

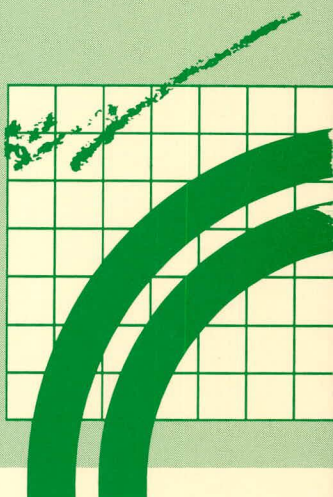
ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



LA PÉNÉTRATION DES MATÉRIAUX AVANCÉS DANS LES SYSTÈMES DE COMMANDE DES VÉHICULES

DANIEL LEBLANC
MICHEL RIGAUD
JEAN-PIERRE TRUDEAU

ESSAIS
ET MATÉRIAUX



CANQ
TR
BSM
RE
112

Québec 

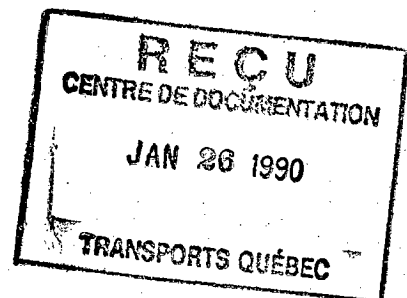
2/7232

LA PÉNÉTRATION DES MATÉRIAUX
AVANCÉS DANS LES SYSTÈMES
DE COMMANDE DES VÉHICULES

DOR-CEN-MON

CANQ
TR
BSM
RE
112

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1



Dépôt légal, 4^e trimestre 1989
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-20069-1



Titre et sous-titre du rapport La pénétration des matériaux avancés dans les systèmes de commande des véhicules				N° du rapport Transports Québec RTQ - 89-06		
				Rapport d'étape ☐ An Mois Jour Rapport final ☒ 8 9 0 3		
				N° du contrat		
Auteur(s) du rapport Daniel Leblanc, Michel Rigaud, Jean-Pierre Trudeau				Date du début d'étude Date de fin d'étude 8 8 0 2 8 9 0 3		
				Coût de l'étude 4 500 \$		
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Départements de génie industriel et de génie métallurgique, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succ. "A", Montréal (QC) H3C 3H7			Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Direction de la recherche Ministère des Transports du Québec 1410, rue Stanley, 11e étage, Mt1 (Qc) H3A 1P8			
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Identifier les orientations actuelles et futures dans les systèmes de commande des véhicules (systèmes de transmission, de direction, de freinage et de suspension), les principales classes de matériaux qui seront utilisés dans ces systèmes ainsi que les opportunités dans le domaine.						
Résumé du rapport Les principaux résultats de cette étude qui a considéré un horizon de 10 à 15 ans, et qui a impliqué notamment des rencontres avec 12 experts internationaux, sont les suivants: - les systèmes de commande des véhicules vont être le siège d'une foule d'innovations, tant au niveau des transmissions (à variation continue: par courroie, par poulies à gorges variables, toroïdale) que des différentiels (de Torsen, de Knight), des freins (antiblocage), des suspensions (actives) et des directions (4 roues directrices); - ces systèmes de commande seront de plus en plus intégrés par l'intermédiaire de systèmes de contrôles électroniques; - au chapitre des matériaux, plus d'aciers avancés (aciers microalliés en particulier) vont se substituer aux aciers ordinaires (ensemble des systèmes); le pourcentage en poids des plastiques va croître lentement (ensemble des systèmes) mais plus rapidement dans les systèmes de commande que dans les carrosseries; les céramiques avancées seront de plus utilisées comme capteur et actuateur dans les systèmes de contrôles. Devraient connaître également un certain développement, les composites d'aluminium (transmission notamment), les magnésiums (direction notamment) et éventuellement le titane; - au-delà de la complémentarité traditionnelle entre les constructeurs et les équipementiers, ces derniers vont jouer un rôle grandissant dans le développement de pièces utilisant les matériaux avancés. L'utilisation de nouveaux matériaux permettra notamment aux constructeurs de réduire les coûts par une plus grande modularité et une diminution du nombre total de pièces.						
Nbre de pages	Nbre de photos	Nbre de figures 17	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques 65	Langue du document ☒ Français ☐ Anglais	Autre (spécifier)
Mots-clés Matériaux avancés, matériaux composites, céramiques avancées, automobile, transmission, différentiel, suspension, direction, freins.				Autorisation de diffusion ☐ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite Signature du directeur général		
				Date 8 9 1 1 6 7		

AVERTISSEMENT

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du ministère des Transports du Québec.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les étudiants du cours de maîtrise "MU-645 - La prévision technologique" de l'École polytechnique, pour leur aide durant le trimestre d'hiver 1988 dans la réalisation de ce travail, ainsi que le ministère des Transports du Québec pour son soutien financier.

Les auteurs sont aussi reconnaissants envers les personnes qui ont bien voulu leur faire part de leurs opinions, soit à titre de conférenciers invités soit lors d'interviews structurées; ils demeurent toutefois les seuls responsables du contenu du rapport.

SOMMAIRE

Les systèmes de commande étudiés dans ce rapport sont ceux qui relient le moteur à la carrosserie. Ils seront l'objet d'un nombre considérable d'innovations apportées à la transmission (à variation continue, par courroie, par poulies à gorges variables, toroïdale), au différentiel (de Torsen, de Knight), au système de freinage (autiblocage), à la suspension (active de type Lotus), et à la direction (quatre roues directrices).

La mise au point de ces nouveautés technologiques est conditionnelle à l'intégration dans ce système d'informations, lui-même basé sur l'introduction de l'électronique dans tous les véhicules routiers (transfert de l'aéronautique).

Dans ce contexte, l'utilisation des matériaux avancés dans la fabrication des systèmes de commande des véhicules se fera en même temps que l'introduction massive de l'électronique et la redéfinition des fonctions visant à minimiser le nombre de pièces et de sous-systèmes.

Fait important à noter, le savoir-faire dans le domaine des nouveaux matériaux suscitera l'arrivée de nouveaux fournisseurs de pièces. Les constructeurs se spécialiseront de plus en plus dans la conception et l'assemblage des véhicules pour des raisons d'efficacité industrielle et de savoir-faire technologique.

En ce qui a trait à la fabrication des matériaux, les aciers améliorés vont graduellement se substituer aux aciers ordinaires, produisant une réduction sensible du pourcentage des métaux et alliages dans le poids total. Le pourcentage des plastiques va croître lentement mais sûrement et plus rapidement dans les systèmes de commande que dans les carrosseries. Les nouveaux systèmes de commande, une fois intégrés, utiliseront de nombreux senseurs et actuateurs dont la base sera constituée de matériaux céramiques perfectionnés.

Le Québec doit reconnaître au plus tôt l'importance des matériaux industriels perfectionnés et favoriser l'implantation d'entreprises dans ce secteur-clé. Le développement de ces entreprises repose plus sur le savoir-faire que sur la disponibilité de matières premières.

En ce qui concerne les matériaux et les pièces pour l'industrie automobile, le secteur le plus prometteur est celui des senseurs. Le Québec doit se doter d'une politique d'attrait visant tout particulièrement ce secteur, en raison de l'effet d'entraînement qu'il représente pour les autres secteurs des transports.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1: Nouvelle génération de transmission
- Figure 2: Principes de base de quelques transmissions mécaniques à variation continue
- Figures 3a et 3b: Transmission de type Van Doorne
- Figure 4: Transmission toroïdale
- Figure 5: Systèmes de traction intégrale
- Figure 6: Différentiel épicycloïdal
- Figure 7: Différentiel Torsen
- Figure 8: Visco-coupleur
- Figure 9: Système ASD
- Figure 10: Électrovanne du système ABS
- Figure 11: Module du système SCS
- Figure 12: Mécanisme du système Honda
- Figures 13a et 13b: Mécanisme du système Mazda
- Figure 14: Amortisseurs variables
- Figure 15: Relation existant entre un système de freinage anti-blocage et un système de contrôle de la traction
- Figure 16: Intégration future des systèmes de commande
- Figure 17: Application des céramiques dans les véhicules de surface

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	v
Remerciements	vii
Sommaire	ix
Liste des figures.....	xi
1. Mandat et cadre de l'étude	1
2. Méthodologie	3
3. Présentation du sujet	7
3.1 Ajustements structurels dans l'industrie automobile	7
3.2 Pourquoi utiliser des matériaux avancés dans les systèmes de commande?	11
3.3 Les systèmes de commande étudiés	12
4. Les changements technologiques apportés aux systèmes de commande de l'automobile	15
4.1 Transmission de puissance (démultiplication)	15
4.2 Transmission de puissance (motricité)	33
4.3 Système de freinage	51
4.4 Système de direction	56
4.5 Système de suspension	59
4.6 Intégration des cinq systèmes de commande	65
5. Les matériaux nouveaux dans l'automobile et les systèmes de commande	71
5.1 Vue d'ensemble	71
5.2 Les plastiques	72

TABLE DES MATIÈRES (suite)

5.3 Les métaux	75
5.4 Les céramiques	80
6. Éléments de synthèse	85
7. Effets	89
Références bibliographiques	93

1. MANDAT ET CADRE DE L'ÉTUDE

La présente étude de prévision technologique porte sur l'utilisation des matériaux perfectionnés dans la fabrication des systèmes de commande des véhicules. Elle vise à identifier:

- les principales classes de matériaux perfectionnés qui seront utilisés dans les systèmes de commande, à savoir les systèmes de transmission, de direction, de freinage et de suspension;
- les tendances actuelles et futures du développement dans cet ensemble de systèmes de commande;
- les effets et les possibilités pour le Québec afin de formuler des stratégies de recherche-développement dans le secteur du transport routier.

Cette étude, échelonnée sur une période de 12 mois, a été amorcée dans le cadre du cours "MU-645 - La prévision technologique", du programme d'études supérieures de l'École polytechnique de Montréal, durant le trimestre d'hiver 1988. Elle a été poursuivie de juin à décembre 1988 par une série d'interviews structurées portant à 12 le nombre d'experts consultés: sept Canadiens, un Américain, un Britannique, un Français et deux Allemands. C'est au cours des deux premiers mois de 1989 que la synthèse de l'information recueillie a été effectuée, objet du présent rapport.

2. MÉTHODOLOGIE

En vue de situer le sujet, dont l'horizon temporel est de 10 à 15 ans, il convient de :

- faire ressortir quelques tendances parmi les plus importantes qui ont marqué l'évolution du secteur industriel de production de véhicules de surface depuis le début de la décennie, touchant essentiellement l'industrie automobile;
- définir les raisons pour lesquelles on a choisi les matériaux avancés dans les systèmes de commande de l'automobile;
- expliquer en quoi consistent les systèmes de commande et identifier leurs innovations technologiques;
- examiner l'importance des matériaux nouveaux dans ces systèmes.

Les deux premiers points sont traités dans le troisième chapitre, "Présentation du sujet", qui sert d'introduction générale. Le chapitre 4 présente les systèmes de commande et leur évolution. La synthèse sur l'importance des matériaux nouveaux dans les industries du transport constitue le chapitre 5. Quelques pistes et éléments de réflexion en vue de cerner les effets et les possibilités pour le Québec, et formuler des stratégies de recherche-développement dans le secteur du transport routier, se trouvent au chapitre 6.

Pour réaliser ce travail, l'atelier de prévision technologique du cours "MU.645 - La prévision technologique", regroupant onze étudiants de maîtrise, a été scindé en trois groupes et a été organisé pour simuler l'opération de monitoring en vue de la diversification des activités d'une compagnie manufacturière distributrice de pièces d'automobiles. L'accent a été mis sur la production de sous-systèmes comportant des pièces structurelles et des pièces fonctionnelles de contrôle et commande. Il s'agissait alors, d'après le mandat donné à ces groupes, de déterminer les inconvénients et les possibilités pour les pièces les plus intéressantes à manufacturer, compte tenu de l'évolution des matériaux prévue pour l'an 2000.

Pour appuyer cette démarche, trois conférenciers sont venus préciser certains points particuliers: M. Harvey Filger, directeur de la recherche chez Automobile Parts Manufacturers Association of Canada de Toronto, a présenté un séminaire sur le thème "Perspectives de l'évolution de l'industrie canadienne des pièces automobiles dans le contexte du libre échange".

M. Richard Webb, alors directeur de l'expansion commerciale d'Alcan International et actuellement président de la compagnie Alanx dans le Delaware, a présenté une conférence intitulée "Alanx : a new material for automobile parts in industry". Finalement, M. Lewis Sabounghi du Centre de développement des transports, a présenté des transferts de technologie dans le domaine des matériaux appliqués aux transports routiers.

Pour compléter ces démarches, on a rencontré les personnes suivantes, entre mai et décembre 1988 : MM. Daniel Poisson de Camoplast; Don Haines, président de Haines Technology Associates de Toronto; Gene Helmes, Chief of Vehicular Engines, GM Corporation, Indiannapolis (Ind.); Georges Lacey, président de l'Ontario Centre for Auto Parts, Ste. Catherines; David Huggins, Department of Industry and Trade, Londres (GB); Jean-Paul Torre, directeur de la recherche chez Céramiques Desmarquets (Péchiney), Trappes (France); Anton Ziebig, directeur général de Ceramtec, Lauf (RFA); ainsi que Manfred Lipps, vice-président R-D, ESK Kempten (RFA).

Au total, les étudiants de l'atelier ont identifié une vingtaine de projets d'étude en basant leur argumentation sur un ensemble de plus de 750 références bibliographiques portant directement sur le choix des matériaux pour les pièces d'automobiles, sélectionnées avec l'aide du "Material Information's Document Supply Services" de l'ASM International et du service équivalent de la Society of Automotive Engineers Inc., et en se basant aussi sur une banque de rapports et de thèses. [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]

3. PRÉSENTATION DU SUJET

3.1 Ajustements structurels dans l'industrie automobile

François Perrin Pelletier de Peugeot S.A. [8] voit l'évolution de la voiture européenne en fonction des caractéristiques suivantes:

- plus propre, c'est-à-dire causant moins de pollution;
- systèmes de commande et de contrôle plus sécuritaire;
- puissance accrue par unité de poids du véhicule;
- options mécaniques et surtout électroniques plus variées;
- éléments esthétiques et performances au choix, selon les goûts et les besoins du client;
- coût relativement plus élevé.

Le perfectionnement de ces caractéristiques varie d'un produit à l'autre selon qu'il soit européen, américain ou japonais. Ces aspects constituent néanmoins une liste de contrôle valable pour suivre son évolution d'ici la fin du siècle.

Il apparaît en particulier que l'automobile devient un produit de plus en plus sophistiqué, dont la fabrication fait appel à des spécialistes de technologies très différentes: motoristes, spécialistes des matériaux de structure et de fonctions, de l'aérodynamique, etc.

Dès lors, la complémentarité entre les fabricants de pièces et le maître-d'oeuvre de la conception, puis de l'assemblage du véhicule, est en passe de devenir un aspect essentiel de concurrence dans l'industrie automobile.

Il est intéressant de constater que cette complémentarité est abordée de manière différente selon que l'on considère l'industrie japonaise, européenne ou américaine. Ainsi, on estime [8] [9] qu'environ seulement 30 à 35 % de la valeur du produit serait manufacturée chez le constructeur japonais alors que cette proportion atteindrait 75 % chez le constructeur américain. La répartition européenne se situerait entre les deux. Lorsque l'on remarque que près de la moitié du coût d'un véhicule provient de l'assemblage, on note que les différences de structure sont encore plus apparentes lorsque l'on considère seulement la production des pièces.

La faible intégration verticale dans l'industrie automobile japonaise comporte des avantages pour les constructeurs. D'abord, ils sont moins affectés par les baisses de demande, car ils peuvent reporter sur les fournisseurs de pièces le coût de la sous-utilisation des capacités de production. (En fait, on attribue au système de sous-traitance une bonne partie de la réaction rapide de l'industrie japonaise à la récession de 1985 provenant de l'appréciation du yen.) L'organisation de la production est plus souple et répond aux besoins de pièces au fur et à mesure, ce qui permet non seulement de baisser les coûts d'inventaire mais aussi d'offrir économiquement un plus grand choix d'options au consommateur. (Il est d'ailleurs intéressant de noter que la faible intégration verticale est certainement une raison du succès des changements apportés à l'organisation de la production dans les firmes japonaises, alors que l'on connaît les difficultés sinon l'échec de l'expérience tentée à grands frais par G.M. (achat de Hughes Aircraft et Electronic Data Systems - EDS) pour implanter un système informatisé de gestion des opérations dans une organisation beaucoup plus grande et complexe).

L'étroite collaboration entre constructeurs et fournisseurs de pièces, classique dans l'industrie japonaise, n'est pas sans intérêt pour ceux-ci. Elle leur a permis, en particulier, de réaliser des économies d'échelle en devenant d'abord les fournisseurs d'un composant donné pour toute l'industrie automobile japonaise dans un premier temps (système des "kyoryokuhai"), puis d'attaquer les marchés mondiaux de pièces détachées en s'appuyant sur l'expertise et l'assurance de débouchés locaux.

D'autres raisons technologiques et économiques désavantagent l'intégration verticale dans cette industrie. Le constructeur responsable de la conception, de l'assemblage et de la mise en marché du produit doit présenter au consommateur un produit qui sera jugé dans son ensemble. Celui-ci devra être équilibré selon les performances et les caractéristiques désirées. Le constructeur doit faire en sorte que chaque partie du véhicule participe à cet équilibre selon des normes établies quant aux performances lors du design.

Ces performances peuvent être décrites avec précision dans un cahier des charges et soumises à des fabricants qui travaillent alors suivant une logique de production d'un produit intermédiaire, non d'un produit final. La concurrence peut alors s'établir tant sur le plan des coûts que des solutions techniques pour satisfaire ces cahiers de charges. L'expertise technique peut alors servir à améliorer le produit final à des coûts concurrentiels. Ceci est particulièrement important si on tient compte que l'automobile moderne fait appel à des expertises de plus en plus diversifiées qu'une seule entreprise peut difficilement maintenir et développer.

On peut illustrer ces mécanismes d'offre et de demande de technologie dans le cas d'un changement technologique basé sur les matériaux dans l'automobile.

Ainsi, les coûts d'assemblage peuvent représenter la moitié du prix du produit fini. Ces coûts varient à la hausse selon le nombre de composantes à assembler. Deux approches sont envisageables pour réduire ces coûts: la modularité (assembler des petits sous-systèmes qui seront à leur tour assemblés entre eux) et la diminution du nombre de pièces. Un exemple maintenant classique est celui du hayon arrière de la BX. La collaboration du concepteur (Peugeot-Citroën), de fabricants de presse et d'outillages (Billon, Sera, Vetrotex), de fabricants de fibres (Saint-Gobain) et de résines (Rhone-Poulenc) a permis de fabriquer cette partie de véhicule en composite de verre et de polyester par injection, en seulement trois pièces plutôt que 27 pour son équivalent métallique [11].

