

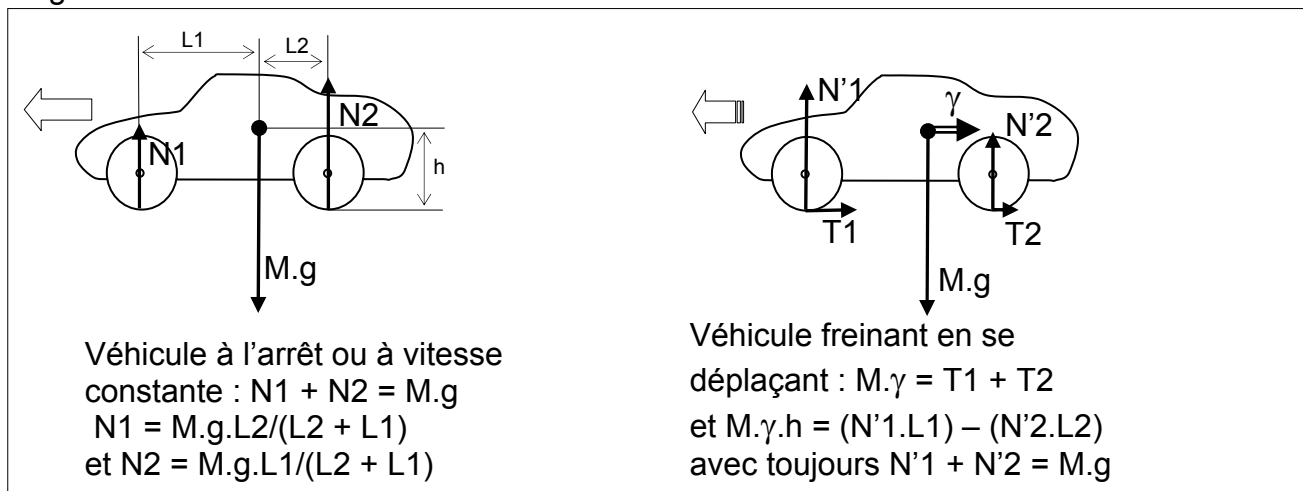
Info Tech n° 15

Cinématiques de suspension antiplongée

Préambule : cette INFOTECH va montrer comment le choix de l'architecture des trains roulants agit sur la plongée du véhicule indépendamment des raideurs de suspension. Ce problème sera généralisé par la notion de **coefficient antiplongée** de la suspension et sera étendu au cas du comportement des motos qui elles aussi connaissent une évolution de leur fonction suspension.

Plongée du véhicule au freinage

Lorsque le véhicule décélère les appuis verticaux sol/roue varient par rapport à leurs valeurs statiques. L'appui AR diminue (de N_2 à N'_2) et l'appui AV augmente (de N_1 à N'_1) à cause de l'accélération négative appliquée au véhicule, générée par les efforts tangentiels sol/roues.



Ces équations sont obtenues en appliquant les principes de la dynamique au véhicule, à partir de celles-ci il est facile de montrer que :

$$N'_1 = N_1 + M.\gamma.h/(L_1 + L_2) \text{ et } N'_2 = N_2 - M.\gamma.h/(L_1 + L_2)$$

Ce qui permet de voir que le « transfert d'appui ⁽¹⁾ » dynamique de l'AR vers l'AV vaut $M.\gamma.h/(L_1 + L_2)$ et ne dépend que de la décélération et du rapport entre l'altitude du centre de gravité et l'empattement du véhicule.

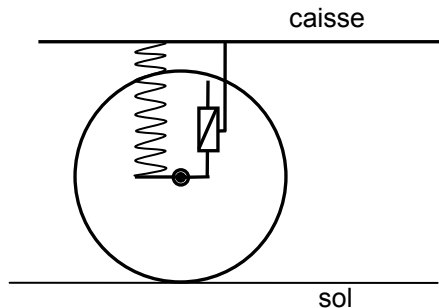
Remarque : certains véhicules ont d'ailleurs un tel rapport $h/(L_1+L_2)$ que la valeur N'_2 peut atteindre une valeur nulle aux décélérations habituelles : c'est le cas des 2 roues qui subissent de très grandes variations d'appuis dynamiques.

⁽¹⁾ le terme « transfert de charge » quelquefois utilisé est à proscrire car il entraîne une confusion avec un déplacement de matière et un changement de la position du centre de gravité.

Pour la suite cette valeur de variation d'appui au sol sera notée ΔN et aura la valeur $M \cdot \gamma \cdot h / e$ (avec e = empattement du véhicule).

En principe cette variation d'appui au sol devrait provoquer un écrasement de la suspension avant $\Delta H_{av} = M \cdot \gamma \cdot h / e \cdot K_{av}$ (ou K_{av} est la raideur de la suspension ramenée à la roue), la suspension arrière subissant elle une détente car le ΔN y est négatif. La conjugaison de ces variations de hauteur provoque la plongée du véhicule.

