

SUSPENSION

Hydractive

CITROËN

PREFACE

Qu'il s'agisse d'une chaise à porteur ou d'une Formule 1, il n'est pas besoin de réfléchir longtemps pour apprécier l'importance extrême que peuvent avoir les éléments reliant au sol la carrosserie de ces mobiles. D'eux dépendent à la fois la sécurité et le confort des occupants du véhicule.

C'est donc à juste titre que Citroën – surtout à partir de la Traction avant – s'est préoccupé de la suspension et de ses problèmes, au point que ces recherches et leurs débouchés sur des progrès très concrets sont devenus constitutifs à la fois d'une sorte de tradition technique de la firme et de l'herméneutique de l'image de la marque.

En ce domaine, la DS a représenté une étape capitale. Grâce à la bienveillante collaboration de deux éminents savants du XVII^e siècle, le philosophe Blaise Pascal (pour la loi de l'équilibre des liquides) et l'abbé Edme Mariotte (pour la formule de la compressibilité des gaz) avec les ingénieurs

du bureau d'études Citroën, pour la première fois se trouvèrent conciliés deux objectifs jusque là antagonistes : le confort et la tenue de route. L'abandon du recours unique aux éléments mécaniques au profit de l'interaction de l'hydraulique et du gazeux permettait d'obtenir à la fois flexibilité maximale, amortissement satisfaisant, hauteur constante au-dessus du sol quelles que soient les variations de la charge.

Ce résultat à peine obtenu, Citroën – dans les années cinquante – déposait un brevet de suspension pilotée par un radar repérant les inégalités du sol. C'était le premier pas vers une suspension intelligente capable de réagir d'elle-même au profil de la route. Les recherches dans ce sens aboutissent aujourd'hui, avec le mariage de la suspension hydraulique à un calculateur électronique nourri d'informations par des capteurs sensibles, à une nouvelle révolution dans l'histoire de la suspension, c'est-à-dire dans celle de la sécurité et du confort automobiles.

Jacques Wolgensinger.

SOMMAIRE

PREFACE	1
LA SUSPENSION AUTOMOBILE	3
Définitions de base	
Un compromis difficile	
LA SUSPENSION HYDRAULIQUE	5
Rappel de quelques lois	
Principes de fonctionnement	
Vers une nouvelle étape	
LA SUSPENSION HYDRACTIVE	7
Deux états de suspension	
Principe de base appliqué à une roue	
Calculateur et capteurs	
Des réactions anticipées	
Sphères et amortisseurs	
Le plus ou le moins	
Les fonctions hydrauliques	
Le système « ferme »	
Le système « moelleux »	
La gestion électronique	
Les capteurs d'informations	
Le commutateur de sélection	
L'essieu avant	
CONCLUSION	19

LA SUSPENSION AUTOMOBILE

Les fonctions essentielles d'une suspension automobile consistent à :

- permettre aux roues de suivre le relief du sol sans transmettre à la carrosserie des efforts trop importants ;
- maintenir le contact des roues avec le sol ;
- réduire au maximum les mouvements imposés à l'habitacle et, d'une façon générale, à la partie suspendue du véhicule.

On y parvient, au moins partiellement, grâce à l'action conjuguée des ressorts et des amortisseurs.

Définitions de base

Pour « filtrer », c'est-à-dire absorber ou réduire les vibrations et chocs provoqués par les inégalités de la surface sur laquelle roule le véhicule, il faut interposer un élément élastique entre roue et carrosserie.

Pour que la suspension absorbe bien ces chocs, il faut que le ressort soit souple, c'est-à-dire à grande flexibilité.

Mais les inégalités du sol tendent à faire sauter les roues au-dessus de la chaussée, en même temps qu'elles provoquent des oscillations du véhicule (nuisibles à la tenue de route). L'amplitude de ces mouvements est d'autant plus forte que la flexibilité est grande. Il importe de les freiner.

C'est le rôle de l'amortisseur : il doit à la fois éliminer les oscillations de la carrosserie et maintenir les roues au contact du sol.

Le binôme ressort-amortisseur constitue l'élément de base d'une suspension. Ses caractéristiques déterminent les qualités de celle-ci.

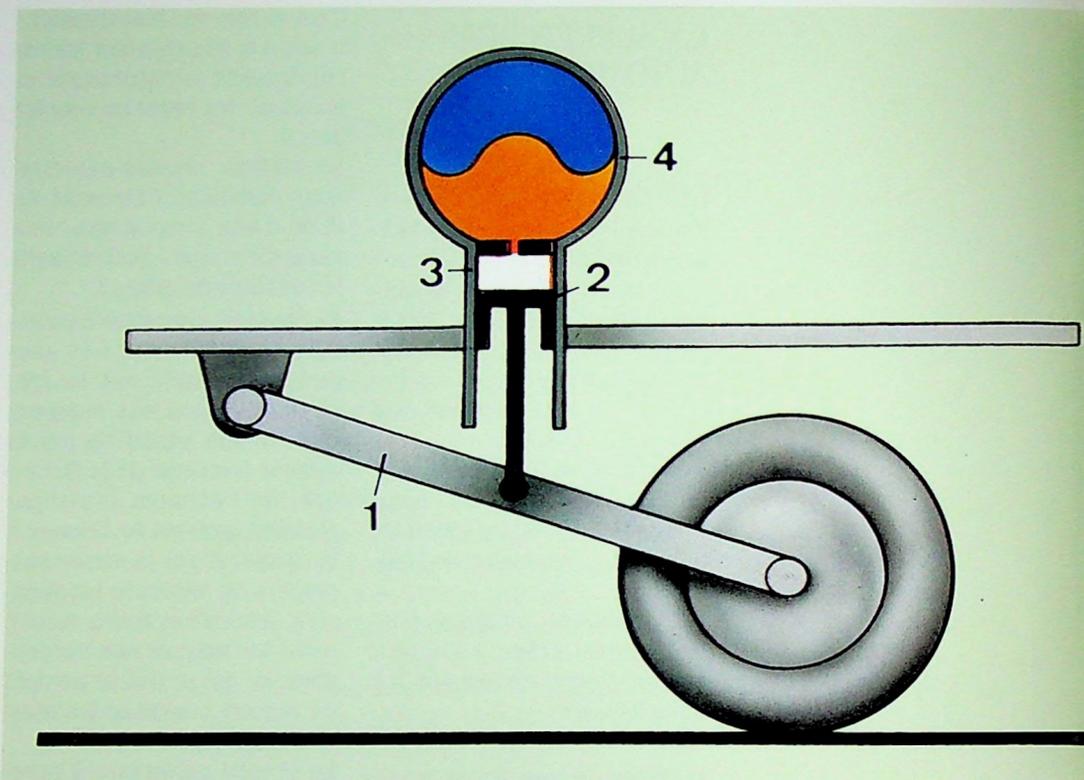
Le premier paramètre à considérer pour décrire une suspension donnée est la fréquence propre des essieux. Cette notion est définie par la raideur (l'inverse de la flexibilité) de l'élément élastique (ressort, gaz) qui lie l'essieu à la caisse, et par la masse suspendue du véhicule (suspension, essieux et roues constituent les masses non suspendues, ce qui se trouve au-delà du ressort constitue les masses suspendues).

Le second paramètre à prendre en compte est le taux d'amortissement.

Un compromis difficile

Pour assurer un bon confort, il faut une suspension à grande flexibilité et à faible taux d'amortissement. Pour assurer un bon comportement routier, il faut une suspension à moindre flexibilité et à fort taux d'amortissement.

Une suspension de type traditionnel n'autorise pas d'équilibre véritable entre ces deux exigences, l'une étant difficilement conciliable avec l'autre, ce qui oblige quoi qu'on fasse à choisir plutôt l'un ou plutôt l'autre. La suspension hydraulique pilotée par l'électronique permet de satisfaire aux deux objectifs.