Ce type de solution fait appel à des spécialistes des matériaux, que l'on ne rencontre pas habituellement chez un constructeur automobile plus porté sur les moteurs et les aciers. La collaboration avec des fournisseurs concurrents devient donc plus rentable que l'appropriation de changements technologiques. Les exemples vont se multiplier. Certains spécialistes [12] de l'organisation industrielle voient se généraliser ces phénomènes de collaboration-concurrence par cahier des charges à l'intérieur même de l'entreprise et dans la recherche.

Les fonctions sont aussi un nouveau type d'intégration. Cette intégration se fait déjà dans le système de commande (voir paragraphes 4.6.1 et 4.6.2. Des phénomènes similaires se profilent dans le domaine des matériaux "sur mesure. Par

exemple, les composites carbone-carbone, déjà utilisés pour le freinage dans le domaine aéronautique, intègrent la fonction de frottement avec celle d'élément de structure, à la différence du frein classique qui n'a qu'une fonction de frottement. Ceci entraîne une simplification à la fois des pièces et de leur conception [11].

En plus de la complémentarité constructeur et équipementier, les producteurs de matériaux joueront un rôle grandissant dans la fabrication des pièces d'automobiles. Une partie importante des contraintes imposées par les constructeurs à leurs fournisseurs seront satisfaites par un savoir-faire de haut niveau dans le domaine des matériaux. Étant donné l'internationalisation des échanges entre constructeurs automobiles, un créneau important est ouvert pour ces producteurs de matériaux. Au Québec et au Canada de s'y tailler une place de choix!

3.2 Pourquoi utiliser des matériaux avancés dans les systèmes de commande?

L'étude a été conçue en considérant les trois grandes divisions fonctionnelles dans un véhicule: le moteur, la carrosserie et les pièces de structure qui relie carrosserie et moteur. Cette dernière se divise en deux classes: l'aménagement intérieur et les systèmes de commande. En 1987-1988, une première étude prévisionnelle et sectorielle a été effectuée pour le compte de la Direction de la recherche du ministère des Transports du Québec [13], en considérant la pénétration des matériaux céramiques avancés dans les moteurs. En 1988-1989, il a été décidé d'examiner la pénétration des matériaux nouveaux dans les systèmes de commande, de préférence à la carrosserie, parce que cela présentait a priori un plus

grand défi à relever au point de vue de la synthèse de l'information, de la compréhension de la structure industrielle et de l'utilisation de l'approche prévisionnelle. Une autre raison était que cela devait jeter un éclairage plus original et plus novateur sur le phénomène de substitution des matériaux traditionnels par les matériaux avancés et sur l'étude des conséquences.

L'industrie automobile est l'une des principales acheteuses de matériaux nouveaux. Elle n'est devancée que par l'aviation militaire et l'aérospatiale (espace), les systèmes terrestres guidés (armements) et l'aéronautique civile. Dans le secteur des véhicules routiers, il était intéressant d'effectuer le monitoring de la pénétration de ces matériaux nouveaux, déjà fort présents dans les trois secteurs énumérés. Avant d'effectuer un survol des matériaux, et pour mieux situer le sujet, il convient de décrire maintenant ce qu'on entend par systèmes de commande.

3.3 Les systèmes de commande étudiés

Les systèmes de commande d'un véhicule automobile sont destinés à transmettre et à contrôler la puissance générée par le moteur. Ces systèmes peuvent être définis en fonction du rôle, distinct mais complémentaire, qu'ils jouent.

La transmission est la liaison mécanique assurant la transmission de la puissance de l'arbre de sortie du moteur (vilebrequin) aux roues motrices. Deux systèmes assurent cette fonction: la démultiplication et la motricité. La démultiplication permet d'ajuster le couple requis par le véhicule en fonction des caractéristiques de couple et de puissance

développées par le moteur à différents régimes. Cette liaison mécanique de rapport variable est intégrée dans une boîte de vitesses.

Le second système, complémentaire au premier, transmet la puissance de la boîte de vitesses aux roues motrices, par l'intermédiaire du différentiel. Cela permet aux essieux et aux roues motrices de tourner à différentes vitesses, lors d'un virage par exemple. Ce système assure la motricité du véhicule.

Le freinage est un système qui permet de ralentir et d'immobiliser un véhicule en transformant l'énergie cinétique en chaleur, généralement par frottement.

La direction est un système qui guide le véhicule dans le plan horizontal en modifiant l'angle de braquage des roues avant et, parfois, des roues arrière.

La suspension est un système qui assure l'interface continu entre le sol et le véhicule, en absorbant les inégalités du terrain ou de la route. En permettant un contact adéquat des roues avec le sol, il est un complément essentiel des systèmes de transmission, de freinage et de direction. Il conditionne également le confort des passagers.

Cela constitue cinq sous-systèmes si on distingue la démultiplication et la motricité dans la transmission. Afin de bien situer l'importance des matériaux nouveaux pour ces cinq sous-systèmes, une étude prospective parallèle a été menée sur l'évolution technologique qui leur est propre (chapitre 4).

Nous nous dirigeons vers une nouvelle génération de systèmes de commande faisant de plus en plus appel à des sous-systèmes de contrôle informatisés. Ces systèmes intégreront des données relevées par des capteurs et des actionneurs en nombre croissant (voir paragraphe 4.6).

Par exemple, l'on s'oriente vers des véhicules avec des normes de freinage plus sécuritaires, de type anti-blocage sur tous les véhicules. L'introduction d'équipements électroniques d'aide à la conduite se sera aussi imposée.

4. LES CHANGEMENTS TECHNOLOGIQUES APPORTÉS AUX SYSTÈMES DE COMMANDE DE L'AUTOMOBILE

On distinguera tour à tour la transmission (multiplication et motricité du véhicule), le freinage, la direction et la suspension.

4.1 Transmission de puissance (démultiplication)

4.1.1 Systèmes actuels

Le moteur à explosion, utilisé dans la majorité des véhicules automobiles, ne développe qu'un faible couple à bas régime, contrairement au moteur électrique, par exemple. Cette caractéristique impose la présence, d'une part, d'un mécanisme de démultiplication destiné à multiplier le couple du moteur et, d'autre part, d'un lien non rigide entre le moteur et la transmission. Ce dernier rôle est celui de l'embrayage à disques de friction dans les transmissions manuelles et du convertisseur hydraulique des transmissions automatiques.

Le convertisseur hydraulique comprend également, interposé entre l'élément moteur (la pompe) et l'élément entraîné (la turbine), un élément intermédiaire, le stator. Lorsque la vitesse de la turbine est très inférieure à celle de la pompe, c'est-à-dire en accélération, cet élément renforce l'effet du fluide hydraulique sur la turbine et permet au convertisseur hydraulique d'agir comme multiplicateur de couple. [14]

C'est pour cette raison que les transmissions automatiques comportent généralement moins de rapports que les transmissions manuelles correspondantes.

Les véhicules actuels sont généralement équipés de l'un des deux types de transmissions suivants: manuelles, avec de trois à cinq rapports, et automatiques ou semi-automatiques, avec de deux à quatre rapports et un convertisseur-multiplicateur de couple hydraulique. Les véhicules plus lourds reçoivent les mêmes types de transmissions, renforcées et munies d'un nombre plus élevé de rapports.

L'efficacité d'une transmission manuelle, correctement utilisée par le conducteur, est très élevée. Des versions analogues, mais plus sophistiquées, à six ou sept rapports sont actuellement en développement. Elles sont destinées aux automobiles de haut de gamme à vocation sportive, comme la Porsche 959 à six rapports, et aux modèles de luxe à hautes performances.

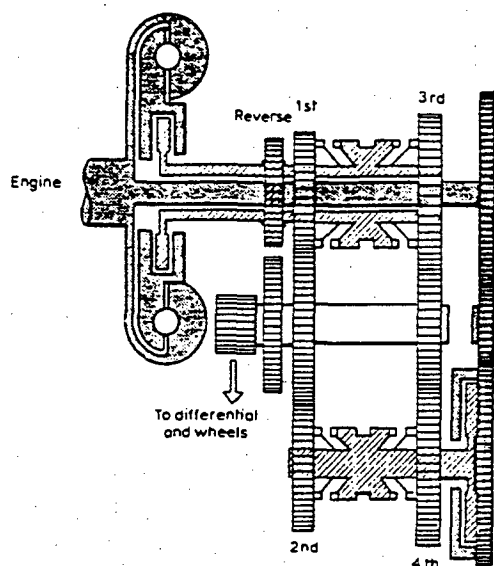
Les transmissions automatiques actuelles sont nettement moins économiques, avec une perte d'efficacité d'environ 10 % à 15 % par rapport aux transmissions manuelles comparables. Cette perte est due à l'ensemble convertisseur-multiplicateur de couple hydraulique. À vitesse stabilisée, l'ensemble travaillant comme coupleur hydraulique atteint une efficacité de l'ordre de 95 % à 98 %. Cette efficacité diminue cependant beaucoup lorsqu'il est utilisé comme multiplicateur de couple. [15]

Au cours des prochaines années, des versions plus complexes de ce concept verront le jour. Le multiplicateur de couple cèdera en partie sa place à une augmentation du nombre de rapports pouvant atteindre cinq ou six. L'efficacité globale augmentera, ainsi que le coût, le poids et l'encombrement de ces transmissions. À moyen terme, leur avenir semble compromis par de nouvelles générations de transmissions automatiques.

4.1.2 Évolution des systèmes actuels

Les transmissions manuelles classiques servent actuellement à développer une nouvelle génération de transmissions qui pourront être automatisées. Ces transmissions comprennent deux arbres secondaires au lieu d'un seul, chacun étant contrôlé par un embrayage (figure 1).^[15]

FIGURE 1
Nouvelle génération de transmission



British company AP has devised a way of making a manual gearbox continuously variable

L'un des arbres porte les engrenages correspondant aux rapports impairs, l'autre, aux rapports pairs. Ainsi, deux rapports successifs servent en même temps. Le passage de l'un à l'autre se fait par embrayage-débrayage graduel des arbres secondaires correspondants. Ce système évite de débrayer lors du passage des rapports, sauf au démarrage. La chute de régime du moteur est moins importante et correspond uniquement à la différence de démultiplication. L'efficacité globale et la rapidité du changement de rapport sont augmentées d'autant.

Ce dernier avantage devient déterminant en compétition automobile ou pour des voitures à vocation sportive, particulièrement avec des modèles munis de moteurs turbo-compressés. Ainsi, la compagnie Porsche développe un tel système destiné en premier lieu aux modèles de compétition et, ultérieurement, aux voitures de production. L'économie de carburant par rapport à une transmission automatique conventionnelle est estimée à 13 %. La transmission Porsche, appelée PDK, utilise un système de changement de rapports électriques, à contrôle manuel.^[16]

D'autres systèmes similaires sont en développement, dont celui d'Automotive Products Company d'Angleterre. Le système de commande est hydraulique et le contrôle, confié à un micro-processeur, est entièrement automatisé.^[15] Ce système utilise des composants standardisés de transmissions manuelles existantes. Il s'agit d'un avantage non négligeable pour l'industrie automobile.

Le nombre de rapports, actuellement de quatre ou cinq, est appelé à augmenter, de même que le rapport global de démultiplication, qui évoluera de 4:1 à 6 ou même à 8:1, pour des raisons d'économie.^[15] Les systèmes de commande seront informatisés et offriront plusieurs programmes de contrôle axés sur l'économie, les performances, la puissance ou, plus simplement, un contrôle manuel.

4.1.3 Transmissions à variation continue

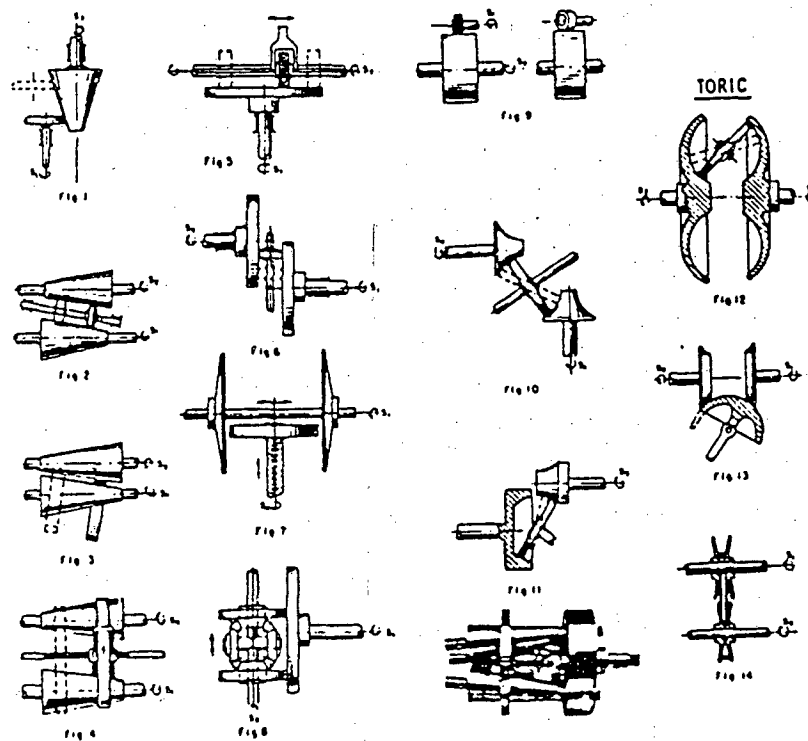
Les transmissions à variation continue, par opposition aux transmissions classiques qui sont discontinues, ont une infinité de rapports variant entre deux limites établies.

Ce concept est, par nature, beaucoup mieux adapté aux moteurs à explosion, qui ne fournissent des performances optimales, tant en couple qu'en puissance, que sur une plage de régime relativement étroite. Il permet également d'adopter le régime de consommation minimal d'un moteur, qui varie constamment en fonction de la vitesse et de la charge.^[17]

La transmission à variation continue permet également d'exploiter le potentiel d'un moteur, qui peut être dimensionné de façon plus juste, ce qui entraîne d'autres économies. Certaines évolutions de ce concept permettront peut-être, dans l'avenir, l'utilisation de moteurs moins adaptés aux changements fréquents de régime, mais plus efficaces telle la turbine.

Les principes mécaniques permettant une variation continue de la vitesse sont bien connus. Plusieurs types de variateurs mécaniques existent (figure 2) et sont utilisés, dans plusieurs cas, sur des équipements motorisés. Les applications au domaine automobile étaient cependant inexistantes jusqu'à présent, à cause des puissances relativement élevées, des conditions très dures d'utilisation (chocs et vibrations) et de la faible efficacité de certains mécanismes.

FIGURE 2



Principe de base de quelques transmissions
mécaniques à variation continue

Trois types de transmissions à variation continue semblent prometteurs, dont deux qui utilisent le principe de la courroie reliant deux poulies à gorge variable. Le premier est le variateur Van Doorne qui utilise une courroie métallique transmettant l'effort par compression plutôt que par tension, ce qui permet d'augmenter la puissance transmise. Il est actuellement au stade expérimental, et en quantité limitée, sur de petites voitures de production. Le second est le variateur P.I.V. qui utilise une courroie métallique transmettant l'effort par traction.

À plus long terme, la transmission à variation continue de type toroidal offre un potentiel intéressant. De nombreux prototypes existent sur des véhicules lourds. L'efficacité semble très élevée, mais de nombreux problèmes techniques, reliés notamment aux matériaux et aux procédés de fabrication, doivent être résolus avant d'en généraliser l'utilisation sur des véhicules de production.

4.1.3.1 Transmission de type Van Doorne

Le principe de la courroie et des poulies à gorge variable est connu et utilisé depuis longtemps. Il a même été appliqué à l'automobile par la compagnie DAF (système Variomatic).^[17] Toutefois, le frottement important généré par les courroies de caoutchouc, de même que leur faible résistance en traction et leur usure, expliquent le peu de succès de cette formule dans le domaine de l'automobile.

L'originalité du concept mis au point par la compagnie néerlandaise Van Doorne Transmissie BV (figure 3) réside dans l'utilisation d'une courroie transmettant la force par compression, et non par traction. Cette courroie composite en acier permet, pour un volume équivalent, de transmettre une charge bien supérieure à celle d'une courroie classique.

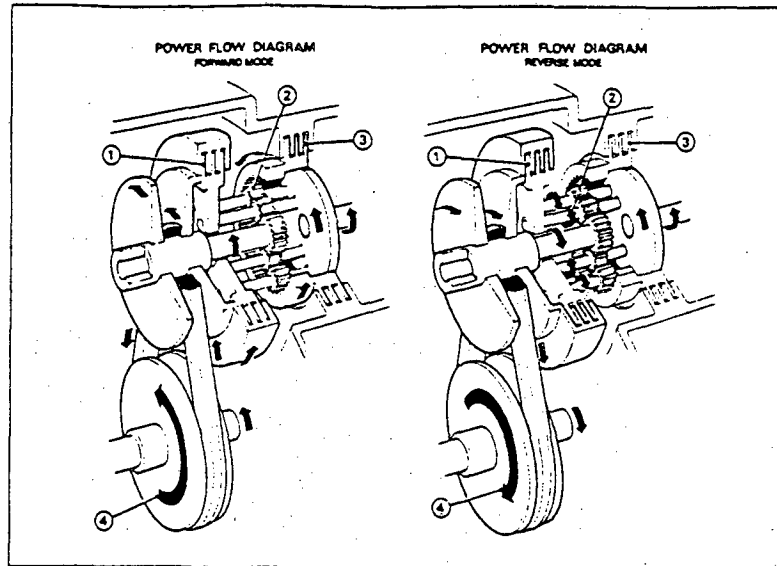
La courroie porteuse est constituée de deux séries de 10 à 14 lames concentriques d'acier austénitique. Sur cette structure flexible sont enfilés quelques centaines d'éléments d'acier trempé, montés avec un certain jeu afin de permettre la flexibilité longitudinale de l'ensemble. La poulie motrice renvoie les maillons dont l'empilement pousse sur la poulie réceptrice. Le rendement mécanique est excellent; les pertes par frottement qui nuisaient aux courroies en caoutchouc sont grandement diminuées. Par ailleurs, l'usure de la courroie est automatiquement compensée par un rapprochement des joues des poulies, également en acier.