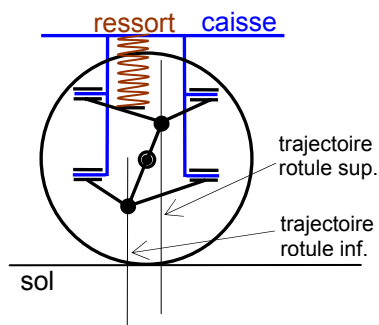
Ces variations de hauteur seront conformes au calcul posé uniquement si la liaison entre la roue et la caisse et du type liaison « glissière », d'axe perpendiculaire au sol.



Ce type de liaison découple parfaitement les efforts normaux et tangentiels et le ΔN sera intégralement transmis à la suspension.

Remarque : le dessin ci-dessus montre une liaison glissière entre le moyeu et la caisse alors que nous parlions d'une liaison glissière entre la caisse et le sol ; il est d'usage de confondre cinématiquement les deux car la roue peut être considérée tournant à vitesse constante par rapport au moyeu (voire bloquée), l'ensemble roue + moyeu devient un seul système dans l'analyse cinématique. Cette convention ne sera plus rappelée dans la suite du document.

Réalisation pratique d'une liaison glissière par la suspension



Une solution parmi les plus simples est celle des deux triangles dont les axes de rotation sont parallèles et horizontaux. Cette disposition donne aux rotules de chacun des triangles des trajectoires parallèles ce qui fait que l'ensemble moyeu roue est bien en translation par rapport à la caisse (puisque ces deux rotules appartiennent aussi au moyeu). La liaison cinématique réalisée est bien équivalente au dessin précédent dans l'hypothèse d'un mouvement plan de la roue.

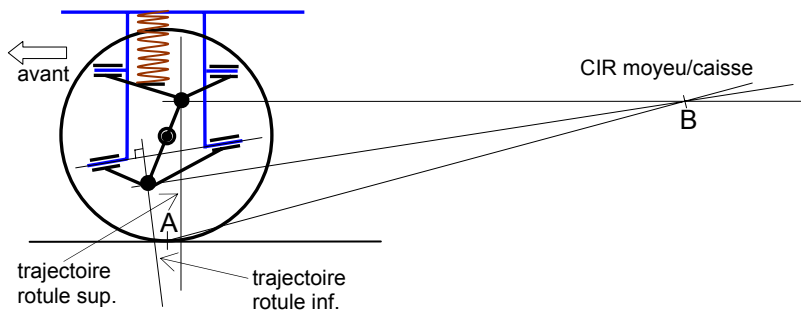
En réalité cette solution est très rarement appliquée en l'état et l'organisation de la suspension fait apparaître un centre instantané de rotation (CIR) entre la caisse et le moyeu. La position de ce CIR va alors influencer le comportement de la suspension lorsque des efforts tangentiels seront appliqués.

Recherche du CIR

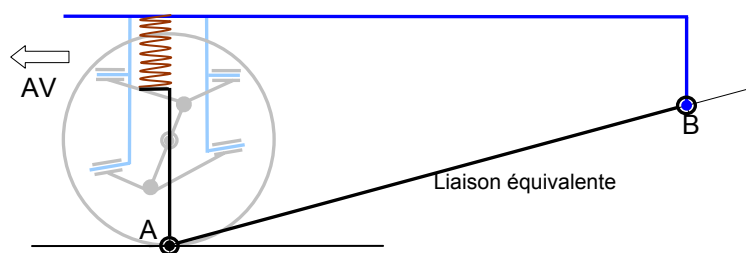
Nous reprenons l'exemple précédent de suspension et nous modifions la position du triangle inférieur (schéma page suivante), cet exemple particulier sera généralisé plus loin.

L'inclinaison du triangle inférieur change la trajectoire de la rotule inférieure ce qui fait que les vecteurs vitesses respectifs des rotules lors du débattement de la suspension ne sont plus parallèles : l'ensemble roue et moyeu se trouve en rotation par rapport à la caisse et

nous pouvons trouver le CIR de ce mouvement (en B) en prolongeant des parallèles aux axes de triangles passant par les centres de rotules.



De plus, l'ensemble roue-moyeu peut être considéré en liaison ponctuelle avec le sol en A (par l'adhérence du pneumatique) ce qui fait que tout le système de suspension peut être remplacé par un seul élément de liaison entre la caisse et le sol respectant les conditions cinématiques énoncées précédemment. Une seule barre de liaison articulée en A et en B est totalement équivalente du point de vue cinématique à l'ensemble roue-moyeu, triangle supérieur et triangle inférieur.



Cette représentation n'est valable que pour de faibles débattements car sinon B n'est pas un point fixe sur la caisse. Ceci s'accorde assez bien avec la réalité des voitures modernes pour lesquelles l'angle de plongée est très modéré

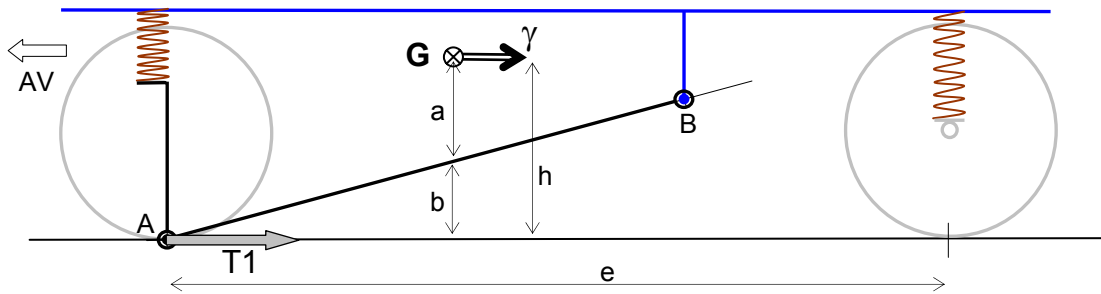
Remarque : nous reparlerons plus tard de la droite AB car nous savons que le CIR de la caisse par rapport au sol est quelque part sur cette droite⁽²⁾, c'est le même tracé effectué à l'arrière qui permettra de le localiser. Ce CIR caisse/sol est le **centre de tangage** du véhicule