Suspension hydraulique

Principe de fonctionnement

1. Bras de suspension
2. Piston
3. Cylindre
4. Sphère

LA SUSPENSION HYDRAULIQUE

Son principe consiste à remplacer les ressorts mécaniques traditionnels par deux fluides : un liquide (huile minérale) et un gaz (azote).

Rappel des lois

Les gaz et les liquides sont régis respectivement par les lois suivantes :

– **Théorème de Pascal** : les liquides au repos transmettent intégralement, et en tous leurs points, les variations de pression qu'ils subissent.

– **Loi de Mariotte** : pour une masse de gaz donnée, maintenue à température constante, le produit des nombres qui mesurent la pression et le volume est constant.

Soit $P \times V = K$ (constante).

– **Équation de Laplace** : en dynamique, lorsque la température du gaz varie, la relation devient $P \times V^\gamma = \text{constante}$ (γ est un coefficient égal à 1,4 pour l'azote).

Principes de fonctionnement

Dans une suspension hydraulique, le gaz constitue l'élément élastique, sa pression variant avec la charge. Le liquide, incompressible, assure la liaison entre les organes mécaniques (éléments mobiles des essieux) et le gaz.

Chaque roue, indépendante, est reliée à la caisse par un bras de suspension (1). Un piston (2) solidaire de ce bras coulisse dans un cylindre (3) et agit sur un liquide qui comprime – par l'intermédiaire d'une membrane – une masse constante de gaz contenue dans une sphère en acier (4). La masse du gaz enfermée dans la sphère ne varie pas. La flexibilité du ressort pneumatique qu'il constitue est proportionnelle à sa pression et à son volume selon la loi $P.V^\gamma = K$.

La suspension hydraulique permet d'obtenir une grande flexibilité et une hauteur constante quelle que soit la charge : un correcteur automatique fait varier le volume de liquide afin de maintenir la hauteur du véhicule au-dessus du sol en cas de variation de la charge transportée.

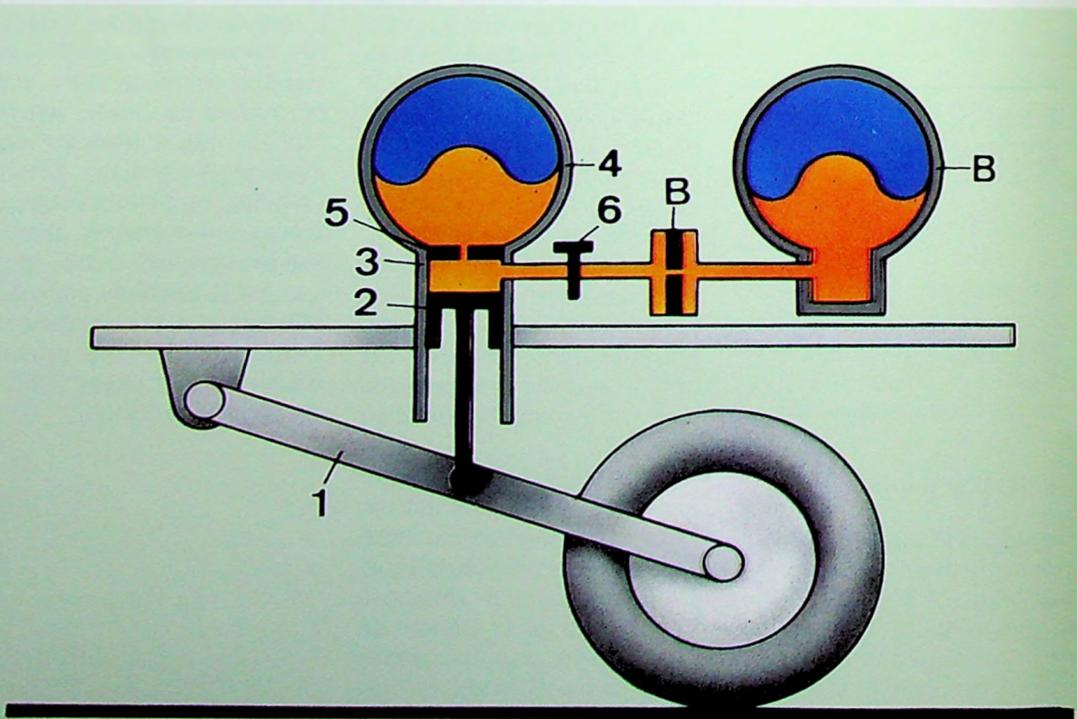
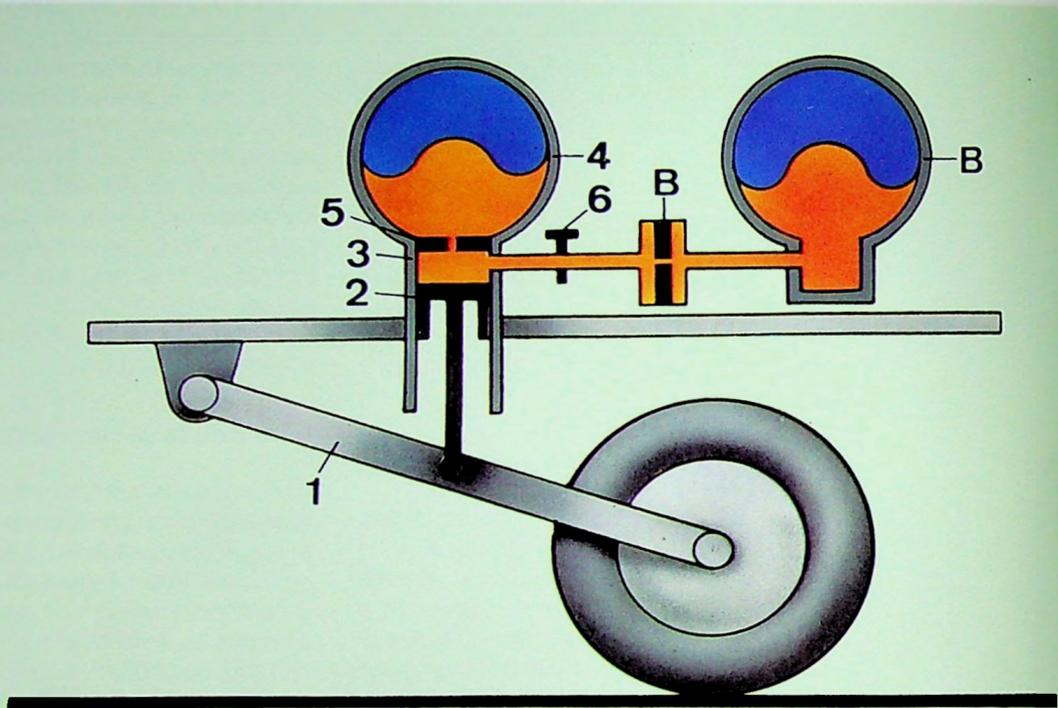
L'amortissement est obtenu par le passage (laminage) du liquide à travers des trous calibrés plus ou moins obturés (selon la pression du liquide) par des clapets. L'effet de freinage ainsi obtenu dans le déplacement du liquide est d'autant plus fort que le mouvement de la roue qui l'a provoqué est brutal.

L'amortisseur est placé entre le cylindre et la sphère.

Vers une nouvelle étape

Une suspension hydraulique peut être considérée comme partiellement « active » puisqu'elle fait appel à une source d'énergie extérieure pour assurer la modification de certains paramètres de réglage. Elle confère aux véhicules un excellent niveau de confort vertical et un comportement dynamique de qualité.

L'accroissement des exigences, notamment en matière de stabilité de caisse et de comportement en virage, ont incité Citroën à franchir une étape supplémentaire. Les recherches et développements menés ces dernières années sur les systèmes actifs, ainsi que les possibilités nouvelles offertes par les progrès de l'électronique, ont permis d'aborder la phase industrielle de cette étape.