La flexibilité de la courroie porteuse est due au jeu des lames d'acier concentriques de 0,2 mm d'épaisseur, glissant les unes sur les autres. Les tolérances sont très serrées, car les diamètres internes et externes de deux lames successives ne sont espacés que de 0,1 mm. La fabrication de ces transmissions

a d'ailleurs posée des problèmes techniques qui ont retardé de plusieurs années leur mise en marché.[¹⁷ à ²¹]

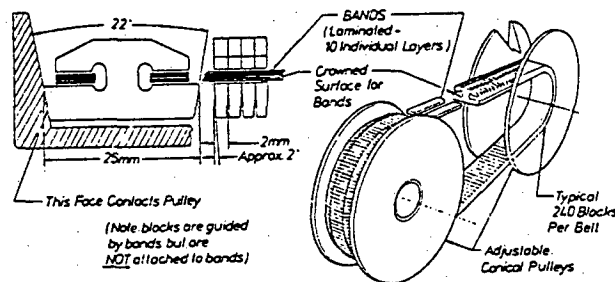
Le rendement mécanique du variateur est très élevé, quoique légèrement inférieur à celui d'un train d'engrenages, qui est voisin de 100 %. Les rapports de démultiplication peuvent varier continuellement de 1:1 à 5:1. Le couple maximum est pour l'instant de 120 Nm, ce qui correspond à des moteurs d'une cylindrée de 2 litres et moins. Des modèles plus perfectionnés, assurant des rapports extrêmes de 1:1 à 7:1 et capables de passer des couples de 180 Nm, sont à l'étude.[¹⁷] Des programmes d'essais intensifs ont démontré leur fiabilité.[²⁰]

FIGURE 3
Transmission de type Van Doorne

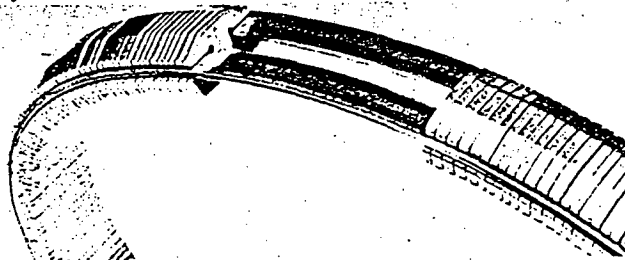


Single-stage epicyclic gearset gives start-up engagement of forward and reverse drives. Forward mode: clutch (1) locks sunwheel on primary pulley to planet carrier on input shaft. Planet gears (2) do not rotate, as clutch (3) on annulus is disengaged. Output pulley (4) rotates in forward direction. Reverse mode: clutch (1) disengaged, causing planet gears (2) to rotate since annulus is locked to casing by clutch (3). Doubled planet pinions reverse rotational sense of pulley (4).

COURROIE MÉTALLIQUE



This diagram shows how the metal belt rides on the variable diameter pulleys.



A typical CVT steel "belt," this one made by the Morse Chain Div. of Borg-Warner, is made of hundreds of metal blocks guided by steel bands. This belt operates under compression as opposed to rubber belts which operate under tension.

Le variateur Van Doorne, contrôlé par un levier identique à celui d'une transmission automatique, permet le freinage par compression du moteur. La marche arrière est assurée par un pignon inverseur. Le système de commande de l'écartement des joues des poulies, principalement hydraulique, est basé sur le même principe que celui des transmissions automatiques conventionnelles. D'autres systèmes de commande, électriques ou mécaniques, peuvent être utilisés. Des programmes sophistiqués de contrôle informatisés sont en développement.^[19] Il est probable que plusieurs de ces programmes de contrôle, axés sur l'économie, les performances ou la puissance (couple) seront disponibles et pourront être sélectionnés d'après l'utilisation du véhicule.^[17]

Les compagnies Fiat (Uno), Subaru (Justy) et Ford Europe (Fiesta) offrent ou offriront sous peu le variateur Van Doorne sur leur marché local. Ford Europe se prépare à le produire en grandes quantités, sous licence, à son usine de Bordeaux, en France. General Motors développe son propre système, basé sur le variateur Van Doorne. Il sera adapté à des moteurs de plus forte cylindrée, de l'ordre de 2 à 2,5 litres.^[17]

La Subaru Justy est également dotée d'un embrayage magnétique, développé par Mitsubishi Electric et Fuji. Ce type d'embrayage semble offrir des transitions beaucoup plus douces qu'un système mécanique. En outre, un micro-processeur permet d'ajuster de façon continue son fonctionnement aux conditions d'utilisation.[22 et 23]

La compacité axiale du variateur Van Doorne le rend particulièrement bien adapté aux tractions avant de petite cylindrée à moteur transversal. Les essais réalisés sur prototypes semblent indiquer que l'efficacité globale, d'environ 90 %[20], sera comparable à celle d'une transmission manuelle de cinq vitesses, utilisée normalement. La fiabilité et la durabilité devraient être adéquates. Par contre, le bruit d'un petit moteur tournant à vitesse plus élevée posera un problème gênant sur les petites voitures mal insonorisées.

Il est difficile d'évaluer le succès que ces transmissions auront auprès du consommateur. Celui-ci verra en effet ses perceptions ainsi que ses habitudes de conduite modifiées par ce nouveau produit. Par ailleurs, la réaction des marchés européens et japonais ne présage pas de celle du marché américain, grand consommateur de transmissions automatiques, mais nettement plus conservateur et

davantage orienté vers des modèles de plus grosse cylindrée. La concurrence de la nouvelle génération de transmissions automatiques (4.1.2) sera très forte et sans doute mieux adaptée aux automobiles de cylindrées supérieures à 2 litres. En conséquence, le variateur Van Doorne pourrait être confiné aux modèles de bas de gamme.

4.1.3.2 Transmission de type PIV

Le principe de la poulie à gorge variable est le même pour la transmission PIV que pour le variateur Van Doorne, à cette différence près que la chaîne, également métallique, transmet la force du moteur par traction, et non par compression. Cette conception permet, semble-t-il, d'éliminer le frottement dû à la flexion des plaques d'acier du variateur Van Doorne. Le frottement résiduel, l'usure subséquente et l'allongement de la chaîne sont très réduits, même à de très faibles diamètres de rotation. L'efficacité de l'ensemble serait par conséquent supérieure à celle du variateur Van Doorne.

La chaîne, plutôt que la courroie, est assez identique à celle d'un vélo ou d'une motocyclette. Elle est plus facile à produire, donc plus économique que la courroie du variateur Van Doorne. De plus, sa longueur peut facilement être modifiée par ajout ou

retrait de maillons. Le contact entre la chaîne et la poulie est assuré uniquement par les extrémités des goupilles joignant les maillons entre eux.

La compagnie allemande PIV, spécialisée dans les transmissions industrielles, développe ce concept en relation avec le réputé fabricant de transmissions automobiles ZF. Les constructeurs allemands, particulièrement Volkswagen et Daimler-Benz, sont intéressés au projet. Des prototypes ont d'ailleurs été construits pour des tractions avant et des propulsions. Ce type d'architecture est favorisée par certains constructeurs allemands, notamment Mercedes et BMW.^[24]

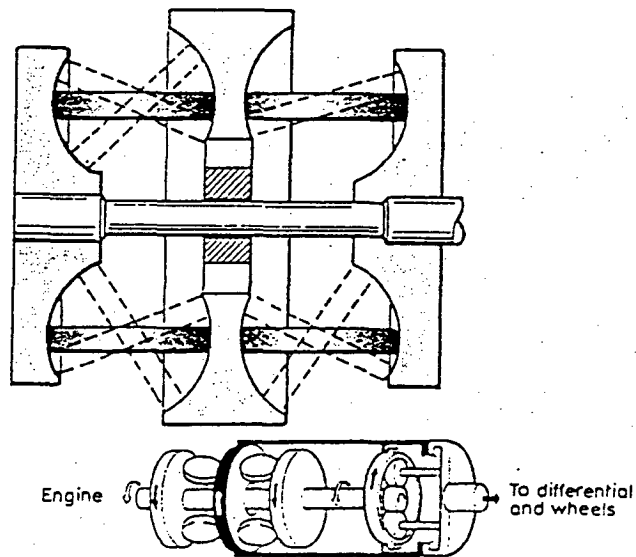
4.1.4 Transmission toroïdale

La transmission toroïdale est un concept vieux de quelque soixante années (figure 4). Le principe de base, assez simple, est le suivant: des galets sont interposés entre les faces intérieures, de forme semi-toroïdale, de deux disques disposés face contre face. Les galets sont en contact avec les faces intérieures de chacun des disques, qui sont eux-mêmes respectivement reliés aux arbres d'entrée et de sortie de la transmission. En faisant varier l'angle des galets par rapport à l'axe des disques, le rapport de démultiplication se trouve modifié. Le tout se fait graduellement, sans à-coups, lorsque les éléments de la transmission sont en rotation. Les faces de contact des galets et des disques sont absolument lisses.

La force est transmise par frottement et, surtout, par cisaillement d'un film d'huile élasto-hydrodynamique emprisonné entre les faces de contact. Pour cette raison les deux disques sont soumis à une force de compression énorme, de l'ordre de 150 tonnes par pouce carré (300 000 psi). En pratique, les transmissions peuvent comporter plusieurs étages de disques et de galets.[¹⁵]

FIGURE 4

Transmission toroïdale



Forbes Perry thought up this novel variable transmission; it has both potential and problems

Les avantages de la transmission toroïdale, par rapport aux autres types de transmissions automobiles, découlent du mode de transmission mécanique utilisé. Il y a plusieurs avantages.

- L'efficacité. En théorie, les pertes mécaniques résultant de la transmission par frottement sont à peu près nulles. En pratique, l'efficacité globale des prototypes est d'environ 95 %. Cela est très élevé compte tenu du mode d'opération, qui permet de varier les rapports de façon continue sans utiliser d'embrayages qui absorbent de l'énergie.
- Le rapport global de démultiplication peut atteindre 9:1. En pratique, il est limité à 6 ou 7:1 pour les applications automobiles.
- La démultiplication peut être variée rapidement une fois la transmission en mouvement. La gamme complète de démultiplication est parcourue en quelques tours, c'est-à-dire souvent en moins d'un dixième de seconde. En outre, le système de commande n'absorbe que très peu d'énergie.
- Le silence et la douceur du fonctionnement est supérieurs à ceux des autres transmissions à variation continue.
- La forme concentrique est assez bien adaptée aux véhicules automobiles. L'ensemble, quoique fortement pressurisé, est auto-supportant et ne nécessite aucun renfort extérieur.

- La fabrication, consistant essentiellement au tournage et au polissage de pièces métalliques, est nettement plus simple que l'usinage de dents d'engrenage, par exemple. Par contre, de très grandes tolérances dimensionnelles doivent être observées et ce, dans des matériaux très durs en surface.

Ces avantages expliquent l'intérêt porté aux transmissions toroïdales par l'industrie automobile. Ces transmissions ont fait l'objet d'ambitieux programmes de recherches dans les années soixante, particulièrement de la part de General Motors. De nombreux prototypes ont été construits, mais les recherches n'ont jamais abouties à un projet commercial, à cause d'un problème de fiabilité et de coût. Les principaux défauts et problèmes, encore une fois inhérents au mode de transmission de puissance, sont les suivants:

- Le poids et les dimensions des transmissions qui doivent être très robustes et rigides pour résister sans aucune déformation aux pressions appliquées en opération.
- Il y a une sensibilité au glissement. La moindre détérioration des surfaces de contact, notamment causée par le glissement, peut résulter en une destruction complète et instantanée de la transmission.
- La fabrication d'une transmission toroïdale requiert de grandes quantités d'aciers de haute qualité, du type utilisé pour les paliers. Les procédés de traitement et l'usinage de haute précision de ces matériaux sont complexes et délicats. Dès lors, les matériaux et la fabrication sont coûteux.

- Il y a des contraintes de service. À cause de l'énorme pression à laquelle est soumise la transmission, des phénomènes de fatigue cyclique sont susceptibles de se produire. L'usure des pièces de frottement peut également causer des ennuis.

Confrontés à ces problèmes, la majorité des bureaux d'études ont abandonné leurs recherches. L'un d'entre eux, le groupe britannique Perbury Engineering, les a poursuivies et aurait, semble-t-il, résolu certains des problèmes précités.^[25]

Les travaux de Perbury ont servi de base au développement, par Leyland Vehicles, d'un prototype avancé destiné aux véhicules mi-lourds en milieu urbain, autobus et camions de livraison. Cette transmission utilise un nouveau type d'huile élasto-hydrodynamique, mise au point par la compagnie Monsanto. Cette huile permettrait d'éviter tout contact entre les surfaces de friction, éliminant ainsi l'usure. De plus, elle permettrait un certain glissement des surfaces, ce qui augmenterait la fiabilité de la transmission.

La transmission toroïdale de Leyland Vehicles peut transmettre jusqu'à 500 HP. Elle possède deux gammes de démultiplication: prise directe sur le variateur ou démultiplication additionnelle via un train d'engrenages épicycloïdal qui permet la marche arrière. L'ensemble de la transmission est pressurisé par un vérin hydraulique incorporé dans le disque avant. Entièrement automatique, la transmission est contrôlée par un système informatique très sophistiqué qui lui permettrait, le cas échéant, de convenir à n'importe quel type de courbe de puissance de moteur.

Comparée à une transmission automatique classique pour véhicules mi-lourds, la transmission toroïdale est plus petite, plus économique à produire en série et surtout nettement plus efficace, avec une économie de carburant de 22 %. Un système de freinage à régénération, actuellement à l'étude, permettra d'augmenter l'économie à quelque 30 %. Un tel système, utilisant un volant mécanique qui absorbe ou restitue l'énergie sous forme cinétique, est particulièrement bien adapté à ce type de transmission.

Si les essais se révèlent satisfaisants, il est probable que la transmission donnera lieu à une fabrication en série limitée, destinée aux véhicules utilitaires mi-lourds. Une version plus légère, pour les automobiles de production, ne semble pas à l'étude pour l'instant.[²⁶ et ²⁷]

4.2 Transmission de puissance (motricité)

Les systèmes de motricité d'un véhicule assurent la transmission de la puissance mécanique de la sortie de la boîte de démultiplication aux roues motrices qui la transmettront, via les pneumatiques, au sol. Leur nombre et leur position permettent, d'emblée, de distinguer trois configurations distinctes.

- La traction avant. Les deux roues motrices, directionnelles, sont situées sur l'essieu avant, dans la majorité des cas directement en dessous du moteur. Ce type d'architecture convient aux automobiles de petite cylindrée (généralement

moins de 2,5 litres), mais favorise moins les cylindrées plus élevées. En effet, lors d'accélération positives, le train avant est délesté au profit du train arrière, ce qui limite la transmission de puissance au sol. De plus, le moteur et la boîte de démultiplication sont mis bout à bout en position transversale, entre les roues avant, dans un espace très limité.

D'une part, le comportement routier d'une traction avant, en conditions d'adhérence précaire, est sous-vireur. Il s'agit cependant d'un phénomène facile à contrôler, même par un conducteur novice. D'autre part, le véhicule, tiré par son train avant, possède une grande stabilité directionnelle. Les tractions avant, bien que complexes sur le plan mécanique, offrent un avantage de taille pour la production en série: l'ensemble moteur, transmission et train avant, est assemblé de façon modulaire, indépendamment du reste du véhicule.

- La propulsion (arrière). C'est l'architecture conventionnelle. Le moteur et la boîte de démultiplication sont généralement montés à l'avant, en position longitudinale. Ils transmettent leur puissance aux roues arrière par l'intermédiaire d'un arbre de transmission. Les propulsions, aux limites de l'adhérence, ont un comportement routier survireur. Ce type de comportement convient aux conducteurs experts et aux pilotes de compétition, qui tirent profit du dérapage contrôlé lors de virages rapides. Pour le conducteur moyen, c'est beaucoup plus difficile à contrôler - et dangereux - que le sous-virage.

Les véhicules de haut de gamme, équipés de moteurs de forte cylindrée, et les véhicules lourds ont généralement recours à la propulsion. Les petites automobiles de bas de gamme et de conception ancienne l'utilisent également.

- La traction intégrale (4 WD). Il s'agit de la traction aux quatre roues adaptée à des véhicules routiers de grande production. Les véhicules tout terrain en sont équipés depuis nombre d'années. La traction intégrale augmente de façon significative la sécurité active d'un véhicule: la motricité est très supérieure à celle d'un deux roues motrices, particulièrement dans des conditions d'adhérence précaire. Le comportement routier devient beaucoup plus neutre, par atténuation des phénomènes de sous-virage ou de sur-virage, propres aux tractions-avant et aux propulsions.

La firme allemande Audi, filiale du groupe V.A.G., a été une pionnière dans le développement de cette technique. Les succès d'Audi en rallye ont incité ses compétiteurs, notamment européens (Ford Europe, Lancia, Peugeot, etc.), à développer des systèmes de traction intégrale, d'abord destinés à la compétition automobile puis aux voitures de production.

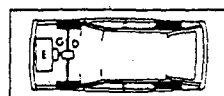
4.2.1 Transmission intégrale

Il existe plusieurs systèmes de traction intégrale (figure 5). Certains fabricants, à l'exemple d'Audi, ont opté pour une répartition permanente de la traction aux quatre roues. Ces systèmes utilisent trois différentiels, dont un différentiel inter-ponts ou différentiel central à répartition avant-arrière de couple

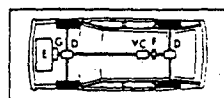
FIGURE 5

Systèmes de traction intégrale

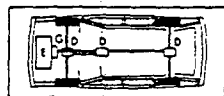
Drive concept



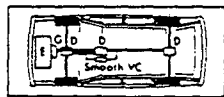
FWD
Front-wheel drive



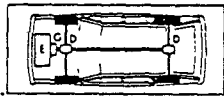
D-V-D
Permanent four-wheel drive (slip controlled)
Visco-coupling with free-wheeling mechanism



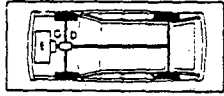
D-D-D
Permanent four-wheel drive
(power-controlled with differential) $M_f:M_r = 1:1$



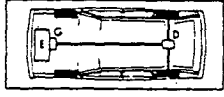
D-DV-D
Permanent four-wheel drive
(power- and slip-controlled) $M_f:M_r = 1:2$



D-R-D
Rigid four-wheel drive



D-R-R
Rigid four-wheel drive with locked rear axle



RWD
Rear-wheel drive

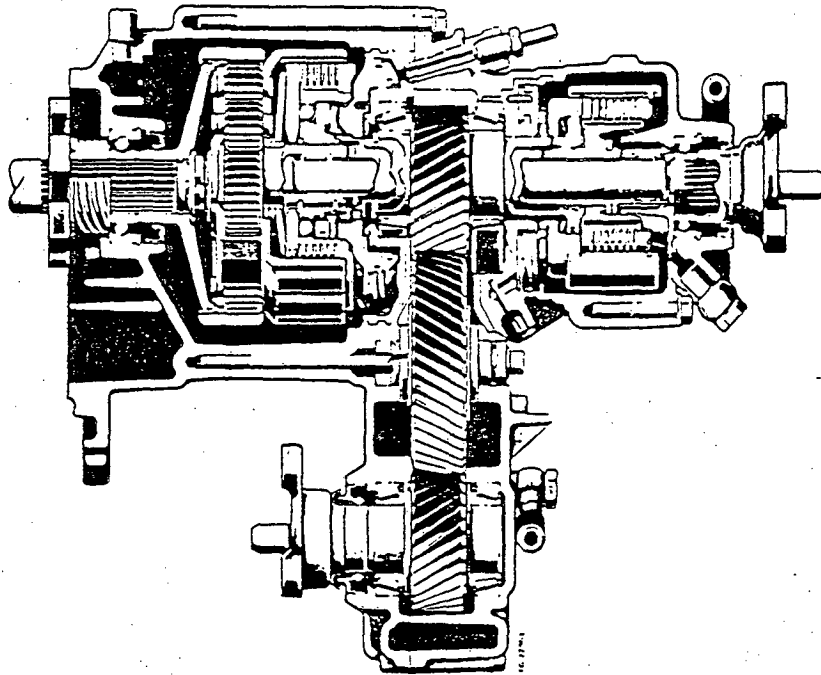
E-Engine, G-Gearbox, D-Differential, VC-Visco-coupling, F-Free-wheeling mechanism

fixe. Il existe plusieurs types de classiques à planétaires, dont le glissement peut être limité par des disques de friction ou des systèmes de verrouillage et à engrenages et vis sans fin, interdisant le glissement (Torsen et Knight). La répartition de couple est alors de 50 % AV et 50 % AR en conditions d'adhérence optimales. Le différentiel épicycloïdal (figure 6) permet une répartition fixe mais asymétrique du couple, par exemple 65 % AR et 35 % AV, fixée dès la conception du différentiel. Cette approche, utilisée notamment par Ford Europe, permet de conserver à l'automobile les caractéristiques routières d'une propulsion.