Conséquences en situation dynamique

Nous allons maintenant montrer comment la position de B va influencer la compression de la suspension lors de l'application d'un effort tangentiel en A. La notion de liaison équivalente va s'avérer très intéressante car elle nous amènera au résultat recherché (variation de charge sur la suspension) sans que nous ayons à calculer les efforts dans toutes les liaisons du train.

Le cas sera traité avec un effort retardateur appliqué seulement à l'avant puisque nous voulons isoler l'effet anti-plongée de la suspension avant. La suspension avant a une incidence déterminante sur la plongée car les efforts de freinage générés à l'arrière sont faibles en regard de ceux de l'essieu avant.

⁽²⁾ en considérant que nous avons un mouvement plan sur plan de 3 systèmes liés entre eux : 1=roue-moyeu, 2=sol et 3=caisse. Nous savons que $\Omega_3/2 = \Omega_3/1 + \Omega_1/2$ et que les trois vecteurs correspondants à ces vitesses de rotations sont parallèles entre eux (car tous perpendiculaires au même plan). Ces propriétés font que les trois CIR ($I_{3/2}$, $I_{3/1}$, $I_{1/2}$) sont alignés sur la même droite car ils ne sont que les traces des vecteurs vitesses dans le plan du mouvement. Cette propriété des 3 CIR alignés est détaillée dans tous les cours de cinématique.



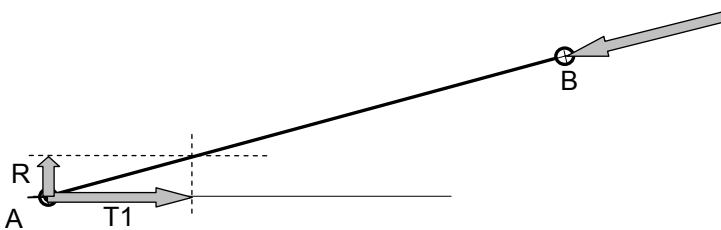
Les résultats trouvés à la page 1 sont toujours vrais donc les appuis au sol du véhicule valent : à l'avant ($N1 + \Delta N$) et à l'arrière ($N2 - \Delta N$), tels que $N1 + N2 = M.g$

Les ressorts subissent une surcharge ou un délestage et les efforts qui leur sont appliqués valent : à l'avant ($N1 + \epsilon$) et à l'arrière ($N2 - \epsilon$)

Le problème est de montrer que ϵ est différent de ΔN , dans notre cas avec effet antiplongée nous devrions avoir $\epsilon < \Delta N$.

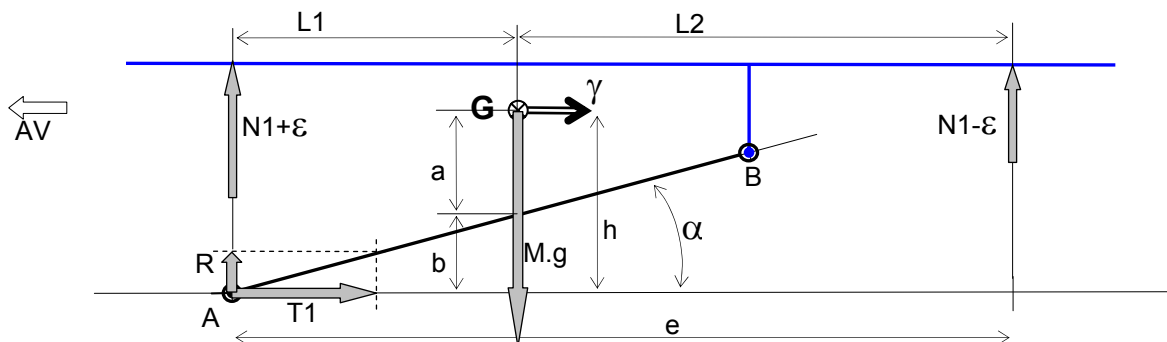
Si nous arrivions à $\epsilon = 0$ ceci correspondrait à une plongée nulle puisque la charge sur le ressort ne varierait pas lors de l'application de $T1$.

Isolons AB



Ce système est soumis à 2 efforts dont l'un peut être décomposé sur les directions normale et tangentielle : $T1$ est la composante tangentielle

Isolons [AB + caisse] sans les ressorts



Nous allons écrire que la somme des moments par rapport à G est nulle, soit :

$$T1.h - R.L1 + (N2 - \epsilon).L2 - (N1 + \epsilon).L2 = 0$$

Exprimons la valeur de ϵ à partir de cette équation.