Suspension hydractive

Principe de base

État moelleux

1. Bras de suspension
 2. Piston
 3. Cylindre
 4. Sphère
 5. Amortisseur
 6. Robinet ouvert
- B. Sphère et amortisseur additionnels

Suspension hydractive

Principe de base

État ferme

1. Bras de suspension
 2. Piston
 3. Cylindre
 4. Sphère
 5. Amortisseur
 6. Robinet fermé
- B. Sphère et amortisseur additionnels

LA SUSPENSION «HYDRACTIVE»

Une suspension automobile idéale serait une suspension «intelligente» c'est-à-dire capable de prendre en compte les conditions de roulage et le mode de conduite pour optimiser en permanence le confort et l'agrément de conduite ainsi que le comportement routier et la sécurité active.

Deux états de suspension

L'association de deux technologies, l'hydraulique haute pression et l'électronique embarquée, a permis de concilier l'ensemble de ces propositions. Pour ce faire, la suspension hydractive de la Citroën XM possède deux états :

- un état moelleux assurant confort et agrément de conduite (85 % du temps de roulage en moyenne). La suspension a une grande flexibilité et un faible taux d'amortissement pour isoler les passagers des véhicules des chocs et des vibrations provoqués par le relief de la route.

- un état ferme garant d'un bon comportement routier et d'une sécurité active (15 % du temps de roulage en moyenne). La suspension a une moindre flexibilité et un fort taux d'amortissement pour diminuer les effets néfastes de roulis (1), de tangage (2), de lacet (3), de pompage (4) et de talonnement (5) sur routes déformées.

Principe de base appliqué à une roue

Si on ajoute à un élément de suspension hydraulique une sphère B et un amortisseur B, on augmente la flexibilité (plus grand volume d'azote) et l'amortissement devient plus faible (l'huile passe par deux orifices). C'est l'état moelleux.

L'état ferme est obtenu en isolant l'amortisseur B par un robinet (régulateur de raideur). Le volume d'azote est moins important, donc la flexibilité diminue et l'huile ne passe que par un orifice, ce qui augmente l'amortissement.

Calculateur et capteurs

La suspension hydractive est gérée par un calculateur qui adapte automatiquement et instantanément par anticipation les réglages de suspension (moelleux ou ferme) au mode de conduite adopté par le conducteur et aux contraintes extérieures (état de la route).

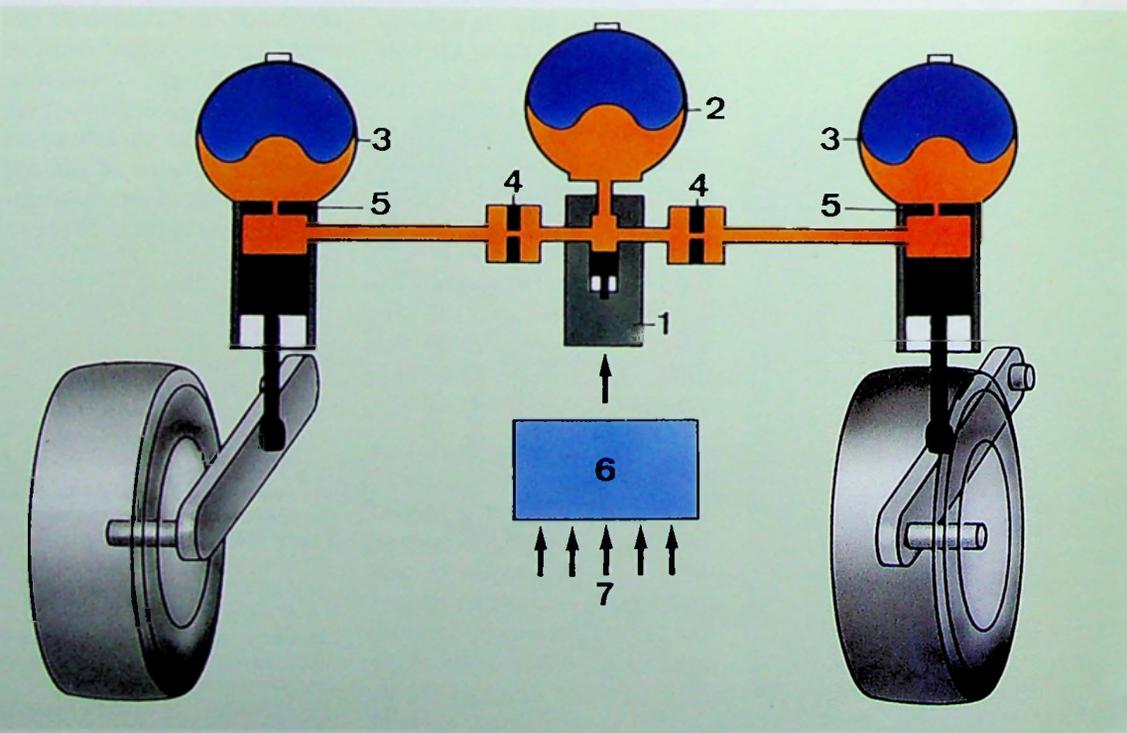
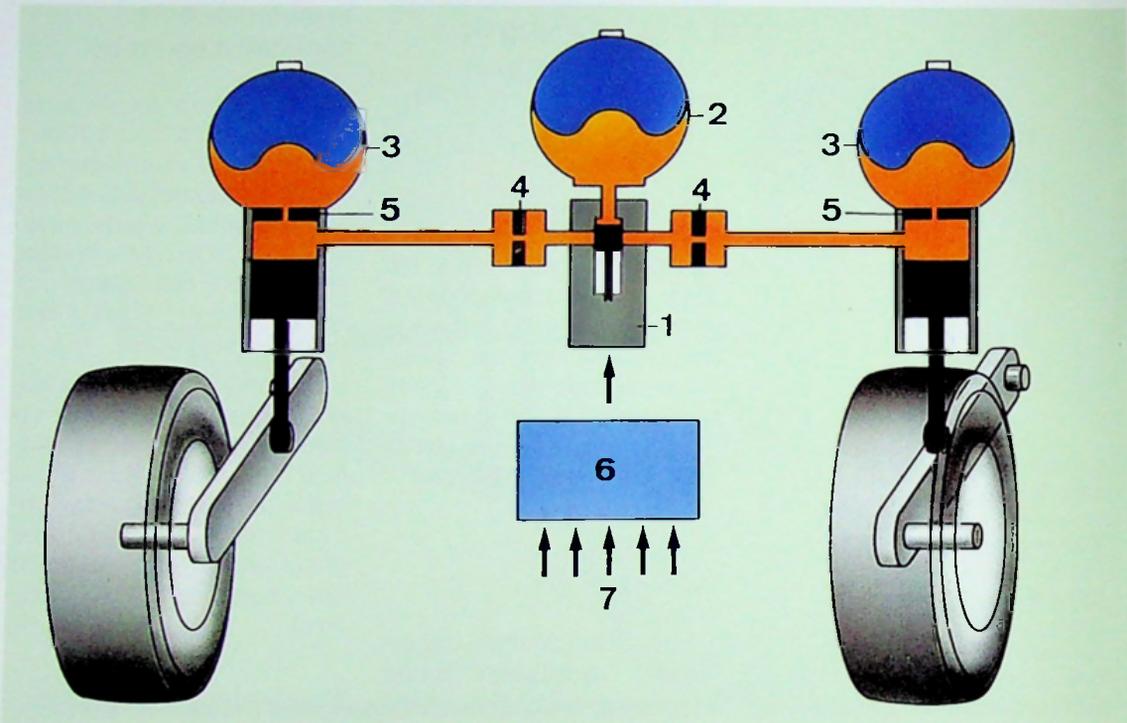
(1) Roulis : oscillation de la masse suspendue du véhicule d'un bord sur l'autre autour d'un axe longitudinal.

(2) Tangage : oscillation de la masse suspendue du véhicule autour d'un axe transversal.

(3) Lacet : mouvement de rotation du véhicule autour d'un axe vertical passant par son centre de gravité.

(4) Pompage : mouvement vertical des masses suspendues.

(5) Talonnement : contact brutal sur une butée.