D'autres systèmes de traction intégrale permettent un engagement permanent des quatre roues, mais avec une répartition de couple variable. Il en est ainsi du visco-coupleur, utilisé seul ou comme partie d'un ensemble différentiel. La firme Jaguar utilise un différentiel épicycloïdal couplé directement au moteur (vilebrequin) en amont de la boîte de vitesses. La répartition avant-arrière varie alors en fonction du rapport engagé. Sur les premiers rapports, en accélération, elle favorise le train arrière. En cinquième vitesse, elle est de 40 % AR et 60 % AV, ce qui améliore la stabilité à haute vitesse.[²⁸]

Une autre système consiste à n'utiliser quatre roues motrices que lorsque les conditions d'adhérence le justifient et à conserver la configuration de base (traction avant ou propulsion) en toutes autres circonstances. L'ensemble est commandé depuis le différentiel central, verrouillé (4 RM) ou libre (2 RM). La

FIGURE 6

Différentiel épicycloïdal

- Transfer case with two multi-disc clutches for engaging the front-wheel drive and the central differential lock

compagnie Mercedes, notamment, a mis au point un système innovateur, sophistiqué et très efficace, qui commande la répartition de couple arrière-avant (variable) à l'aide d'un micro-processeur. (Voir paragraphe 4.2.2).

Les systèmes à quatre roues motrices entraînent généralement une légère augmentation de la consommation, de l'ordre de 2 % à 3 %, à cause des pertes encourues par le système de transmission (différentiels, arbres, etc.). Sur les systèmes non permanents n'utilisant pas de victo-coupleur, il est possible d'isoler la transmission mécanique inter-ponts des roues à l'aide de vérins, ce qui permet de réduire la consommation, le bruit, les vibrations et l'usure de la transmission.[²⁹]

Le succès des voitures à quatre roues motrices auprès des consommateurs nord-américains est encore mitigé malgré l'existence, au Canada et au nord des États-Unis, de conditions hivernales qui justifieraient pleinement son emploi. L'offre demeure encore faible, quoiqu'elle ait tendance à se développer. Les constructeurs japonais et américains s'y intéressent de plus en plus.

4.2.1.1 Différentiels à vis sans fin

Différentiel Torsen

Le différentiel Torsen (figure 7) est destiné à jouer le même rôle qu'un différentiel classique à planétaires. Il peut être implanté sur les trains avant ou arrière, ainsi qu'au

FIGURE 7

Différentiel Torsen



Dans le différentiel Torsen, comme dans tout différentiel, le couple moteur est reçu par la couronne, puis transmis aux satellites — ici deux engrenages hélicoïdaux liés par quatre engrenages droits — qui portent sur deux vis sans fin de part et d'autre du centre. Les engrenages à taille droite sont nécessaires pour lier les engrenages à taille hélicoïdale qui ne peuvent engrener l'un dans l'autre, leurs tailles étant de même sens.

centre, comme différentiel interponts. Il est destiné aux voitures à deux ou à quatre roues motrices.

L'intérêt du différentiel Torsen, dont le nom provient de la contraction de "torque sensing", est de répartir le couple moteur en fonction de l'adhérence dont disposent les roues ou les trains moteurs. La répartition est optimale, et se fait automatiquement, sans l'intervention d'aucun artifice de contrôle. En fait, le différentiel Torsen ne permet de différences de vitesse entre les roues ou les trains moteurs qu'en virage, et agit comme un essieu rigide en toute autre circonstance, entraînant les roues ou les trains moteurs à la même vitesse. Ainsi, la roue ou le train ne disposant d'aucune adhérence tournera à vide sans absorber de puissance. Celle-ci sera entièrement reportée sur l'autre roue ou train. Dans la même situation, un différentiel à planétaires transmettrait toute la puissance (avec le double de la vitesse) à la roue ou au train sans adhérence.

Le principe de fonctionnement du différentiel Torsen est basé sur la dualité vis sans fin et engrenage. La vis entraîne l'engrenage; l'inverse n'est pas vrai. Ainsi, chaque demi-arbre du différentiel porte une vis sans fin, alors que les planétaires sont remplacés

par des engrenages à taille hélicoïdale, reliés entre eux par des engrenages à taille droite. Lorsque la différence de rotation provient des roues ou des trains, elle est transmise par les vis sans fin aux engrenages planétaires, qui absorbent et transmettent la différence de mouvement. Dans tous les autres cas, l'ensemble est rigide.

L'efficacité du différentiel Torsen est telle qu'il transforme complètement le comportement d'une voiture. Une voiture à deux roues motrices ainsi équipée acquiert presque la motricité d'une quatre roues motrices. Quant à cette dernière, elle atteint pratiquement les performances d'un engin chenillé. Cette efficacité a son prix. Le différentiel doit être très robuste, à cause des réactions latérales sur les vis. De plus, sa fabrication fait appel à des équipements d'usinage spéciaux, car les engrenages et les vis qui le composent sont totalement hors-normes.

Le différentiel Torsen est fabriqué aux États-Unis par Gleason Works, le plus gros fabricant américain d'engrenages et de matériel connexe. Il est utilisé en particulier par Audi Quattro, comme différentiel inter-ponts, par Lancia et par Maserati. L'équipe de formule un McLaren l'utilise en compétition. L'armée américaine en a également équipé certains de ses véhicules. C'est un équipement fiable, dont l'entretien ne cause aucun problème. [30 à 33]

Différentiel Knight

Le différentiel Knight est basé sur le même principe que le Torsen, c'est-à-dire sur la dualité vis sans fin et engrenage. Beaucoup de ses composants sont conformes aux normes établies pour les engrenages et les vis sans fin et peuvent être fabriqués par des équipements standards, ce qui permet d'abaisser son prix de revient.

Récemment mis au point par la société britannique Knight-Mechadyne, ce différentiel aura des performances identiques à celles de Torsen dont il s'annonce un concurrent sérieux.^[34]

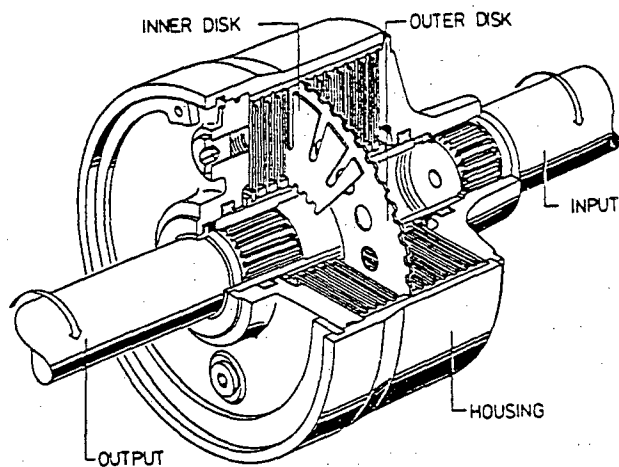
4.2.1.2 Visco-coupleur

Le visco-coupleur (figure 8) est implanté sur l'arbre de transmission d'un véhicule à traction intégrale, entre les trains avant et arrière. Sa fonction principale est de permettre la transmission du couple entre le train principal (avant ou arrière), qui reçoit normalement la plus grande partie du couple moteur, et le train secondaire (entraîné). Cette transmission est continue, mais demeure généralement faible, de l'ordre de 5 %, en conditions normales. Si le train principal vient à patiner, elle augmente et peut atteindre près de 100 % vers le train secondaire, si celui-ci dispose de bonnes

conditions d'adhérence. Le visco-coupleur joue le rôle d'un différentiel central, en permettant de légères différences de rotation entre les arbres solidaires des essieux, ce qui élimine l'antagonisme des trains avant et arrière.

FIGURE 8

Visco-coupleur



Viscous coupling

Le visco-coupleur est constitué d'un certain nombre de disques perforés, de section plate, solidaires de l'axe central. Ils sont

intercalés avec d'autres disques fixés à la couronne extérieure. La couronne et l'axe central sont respectivement reliés aux arbres d'entrée et de sortie du visco-coupleur. L'ensemble des disques (il y en a plusieurs dizaines, espacés de quelques millimètres) baigne dans une huile minérale extrêmement visqueuse. Enfin, la couronne et l'axe central sont scellés par un plateau comportant un palier.

L'ensemble fonctionne comme suit: tant que les conditions d'adhérence sont bonnes, le train secondaire conserve la même vitesse que le train principal. Le visco-coupleur, ne transmettant qu'un faible couple, tourne comme un tout, à la même vitesse que l'ensemble de l'arbre. Si le train principal vient à patiner, l'axe d'entrée, entraîné par ce train, tourne plus vite que l'axe de sortie, solidaire du train secondaire. Les disques moteurs entraînent alors, par cisaillement à travers le fluide, les disques reliés à l'axe de sortie. Le visco-coupleur transmet progressivement, sans à-coups, la puissance à l'autre train et la traction du moteur est transmise aux quatre roues.

Le cisaillement de l'huile entraîne une augmentation de la température et de la pression interne du visco-coupleur. En cas de surchauffe due à un cisaillement intensif,

il est possible, par la pression élevée, de plaquer les disques les uns contre les autres, ce qui verrouille le visco-coupleur et interdit toute surchauffe additionnelle.

Simple et efficace, le visco-coupleur fonctionne instantanément, sans intervention du conducteur. C'est également un élément fiable et durable, ne requérant aucun entretien. Son prix de revient très compétitif, malgré un assemblage délicat, le destine aux voitures de gamme moyenne-élevée. Il peut être compatible avec les systèmes de freinage anti-blocage, si on lui adjoint un mécanisme de désaccouplement du train secondaire, à rochet par exemple, qui libère le train en cas de freinage.

Le visco-coupleur est susceptible de réagir plus rapidement lorsque les différences de vitesse entre les arbres d'entrée et de sortie sont élevées. Dans certains cas, on augmente la vitesse de l'arbre de transmission via un train d'engrenages afin d'en augmenter l'efficacité.[³⁵ à ³⁷]

Le visco-coupleur peut également être utilisé comme équipement auxiliaire. Monté en série avec un différentiel classique ou épicycloidal, il lui confère des caractéristiques de glissement limité et de verrouillage progressif à déclenchement très doux, et s'avère généralement supérieur aux systèmes de disques de friction.[³⁵ à ⁴²]

4.2.2 Systèmes de contrôle actif de la traction

Le constructeur allemand Mercedes, conjointement avec le fabricant d'équipements Bosch, a mis au point différents systèmes d'assistance électronique de la traction, maintenant disponibles en option sur certains de ses modèles. Les deux sociétés; déjà responsables de l'apparition, il y a une dizaine d'années, des premiers dispositifs de freinage auto-blocage avec le Bosch ABS (Anti-Bloc System), vont beaucoup plus loin dans le contrôle actif du comportement dynamique d'une voiture. Ces innovations ouvrent la voie à de véritables systèmes de contrôle actif généralisé, qui prendront vraisemblablement en compte tous les systèmes de commande d'un véhicule (voir paragraphe 4.6).

Les systèmes mis au point par Bosch et Mercedes utilisent les capteurs de vitesse de l'anti-blocage ABS dont ils sont le complément logique. Ces capteurs, installés sur chacune des roues, comparent constamment leur vitesse relative. Ils peuvent ainsi détecter toute amorce de glissement ou de dérapage. Dès cet instant, un calculateur contrôle et dose l'action d'un dispositif correcteur, qui rétablit l'équilibre dynamique du véhicule. Le tout fonctionne automatiquement, sans que le conducteur n'ait à intervenir, ce qui serait de toute façon trop long. Celui-ci est cependant informé, par des témoins lumineux, que son véhicule approche des limites de l'adhérence et peut ajuster sa conduite en conséquence.

Bosch propose trois systèmes différents: les deux premiers sont déjà offerts à plusieurs constructeurs. Le troisième, plus sophistiqué, est pour l'instant exclusif à Mercedes.

L'ASR (Anti-Skid Regulation) est un système d'anti-patinage des roues motrices destiné aux propulsions. Le calculateur du système utilise les capteurs de l'ABS. Il compare constamment la vitesse des roues motrices aux roues avant et tient compte des différences normales dues aux virages.

Le patinage éventuel d'une roue motrice entraîne la mise en pression de son frein, ce qui reporte la puissance motrice sur l'autre roue via un différentiel classique. Une seconde boucle de contrôle agit au besoin sur la commande de l'accélérateur pour réduire le couple moteur.

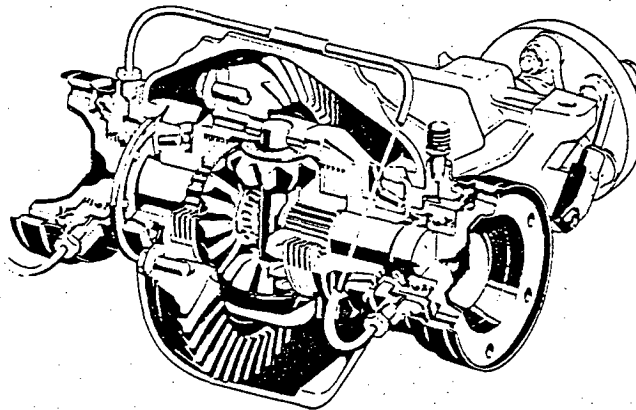
Le système, particulièrement utile au démarrage, élimine le survirage typique d'une propulsion, au grand dam des conducteurs "sportifs" qui peuvent le mettre hors-circuit.

L'ASD (Anti-Skid Differential) se présente sous la forme d'un différentiel classique implanté sur l'essieu arrière, comportant un système de glissement limité (disque de friction) à commande hydraulique contrôlée par un micro-processeur (figure 9).

Le système de contrôle utilise les capteurs de l'ABS, de la même façon que le système anti-patinage ASR. En cas de besoin, le blocage du différentiel, normalement de 30 % à 40 %, peut atteindre 100 %, le couple moteur étant alors réparti équitablement et utilisé en fonction de l'adhérence dont disposent les roues. Le système se met hors service au delà de 60 km/h. Comparé à un système classique de glissement limité, l'ASD est plus rapide et d'utilisation plus souple. C'est un concurrent électronique des différentiels Torsen et Knight.

Le système "4 MATIC", exclusif à Mercedes, est un système de traction intégrale à enclenchement occasionnel, ce qui permet d'éviter l'usure et la dispersion de puissance d'une traction intégrale permanente. Le système, très sophistiqué, est commandé par un système de contrôle entièrement automatisé utilisant l'information fournie par le système ABS: vitesse des roues et courbure de la trajectoire, ainsi que d'autres paramètres tel l'angle de braquage.

FIGURE 9
Système ASD



Automatic locking
differential ASD

Le coeur du système est un différentiel central de type épicycloïdal muni de deux embrayages hydrauliques (figure 6). L'un met en service le train avant, qui reçoit alors 35 % du couple moteur. Le second verrouille le porte-planétaire, répartissant le couple de façon équitable. Le différentiel avant est classique, tandis que l'arrière est muni de l'ASD.

Le système "4 MATIC" dispose de quatre étages de propulsion, engagés successivement selon les besoins décelés par le système de contrôle.

En temps normal, la voiture demeure une propulsion dont le différentiel arrière est libre. En conditions d'adhérence précaire:

- En premier lieu, le train avant est mis en service via le différentiel central épicycloïdal. Il reçoit 35 % du couple moteur.
- En deuxième lieu, le différentiel central est verrouillé par blocage du porte-planétaire. Le couple moteur est réparti équitablement entre l'avant et l'arrière, et utilisé selon l'adhérence respective de chaque train.
- En supplément à ce qui précède, le différentiel arrière est verrouillé.

Les systèmes ASR, ASD et "4 MATIC" sont automatiquement mis hors-circuit dès que les freins sont actionnés, afin de ne pas nuire au fonctionnement du système de

freinage anti-blocage. D'usage récent, ils sont destinés aux voitures de haut de gamme et, par conséquent, très peu accessibles. Cependant, il y a lieu de croire que leur utilisation s'étendra, à l'exemple de l'anti-blocage, aux voitures de série.[⁴³ à ⁴⁷]

4.3 Système de freinage

Au cours des dernières années, les dispositifs de freinage ont évolué au même rythme que les performances des automobiles: ils sont de plus en plus résistants et efficaces. L'usage des freins à disques assistés est maintenant universel. Plus légers, ils sont refroidis plus efficacement. Les garnitures évoluent également dans le même sens. Mais le développement le plus significatif, une percée technologique majeure en passe de révolutionner le concept de sécurité active de l'automobile, concerne le mécanisme de contrôle du système de freinage.

L'anti-blocage de frein permet au conducteur de conserver en tout temps la maîtrise de son véhicule tout en exploitant au maximum sa puissance de freinage. Apparue il y a une dizaine d'années sur certaines Mercedes (système Bosch ABS), l'anti-blocage s'est rapidement répandu, malgré un prix très élevé, aux voitures de haut de gamme. Il s'étend maintenant, avec des systèmes plus économiques, à la gamme moyenne. Son efficacité dans la prévention d'accidents est telle que l'éventualité qu'il soit légalement imposé ne doit pas être écartée, d'autant plus que des systèmes économiques d'un prix de revient de 150 \$ sont annoncés.