Sachant que $R = T1.\tan\alpha$, l'équation devient :

$$T1.(h - L1.\tan\alpha) + (N2-\varepsilon).L2 - (N1+\varepsilon).L2 = 0 \text{ et en prenant en compte que } L1.\tan\alpha = b$$

$$T1.(h - b) + (N2-\varepsilon).L2 - (N1+\varepsilon).L2 = 0 \text{ la valeur } (h - b) \text{ peut être remplacée par « a »}$$

$$\text{Nous arrivons à : } T1.a - \varepsilon.(L2 + L1) + (L2.N2 - L1.N1) = 0$$

$$\text{Et } T1.a - \varepsilon.e + (L2.N2 - L1.N1) = 0$$

Si nous nous reportons à l'étude statique de la page 1 il apparaît que $(L2.N2 - L1.N1) = 0$

Ce qui amène le résultat : $\varepsilon = T1.a/e$

Alors que la variation d'appui au sol $\Delta N = M.\gamma.h/e$ ce qui s'exprime, en utilisant l'étude dynamique de la page 1, par : $\Delta N = T1.h/e$

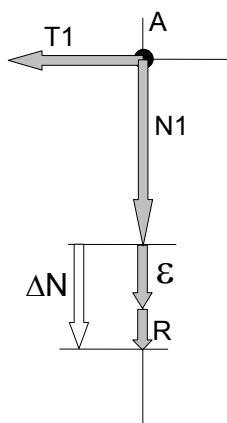
Nous pouvons maintenant répondre au problème posé en page 4 puisque, pour ce tracé, nous aurons toujours :

$T1.a/e < T1.h/e$ et donc $\varepsilon < \Delta N$ ce qui veut dire que la surcharge de la suspension avant (ε) sera inférieure à l'augmentation de la charge sur la roue avant (ΔN). L'écrasement de l'avant en sera réduit et nous avons bien un effet antiplongée.

Si nous pouvons positionner B de telle manière que AB passe par G, « a » sera nul et par conséquent ε également. Dans ce cas de figure, T1 ne produirait aucune plongée quelle que soit la raideur de suspension avant.

Bilan des efforts appliqués au sol

Pour qu'il n'y ait aucune confusion entre les efforts et le comportement du véhicule voici le bilan des efforts reçus en A par le sol.



Le ressort exerce N1 la charge statique plus la surcharge ε due à la plongée.

La liaison AB exerce T1 l'effort tangentiel et R la composante due à l'obliquité de AB.

Comme les lois de la mécanique doivent être respectées (voir page 1), la valeur de l'appui sol/roue ne dépend que de la décélération (ici due à T1) et atteint $N1 + \Delta N$ ce qui veut dire que $\Delta N = \varepsilon + R$

De manière imagée on peut dire que c'est l'obliquité de AB qui crée un effort vertical qui soulage la suspension et réduit la plongée.

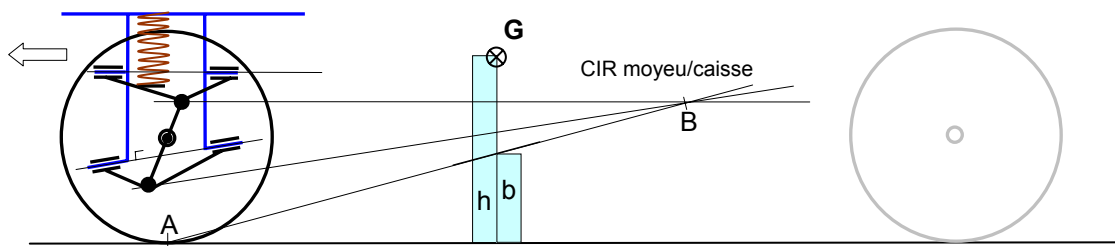
Ce schéma montre également que **réduire la plongée ne peut en aucun cas modifier le transfert d'appui** du à la décélération, alors que cette confusion est fréquente particulièrement dans certains documents de vulgarisation.

Définition du coefficient antiplongée

Le coefficient antiplongée va être défini comme $(\Delta N - \varepsilon)/\Delta N$ c'est-à-dire la réduction obtenue entre le transfert d'appui dynamique et la surcharge de la suspension (c'est l'effort R), ramenée à la valeur initiale du transfert d'appui. Par exemple si ce chiffre est de 0,3 nous pouvons dire que la cinématique de suspension réduit la compression de la suspension de 30% (par rapport à une suspension « neutre » réalisant une liaison de type glissière). Nous nommerons ce coefficient K_{ap} pour la suite

Représentation graphique

En utilisant la définition précédente et en exprimant chacun de ses termes nous obtenons :
 $K_{ap} = (h/e - a/e)/(h/e)$ soit, après simplification : **$K_{ap} = b/h$**

