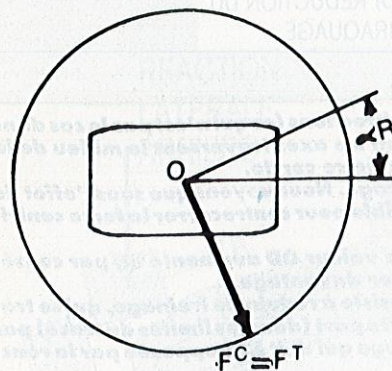
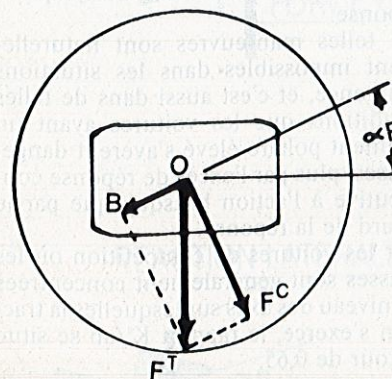


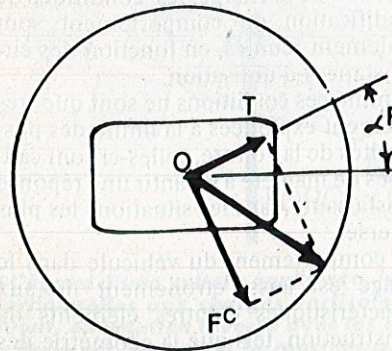
(A) ROUE ARRIERE EXTERIEURE A LA LIMITE DE L'ADHERENCE POUR LE SOUS-VIRAGE



(B) PIED LEVE DE L'ACCELERATEUR



(C) TENTATIVE DE FREINAGE



(D) ACCELERATION

sence d'articulations élastiques), la rigidité des barres et le calibrage des amortisseurs. Des barres rigides et des amortisseurs puissants diminuent également le temps de réponse à l'entrée de virage.

**CAUSES ET REMÈDES**

Afin de creuser le problème du rapport entre les caractéristiques techniques d'une voiture et son comportement en sous-virage ou en survirage, nous allons résumer, toujours à partir de la source citée plus haut, les défauts essentiels de sous-virage et de survirage qui ont été recueillis au cours de plusieurs années de pratique dans la mise au point sur circuit, en indiquant les causes probables qui peuvent en être à l'origine.

Lorsqu'une voiture a tendance à sous-virer à l'entrée du virage, tendance qui tend à s'aggraver, les principales causes peuvent résider dans : une trop grande étroitesse de la voie avant ; une trop grande rigidité de la barre anti-roulis avant ; une localisation trop basse du centre de roulis avant ; une insuffisance de charge sur l'axe avant ; un carrossage positif excessif (sous écrasement) de la roue extérieure avant ; un freinage excessif ou en retard, ou enfin, une insuffisance de freinage des amortisseurs sous compression.

Si, en revanche, toujours dans le cadre du phénomène de sous-virage, la voiture tend à élargir sa trajectoire à la sortie du virage, les causes peuvent être : une convergence avant trop prononcée ; une insuffisance de charge sur l'axe avant ; une insuffisance de compensation du carrossage avant dans des conditions de roulis ; non linéarité du transfert de charge due à une inclinaison des axes de roulis ; une insuffisance de course de la suspension avant à l'écrasement ; une insuffisance de freinage des amortisseurs avant en compression.

Le survirage à l'entrée du virage est un phénomène quasi inexistant et s'il se manifeste, il est indicatif d'une rupture ou d'une erreur de conception : rupture de la barre avant ; rupture de l'amortisseur extérieur arrière ; inhibition de la course de la suspension arrière sous l'ef-

*Cette figure fait référence à une roue arrière extérieure à la limite du sous-virage (A). OT représente la force de traction. En (B), nous voyons la valeur F' augmenter sous l'effet du relâchement de l'accélérateur (OT = 0). La situation inverse est représentée en (C) où une tentative de freinage pendant le sous-virage résulte dans un effet négatif. D représente un effet apparemment tout aussi négatif dû à une accélération. Mais dans ce cas, la résultante F' agit dans une direction propre à déplacer le vecteur O-F' dans le voisinage du centre de rotation instantanée, contrecarrant ainsi la force centrifuge.*

fet d'interférences ; une flexibilité excessive de la suspension ou de la barre arrière.

Par contre, le survirage à la sortie du virage est un phénomène beaucoup plus fréquent.

Lorsqu'il tend à s'aggraver dès son apparition, les causes peuvent en être attribuées à : une défectuosité de l'autobloquant du différentiel ; une rigidité excessive de la barre de torsion arrière ; une insuffisance de charge sur l'axe arrière ; une trop grande flexibilité de la convergence arrière et une insuffisance de freinage des amortisseurs tant et si bien que la voiture se met à pencher sur la roue arrière extérieure.

Lorsque le survirage tend à s'interrompre momentanément à la sortie du virage pour s'accroître ensuite, les causes peuvent consister en : une insuffisance de course de la suspension arrière ; un manque de charge sur l'amortisseur arrière ; une longueur excessive des tampons en caoutchouc de fin de course ; une trop brusque accélération par excès de confiance en la voiture ; une trop brusque variation du carrossage de la roue arrière extérieure.