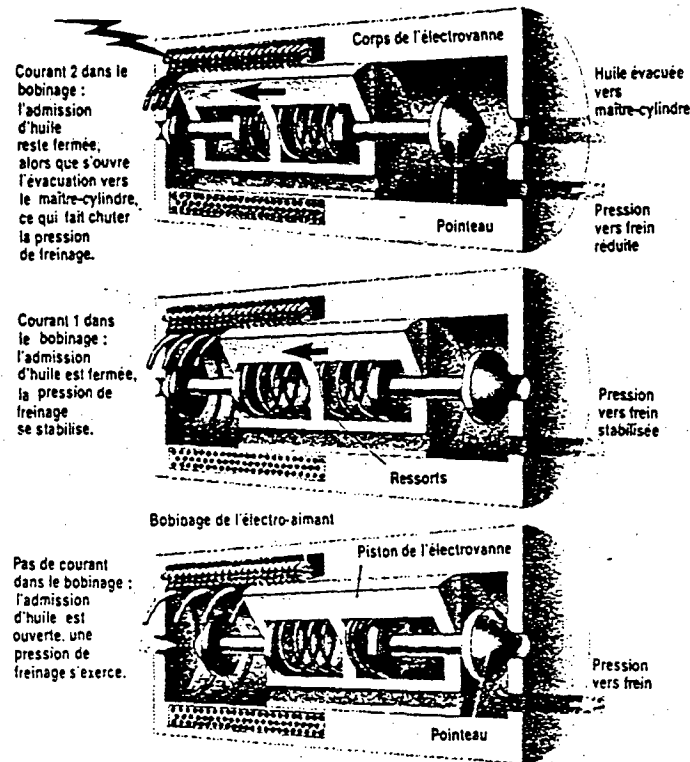
L'anti-blocage est utilisé en aviation depuis 1950. Il s'agissait toutefois de systèmes purement mécaniques offrant une trop grande inertie pour l'automobile. L'électronique a permis de s'affranchir de cette difficulté avec le système Bosch ABS. Depuis Honda, Teves et Bendix offrent des systèmes électroniques de plus en plus sophistiqués.

Les systèmes électroniques fonctionnent selon le principe suivant: un calculateur estime constamment le glissement de chaque roue obtenu en comparant sa vitesse, relevée par un capteur à induction, à celle du véhicule, évaluée dans certains cas par un capteur indépendant. Au freinage, si le glissement atteint une valeur de 15 % à 25 %, indicateur d'un blocage éventuel, une électrovanne (figure 10) stabilise ou même diminue la pression du freinage appliquée à cette roue. Le calculateur réévalue la situation à une fréquence variant selon trois paramètres: la décélération, la vitesse et les conditions d'adhérence.

Les roues avant sont pilotées indépendamment et possèdent leur propre capteur et leur propre électrovanne de régulation. Il n'en est pas de même des roues arrière, où des taux de décélération trop différents pourraient entraîner une dangereuse instabilité directionnelle. Les roues arrière sont donc pilotées par un seul régulateur selon les besoins de la roue exposée à la plus faible adhérence. Dans certains cas exceptionnels, l'anti-blocage privilégie donc la "dirigeabilité" et la stabilité au détriment, très léger, de l'efficacité absolue du freinage.

FIGURE 10

Electrovanne du système ABS

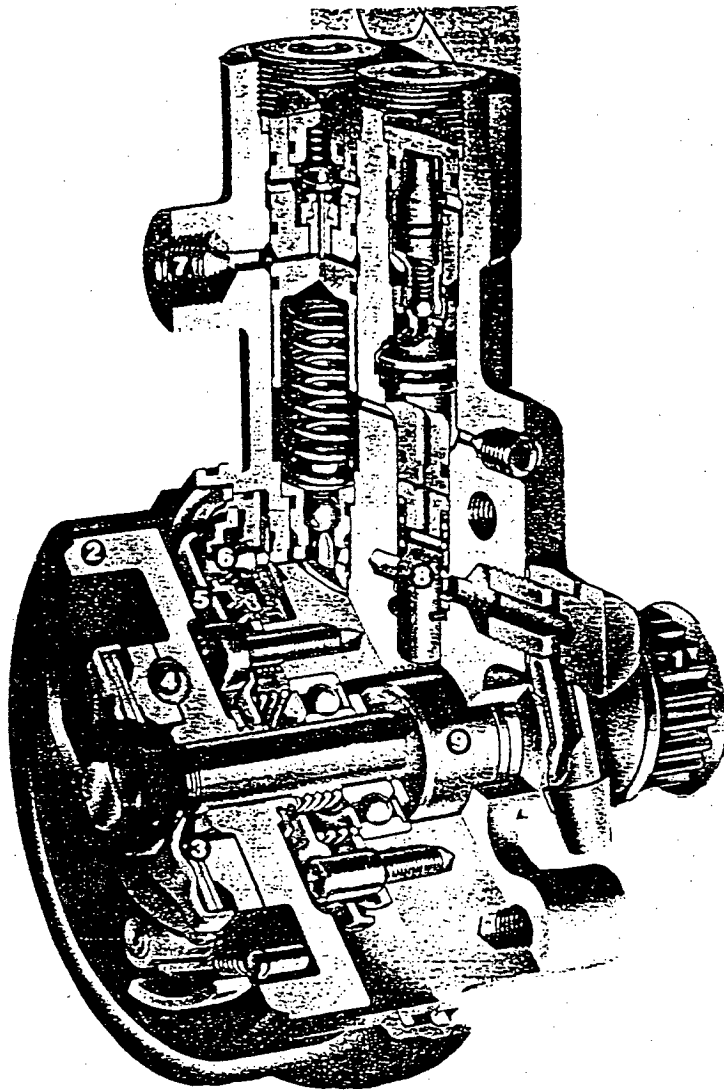


L'anti-blocage se révèle extrêmement efficace. Ne bloquant pas, le coefficient de friction longitudinal des roues, gage d'efficacité du freinage et latéral, gage de "dirigeabilité" et de stabilité, demeure optimal. [49 à 51]

Les systèmes d'anti-blocage électroniques, même produits en grande série, demeurent dispendieux. La compagnie Lucas-Girling a mis au point un système mécanique et hydraulique d'un prix de revient considérablement moins élevé (moins du tiers d'un système électronique), le SCS (Stop Control System). Il est destiné aux tractions avant dotées d'un double circuit de freinage en diagonale. Chaque module (figure 11) installé sur une roue avant contrôle également la roue arrière opposée.

FIGURE 11

Module du système SCS



Operation of the SCS modulator. Toothed pulley (1), belt-driven from front wheel propshaft, normally spins flywheel (2) at 2.8 times roadwheel speed via one-way clutch (3). When roadwheel (and hence shaft pulley) slows abnormally under braking, flywheel overruns driven shaft due to inertia, riding up circular bell ramp (4). This makes it slide axially along shaft, thrusting against lever (5) to open dump valve (6). Valve movement controls hydraulic system that now isolates master cylinder fluid pressure from outlet port (7) to brake caliper, thus releasing roadwheel to roll freely. Shaft speed then increases, and cadence braking for anti-skid sequence occurs as flywheel and roadwheel decelerate in stepped unison, with the dump valve giving the pulse action. Fluid pressure to brake is meanwhile generated by piston pump (8) reciprocated by eccentric cam (9) on flywheel shaft. When normal traction is restored, master cylinder (inlet port not shown) connects directly to brake line, and modulator is bypassed.

Les modules du SCS comportent un volant d'inertie double entraîné par une roue avant via une courroie crantée. En cas de décélération brutale de la roue, révélatrice d'un blocage éventuel, la première partie du volant, solidaire de la roue, décélère avec celle-ci alors que la seconde conserve une vitesse supérieure. Cette différence de mouvement amorce le cycle de dosage du circuit de freinage qui permet d'éviter le blocage de la roue.

Très efficace, ce système fonctionne un peu moins bien sur un revêtement très glissant et inégal du fait que les roues arrière ne sont pas indépendantes. Il occupe également de l'espace sous le capot, ce qui est dans certains cas un obstacle sérieux.[⁴⁹ et ⁵²]

Le SCS, adopté par Ford Europe sur certains modèles de milieu de gamme, pourrait sous peu être concurrencé par un système économique développé par la compagnie britannique Automotive Products. Le dispositif, doté d'un système de contrôle et de capteurs électroniques sur deux ou quatre roues, utilise la dépression d'air générée par le moteur comme source de puissance. Il est disponible en version à deux canaux (roues avant seulement) ou trois canaux (roues avant et train arrière). Il peut équiper des véhicules pesant jusqu'à dix tonnes.[⁵³ et ⁵⁴]

Les systèmes anti-blocage ne peuvent fonctionner adéquatement que lorsque les roues ou les trains sont libres au freinage. Cette condition est satisfaite par les différentiels mécaniques, à l'exception des visco-coupleurs, s'ils ne sont pas munis de dispositifs de glissement limité ou de visco-coupleurs accessoires. Dans ce cas, ils doivent également être équipés de dispositifs débrayeurs actionnés par les freins.

4.4 Système de direction

Les systèmes de direction, un peu comme les systèmes de freinage, semblent sur le point de connaître une évolution majeure à cause de l'avènement des quatre roues directrices. Contrairement aux systèmes anti-blocage dont les énormes avantages sont maintenant reconnus, il est encore trop tôt pour évaluer de façon précise les qualités réelles et le succès éventuel de ce concept. Les manufacturiers européens, américains et surtout japonais semblent y consacrer beaucoup d'intérêt et, dans certains cas, des ressources importantes. Les premiers rapports d'essais indépendants effectués sur les modèles disponibles sont généralement très positifs.

Le système élimine la dérive des roues arrière lors de virages ou de manoeuvres effectués à haute vitesse, donc améliore la stabilité directionnelle. De plus, une voiture engagée dans un virage accentué a tendance à écraser ses suspensions extérieures. Soumises à des contraintes sévères, celles-ci peuvent se déformer de telle façon que les roues arrière prennent un léger angle de braquage inopportun, préjudiciable à la précision de la trajectoire. De nombreux constructeurs combattent ce phénomène par le design mécanique des suspensions. Certains arrivent même à guider convenablement les roues arrière; Mercedes est une référence en la matière. Les quatre roues directrices constituent une autre solution, plus flexible et économiquement accessible.

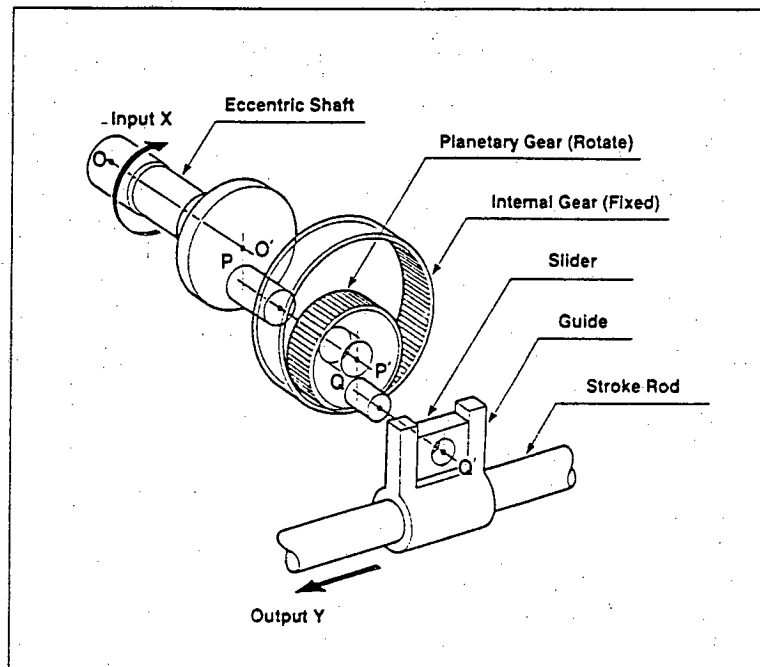
À basse vitesse, le braquage en phase des roues arrière n'offre pas d'intérêt. Il est alors possible de le remplacer par un contrebraquage destiné à augmenter la maniabilité à basse vitesse.

Les constructeurs japonais Honda et Mazda ont choisi cette voie et présentent deux systèmes concurrents. Honda propose un système entièrement mécanique, dont le boîtier arrière comporte une couronne et un excentrique (figure 12). Les roues arrière, commandées depuis le volant, braquent d'abord dans le sens des roues avant jusqu'à un maximum de $1,5^{\circ}$. Lorsque l'angle des roues avant devient plus important, ce qui correspond en principe à des manoeuvres à basse vitesse, les roues arrière contrebraquent progressivement jusqu'à un maximum de $5,3^{\circ}$.

Mazda a pour sa part développé un système de contrôle électronique déterminant l'angle de braquage ou de contrebraquage des roues arrière en fonction de la vitesse du véhicule et de l'angle des roues avant. Le système de commande de Mazda est hydraulique (figure 13). En cas de défaillance du système, les roues arrière reprennent automatiquement un angle neutre. Au dire du constructeur Mazda, les vitesses de manoeuvres tels les changements de voie sur autoroute peuvent être augmentées de 40 % à 50 % par rapport aux systèmes à deux roues directrices. De même, la maniabilité à basse vitesse est augmentée de plus de 20 %.

Plusieurs constructeurs, notamment Nissan et Mitsubishi, sont sur le point d'introduire des systèmes à quatre roues directrices. D'autres, comme Mercedes, General Motors et Peugeot, évaluent actuellement le système et pourraient l'offrir sous peu sur certains de leurs modèles. [55 à 59]

FIGURE 12
Mécanisme du système Honda



By two cranks and planetary gear unit, Honda 4WS steers the rear wheels in the same direction as the front wheels' with smaller steering lock, and in the opposite direction with larger lock.

4.5 Système de suspension

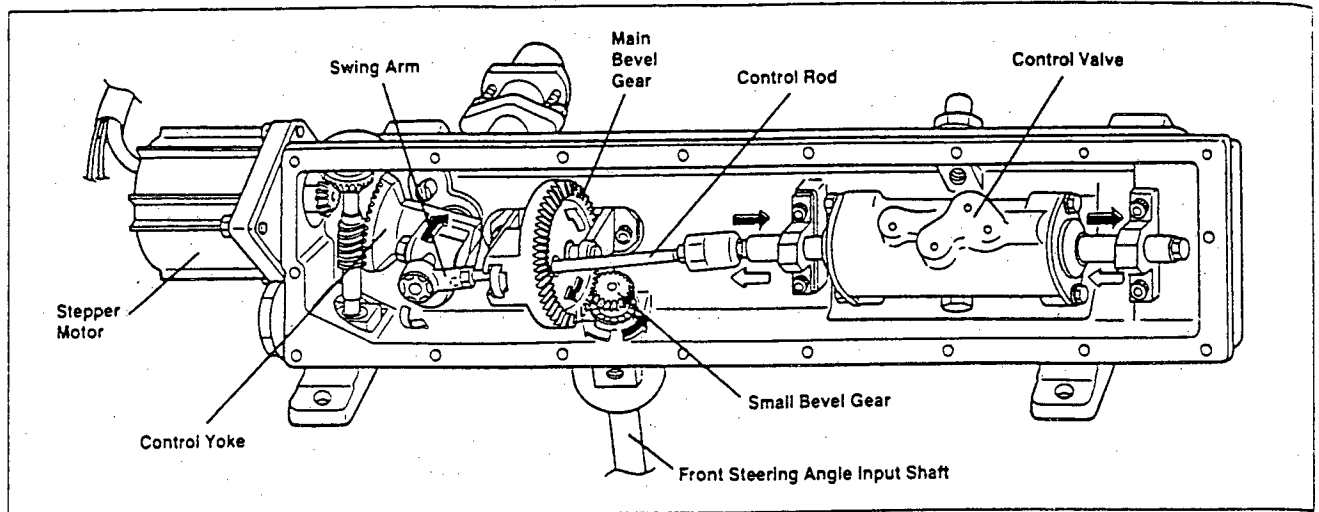
Le rôle primordial d'un système de suspension est d'assurer un contact continu et ferme des roues avec le sol. La qualité de ce contact détermine en définitive l'efficacité des systèmes de transmission (motricité) de freinage et de direction, donc les qualités routières du véhicule. La suspension doit également permettre aux passagers du véhicule de disposer du meilleur confort possible. Ces deux facettes ne sont pas toujours compatibles. À faible vitesse et sur un mauvais revêtement, le confort commande un amortissement mou. À haute vitesse et sur une route plane, la qualité de la tenue de route dépendra de la fermeté de la suspension et du guidage des roues, particulièrement à l'arrière.

Le combiné classique ressort et amortisseur n'est donc qu'un compromis entre le comportement routier, élément de sécurité, et le confort des passagers.

4.5.1 Amortisseurs variables

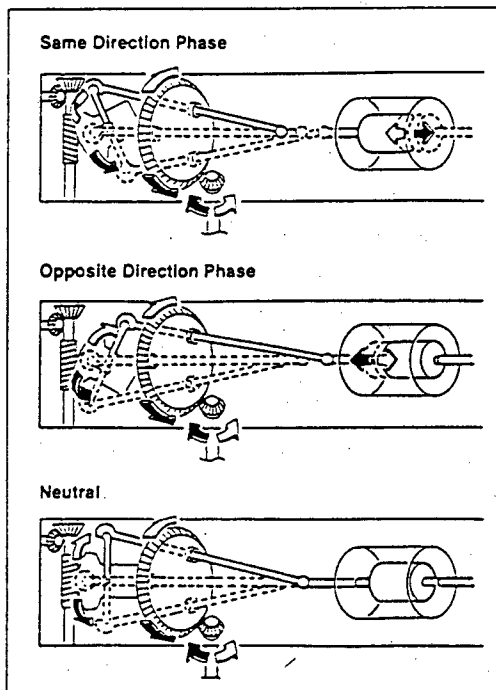
Certains constructeurs, notamment japonais, proposent maintenant un choix entre un réglage d'amortisseur souple, favorisant davantage le confort, et un réglage ferme, destiné à la conduite rapide ou "sportive". Le conducteur sélectionne une position de contrôle qui commande la soupape d'une dérivation logée dans l'amortisseur. La soupape ouverte, la circulation de l'huile n'est pas contrainte et l'amortisseur est mou. La soupape fermée, la dérivation est étranglée et l'amortisseur est considérablement durci.

FIGURE 13
Mécanisme du système Mazda



Mazda's four-wheel steering system is electronically controlled and hydraulically operated.