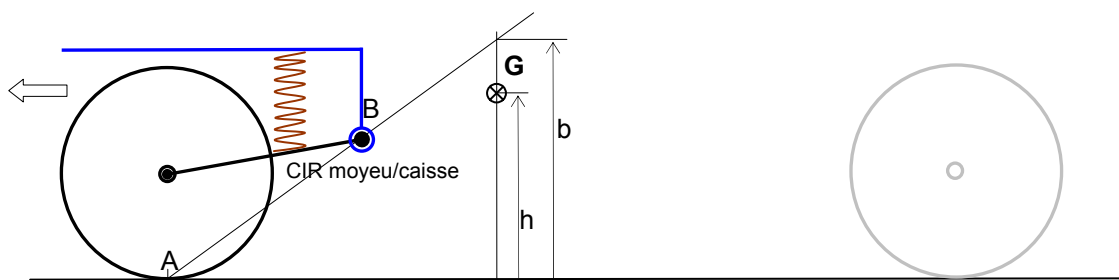


Le résultat est presque surprenant de simplicité puisque le tracé ci-dessus suffit à faire apparaître K_{ap} en traçant la droite reliant le CIR moyeu/caisse et le contact pneu/sol puis en visualisant la verticale passant par G. L'intersection de ses deux droites définit les distances a et b ; sur le tracé ci-dessus K_{ap} est de l'ordre de 0,48 ce qui est une valeur très élevée car l'inclinaison du bras inférieur a été exagérée pour la lisibilité du schéma.

Cas particuliers

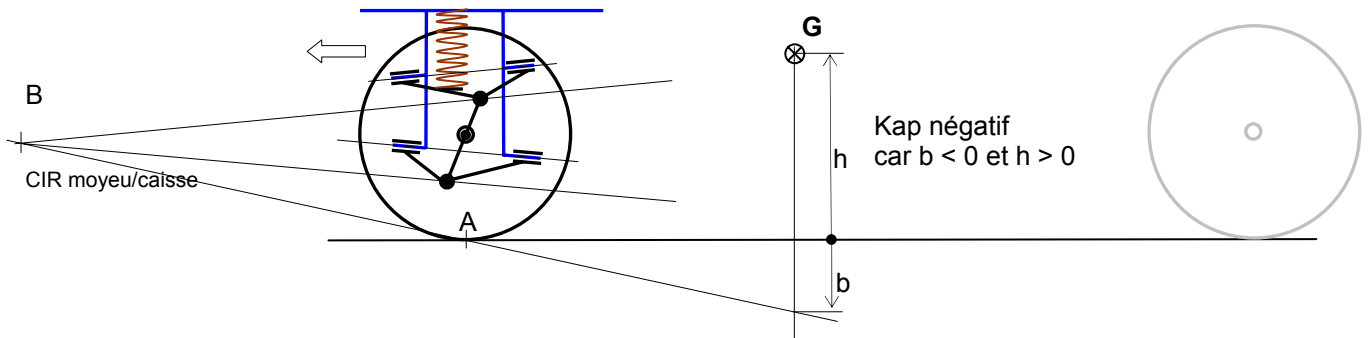
Les épures des trains sont capables de positionner B de manière tout à fait libre et ainsi obtenir des effets particuliers sur la plongée ; voici deux autres cas différents de la situation représentée jusqu'ici.

$K_{ap} > 1$: cette valeur veut dire que l'on dépasse la situation de plongée nulle ($K_{ap} = 1$) et que la plongée change de sens, l'avant de la voiture se soulève lorsque l'effort retardateur T1 est appliqué (R est supérieur à ΔN , la valeur ε change de sens et se soustrait à N1). Ce comportement assez inattendu est tout à fait réalisable, par exemple avec un bras poussé à l'avant.



Le CIR moyeu/caisse est facile à identifier puisque c'est le centre de la liaison pivot du bras sur la caisse. La droite AB passe au dessus de G, le rapport b/h est bien supérieur à 1 et aura les effets évoqués précédemment.

$Kap < 0$: cette valeur veut dire que h et b sont de sens opposés, ce qui impose une position de B en dessous du niveau du sol. Le coefficient d'antiplongée mérite alors bien mal son nom puisque la plongée est augmentée par cette architecture (R change de sens et ε devient supérieur à ΔN). Un changement dans le sens d'inclinaison des triangles suffit à réaliser cette situation.

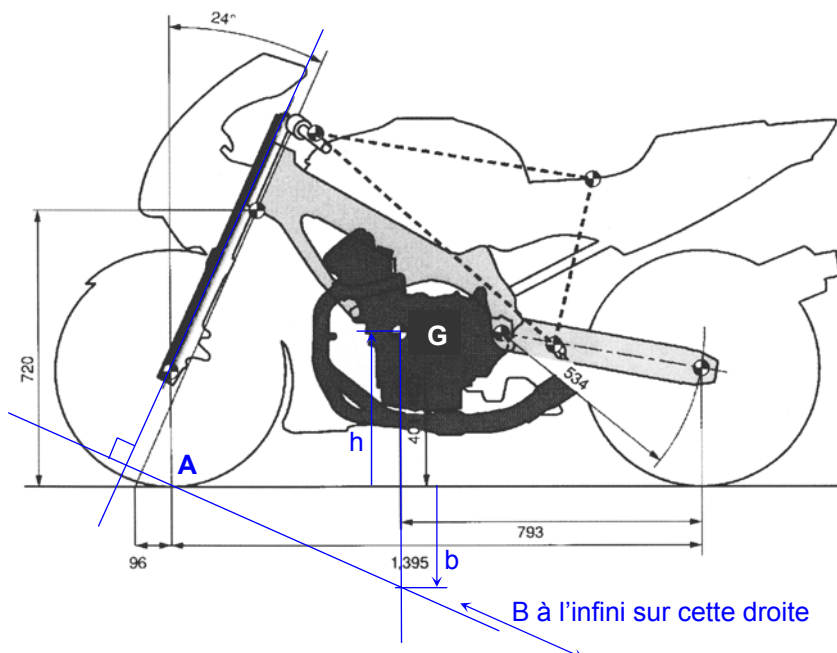


Cette architecture peut se rencontrer pour des applications particulières telles que des véhicules tout terrain (kart-cross, rallye-raid, ...), alors que le cas où Kap dépasse 1 ne se rencontre quasiment jamais.