Suspension hydraulique

Schéma de principe appliqué à un essieu

État ferme

1. Régulateur de raideur
2. Sphère additionnelle
3. Sphères principales
4. Amortisseurs additionnels
5. Amortisseurs principaux
6. Calculateur
7. Capteurs

Suspension hydraulique

Schéma de principe appliqué à un essieu

État moelleux

1. Régulateur de raideur
2. Sphère additionnelle
3. Sphères principales
4. Amortisseurs additionnels
5. Amortisseurs principaux
6. Calculateur
7. Capteurs

Ce calculateur commande le régulateur de raideur à partir des informations relevées par cinq capteurs :

- 1 – un capteur sur le volant mesurant l'angle du volant et sa vitesse angulaire ;
- 2 – un capteur sur l'accélérateur mesurant la vitesse d'enfoncement ou de relâchement de la pédale ;
- 3 – un capteur mesurant la pression dans le circuit de freinage ;
- 4 – un capteur, fixé sur la barre anti-roulis avant, mesurant l'amplitude et la vitesse de débattement de la caisse ;
- 5 – un capteur monté sur la boîte de vitesses mesurant la vitesse du véhicule.

Des réactions anticipatives

Le calculateur possède en mémoire des lois qu'il compare en permanence aux informations reçues des capteurs. En fonction de l'écart entre les unes et les autres, le calculateur choisit le type de suspension adéquat, et la commutation hydraulique s'effectue immédiatement : le temps de réponse global du système est inférieur à 5/100^e de seconde. Le choix des informations données par les capteurs a été déterminé de façon que le système précède toujours la réaction dynamique du véhicule. Cette anticipation est particulièrement avantageuse dans la conduite rapide sur route sinueuse : elle permet d'éliminer les mouvements intempestifs de la carrosserie et d'obtenir un comportement dynamique de haut niveau.

3 sphères, 4 amortisseurs

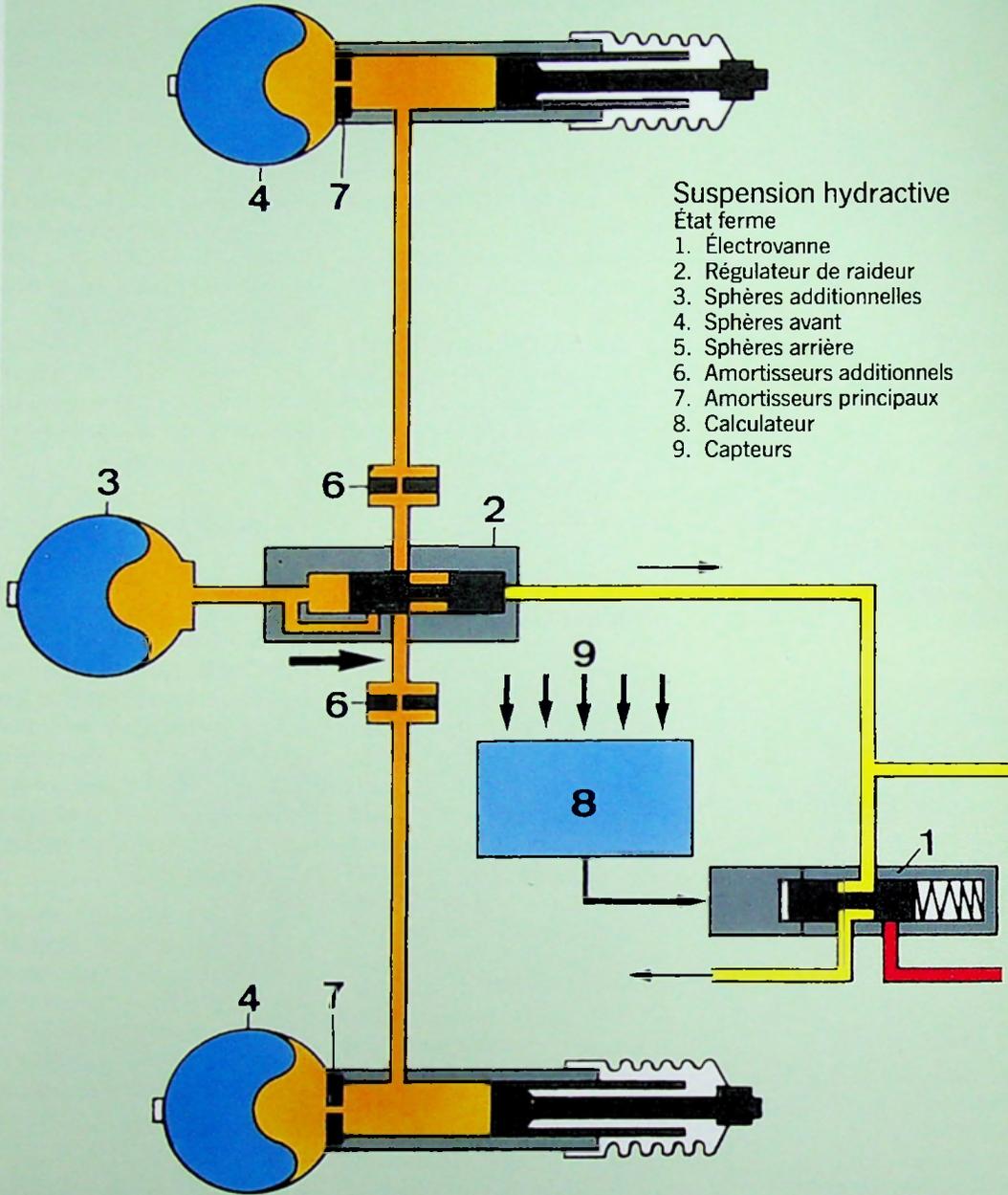
Sur le véhicule, chaque essieu comporte, en plus de sa constitution habituelle dans le cas d'une suspension hydraulique (deux sphères et deux amortisseurs), une sphère et deux amortisseurs supplémentaires. La sphère additionnelle permet de modifier la masse de gaz de l'essieu et de faire ainsi varier la flexibilité. Les deux amortisseurs supplémentaires permettent de modifier la section de passage du liquide et donc de faire varier l'amortissement.

Le plus ou le moins

Recevant ses ordres du calculateur et actionné par une électrovanne, un robinet appelé régulateur de raideur met en service ou isole la troisième sphère et les deux amortisseurs. Il détermine ainsi un état de suspension moelleux (3 sphères, 4 amortisseurs) ou ferme (2 sphères, 2 amortisseurs).

• **Robinet ouvert.** l'huile passe par quatre amortisseurs au lieu de deux ; elle est moins freinée et l'amortissement devient plus faible. La troisième sphère est alimentée, la masse de gaz augmente, la flexibilité également. C'est l'état moelleux.

• **Robinet fermé.** l'huile ne passe que par deux amortisseurs, ce qui augmente l'amortissement. La troisième sphère est isolée, la masse de gaz diminue, ainsi que la flexibilité. C'est l'état ferme.



