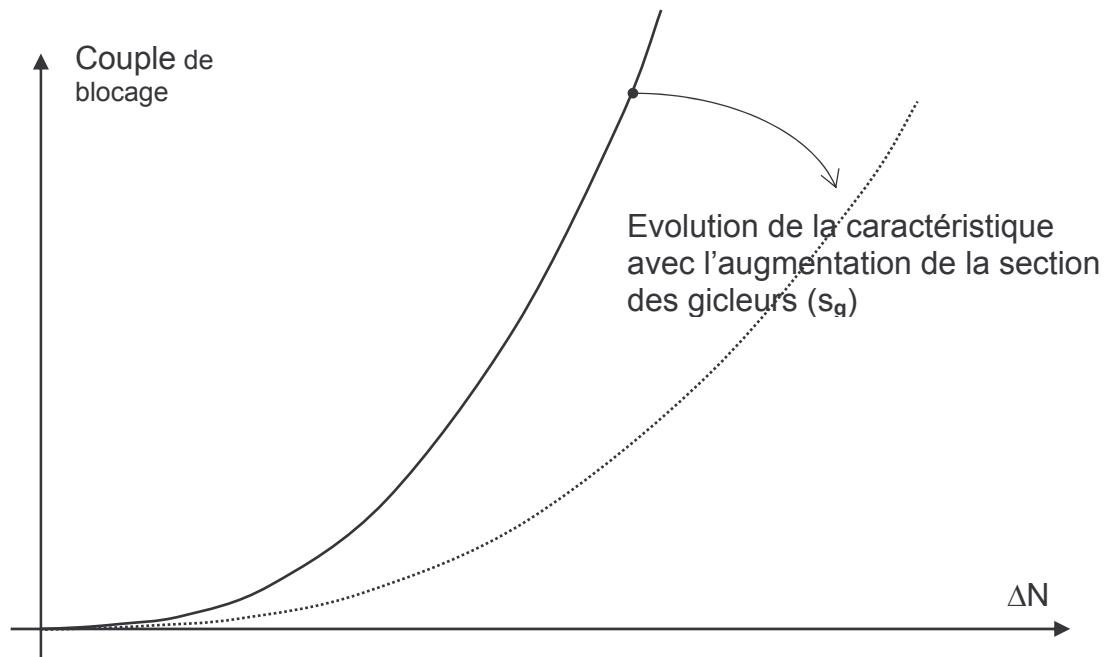
Nous pouvons poser également que le travail du couple rotor/boîtier est égal au travail de la pression (si les frottements mécaniques sont négligés) ce qui donne exprimé en termes de puissance :

$$Pr. Q_{total} = \text{Couple} \cdot \Delta N \cdot 2\pi$$

A partir des 2 équations précédentes nous obtenons :

$$\text{Couple} = (\rho/4\pi) \cdot (V_{tour}^3/s_g^2) \cdot \Delta N^2$$

Le couple de blocage évolue donc avec le carré de la différence de vitesse des deux arbres ce qui donne cette allure de la caractéristique :



L'intérêt de cette allure parabolique est le faible effet de blocage pour les écarts de vitesses faibles puis une croissance rapide dès que ΔN devient significatif. Cette tendance est à l'inverse du viscoupleur dont le couple présente une forte croissance au début et évolue plus lentement ensuite.