Cas des motos

Suspension classique par fourche télescopique

La fourche télescopique articulée par une liaison pivot sur le cadre a pour conséquence de mettre la roue et son moyeu en translation par rapport au cadre. Le CIR roue-moyeu/cadre est donc à l'infini sur toute perpendiculaire aux tubes de fourche. Le point B se trouve sur une droite respectant cette condition et passant par A (CIR roue/sol) : le résultat est que AB coupe la verticale abaissée de G nettement en dessous du niveau du sol.



Cet exemple est tracé pour une épure de 600 CBR modèle 99.

La valeur du coefficient Kap est calculée à **-0,56** d'après les cotes du dessin.

La plongée est accentuée par rapport à une suspension neutre.

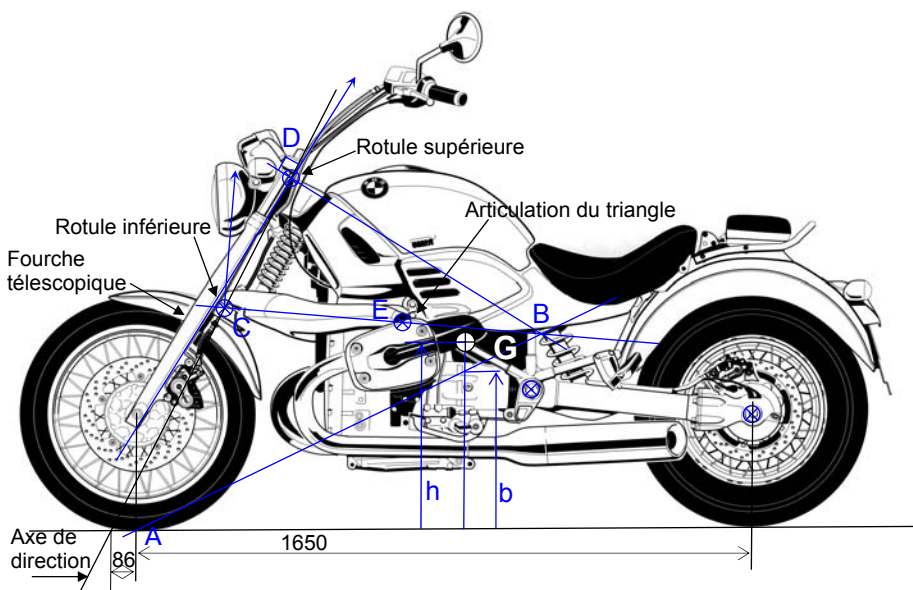
Pour toutes les applications de ce type K_{ap} est nettement négatif et la plongée est accentuée par cette solution technique.

Remarques :

- Cette plongée importante ne doit pas être considérée comme un inconvénient irrémédiable car elle est aussi une sensation utile à la conduite pour bien doser son action de freinage ; de plus, une plongée importante réduit le déport au sol ce qui peut améliorer la maniabilité en entrée de virage (avec freinage conjugué).
- La droite AB est perpendiculaire à l'axe de la liaison glissière et pas à l'axe de rotation de la fourche sur le cadre. Ces deux axes sont souvent parallèles mais certaines applications permettent de les dissocier par des tés de fourches particuliers. Les tés permettent également de régler séparément le déport au sol (ici 96 mm) et l'angle de chasse par le décalage qu'ils assurent entre l'axe de direction et les axes des tubes de fourche (nommé communément le déport du té). Nous comprenons l'intérêt de dissocier tous ces paramètres géométriques pour pouvoir régler séparément leurs effets

Suspension « telever » BMW

La fourche est toujours télescopique mais son axe de rotation est réalisé par deux rotules (en C et D) qui définissent l'axe de pivotement, elle n'assure plus aucune fonction suspension puisque celle-ci est prise en charge par un combiné ressort-amortisseur. C'est un triangle, articulé en E sur le cadre, qui fait travailler ce combiné.



Cet exemple est tracé pour une épure de 1200C BMW modèle 1997.

Le tracé montre un coefficient K_{ap} de l'ordre de + 0,8

La plongée est nettement réduite par rapport à une suspension neutre

Recherchons le CIR du moyeu par rapport au cadre :

- ✓ En C la vitesse « V_c moyeu/cadre⁽³⁾ » est perpendiculaire à CE par la liaison pivot en E
- ✓ En D la vitesse « V_D moyeu/cadre » est parallèle aux tubes de fourche car nous avons V_D moyeu/cadre = V_D moyeu/tube + V_D tube/cadre et que V_D tube/cadre est nulle en D par la liaison pivot entre les tubes et le cadre. V_D moyeu/tube étant porté par l'axe des tubes, V_D moyeu/cadre l'est également.