Opposite direction phase (vehicle speed under 35 km/h): Control yoke is canted at angle by stepper motor. In right turn situation, small bevel gear is rotated in X direction by steering angle transmission shaft from front wheel steering unit. Small bevel gear rotates main bevel gear. Rotation of main bevel gear causes control rod to move toward control valve. Input rod of control valve is pushed to right, by movement of the control rod which is determined by disposition of the swing arm, and rear wheels are steered to the left.

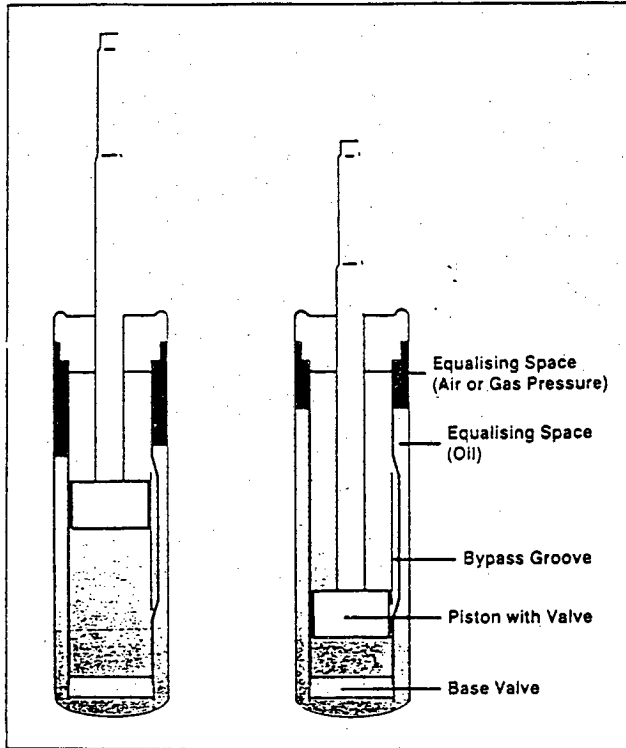


L'inconvénient de ce système est d'agir sur tous les amortisseurs à la fois. Il lui est impossible de ne réagir que sur certains d'entre eux au moment opportun, par exemple de ne durcir que les amortisseurs extérieurs lors d'un virage accentué ou d'assouplir l'amortisseur dont la roue heurte un cahot.

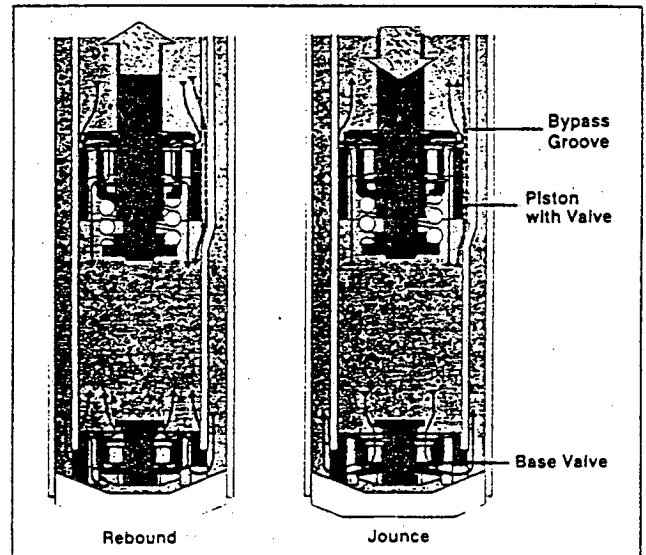
Certains fabricants d'amortisseurs, dont Fichtel et Sachs d'Allemagne, ont mis au point des amortisseurs variables en fonction du degré d'amortissement requis. Ces amortisseurs fonctionnent indépendamment, sans faire appel à aucun artifice de contrôle. Ils reprennent le principe de la dérivation d'huile, mais celle-ci est uniquement commandée par le mouvement du piston (figure 14). La dérivation ouverte, en début de course, facilite le passage de l'huile d'un compartiment à l'autre; l'amortisseur est souple. Soumis à une plus forte charge, le piston, en s'enfonçant dans l'amortisseur, masque la sortie de la dérivation; l'huile ne circule plus que par les soupapes intégrées au piston; l'amortissement se durcit. Ce système, valable pour l'automobile, est intéressant pour les camions en raison des grandes différences de charge auxquelles ils sont soumis.

Le fabricant allemand d'équipements Boge a repris le concept de la dérivation à soupape contrôlée, mais l'a raffiné par l'utilisation de deux soupapes de calibres différents dont les combinaisons permettent d'adopter quatre types d'amortissement différents, du plus souple (toutes soupapes ouvertes) au plus ferme.

FIGURE 14
Amortisseurs variables



Simplified drawing shows principle of Sachs Vario shock absorber. Shallow bypass groove recessed in central portion of inner tube diverts some fluid past piston under light vehicle loading (left), thus reducing damping action. With increased loading or severe bump thrust piston moves past groove into lower tube area for full damping (right).



When vehicle is lightly loaded, bypass groove permits an additional flow of oil past piston on both jounce and rebound for reduced damping. Piston and base valves work normally in this operating mode, but are under increased pressure when piston travels into end zones of tube.

Les amortisseurs Boge sont pilotés indépendamment les uns des autres par un calculateur fonctionnant en temps réel, en fait un véritable système de contrôle actif. Le calculateur s'appuie sur l'information fournie par une multitude de capteurs. Roulis, cabrage, charge du véhicule, fréquence des sollicitations, course de débattement et accélérations verticales sont relevés par une jauge de contrainte reliée à l'amortisseur. D'autres paramètres doivent être connus: température et fluidité de l'huile d'amortissement, vitesse réelle du véhicule (tube de pitot), rayon des virages (capteurs d'anti-blocage), entre autres.

Le système Boge, encore expérimental, possède un temps de réaction de l'ordre de 12 millisecondes. Son prix estimé est de 3 000 \$. Il est comparable à celui d'un ABS de haut de gamme mais possède un inconvénient majeur: l'amortisseur à assistance électronique demeure une pièce d'usure qu'il faut remplacer périodiquement. [60 à 62]

4.5.2 Suspension active

La suspension électronique active constitue un système beaucoup plus sophistiqué, où les combinés ressorts et amortisseurs de chaque roue sont remplacés par des vérins hydrauliques. Pilotés indépendamment par un ordinateur de contrôle fonctionnant en temps réel, ces vérins réagissent en fonction des inégalités du sol ou des transferts de masse rencontrés avec l'amplitude de mouvement et la vitesse requise, sans transmettre aucune secousse à la carrosserie.

Pour ce faire, le véhicule dispose d'un système hydraulique à circulation continue, assuré par une pompe hydraulique. Le système de contrôle pilote la suspension, via un ensemble de soupapes hydrauliques, en intégrant l'information fournie par un réseau de capteurs et d'accéléromètres disposés sur les vérins.

La suspension électronique active permet de maintenir un contact permanent des pneus avec le sol sans les rebonds et le temps de réaction dus à l'inertie des systèmes mécaniques. L'assiette et la garde au sol peuvent être maintenues optimales, quel que soit l'état de la route, avec une stabilité absolue. Il est également possible de faire adopter des configurations particulières au véhicule. Ainsi, une voiture peut être programmée pour s'incliner vers l'intérieur d'un virage serré pour compenser la force centrifuge.

Un véhicule ainsi équipé acquiert une tenue de route et un confort exceptionnels. La sécurité active est considérablement augmentée. Un tel système, assez complexe sur le plan mécanique, ne pourra être destiné, lorsqu'il sera opérationnel, qu'aux véhicules de haut de gamme. Même fabriqué en grande série, ce système hydraulique sophistiqué, du type de ceux utilisés en aéronautique, ne sera jamais économique.

Ce concept de suspension active a été développé par Lotus Cars, firme britannique, filiale de General Motors. Volvo en a équipé certains prototypes mais ne compte pas le commercialiser pour l'instant. D'autres systèmes, moins sophistiqués mais potentiellement efficaces sont également étudiés, notamment par les fabricants japonais.

Les suspensions actives sont définitivement un concept d'avenir. Au cours des prochaines années, il est probable que de nombreux systèmes hybrides, moins sophistiqués, feront leur apparition. Ils ouvriront la voie aux systèmes complètement actifs qui transformeront le comportement de la voiture de demain.[63 à 65]

4.6 Intégration des cinq systèmes de commande

Au niveau descriptif, les différents systèmes de commande d'un véhicule automobile peuvent aisément être considérés indépendamment les uns des autres. Ils sont en effet constitués de pièces et de sous-ensembles mécaniques distincts; une crémaillère de direction n'a pas, a priori, beaucoup de points communs avec un différentiel ou un frein à disque par exemple.

Sur le plan fonctionnel, cette indépendance disparaît complètement. Le rôle des systèmes de commande est complémentaire et leur fonctionnement, indissociable. Ainsi, les systèmes de motricité, de freinage et de direction ne fonctionnent bien que dans la mesure où le système de suspension assure un bon contact des roues avec le sol.

La nouvelle génération des systèmes de commande fait de plus en plus appel aux systèmes de contrôle informatisés. Ces systèmes sont constitués de calculateurs intégrant les paramètres requis pour le fonctionnement optimal de l'ensemble. Nombre d'entre eux sont relevés par des capteurs ou des accéléromètres. Cette situation crée une nouvelle sorte de dépendance, d'intégration, des systèmes de contrôle. Cette fois, ils utilisent la même information dans beaucoup de cas.

Cette intégration des systèmes de commande est déjà amorcée. L'information relevée par les capteurs ou générée par les calculateurs du système Bosch ABS est utilisée par les systèmes de contrôle actif de traction Bosch ASR, ASD et "4 MATIC". Ce dernier dispositif, disponible chez Mercedes, constitue l'exemple le plus significatif d'intégration de systèmes de contrôle (voir paragraphe 4.2.2).

À court terme, cette intégration se poursuivra. Peu à peu, elle englobera les systèmes de contrôle des suspensions actives, de la direction aux quatre roues et de la transmission (démultiplication).

4.6.1 Situation actuelle

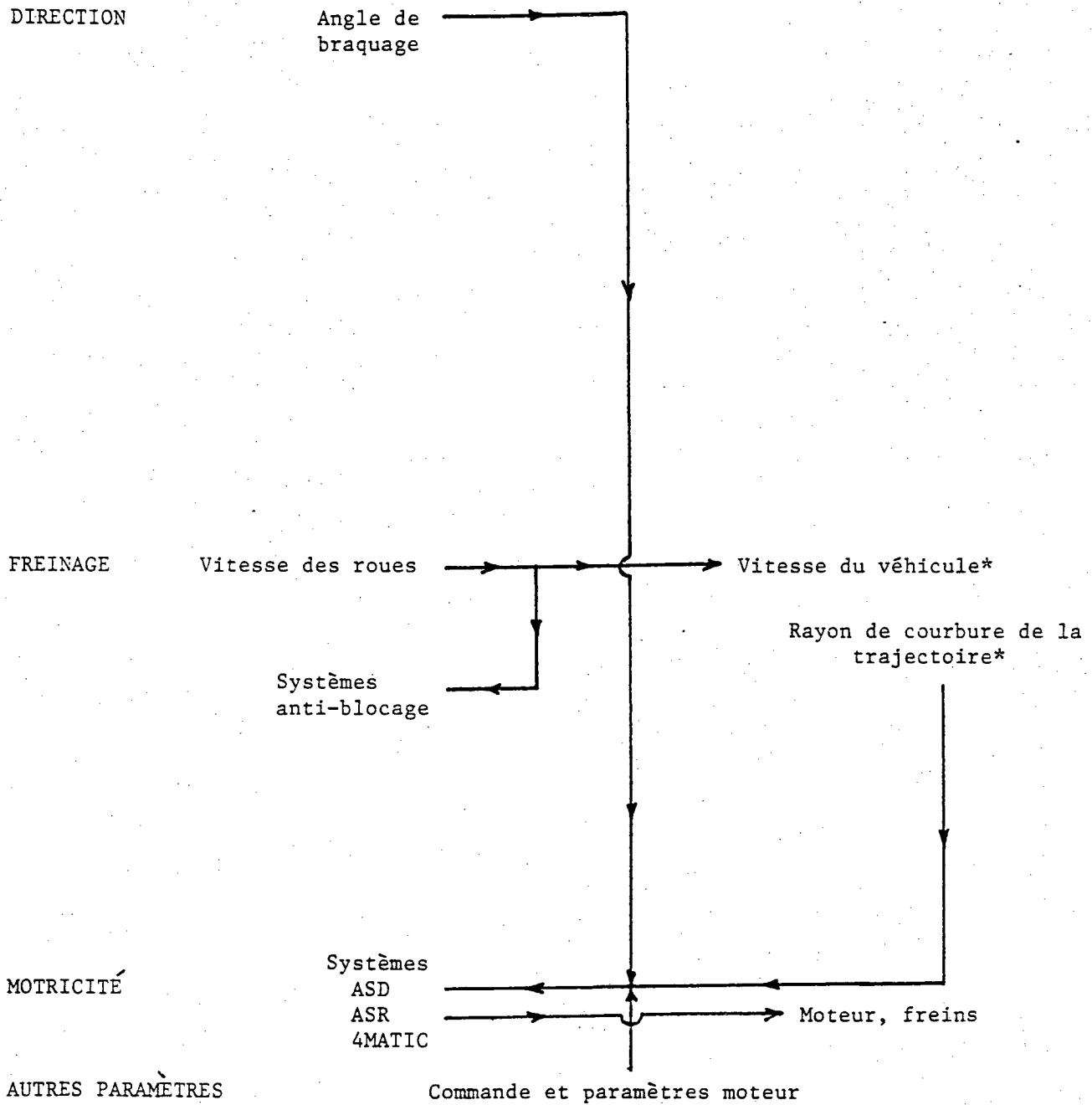
La figure 15 indique les relations existant entre un système de freinage anti-blocage et un système de contrôle de la traction. Les échanges d'informations sont également indiqués.

4.6.2 Situation prévue

Suspension:

L'apparition plus ou moins sophistiqués des systèmes de suspension active ou semi-active multipliera la quantité de paramètres à traiter. Ces systèmes consomment de grandes quantités d'information. Certains paramètres sont générés par des jauges d'amortisseurs ou de vérins: roulis, cabrage, charge du véhicule, fréquence des sollicitations, course de débattement, accélérations verticales. D'autres doivent être obtenus de sources différentes: températures d'huile, vitesse réelle (tube de pitot), accélérations horizontales, angle du volant, sollicitation des freins.

FIGURE 15
Relation existant entre un système de freinage
anti-blocage et un système de contrôle de la traction



*Évalués à l'aide des capteurs du système anti-blocage.

Direction

L'angle de braquage des roues arrière est déterminé en fonction de paramètres tels que l'angle de braquage du volant, la vitesse du véhicule et le rayon de courbure réel.

Transmission (démultiplication)

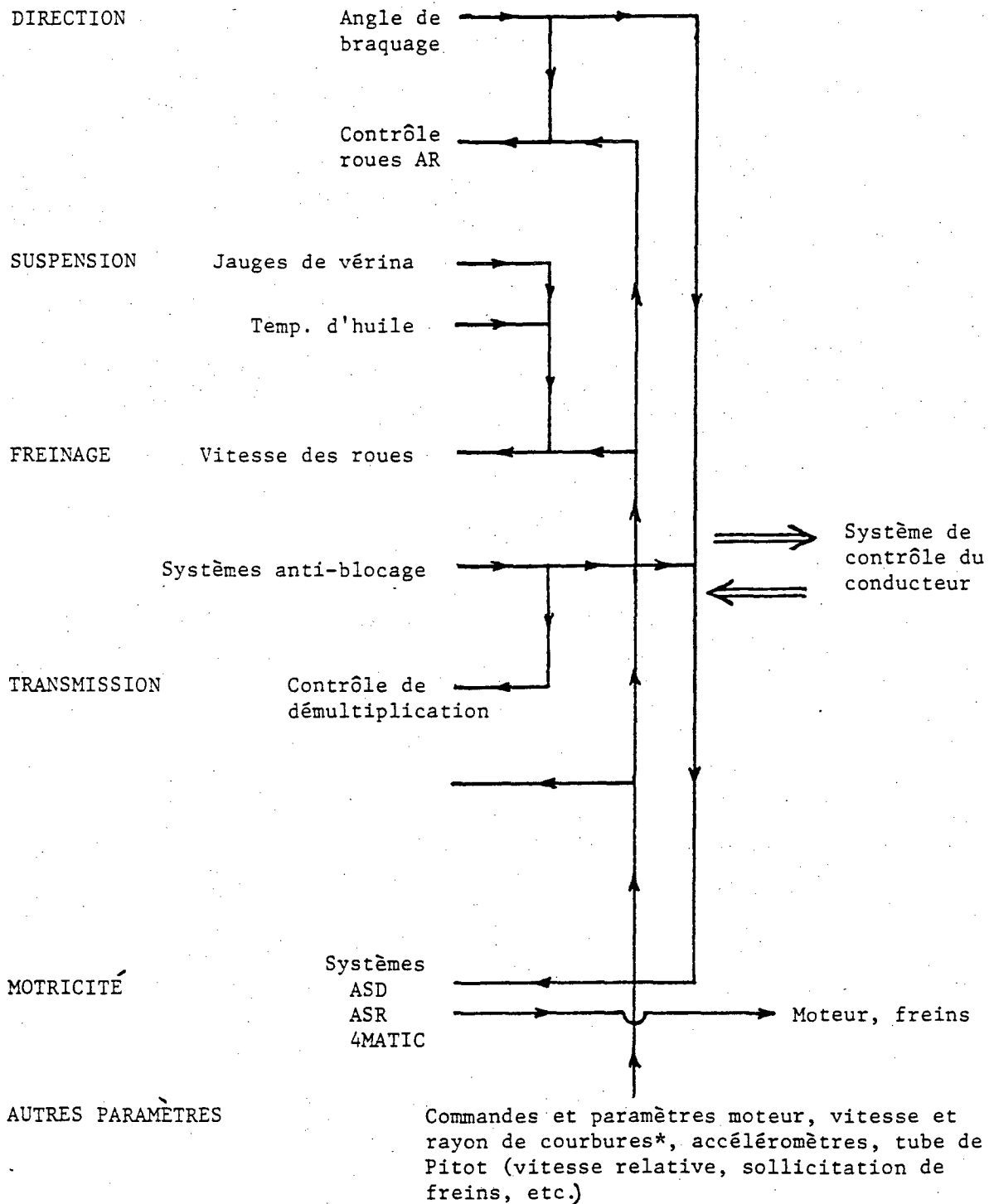
Le système de contrôle de la démultiplication utilisera les paramètres disponibles au réseau central.