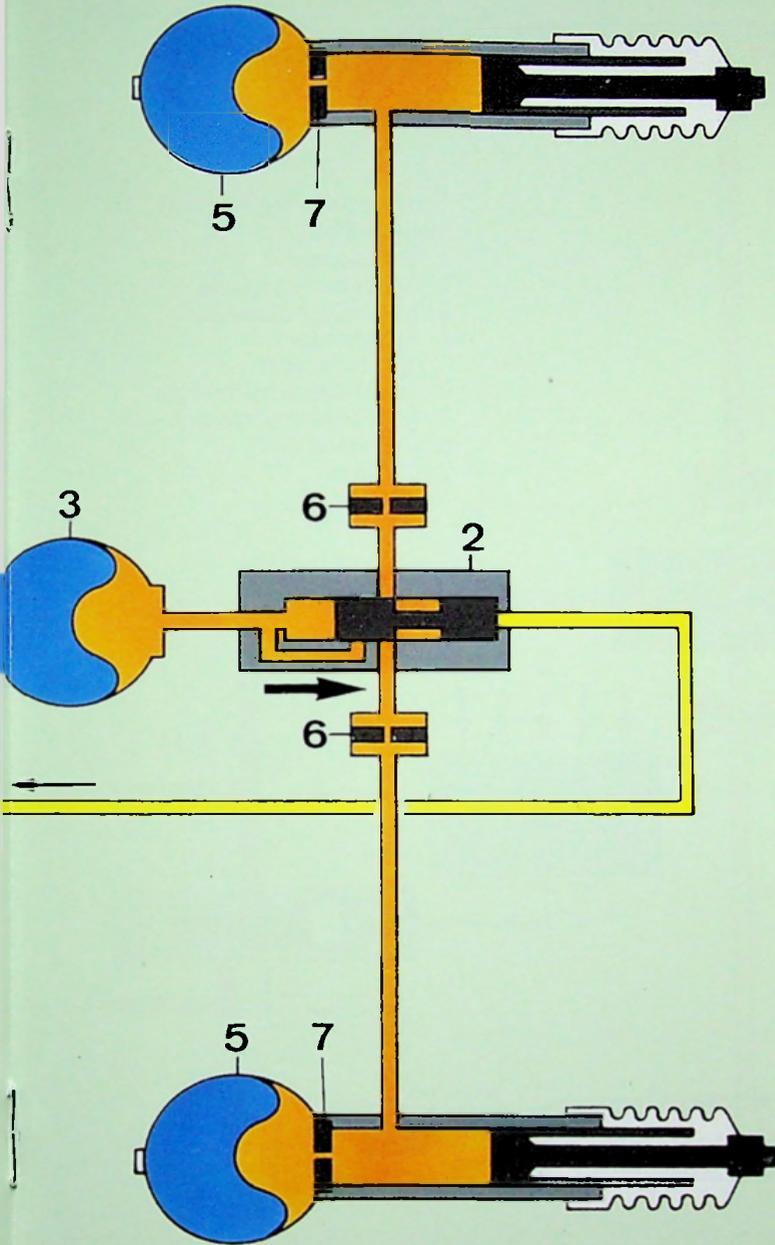
Les fonctions hydrauliques

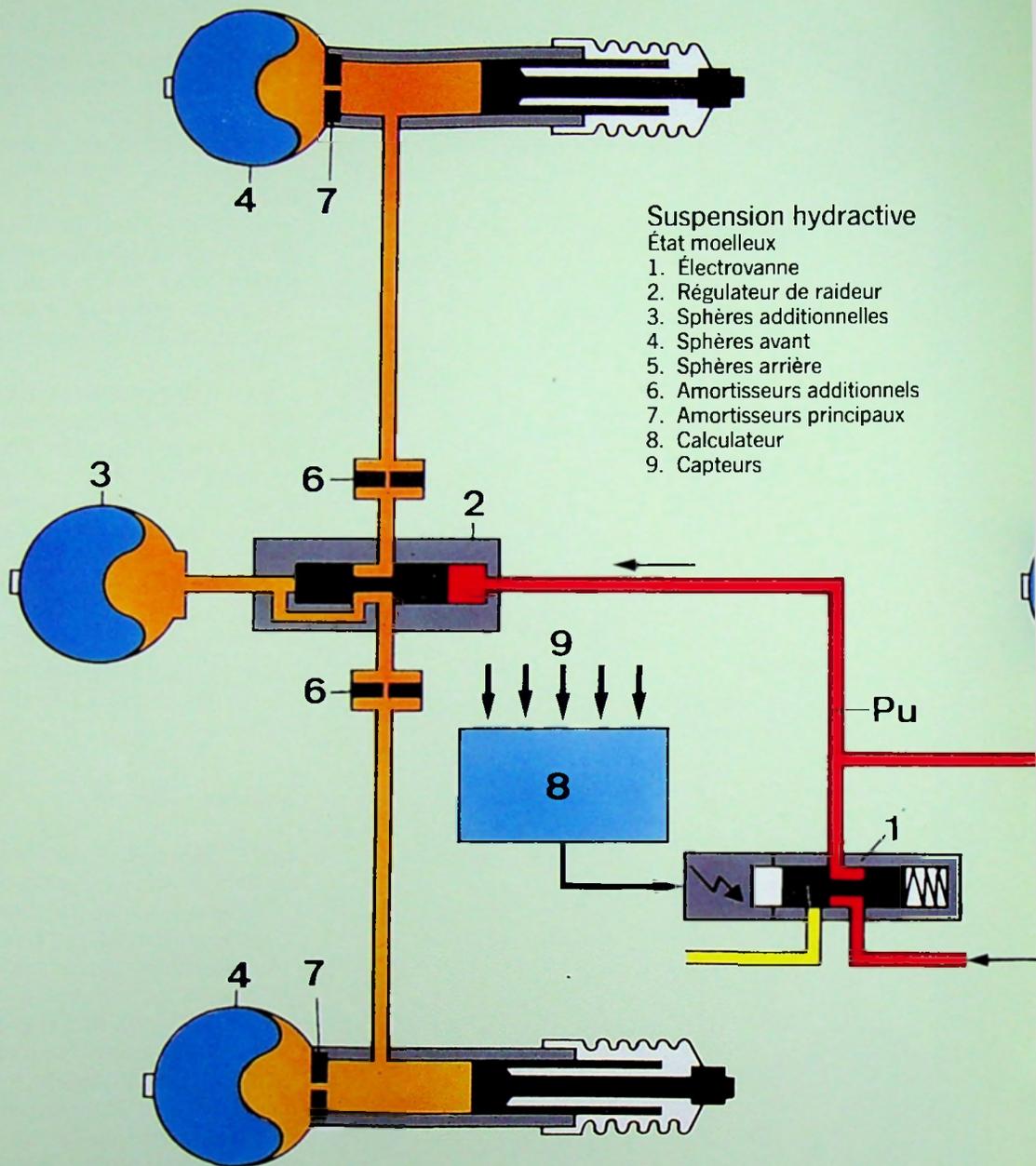
Les fonctions hydrauliques de la suspension hydraactive de la XM sont assurées par :

- deux régulateurs de raideur constitués d'un corps en fonte dans lequel sont intégrés le tiroir, le clapet piloté et les deux amortisseurs d'un même essieu (un à droite et un à gauche). Il servent également de support à la sphère additionnelle :
- une électrovanne de marque Eaton. C'est une vanne à trois voies, normalement fermée, qui commande le passage de moelleux à ferme et inversement - par l'intermédiaire des 2 régulateurs de raideur - suivant les informations du calculateur ;
- des canalisations qui relient les régulateurs aux cylindres de suspension et à l'électrovanne.

Système « ferme »

Hors tension, l'électrovanne est fermée et met en communication les canalisations d'alimentation des régulateurs de raideur avec le retour au réservoir ; la pression est nulle. Le tiroir des régulateurs de raideur occupe une position interdisant le passage de liquide entre les deux sphères principales et la sphère additionnelle. Il interrompt aussi le flux entre les deux sphères principales. L'état du système est ferme.