⁽³⁾ lire : vitesse du point C, appartenant au moyeu, par rapport à un repère lié au cadre

- ✓ **Le CIR moyeu/cadre se trouve donc en B**, intersection des deux perpendiculaires aux supports des vecteurs vitesses.

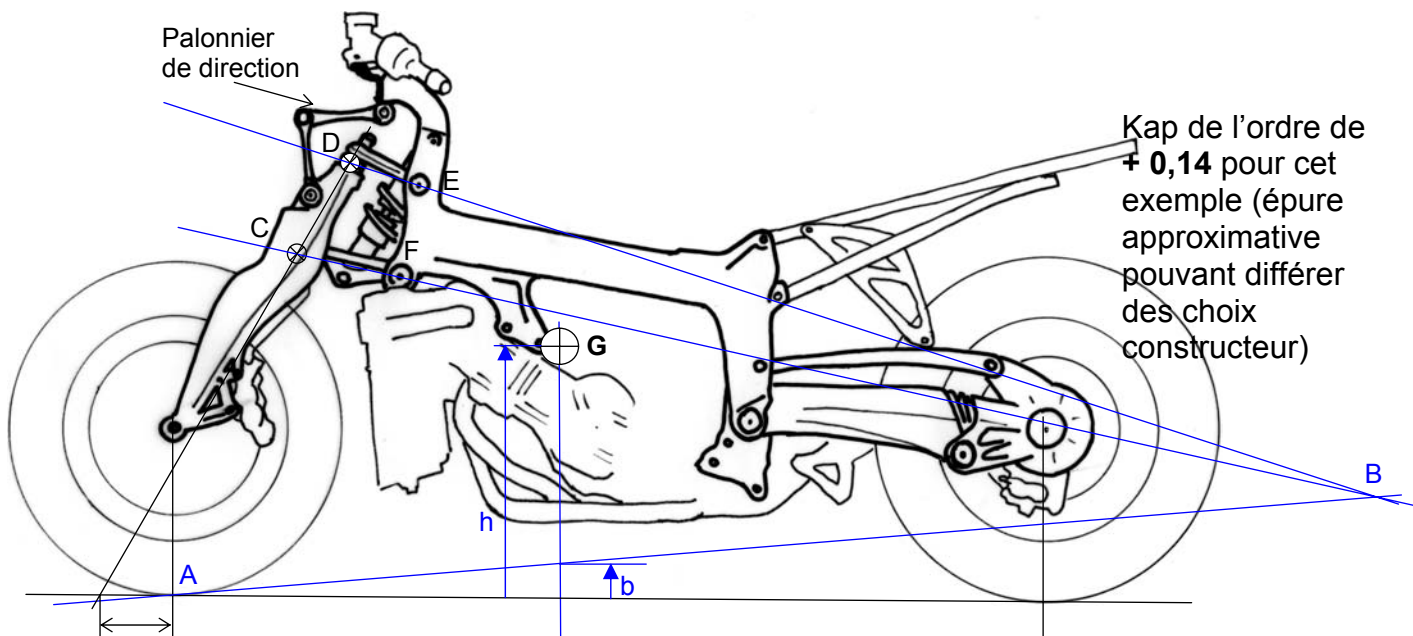
Le tracé de AB montre une forte tendance antiplongée (+80% !) ce qui confirme un choix radicalement différent de la majorité de la production actuelle.

Cette quasi-absence de plongée peut même dérouter le conducteur lors de ses premiers essais sur ces machines.

Cet effet d'épure peut autoriser, par exemple, le choix d'une suspension plus souple sans que ceci n'entraîne une plongée excessive et une mise en butée de la suspension lors des freinages violents.

Suspension parallélogramme

Cette technologie est très ancienne mais BMW vient de la réactualiser pour sa K1200S en la baptisant « Duolever » ; voici un tracé sommaire permettant de réaliser une épure antiplongée.



La fourche télescopique disparaît et laisse place à un élément rigide relié au cadre par un parallélogramme déformable CDEF (D et C sont des rotules, E et F sont des axes de rotation sur le cadre). Un palonnier articulé permet au guidon d'être relié en rotation à cet élément pour la fonction direction.

Recherche du CIR du moyeu par rapport au cadre :

- ✓ Pour chacune des rotules le vecteur vitesse est supporté par la perpendiculaire à DE et CF.
- ✓ Le CIR se trouve à la convergence des directions CE et DF en B. Le choix de la position initiale de B s'avère très facile à régler par la position initiale des deux triangles.

La droite AB fait apparaître une valeur antiplongée faible (de l'ordre de + 0,14) qui en elle-même n'a rien de remarquable ; pour bien comprendre l'intérêt de cette sophistication mécanique il faut envisager d'établir comment évolue Kap de manière dynamique au cours de l'accroissement de la plongée.