Système d'assistance au conducteur

Les paramètres et informations disponibles au réseau central alimenteront divers dispositifs d'aide et d'information au conducteur: ordinateur de bord, système de guidage, de diagnostic de pannes.

La figure 16 schématise l'intégration future des systèmes de commande.

FIGURE 16
Intégration future des systèmes de commande



*Évalués à l'aide des capteurs du système anti-blocage.

5. LES MATÉRIAUX NOUVEAUX DANS L'AUTOMOBILE ET LES SYSTÈMES DE COMMANDE

5.1 Vue d'ensemble

Au point de vue des matériaux, nous distinguerons trois classes: les métaux, les plastiques et les céramiques. Les matériaux composites seront classés dans les métaux, plastiques ou céramiques, d'après la nature prépondérante de la matrice. Il est indéniable que dans les matériaux nouveaux la place des matériaux composites est prépondérante. Toutefois, compte tenu de la très grande diversité de ces matériaux composites et des limites floues entre les trois classes traditionnelles et ces matériaux composites, nous avons choisi de ne pas la traiter comme une classe à part.

Dans les systèmes de commande, tels que définis au préalable, le premier principe à retenir est le respect des normes de sécurité, c'est-à-dire que ces systèmes doivent avoir une fiabilité presque absolue. Les autres principales tendances qui vont influencer le choix des matériaux, compte tenu que ces systèmes ont un très grand nombre de pièces différentes, sont:

- la simplification des systèmes suivant la conception de plus en plus modulaire des véhicules;
- la poussée de la robotisation et de l'automatisation des tâches d'assemblage;

- l'analyse fonctionnelle de tous les sous-ensembles;
- la répartition des tâches conduisant à une hiérarchisation dans les rôles, où le fabricant d'automobile deviendra de plus en plus un assembleur de sous-systèmes.

En ce qui a trait aux matériaux, la première attitude a été de s'en tenir à ce qui fonctionne, et de simplifier les modes de fabrication en vue d'une réduction des pièces à assembler. Il faut se rappeler que 51 millions de tonnes de matériaux sont requis pour les quelque 40 millions de nouveaux véhicules routiers assemblés chaque année et autant de tonnes pour fabriquer les pièces de rechange vendues chaque année. Cette attitude conservatrice est mise en brèche grâce aux possibilités offertes par les nouveaux matériaux.

5.2 Les plastiques

Aujourd'hui, la gamme des matières plastiques utilisées dans l'automobile est très large. Les plus connus sont des plastiques à base de polyuréthanes: le polypropylène et le polychlorure de vinyl, les polyesters renforcés de fibres de verres, les nylons, les polystyrènes et les résines époxydes. En ce qui concerne les fibres, les fibres de verre constituent le seul matériau utilisé à grande échelle.

Pour les matériaux plastiques avancés, on envisage de tirer profit des fibres de Kevlar ou des fibres de carbone, en utilisant des composites hybrides comportant deux agents de renforcement (verre-Kevlar ou verre-carbone). Les récents progrès dans les procédés de mise en forme nous permettent de

miser sur l'avenir des matériaux plastiques avancés: le moulage par injection et réaction (Reaction Injection Molding ou RIM) des plastiques renforcés, permettant de fabriquer des matériaux isotropes, et la production de laminées, matériaux sandwichs dans lesquels une feuille en plastique est comprimée entre deux panneaux d'acier ou d'aluminium (voir paragraphe 5.3).

Malgré la position des métaux dans le secteur des carrosseries (voir plus loin), la pénétration des matériaux polymériques va se poursuivre inexorablement.

La possibilité de remplacer plusieurs pièces assemblées, en métal, par un seul élément en plastique constitue un avantage clé.

Les désavantages souvent cités demeurent les cadences de production souvent moindres, les propriétés de surface et la finition avec des peintures cuites à 200° C, la disponibilité et le coût des matières premières.

Mais l'enjeu réel, c'est la concurrence entre matériaux polymériques. Les résines polyuréthanes moulées par réaction (RIM) subissent l'assaut des résines produites par compression-transfert (Resin Transfert Molding ou RTM), par moulage et par impression de pré-imprégnés. Ces matériaux permettent de faciliter et d'améliorer les finitions de surface (peinture). À l'horizon de l'an 2 000, il faut prévoir le remplacement des polyuréthanes par des polyuréées ou un mélange des deux. Les polyépoxydes seront aussi dans la course.

Chose assurée, les fabricants d'automobile feront de plus en plus appel aux services des grands manufacturiers de polymères pour résoudre leurs problèmes de conception. Ils leur donneront carte blanche pour rentabiliser la fabrication, mais demeureront vigilants pour les performances escomptées et les critères d'acceptation entourant la livraison. Devant ce constat, le nombre de fournisseurs de pièces va chuter, le nombre de pièces différentes aussi. On s'orientera vers la production de sous-systèmes complets, avec des fournisseurs spécialisés qui satisferont l'ensemble de l'industrie et qui pourront fournir de plus grandes quantités, ce qui justifiera les investissements requis pour des équipements adaptés.

Dans ce contexte, de nombreuses applications "tout plastique" sont dès lors à prévoir pour les systèmes de commande: petits engrenages, roues de poulie, bagues d'étanchéité, corps de pompe, arbres de distribution secondaires, butoirs, supports de tringlerie, en plastique à base de résines phénoliques de polysulfure de phénylène (PPS), de polytéréphtalate d'éthylène (PETP) et autres polyesters saturés. Pour les tubulures des systèmes d'alimentation d'essence, on s'achemine vers l'utilisation de nylons renforcés de polymères fluorés qui augmenteront la résistance au feu. On utilisera, pour les joints d'étanchéité et les bagues dans les systèmes de transmission, des polymères renforcés à base de polyamide-imide (PAI) avec fibres de carbone. Ces matériaux pourraient servir dans la fabrication des rotors pour turbo-compresseurs, en concurrence directe avec les céramiques Si_3N_4 et SiC .

Pour les systèmes de transmission de puissance, Ford a déjà mis au point un convertisseur de couple de puissance en résine phénolique renforcée de fibres de verre. D'ici cinq ans, on

prévoit mettre en concurrence des arbres de transmission en matériaux composites à matrice polymérique, avec renforcements tressés, avec les composites à matrices métalliques (MMC) produits par Alanx et d'autres.

5.3 Les métaux

5.3.1 Les aciers

Les aciers vont maintenir leur position prépondérante dans l'automobile, mais on verra cette position s'éroder en ce qui a trait au pourcentage de leur poids et, dans une moindre mesure, au pourcentage de leur valeur en dollars. On continuera à utiliser des aciers améliorés en plus grande proportion au détriment des aciers ordinaires. Autrement dit, le premier concurrent des aciers actuels sera l'acier lui-même.

Pour les carrosseries, il faut savoir que, compte tenu des engagements pris par les fabricants d'automobiles vis-à-vis des sidérurgistes (au moins en Amérique du Nord), la part du marché des aciers galvanisés va demeurer stable pour au moins les cinq prochaines années. (Telle était la condition pour que les sidérurgistes investissent dans la mise sur pied de nouvelles lignes de galvanisation). De toute façon, l'équipement nécessaire pour produire des panneaux de grandes dimensions en matériaux polymériques n'est pas encore disponible. Personne n'a osé nous confirmer que ces équipements seraient disponibles d'ici cinq ans, ce qui reporte à beaucoup plus tard l'application des plastiques en quantité massive.

Pendant ce temps, les sidérurgistes continuent à développer des aciers galvanisés avec des propriétés accrues en formabilité, soudabilité et apparence de surface. Ils ont mis au point les aciers sans résiduels (IF pour Interstitial Free), les aciers très bas et ultra-bas carbone (ELC et ULC pour Extra Low et Ultra-Low Carbon). Ils ont proposé de nouveaux revêtements de galvanisation avec des revêtements de zinc-fer et de zinc-nickel, et des revêtements organiques de surface qui produisent de véritables composites laminés. Ce n'est là qu'un début. Le véritable composite acier-plastique pour les grandes surfaces semble promis à un bel avenir, dans dix ans et plus. C'est une façon pour les aciéristes de protéger une part de leur marché et aux fabricants de polymères de progresser. C'est un dossier à suivre, car il implique déjà des engagements pour les entreprises dans les deux secteurs.

Pour les pièces structurales, les aciers microalliés (HSLA) vont être de plus en plus en demande. En fait, depuis dix ans, l'utilisation accrue des HSLA est la chose la plus importante qui soit arrivée en matière de matériaux automobiles de grande consommation. Il faut réaliser que ce sont les nouveaux aciers qui ont déplacé les aciers ordinaires plus que tout autre matériau!

Les aciers HSLA sont de 20 % à 400 % plus résistants que les aciers au carbone ordinaires. Dans les systèmes de commande que nous avons étudiés, la place des aciers va demeurer prépondérante dans les engrenages,

les pignons, l'arbre de torsion, le visco-coupleur (nouvelle technologie), les différentiels (planétaire traditionnel ou de Torsen nouvelle technologie), les tringleries et la timonerie.

Étant donné leurs propriétés supérieures, les aciers microalliés ont remplacé les aciers ordinaires, ce qui a conduit à des gains de poids appréciables, mais a entraîné des coûts plus élevés.

Les pressions économiques sur les matériaux dans l'industrie automobile demeurent très fortes. Le coût moyen des matériaux dans une automobile de grande série est de trois à quatre dollars le kilo! Cela laisse une marge bénéficiaire très faible pour tout matériau avancé.

5.3.2 Les aluminiums

L'utilisation de l'aluminium dans l'automobile reste liée à des questions techniques, mais aussi à des préoccupations économiques et politiques. L'essentiel demeure selon nous la marge de profit accordée aux fabricants. Il y a de part et d'autre des hésitations à s'engager dans la conception d'une voiture privilégiant davantage l'aluminium.

L'avenir semble beaucoup plus favorable à l'aluminium fondu et moulé qu'aux tôles en aluminium. Il est indéniable qu'il y a toujours des essais de pénétration en cours dans le secteur de la carrosserie, certains étant couronnés de succès surtout quand l'allègement du

véhicule doit, à la dernière minute, être privilégié. Mais les solutions à long terme tardent à venir. Les meilleures perspectives d'utilisation pour l'aluminium demeurent pour les radiateurs, les roues (toujours en concurrence avec le magnésium), les pare-chocs (en forte concurrence avec les plastiques et composites) et les culasses.

Dans les systèmes de commande, l'utilisation de l'aluminium pourrait croître dans les organes de transmission: corps de pompe et support central.

L'avenir semble toutefois plus prometteur avec la nouvelle gamme de produits Alanx, basée sur la technologie brevetée de Lanxide Corporation. Il s'agit de nouveaux matériaux composites à matrice métallique (MMC) d'alliages d'aluminium renforcés de particules avec ou sans fibres d'alumine, qui devraient permettre de simplifier la réalisation de pièces comme le vilebrequin. À côté de cette catégorie de MMC, il y a aussi les composites d'aluminium renforcés de carbures de silicium (SiC). Ces composites, que l'on prévoit utiliser très bientôt dans l'aéronautique, pourrait éventuellement l'être dans l'automobile si les coûts de production des fibres courtes de SiC peuvent être diminués. Dans ce contexte, il faudra suivre les progrès de la nouvelle filiale d'Alcan, à Jonquière, la compagnie C-Axis Technology détentrice d'un brevet de fabrication de SiC.

L'avenir de l'aluminium est toujours tributaire de la concurrence exercée par les autres métaux non ferreux, comme le magnésium et le titane, et du retour possible des aciers nouveaux pour des raisons de coûts principalement.

5.3.3 Les magnésiums

La pénétration des alliages de magnésium dans l'industrie automobile ne pourra se poursuivre que si l'industrie du magnésium maintient une forte pression pour commercialiser ses propres produits. Les marchés les plus accessibles seront pour les pièces d'aménagement intérieur et les pièces de finition à l'extérieur (pied de rétroviseur et support de miroir). La concurrence viendra des plastiques.

Dans les systèmes de commande, on a déjà expérimenté des pièces en magnésium dans les colonnes de direction, compte tenu du rapport résistance et poids.

Par ailleurs, les roues en magnésium (alliage du type QH21A-T6) demeurent un marché potentiel, mais la concurrence des matériaux traditionnels (aciers HSLA microalliés et alliages d'aluminium du type A-356) et des matériaux composites est réelle. Les matériaux plastiques renforcés de fibres de verre sont aussi à considérer même si, au niveau des exigences limites, leur résistance en fatigue rotative et radiale restent à améliorer.

5.3.4 Le titane

Dans les systèmes de commande, les alliages de titane pourront être utilisés pour les ressorts d'amortisseurs à cause de leur haute résistance à la traction et de leur faible module d'élasticité. Les amortisseurs en titane seraient de 50 % plus légers que ceux en acier. Le facteur coût et l'aspect fiabilité -- la résistance en fatigue n'a pas été démontrée -- demeurent des obstacles à surmonter.

5.4 Les céramiques

Les matériaux céramiques, dont les matériaux monolithiques denses, les composites céramiques-céramiques, les composites céramiques à matrice métallique et les composites céramiques-métaux (revêtement céramique sur métal), constituent la dernière classe de matériaux que nous avons considérée, la plus intrigante à cause de sa nouveauté dans l'industrie automobile. Nous avons montré dans une étude en 1988^[13] l'importance de ces matériaux dans la partie moteur, et proposé que le scénario le plus probable correspondrait à une lente pénétration, passant d'un demi-kilo à deux kilos et demi par moteur d'ici l'an 2000.

En adoptant une démarche toute différente, nous avons cherché dans la présente étude à analyser le rôle potentiel des matériaux céramiques dans les systèmes de commande.

La concurrence que se feront les métaux et les plastiques dans le système de commande est un phénomène largement connu. Compte tenu de l'évolution de la technologie dans l'assemblage des voitures et de l'évolution même des systèmes de commande, il y aurait place pour la pénétration de matériaux céramiques. Pour assurer en effet l'intégration des fonctions du système de commande d'un véhicule, tel que nous l'avons délimité avec ces cinq sous-ensembles, on devra faire un usage grandissant de senseurs et d'actuateurs (ou capteurs de mesures). Les céramiques sont une des rares catégories de pièces dans l'automobile dont le nombre va croître de façon importante. Ces pièces sont et seront de faibles poids mais de très grande plus-value, d'où le choix des matériaux céramiques dits fonctionnels.

On peut classer ces matériaux céramiques fonctionnels en céramiques isolantes, diélectriques, piézo-électriques et conductrices ioniques, magnétiques, opto-électroniques et semi-conductrices (NTC et PTC).

Les céramiques isolantes sont ordinairement en alumine (Al_2O_3) et sont employées dans l'automobile pour les bougies, les substrats de microcircuits hybrides et les substrats isolants pour le circuit de démarrage. Parmi les matériaux céramiques compétitifs, il faut citer le nitrure d'aluminium (AlN).

Les céramiques diélectriques sont utilisées principalement comme condensateurs. Le titanate de baryum (BaTiO_3) est le matériau type pour la fabrication de ces éléments. Comme il est nécessaire de disposer de matériaux diélectriques améliorés et supérieurs pour se conformer à des besoins complexes, de nombreuses formulations nouvelles sont en cours de

développement: des titanates de baryum et de strontium avec ou sans zirconates de calcium, des fondants argileux avec ou sans silicieux, ceriques et terres rares. On retrouve déjà des composants en titanate de baryum dans l'automobile pour les condensateurs et les circuits de démarrage.

Les céramiques piézo-électriques sont des matériaux capables d'assurer l'interconversion des énergies électriques et mécaniques. Ces céramiques appartiennent à la famille de pérovskites (titanate de baryum, titanates et zirconates de plomb). Le matériau le plus utilisé présentement est celui à base de zirconate et de titanate de plomb (PZT), que l'on retrouve dans les détecteurs de détonation, les capteurs de vibration, les détecteurs de marche arrière, les senseurs de proximité et les injecteurs. Il y a aussi de nombreuses autres compositions, notamment des PLZT, des PZT modifiés ou dopés avec de l'oxyde de lanthane. Les PLTZ sont les premiers matériaux ferro-électriques transparents à avoir été fabriqués. (Les recherches ont eu lieu entre 1969 et 1975 et ont conduit aux céramiques électro-optiques, dont la commercialisation s'est faite en 1979). Bien sûr, de nombreuses variations ont été proposées pour doper les PZT avec des oxydes de baryum et des oxydes d'étain du genre $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$, avec des additifs de Nb, Sb, Bi, Fe, Cr, Ta, Co, Mn, avec des (Pb, Sr) $(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ et avec des $\text{Pb}(\text{Mg},\text{Nb})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$.

Connues depuis plusieurs décennies, les céramiques magnétiques peuvent être divisées en ferrites dures (aimants permanents), dont le matériau type est l'hexaferrite de baryum ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), et en ferrites douces, dont le matériau type est le matériau spinel $(\text{MnZn})\text{FeO}_4$. Ces matériaux, très utilisés dans l'automobile, servent dans les noyaux des nombreux petits moteurs électriques dans un véhicule. En fait, on utilise

déjà au-delà de 50 petits aimants durs dans une voiture nord-américaine (actuateur pour monter et descendre les vitres, orienter les rétroviseurs, déplacer et orienter les sièges, entre autres). La présente étude fait ressortir que ce sont les senseurs et les actuateurs magnétiques qui vont constituer la classe de capteurs la plus susceptible de prendre de l'importance.

Les céramiques opto-électroniques ou électro-optiques sont des matériaux soit ferro-électriques du type PLZT ou niobate de lithium, soit des fibres de verre (silice avec revêtement) et des matériaux laser. Les marchés potentiels sont considérables dans l'automobile: éléments de mémoire lumines, affichage vidéo, obturateurs de lumière, communications et connectique.

Les céramiques semi-conductrices ont de multiples usages comme par exemple les thermistances qui commandent la température, les éléments chauffants et les dispositifs de sécurité pour les composants électroniques. Contrairement aux précédentes, pour lesquelles un excellent isolement électrique est de rigueur, ces céramiques sont conductrices de l'électricité. Leurs compositions sont très variables telles que le fer, le manganèse, le cuivre, le nickel. On les retrouve aussi avec de nombreuses additions dopantes. Comme on a affaire à un semi-conducteur, la résistivité ρ est toutefois une fonction exponentielle en $1/T$ de la forme $\log \rho = A + B/T$. Les valeurs du coefficient B vont être soit négatives pour les céramiques NTC, soit positives pour les céramiques PTC. Les thermistors NTC sont des spinels dopés de formule générale $M^{+2}M_2^{+3}O_4$ du type $Ni_{0,6}Mn_{2,4}O_4$. Pour les thermistors PTC, on remarque des

titanates de baryum dopés du genre $\text{Ba}_{0.005}\text{YO}_{0.005}\text{Ti}_{0.02}\text{O}_3$ (p.85). Ces matériaux céramiques particuliers servent à une multitude d'applications dans l'automobile comme les thermo-détecteurs pour les gaz d'échappement, l'humidité ou la quantité d'eau dans les liquides de freinage, les détecteurs de pluie, les gradateurs de puissance pour la régulation de la température et la commande de la vitesse des moteurs électriques.