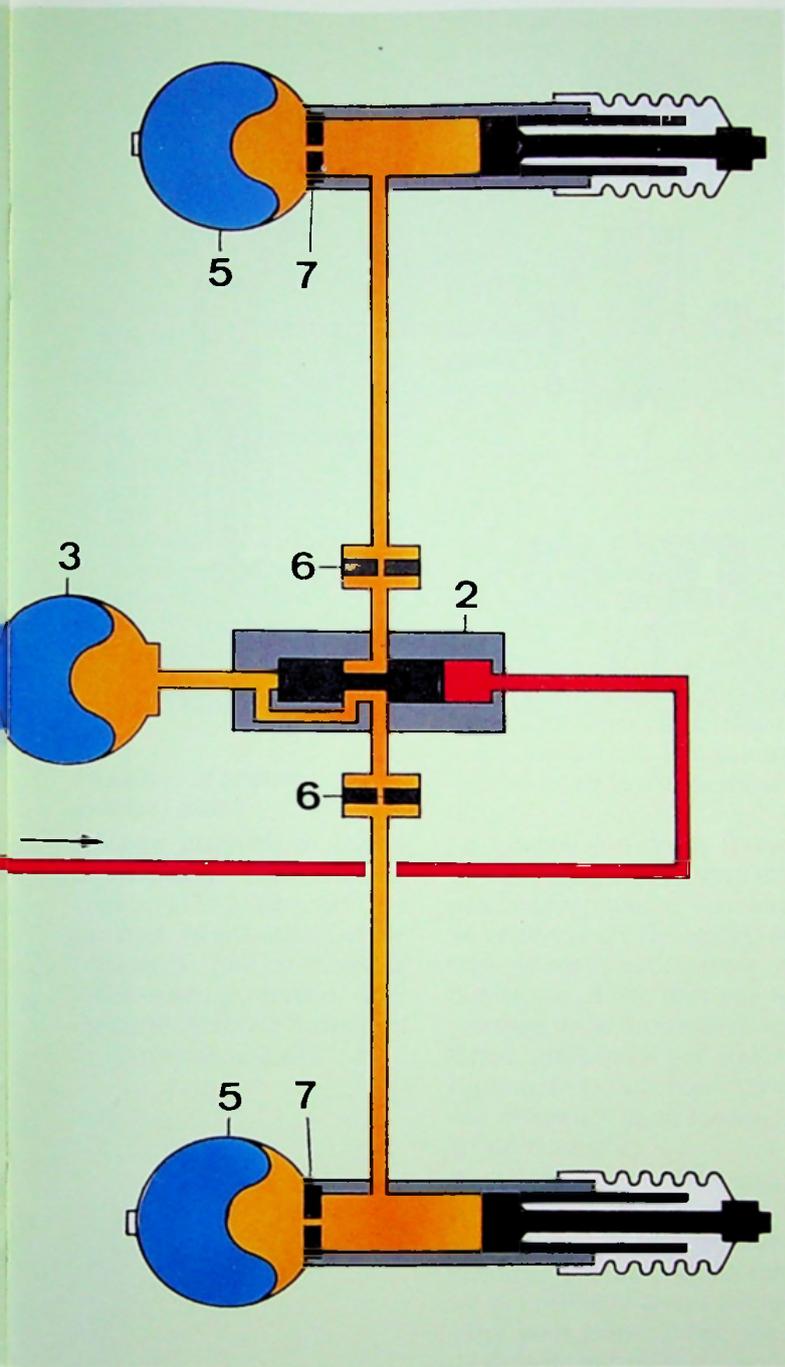




Suspension hydraulique

État moelleux

1. Électrovanne
2. Régulateur de raideur
3. Sphères additionnelles
4. Sphères avant
5. Sphères arrière
6. Amortisseurs additionnels
7. Amortisseurs principaux
8. Calculateur
9. Capteurs

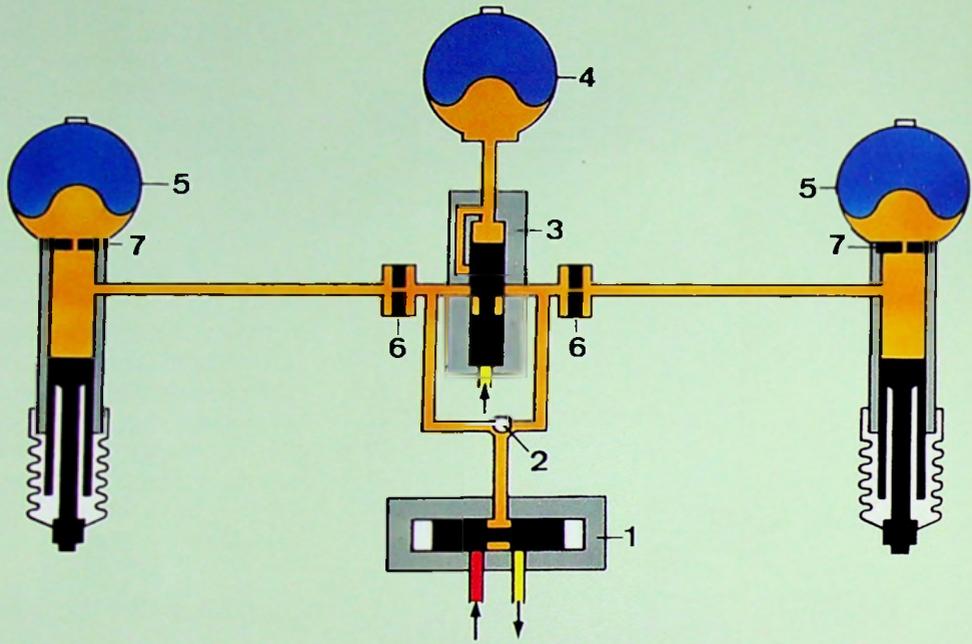


Système « moelleux »

Sous tension, l'électrovanne met en communication les canalisations d'alimentation des régulateurs de raideur avec la haute pression venant de l'accumulateur principal. La pression dans le circuit utilisation (P_u) est égale à la pression de l'accumulateur principal. Le tiroir des régulateurs de raideur se déplace et met en communication les trois sphères entre elles. Le liquide hydraulique circule des cylindres de suspension vers les sphères à travers les amortisseurs et inversement. L'état du système est moelleux.

La gestion électronique

La gestion du système hydraulique et les conditions de sa commutation sont réalisées par un calculateur à microprocesseur. Celui-ci compare les informations reçues des capteurs à des lois préalablement intégrées. Il a aussi pour fonction de corrélérer ces informations entre elles pour veiller au bon fonctionnement du système. Dès qu'une anomalie est constatée, le calculateur commande le passage en suspension ferme. Les lois du programme en mémoire ont été déterminées après de longues et minutieuses expérimentations, effectuées et vérifiées sur des centaines de milliers de kilomètres avec l'aide de clients dont les CX avaient été équi-



Suspension hydractive

Clapet piloté

1. Correcteur de hauteur
2. Clapet piloté
3. Régulateur de raideur
4. Sphère additionnelle
5. Sphères principales
6. Amortisseurs additionnels
7. Amortisseurs principaux

Un dispositif annexe : le clapet piloté

Le clapet piloté est un dispositif hydraulique permettant au véhicule de conserver une garde au sol constante lorsque l'état du système est ferme. Ce système annexe est placé entre les correcteurs de hauteur et les sphères principales.

pées d'une suspension à peu près identique. De la valeur de ces lois de référence et de leur parfaite adéquation aux conditions réelles de roulage, dépend la qualité du système de suspension.

Les capteurs d'informations

Au nombre de cinq, ils sont chargés d'informer le calculateur sur les paramètres suivants :

1 – l'angle et la vitesse angulaire du volant. Tous deux sont relevés par un capteur opto-électronique (6) monté sur la colonne de direction face à une roue multifentes entraînée par l'arbre de direction.

Le passage en suspension ferme est commandé lorsque l'angle du volant ou la vitesse angulaire atteint une valeur dépendant de la vitesse du véhicule.

La suspension reste ferme tant que l'angle du volant n'est pas redescendu au-dessous de cette valeur. De ce fait, la mise en roulis est retardée et minimisée, d'une part par le passage de la suspension en ferme, mais aussi par l'interruption de la communication des éléments de suspension droite et gauche.