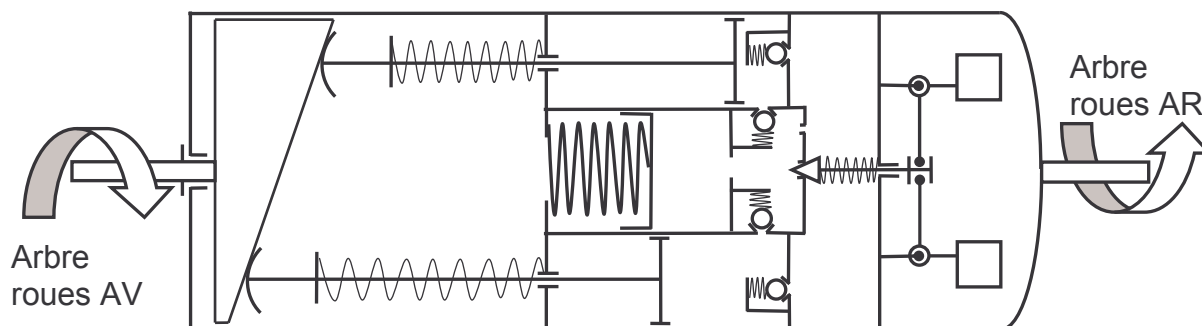
Le résultat est que ce système perturbe peu le comportement dynamique du véhicule pour toutes les situations de roulage en adhérence, tout en autorisant des couples de blocages **très importants** dès qu'une situation de patinage est détectée.

Nous pouvons ajouter à son avantage que sa caractéristique est très facile à adapter à chaque véhicule puisque le principal paramètre de réglage est la section des gicleurs (s_g)

Son adaptation Renault sur Kangoo

La réunion de Renault et Nissan a permis d'utiliser ce brevet sur le Renault Kangoo en inter-ponts. (En montage direct comme un viscotransmetteur)

Le principe est resté identique mais la réalisation a évolué ; les pistons sont axiaux et un plateau à cames les actionne. Le plateau possède 2 cames et le rotor 9 pistons ce qui produit 18 refoulements par tour et garanti une bonne régularité cyclique.



Une autre différence importante est que la section de giclage va évoluer avec la vitesse de rotation du boîtier c'est-à-dire avec la vitesse véhicule grâce à un système centrifuge.

Sur le schéma de principe ci-dessus le mécanisme centrifuge est représenté dans la partie droite du boîtier. Lorsque la vitesse de rotation des roues AR (*proportionnelle à la vitesse véhicule en situation adhérente*) augmente, les masselottes s'écartent et libèrent un gicleur supplémentaire ce qui réduit l'action de blocage du système.

Cet artifice permet de privilégier la motricité en terrain difficile pour une utilisation utilitaire, à faible vitesse, tout en conservant automatiquement un comportement sûr à des vitesses soutenues sur route.

En réalité le système de la Kangoo possède deux mécanismes de ce type qui interviennent à 2 seuils différents :

- Le premier abaisse le tarage initial à partir de 50 Km/h
- Le deuxième crée une deuxième chute du tarage au-delà de 100 Km/h

Le résultat est un effet de **couplage adaptatif** avec la vitesse du véhicule.

Les systèmes de blocage actifs

Ce sont les systèmes qui sont capables de gérer en temps réel et selon de multiples paramètres leurs effets de blocage alors que tous les systèmes précédents étudiés dans ce document sont basés sur des lois de comportement figées.