Quant aux céramiques à conduction souple, elles présentent aussi un grand intérêt comme matériaux servant à fabriquer des senseurs ou des capteurs de mesure qui réagissent à des fluctuations de composition chimique. Des 40 matériaux actuellement connus pouvant servir d'électrolyte solide, les zircons stabilisées à l'oxyde d'yttrium ou à l'oxyde de calcium sont les plus couramment utilisées, pour les sondes à oxygène entre autres. D'autres matériaux comme le spinel MgCr_2O_4 dopé au titane ou le SnO_2 servent de façon très spécifique, le premier comme hygromètre, le second comme détecteur d'hydrocarbures (à l'état gazeux).

Les matériaux céramiques utilisés pour les transducteurs ou les capteurs de mesures dans l'automobile forment un ensemble très varié. Ce sont des matériaux dits avancés, pour la plupart commercialisés depuis moins de quinze ans, mais qui ont été développés pour des besoins technologiques que l'on n'avait pas identifiés initialement dans l'industrie automobile. La pénétration de ces matériaux est maintenant assurée dans la mesure où les systèmes de commande dans l'automobile vont évoluer vers une commande électronique généralisée.

6. ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE

L'industrie de l'automobile n'est pas une industrie de pointe au sens performance et nouveaux produits. Il s'agit plutôt d'une industrie mature, complexe, qui va toujours se perfectionner mais de façon conservatrice, dictée en cela par la complexité de ses relations (législations nombreuses concernant l'environnement, politiques énergétiques, sécurité et protection des consommateurs).

Dans la carrosserie, la présente étude a mis en lumière le fait que les matériaux plastiques ne progresseront que pour les petites pièces. Cela équivaut en pourcentage (poids) global à une pénétration très lente au détriment des aciers ordinaires (tôles laminées).

Dans les moteurs, notre étude de 1988 a confirmé que la progression des matériaux céramiques serait très lente, au moins comme matériaux de structure (de 0,5 à 2,5 kg par moteur, d'ici l'an 2000). Les métaux vont garder leur prépondérance. Les plastiques résistant à plus de 125 C° seront utilisés en très faible proportion (toujours en pourcentage poids).

Il faut s'attendre à de grands changements dans les systèmes qui assurent la connection entre le moteur et la carrosserie. C'est ce que notre étude sur les systèmes de commande a démontré. Ces mutations technologiques dans l'automobile ne seront pas dictées par des considérations de matériaux. Il ne s'agit plus en effet de diminuer le poids spécifique des véhicules (cette étape a été

franchie dès les années 70) ou de diminuer la consommation spécifique (cela pourra éventuellement revenir mais pas dans un avenir prévisible). Il s'agit d'améliorer l'accessibilité à la performance, la fiabilité, la sécurité et, dans une bonne mesure, le rendement écologique des véhicules routiers.

Les systèmes de commande joueront un rôle majeur. À cette fin, l'électronique et, par voie de conséquence, les capteurs de mesure vont s'imposer.

Les capteurs de mesure des grandeurs suivantes devront être considérés: proximité, position, déplacement, épaisseur, niveaux, débits, forces, couples, vitesses angulaires et linéaires, chocs, accélérations, vibrations, températures, pressions, analyse des gaz et de l'humidité dans les liquides et dans l'air. Les composantes manufacturées pour assurer ces mesures seront des transducteurs, qui pourront avoir des "input-output" complexes et réagir à des signaux modulateurs produits par des gradients (mécanique, thermique, électrique, magnétique, chimique). D'emblée, les matériaux céramiques avancés pourront se tailler une place de choix de par leurs propriétés fonctionnelles.

La figure 17 résume de façon éloquentes les endroits susceptibles de trouver des applications pour les matériaux céramiques. Il apparaît clairement que les applications structurales, classées comme thermomécaniques, ne constitueront qu'un nombre restreint d'applications. Les applications pour les palpeurs, les détecteurs, les senseurs et les actuateurs seront en majorité. L'on comptera au-delà de 100 aimants durs dans une voiture régulière, d'ici dix ans, ce qui représente un marché colossal!

Ce sont les pièces automobiles les plus légères qui vont connaître dorénavant le plus de changement. Une multitude de nouvelles pièces vont être introduites dans les véhicules, la plupart produites à partir de matériaux dits avancés. Ce seront des pièces très importantes au point de vue fonctionnel et contenu informatique.

En conclusion, l'utilisation des matériaux avancés dans l'automobile va s'accélérer, étant donné qu'ils sont d'ores et déjà utilisés dans les secteurs technologiques précurseurs comme l'aviation, l'aérospatiale et l'armement.

Les matériaux avancés dans les systèmes de commande seront tout aussi bien à base de céramiques que de plastiques et de métaux. Les cinq sous-systèmes offriront des opportunités grâce à leur évolution propre, car il faudra toujours comprendre en profondeur leur raison d'être aux yeux du concepteur-assembleur, premier responsable de la fiabilité et de la sécurité des véhicules.

Ce qui a retenu le plus notre attention, c'est l'importance que vont prendre les capteurs et les actionneurs.

7. EFFETS

L'industrie de l'automobile est en pleine mutation. La présente étude a révélé qu'au niveau des cinq sous-ensembles les changements seront évolutifs, mais qu'au niveau de leur intégration (mouvement déjà amorcé et irréversible) les innovations seront nombreuses. Cela va entraîner des répercussions :

- Le pourcentage des pièces et des sous-assemblages, produits par des sous-traitants majeurs, va augmenter.
- Le nombre de nouveaux capteurs et actuateurs dans les systèmes de commande va doubler tous les cinq ans, d'ici l'an 2000. Le secteur industriel des capteurs pour automobile va ainsi devenir un secteur industriel porteur. Dans ce secteur, les matériaux industriels avancés et, notamment, les matériaux céramiques avancés vont jouer un rôle primordial.
- Le secteur des manufacturiers de pièces de rechange va être bouleversé par la venue de ces nouveautés. Le nombre de fournisseurs de pièces va diminuer (moins de pièces, plus d'assemblage intégré et beaucoup plus d'informations par sous-ensemble).

À long terme, cela n'est pas sans poser de nouvelles questions auxquelles on devra trouver réponse.

Avec les exigences de sécurité et l'introduction accélérée des nouveaux systèmes électroniques complexes, l'entretien et la maintenance des véhicules sera à repenser. En viendra-t-on à instaurer

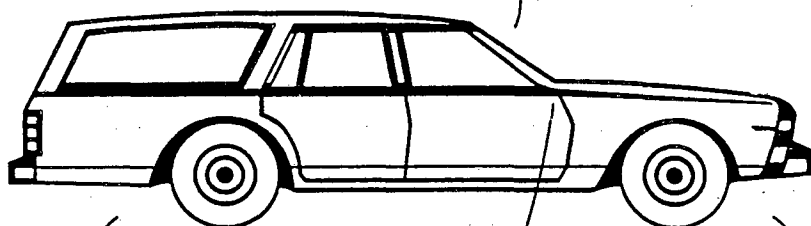
FIGURE 17
**application des céramiques
 dans les véhicules
 de surface**

**PALPEURS —
 DÉTECTEURS**

- Pluie sur parebrise
- Échauffement du volant
- Alarme anti-vol
- Buée
- Niveau d'essence
- Température gaz d'échappement
- Obstacles sur la route (4 roues)

**SENSEURS — (Contrôle
 - Actuation).**

- Température de l'air
- Température d'entrée de l'air
- Température de l'huile
- Ratio air/combustible
- Temps d'ignition
- Étrangleur automatique
- RPM
- Échauffement du mélange air/combustible
- Du combustible (diesel)
- Bougie
- Bougie de préchauffage



SENSEURS

- Température gaz d'échappement
- Support catalytique
- Filtre des gaz d'échappement
- Échauffement du catalyseur
- Analyseur O₂, NO_x...

MÉCAÉLECTRONIQUE

- Circuits intégrés
- Condensateurs
- Varistors
- Tubes fluorescents
- Diodes
- Contrôle des éclairages (externe-interne)

THERMOMÉCANIQUES

- Turbine de turbo compresseur
- Collecteur d'échappement
- Culbuteur/basculeur
- Chemises cylindre
- Piston-axe-tête
- Poussoirs de soupape
- Chambre de combustion diesel
- Conduits d'échappement dans la culasse
- Bagues-joints d'étanchéité
- Guides de soupapes

pour les voitures des calendriers d'entretien copiées sur ceux que l'on retrouve en aéronautique? Trouvera-t-on alors la compétence requise dans les petits garages? Verra-t-on se multiplier des super-centres de services? Les coûts d'entretien vont-ils aller en augmentant? Les pièces utilisées seront-elles de plus en plus fiables?

Le recyclage des matériaux dans les automobiles de demain deviendra-t-il un cauchemar? (Il y a trop de matériaux distincts, incompatibles avec un recyclage massif tel que pratiqué aujourd'hui.) La pollution et la facture énergétique vont-elles accroître leurs pressions sur l'industrie automobile en vue de forcer des changements aujourd'hui inopinés? Ce processus retardera-t-il l'intégration des systèmes de commande que nous projetons?

Parmi les nouvelles avenues prévisibles, le marché des céramiques avancées fonctionnelles dans les automobiles va croître à un rythme beaucoup plus grand que le marché des céramiques avancées structurales, par le biais du marché des capteurs et des senseurs. On pourrait alors implanter au Québec des entreprises de céramiques nouvelles au niveau de la synthèse des poudres et favoriser l'implantation de firmes de haute technologie dans le domaine des senseurs. Bien sûr, la technologie des senseurs a déjà été reconnue, en 1987, par le Conseil des sciences du Canada, comme une technologie émergente à promouvoir dans notre pays. Plus centrée sur une application, notre étude débouche sur la même constatation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] "Materials Selection for Automatic Components", Published searches, No 1004 A (1969-1983) and Y1004 B (1984-1988).
- [2] "Polymer Composites for Automotive Applications", SP-748, SAE - Warrendale, PA, USA, Intel. Congress, Detroit, Michigan, Feb. 29, March 4, 1988.
- [3] "Automotive Ceramics: Recent Developments", P-207, SAE - Warrendale, PA, International Congress, Detroit, Michigan, Feb. 29-March 4, 1988.
- [4] "Application of Advanced Industrial Materials for Transportation Vehicles" Symp. Proceedings, Montreal, May 13, 1986, Transport Canada, R&D Directorate, Ottawa, Ont.
- [5] "Recommandation pour la fabrication de pièces en nouveaux matériaux prometteurs pour l'automobile", J.O. 'Shea, L. Parent et D. Savard, cours MU.645, avril 1988, École polytechnique de Montréal.
- [6] "Identification des créneaux de diversification dans le domaine des pièces automobiles", P. Baribeau, J.-P. Trudeau et D. Laroche, cours MU.645, mai 1988, École polytechnique de Montréal.
- [7] "Prévision technologique dans l'industrie de l'automobile", R. Nault et M. Simoneau, cours MU.645, juin 1988, École polytechnique de Montréal.
- [8] Perrin-Pelletier, F., "A European Market for Cars", Long-range Planning, 1988.
- [9] Le Duff, R., Maïssen, A., Soulié, D., "Industrie automobile: les difficiles relations entre constructeurs et équipementiers", Problèmes économiques, 18 janvier 1989, reprise de Science et technologie, septembre 1988.
- [10] Leslie, S., Hiraoka, "Japanese Automobile Manufacturing in an American Setting", Technological Forecasting and Social Change, n° 1, vol. 26, mars 1989.
- [11] Cohendet, P., Ledoux, J.M., Zuscovitch, E., "Les matériaux nouveaux; dynamique économique et stratégie européenne", Economica, 1987.

- [12] Macrae, N., "The Next Ages of Man", The Economist, Dec. 1988.
- [13] Leblanc, D., Rigaud, M., "Enquête Delphi sur la pénétration des matériaux avancés dans les moteurs", série Études et recherches en transport, ministère des Transports du Québec, 1988.
- [14] Crouse, W.H., Mécanique automobile, Montréal, 2^e édition, McGraw Hill, Montréal, 1973, p.
- [15] Curtis, Anthony, Automatic cars can save petrol, New Scientist, vol. 96, no 5, 279-281.
- [16] Birch, Stuart, Dual clutch gearbox, Automotive Engineering, vol. 96, no 5, 79-80.
- [17] De La Taille, Renaud, Une invention géniale: la courroie qui pousse, Science et vie, n° 757, 103-107.
- [18] Scott, David, CVT belt production breaks new ground, Automotive Engineering, vol. 95, no 11, 85-88.
- [19] Mullins, Peter J. and Szigethy, Neil M., 1984, The year of the CVT, Automotive Industries, August 1984, 47-50.
- [20] Scott, David, European CVT for production cars, Automotive Engineering, vol. 95, no 7, 57-59.
- [21] Scott, David, Belt-drive CVT for '82 model year, Automotive Engineering, vol. 88, no 2, 136-140.
- [22] Yamaguchi, Jack, Subaru launches CVT-equipped mini, automotive Engineering, vol. 95, no 4, 75-77.
- [23] Yamaguchi, Jack, Japanese CVT uses magnetic clutch, Automotive Engineering, vol. 93, no 4, 82-85.
- [24] Scott, David, CVT's looms on European horizon, Automotive Engineering, vol. 91, no 12, 57-63
- [25] Hewko, Lubomyr O., Automotive Traction Drive CVT's - An Overview, SAE Technical Paper Series, no 861355, 1-14.
- [26] Scott, David, Heavy-duty CVT has traction-roller drive, Automotive Engineering, vol. 91, no 7, 57-62.
- [27] Scott, David, Adaptive suspension, rear steering, and CVT for futuristic truck, Automotive Engineering, vol. 95, no 2, 160-166.

- [28] Scott, David, 4WD with variable front/rear torque split, Automotive Engineering, Vol. 95, no 10, 76.
- [29] Scott, David, Isolated 4x4 driveline avoid idling drag, Automotive Engineering, vol. 95, no 6, 90-91.
- [30] de La Taille, Renaud, Une révolution automobile: le différentiel Torsen, Science et vie, no 799, 106-112, 173.
- [31] Scott, David, Transverse-engined 4WD with Torsen differential, Automotive Engineering, vol. 94, no 10, 90-91.
- [32] Brooke, Lindsay, Four wheel drive-in, Automotive Industries, vol. 96, no 3, 50-52.
- [33] Tech briefs, Automotive Engineering, vol. 96, no 4, 34.
- [34] Scott, David, Automotive Newsfront, Popular Science, June 1988, 24-26.
- [35] Lanzer, H., Permanent and Part-Time Four Wheel Drive and Typical Tractive Force Distribution, SAE 861369, 5.263-5.273.
- [36] Scott, David, Viscous drive varies 4x4 engagement, vol. 93, no 5, 87-91.
- [37] Yamaguchi, Jack, Handa adds viscous coupling, Automotive Engineering, vol. 94, no 12, 74-79.
- [38] Scott, David, Technical Highlights of European Vehicles, Automotive Engineering, vol. 93, no 1, 25-41.
- [39] Yamaguchi, Jack, Nissan adopts triple viscous couplings, Automotive Engineering, vol. 95, no 4, 80-81.
- [40] Yamaguchi, Jack, Viscous coupling blossom season in Japan, Automotive Engineering, vol. 95, no 6, 93-94.
- [41] Yamaguchi, Jack, People's four-wheel drives, Automotive Engineering, vol. 96, no 5, 94-97.
- [42] Brooke, Lindsay, Scorpio ascendant: piloting Ford Europe's bimmer-basher, automotive Industries, Feb. 1986, 60-61.
- [43] Zomotor, A. et Al., Mercedes-Benz 4MATIC, and Electronically Controlled Four-Wheel Drive System for Improved Active Safety, SAEe61371, 5.295-5.304.

- [44] Mullins, Peter J., Mercedes bends on active traction technology, Automotive Industries, May 1986, 75.
- [45] Society of Automotive Engineers Inc., Traction control: an ABS extension, Automotive Engineering, vol. 95, no 8, 74-80.
- [46] Augier, Luc, Les freins anti-blocage, Science et vie, no 824, 88-95.
- [47] Augier, Luc, Les roues qui "pensent", Science et vie, no 840, 105-108.
- [48] Maretzke, J. and Richter, B., Directional Control of 4WD Passenger Cars. A Study by Computer Simulation, SAE 861370, 5.274-5.2984.
- [49] Augier, Luc, Les freins anti-blocage, Science et vie, no 824, 88-95.
- [50] Augier, Luc, Les roues qui "pensent", Science et vie", no 840, 105-108.
- [51] The automatic way to slow down safety, New Scientist, 9 May 1985, 25.
- [52] Scott, David, anti-lock brakes for mass-market car, Automotive Engineering, vol. 94, no 5, 77-80.
- [53] Scott, David, Vacuum power cuts anti-lock brake cost, Automotive Engineering, vol. 95, no 4, 67-69.
- [54] Scott, David, Vacuum servos operate anti-lock brakes, Automotive Engineering, vol. 95, no 3, 62-63.
- [55] Augier, Luc, Les roues qui "pensent", Science et vie, no 840, 105-108.
- [56] Yamaguchi, Jack, Four-wheel steering blossoms in Japan, Automotive Engineering, vol. 95, no 7, 60-62.
- [57] Takiguchi, Tadahiko et al., Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle-Speed-Sensing Four-Wheel Steering System, SAE 860624, 3.870-3.879.
- [58] Schreffler, Roger, Four-wheel steering, made in Japan, Automotive Industries, Aug. 1987, 64-65.
- [59] Scott, David, Four-wheel steer with electronic control, Automotive Engineering, vol. 95, no 10, 78.

- [60] Augier, Luc, Les roues qui "pensent", Science et vie, no 840, 105-108.
- [61] Scott, David, Shock absorbers have stroke-regulated action, Automotive Engineering, vol. 95, no 5, 82-83.
- [62] Yamaguchi, Jack, Specialty coupe gets performance boost by electronically-controlled turbocharger wastegate, Automotive Engineering, vol. 93, no 2, 108-109.
- [63] Scott, David, Active Suspension wins big-lease adherents, Automotive Engineering, vol. 94, no 9, 75-77.
- [64] Cross, Michael, Computers put a new spring in cars, New Scientist, 22 May 1986, 31.
- [65] Bell John, An active tilt to a concept car, New Scientist, 25 Oct. 1984, 25.



Gouvernement du Québec
**Ministère
des Transports**

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 066 794