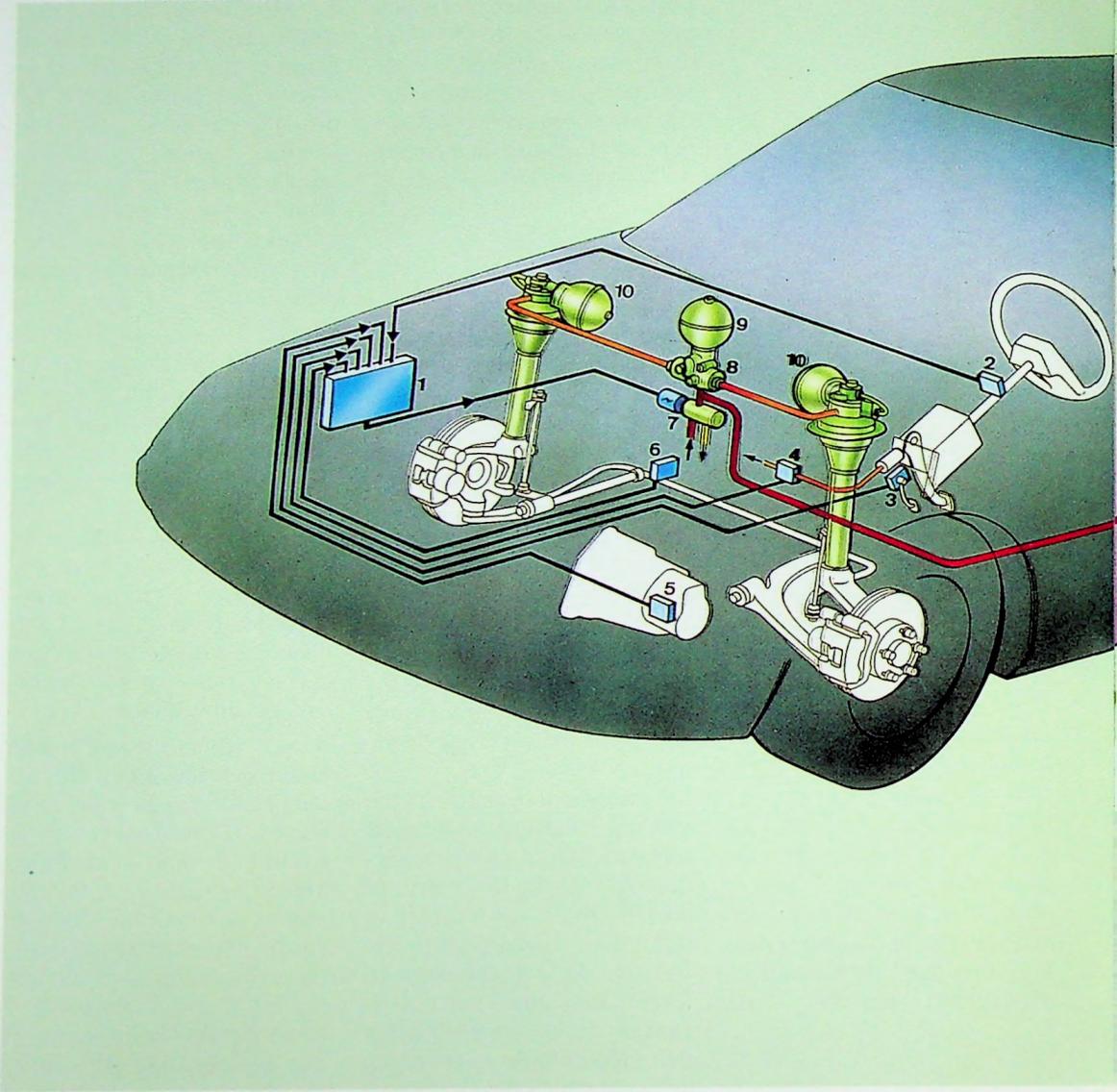
2 – la vitesse d'enfoncement ou de relâchement de la pédale d'accélérateur. Elle est mesurée par un potentiomètre qui relève le temps nécessaire pour franchir une zone de 10% de la course totale de la pédale dans les deux sens, et ce, dans une plage dépendant de la vitesse du véhicule.

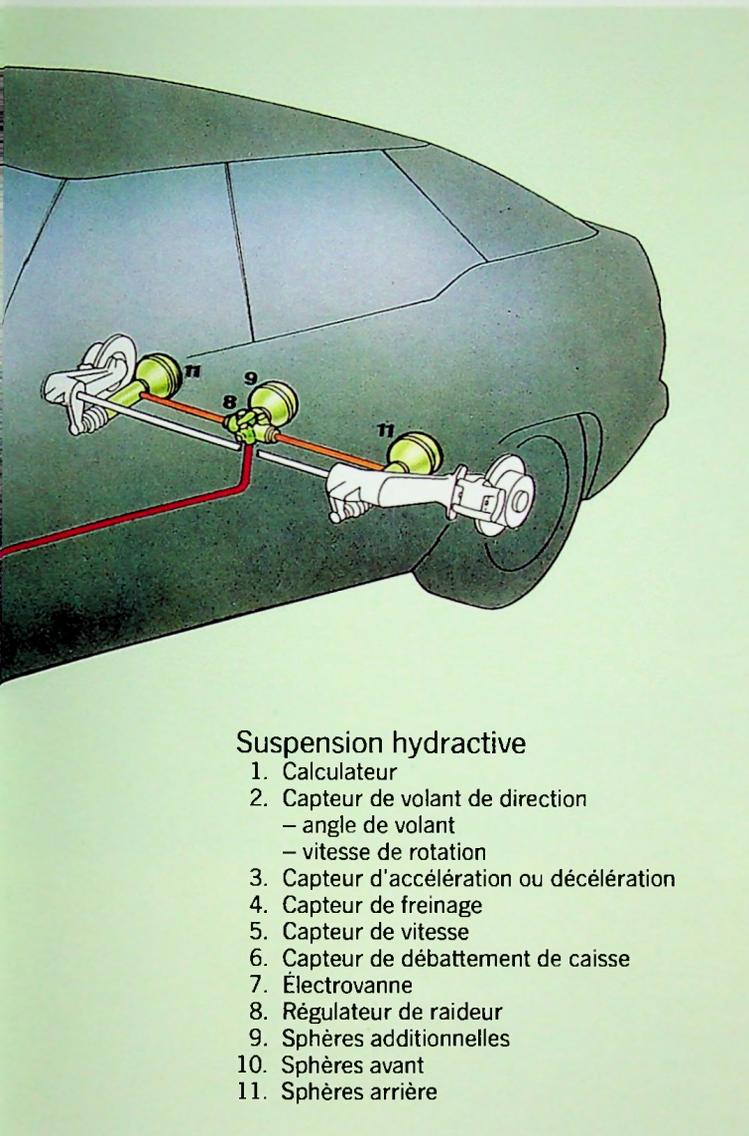
3 – le freinage. La pression de freinage est relevée par un mano-contact branché sur le circuit des freins avant. Le passage en ferme s'effectue lorsque le mano-contact détecte une pression supérieure à une valeur étalon et il est maintenu pour une décélération supérieure à un certain seuil.

4 – le débattement de la caisse. Il est relevé par un capteur optique qui mesure la rotation de la barre anti-roulis avant. Le passage en ferme est commandé dès que l'amplitude de débattement de la caisse atteint un certain seuil en compression ou en détente. De plus, la vitesse de débattement de la caisse est prise en compte pour éviter les mouvements gênant les occupants du véhicule.

5 – la vitesse du véhicule. Elle est relevée par un capteur monté sur la boîte de vitesses. L'information vitesse est utilisée pour moduler les lois de passage en ferme imposées par les capteurs principaux et permettre par exemple une plus grande sensibilité à l'action du volant à vitesse élevée, ou inversement une plus grande sensibilité aux débattements de caisse à basse vitesse. Le calculateur en déduit également l'accélération ou la décélération réelle du véhicule afin de corriger les informations données par les capteurs de freinage et d'accélération.

(6) Optoélectronique : capteur optique à commande électronique.