- ⇒ Pour une fourche télescopique traditionnelle, une épure en situation de plongée nous montrerait que le basculement du cadre lors de la plongée amène une réduction de la chasse au sol et un retour de K_{ap} vers des valeurs nulles (alors qu'il était nettement négatif). Aucun artifice ne peut modifier cette évolution des paramètres.
- ⇒ Pour une fourche **Telever**, le mouvement du bras augmente l'empattement lors de la compression ce qui permet d'espérer une stabilité de la chasse au sol. Par contre, l'inclinaison du bras descend le point B et réduit le coefficient antiplongée (qui était initialement très élevé). Cette variation de K_{ap} n'est pas logique car la réponse à la plongée « s'assouplit » alors que les efforts augmentent.
- ⇒ Pour un train avant **Duolever** il est possible de conserver une stabilité de la chasse au sol avec la plongée par le fait que la longueur de DE est inférieure à celle de DF ce qui va augmenter l'empattement lors de la compression. Cette différence de longueur fait aussi que la rotation du triangle supérieur est plus importante que celle du triangle inférieur. La compression rapproche donc rapidement le point B de l'avant : cette trajectoire de B augmente K_{ap} lors de l'augmentation de la plongée. Cette tendance est intéressante car elle répond à une croissance des efforts tangentiels.

En conclusion, l'adaptation du comportement dynamique de la moto en plongée sera plus facile à régler par la position des 4 points qui définissent cinématiquement le parallélogramme.

Le système Telever étant réduit à 3 points de réglage et la fourche traditionnelle à 1 angle d'inclinaison de fourche, ces limites leur imposent un domaine de compromis plus réduit.

Conclusion

Les analyses développées dans cette INFOTECH ne pourront pas répondre à la question : « quelle est la bonne valeur de K_{ap} sur un véhicule ? »

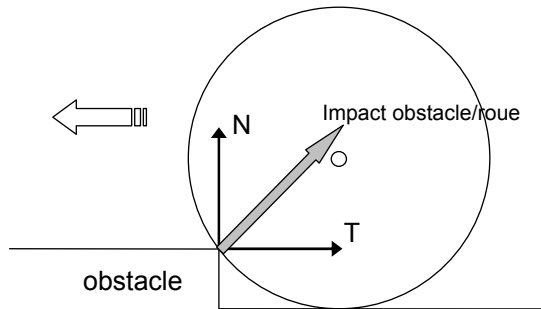
Le choix est lié à beaucoup d'autres paramètres pour que K_{ap} participe de manière harmonieuse aux fonctions suspension et guidage. Quelques tendances peuvent être dégagées :

- ✓ Les véhicules de tourisme se trouvent en général avec des K_{ap} légèrement positifs ce qui permet de diminuer les raideurs de suspension sans exagérer la plongée au freinage. Le gain est donc sur le confort ressenti par l'assouplissement de la suspension.
- ✓ Les véhicules de compétition peuvent atteindre des K_{ap} élevés pour la même raison (pas le confort, mais la réduction de raideur). Sans effet antiplongée les raideurs de suspension deviendraient très élevées pour maîtriser la plongée à cause des coef. d'adhérence énormes des pneumatiques. Ces raideurs arriveraient à perturber la fonction guidage en augmentant les sollicitations sur les pneumatiques.
- ✓ Les motos choisissent en majorité une solution où K_{ap} est nettement négatif ce qui impose d'augmenter les raideurs de suspension, particulièrement pour une conduite sportive, afin de maîtriser la plongée. Le « typage » du véhicule est alors très

marqué selon l'utilisation visée, ce qui n'est pas gênant sur ce marché ou les différentes « familles » de produits sont bien différenciées.

Les solutions originales (telles que Telever et Duolever) se limitent pour l'instant à des véhicules de « niche » malgré leur potentiel avéré car elles peuvent perturber le conducteur par des sensations inhabituelles (bien sur, le critère coût intervient également).

- ✓ Les véhicules destinés au tout terrain (moto et voiture) évitent quant à eux les Kap positifs (cf. remarque p.7) à cause de la perturbation de la fonction suspension qui en découle.



Ces véhicules roulent sur des sols accidentés, la roue est amenée au contact d'obstacles de hauteur importante. L'effort d'impact qui en résulte a deux composantes N et T, chacune pouvant atteindre des intensités élevées.

L'effort T va en quelque sorte « figer » la suspension si celle-ci présente une épure antiplongée.

Nous avons vu en page 5 que l'antiplongée créait une réaction verticale (R) qui applique la roue au sol : cet effet, utile à la réduction de la plongée, est ici perturbant car il empêche la roue de monter sur l'obstacle.

Le choc va donc être intégralement transmis à la caisse sans que les amortisseurs puissent en dissiper l'énergie. Le mouvement de caisse qui en résulte dégrade la tenue de route et le confort, mais surtout un obstacle important peut détruire immédiatement les organes du train.

Des valeurs Kap négatives aident à gérer cette situation (ainsi que des roues de grand diamètre) ; pour bien ressentir l'effet perturbateur du Kap >0 devant un obstacle il suffit de monter un trottoir au guidon d'une moto équipée en Telever pour ressentir nettement l'intensité du choc, plus important que celui ressenti avec une fourche classique.

Tout au long de ce document nous n'avons pas du tout abordé la situation symétrique du cabrage du véhicule. Une future INFOTECH complétera le sujet et traitera du coefficient anticabrage ainsi que de la situation du centre de tangage sur le véhicule (moto et voiture).