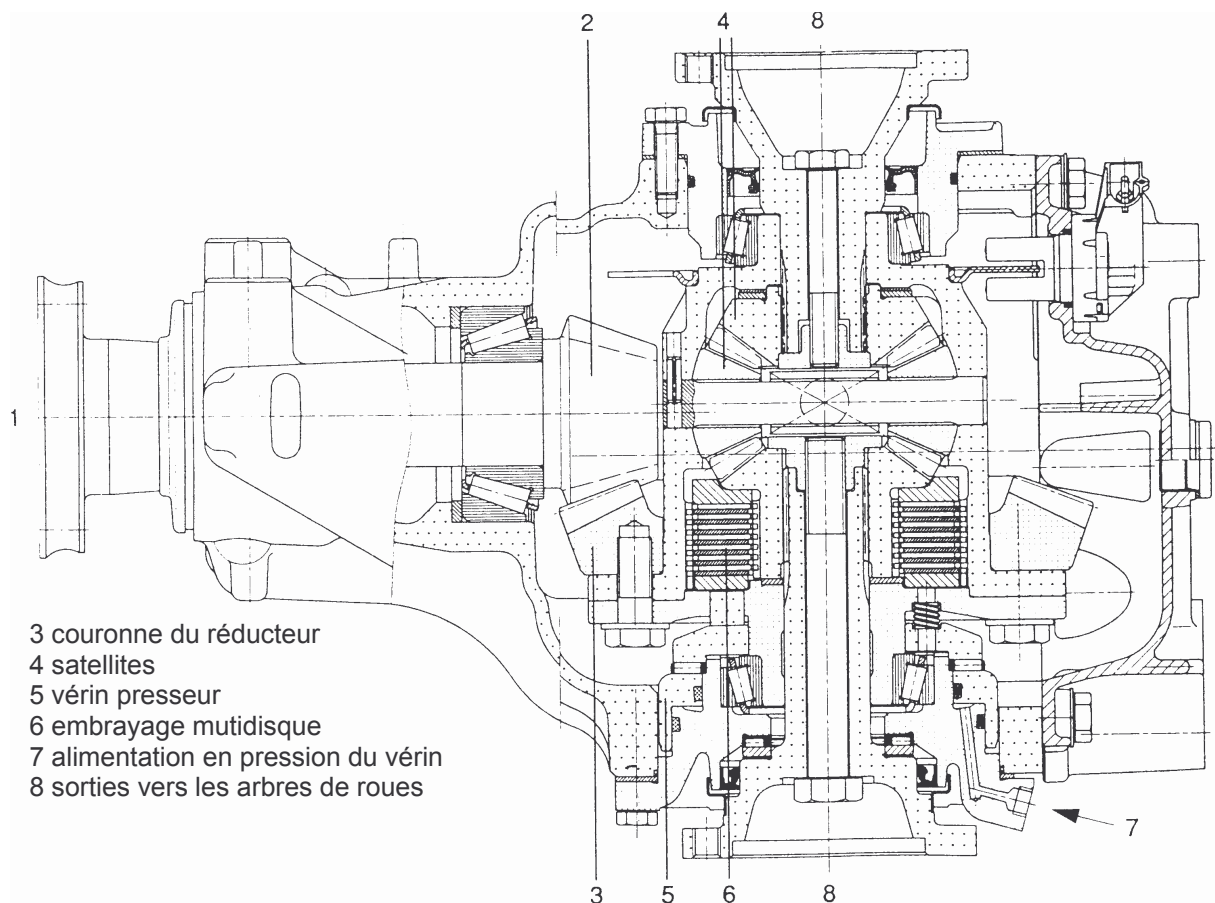
Les parties calcul, préactionneurs et actionneurs qu'il faut ajouter à la fonction les rendent très chers et réservés aux gammes hautes des constructeurs.

Le différentiel à embrayage piloté

Exemple BMW (figure page suivante)

L'embrayage mutidisque (6) reçoit du vérin (5) un effort presseur qui est lui-même commandé par une pression d'huile variable (arrivant en 7). Le calculateur (système GSA dans ce cas) peut alors piloter le couple de blocage par modulation de la pression.

La pression est générée par un groupe de pression autonome (environ 160 b) puis 2 électrovannes créent des phases successives d'admission, maintient et chute de la pression exactement comme une régulation de la pression de freinage par la fonction ABS.



Les grandeurs d'entrée permettant la régulation sont : différence de vitesse des roues arrières, accélération angulaire des roues arrières, vitesse du véhicule, intensité de la pression de freinage et accélération longitudinale du véhicule

Avantage : il n'y a plus obligatoirement blocage quand il y a un écart de vitesse (en virage par exemple). Par contre c'est toujours la roue la plus lente qui reçoit le plus de couple.

Remarque : Il faut citer le coupleur HALDEX (utilisé par exemple sur certaines Audi Quattro) qui est en quelque sorte un « mélange » de deux familles de système.

Il est constitué d'un embrayage multidisques commandé par une pression variable, pilotée par un calculateur (comme le BMW). Son originalité est que la pression gérée par le calculateur est issue d'une pompe interne actionnée par un plateau à cames selon une architecture rappelant l'application Kangoo.

Une pompe électrique assure le gavage du système, la circulation de l'huile pour refroidir l'ensemble et une pression minimale de travail.