Suspension hydractive

1. Calculateur
2. Capteur de volant de direction
 - angle de volant
 - vitesse de rotation
3. Capteur d'accélération ou décélération
4. Capteur de freinage
5. Capteur de vitesse
6. Capteur de débattement de caisse
7. Électrovanne
8. Régulateur de raideur
9. Sphères additionnelles
10. Sphères avant
11. Sphères arrière

Le commutateur de sélection

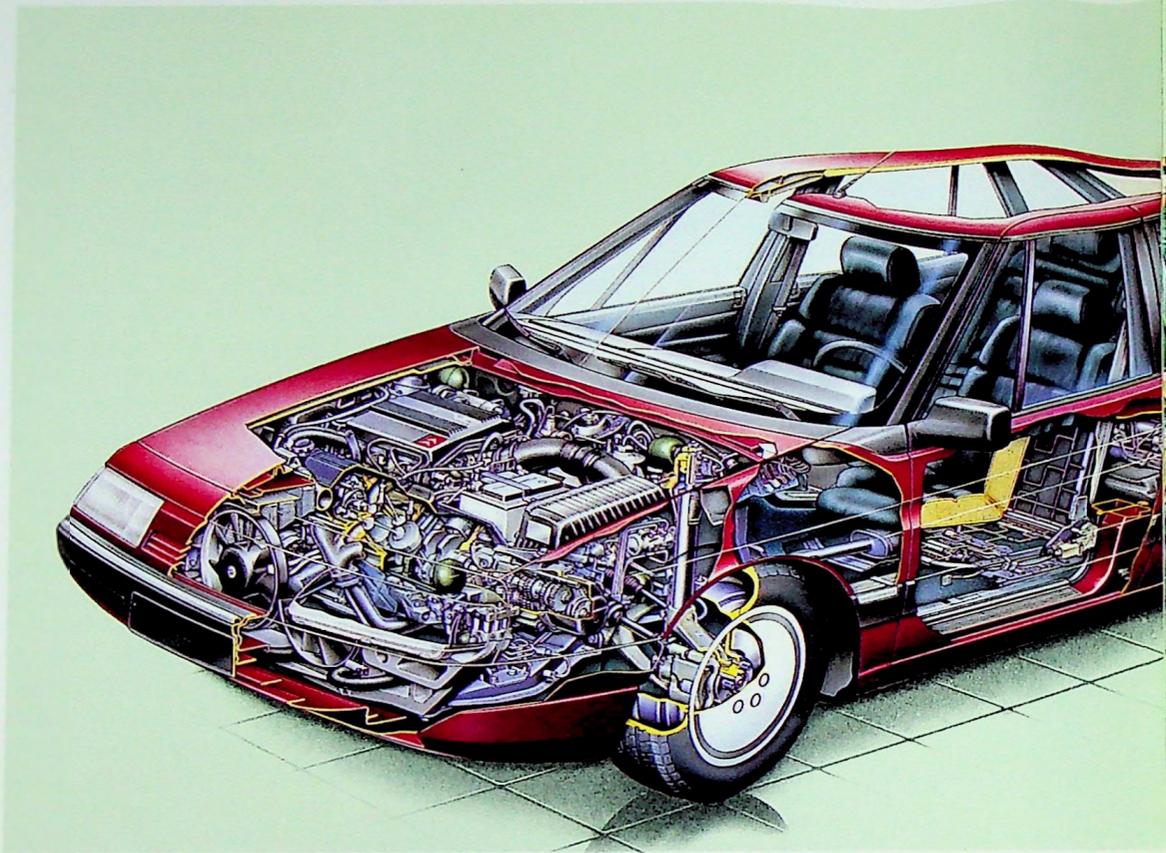
Une commande manuelle dite « commutateur de sélection », située au tableau de bord, permet au conducteur de choisir entre deux programmes : sport ou automatique.

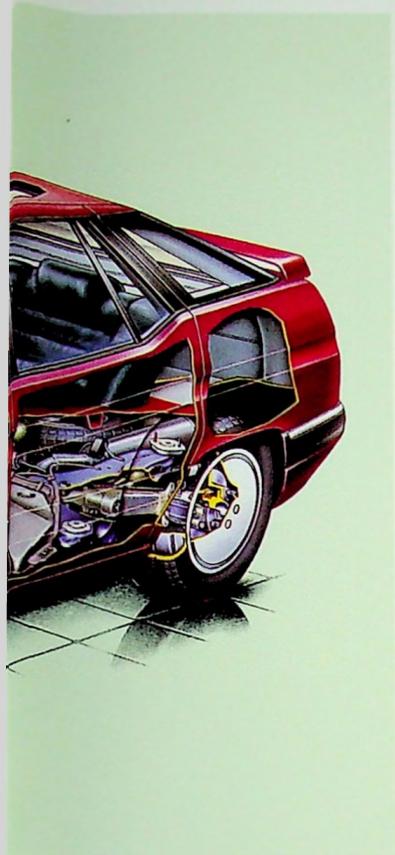
- **Sport** : l'électrovanne est hors tension. L'état ferme est permanent. Il est cependant mis automatiquement hors service à faible vitesse afin que les organes de suspension de chaque essieu soient à la même pression au début du roulage.

- **Automatique** : l'électrovanne est sous tension. L'état de suspension est normalement moelleux, mais en fonction des informations fournies par les capteurs, le calculateur commande ou non le passage en système ferme. Il est donc possible de privilégier la plupart du temps le confort et, dès que les conditions l'exigent (coup de volant, accélération, décélération, freinage brutal, dos d'âne...), de passer temporairement à l'état ferme pour un meilleur contrôle des mouvements de la caisse et la sécurité des passagers. La rapidité de réaction du système, associée à l'anticipation, est telle que le conducteur ne perçoit pas les changements d'états.

L'essieu avant

Pour tirer le meilleur parti des possibilités de la suspension hydractive, l'essieu avant de la XM a fait l'objet d'une étude particulière et a reçu deux modifications qui ont une incidence directe sur le comportement routier du véhicule.





L'essieu avant de la XM est constitué de deux demi-essieux supportés par un berceau fixé en quatre points sur le bloc avant de la caisse.

Le bras inférieur de chaque demi-essieu en acier forgé, largement triangulé, assure un maintien efficace du pivot supportant la roue.

Les articulations en caoutchouc maintenant le bras sur le berceau assurent le filtrage (7) horizontal du bras.

Le filtrage vertical est assuré par la fixation supérieure de l'élément porteur.

Les deux modifications importantes de l'essieu avant concernent l'élément porteur :

- l'agencement spécial de la partie supérieure de l'élément porteur diminue les frottements internes et engendre une force hydraulique qui s'oppose aux efforts latéraux auxquels est soumis l'essieu ;

- une butée hydraulique à effets progressifs supprime le talonnement au passage de dos d'âne.

Le rendement global essieu-suspension a également été amélioré : la barre anti-devers est reliée par des biellettes directement à l'élément porteur, et non au bras de suspension. Il en résulte une efficacité accrue de la barre (dont le délai de réponse est réduit puisqu'elle agit directement sans attendre l'écrasement du caoutchouc des paliers de bras) et une meilleure filtration de ces paliers de bras qui peuvent assurer normalement et sans contraintes excessives leur rôle d'articulation et de filtration, notamment dans les grands débattements.

(7) Filtrage : absorption des vibrations, bruits et autres nuisances remontant de la route et perturbant le confort des passagers.

CONCLUSION

A l'heure où tant de suspensions sont trop facilement dites « intelligentes », alors que la plupart ne traitent que l'amortissement, la suspension hydractive de la XM est la seule suspension hydraulique qui puisse procurer un amortissement et une flexibilité variables instantanément en même temps qu'une hauteur constante au-dessus du sol. Tantôt moelleuse et tantôt ferme, elle réalise la synthèse du confort et de l'agrément de conduite avec le comportement routier et la sécurité active.

Les qualités de cette nouvelle suspension s'ajoutent à celles, bien connues, de la suspension hydraulique Citroën :

- garde au sol constante quelle que soit la charge ;
- maintien des qualités de la suspension et du coefficient aérodynamique (S.Cx) du véhicule à vide comme en charge ;
- hauteur du véhicule variable au gré du conducteur pour le franchissement de passages difficiles ;
- amortisseurs intégrés au système de suspension, ce qui leur confère une fiabilité absolue et les met à l'abri de l'usage ;
- entretien très réduit.

Fidèle à sa tradition d'anticipation technique, Citroën vient à nouveau de s'assurer, avec la suspension hydractive de la XM, une avance considérable dans la résolution du principal problème posé par un mobile circulant au contact du sol.