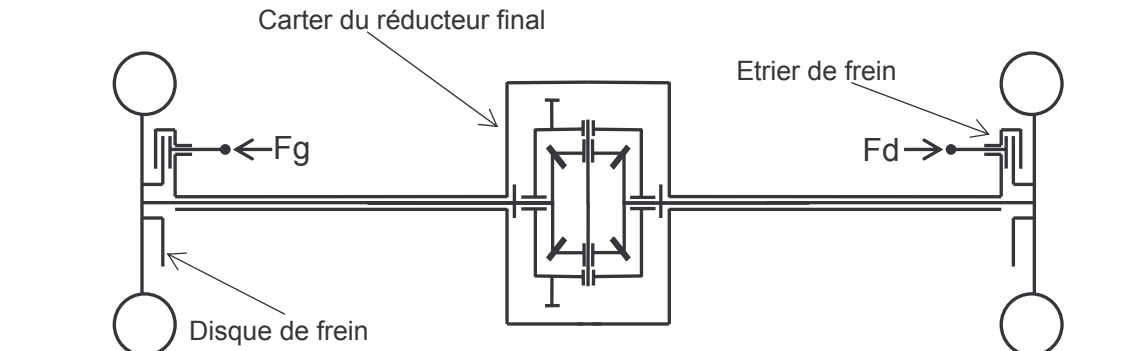
Un tel système permet une adaptativité de la fonction par la gestion électronique tout en conservant la caractéristique intrinsèque $\text{Couple} = K \cdot \Delta N^2$ due à la partie opérative qui permet de réagir à l'intérieur du temps de réponse de la partie commande.

La qualité de réalisation et le refroidissement par la circulation d'huile autorisent des applications de forte puissance (Couple au niveau de l'embrayage jusqu'à 3200 Nm)

L'antiblocage utilisé en anti-patinage

Le différentiel utilisé redevient normal et ne possède plus **aucun système de blocage**.

Le couple de blocage va être prélevé «en externe», à la roue, par les opérateurs de freinage ce qui produit un couple entre l'arbre de transmission et le châssis de la voiture. Dans ce cas la roue qui reçoit le plus de couple ne dépasse pas la valeur ($\frac{1}{2}$.Couple moteur) et la roue qui reçoit le couple le plus faible reçoit (Couple moteur)-(couple freinage).



Ce comportement peut être considéré comme un avantage car le couple le plus faible reste supérieur ou égal à zéro. Dans tous les autres cas précédents, ou le couple est appliqué entre un arbre de roue et le boîtier de différentiel, le couple sur la roue rapide peut très bien devenir négatif pour des tarages élevés et des charges faibles ; ce qui est à l'opposé de la fonction motricité (revoir le graphe page 11 en imaginant une valeur de CT plus faible).

Le coût devient raisonnable puisque les opérateurs sont déjà disponibles et largement dimensionnés et que cette application utilise les capteurs et la puissance de calcul du système anti-bloqueur de freinage.

La logique de détection d'une roue qui patine est sensiblement la même que pour une roue qui bloque et les électrovannes d'admission et d'échappement de la pression de freinage sont capables de doser finement l'action de blocage.

Cette fonction est intégrée aux calculateurs anti-patinage (ASR) et gère les écarts d'adhérence inter-roues, le papillon motorisé adaptant lui le couple moteur appliqué à l'essieu.

Avantage : C'est le seul système où il n'est pas obligatoire que le couple le plus élevé soit sur la roue la plus lente ; le calculateur a le choix roue par roue de son action. Cette capacité est intéressante si les conditions locales d'adhérence sont très différentes d'une roue à l'autre et varient rapidement dans le temps.

Remarque: Cette action n'est pas à confondre avec les actions de freinage générées par le système ESP.

Dans une stratégie blocage de différentiel, le freinage appliqué ne fait jamais passer l'effort sol/roue retardateur car nous sommes en motricité.

Dans une stratégie ESP les pressions appliquées permettent de créer des efforts retardateurs significatifs qui auront une action sur le moment de lacet du véhicule⁽⁴⁾.