Cette liste n'est certes pas exhaustive, mais elle donne quand même un panorama assez complet des situations génératrices de sous-virage ou de survirage.

**L'AVENIR**

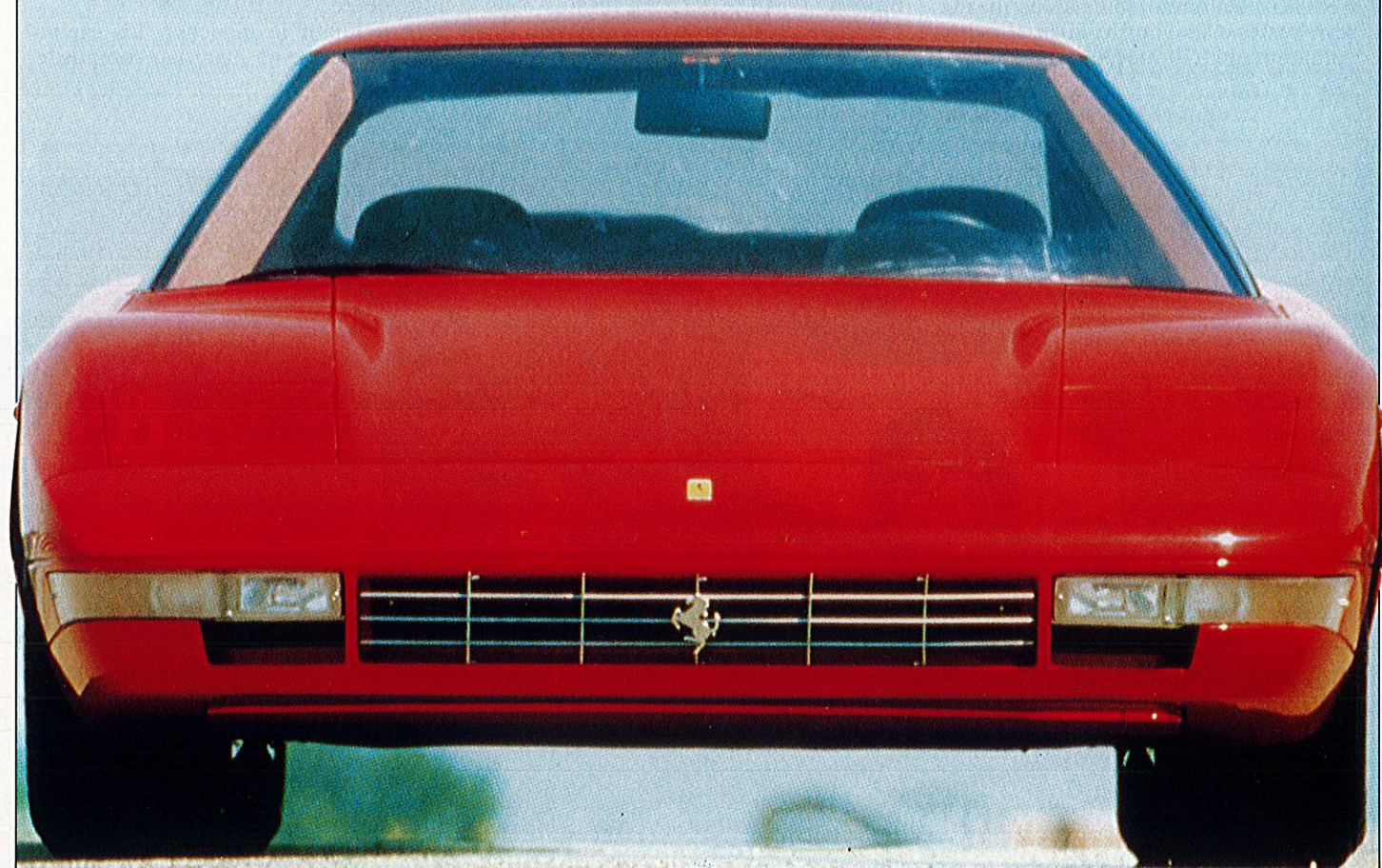
Il y a quelques années encore, le comportement des voitures sur route était simulé à l'aide de calculs à partir de certaines hypothèses simplificatrices, quitte à voir les résultats infirmés par les essais pratiques sur route effectués par les pilotes d'essais.

Aujourd'hui, grâce à l'informatique, il est possible de simuler directement sur ordinateur le comportement de la voiture sur route en visualisant les effets induits par la modification de certaines caractéristiques des systèmes de suspension sur le comportement du véhicule. L'expérience sur route demeure bien entendu indispensable, mais elle s'effectue à présent sur un modèle déjà optimisé qui peut encore être amélioré à l'aide d'instruments appropriés qui mesurent l'ensemble des paramètres techniques caractérisant le comportement. De plus, les impressions des pilotes d'essais sont également pris en compte.

Il faut encore remarquer au sujet du comportement de la voiture que la diffusion de suspensions actives comportent un grand nombre d'avantages, permettant d'effectuer les meilleurs réglages en fonction du type de marque et de prévenir des mouvements anormaux de roulis ou de tangage, ce qui contribue d'une manière essentielle à la sécurité active et au confort de la voiture. ■

# LA FERRARI EXPÉRIMENTALE F 408

**Des travaux de recherche attentifs sur la forme et les matériaux ont révélé qu'une structure en tôles d'aluminium, encollées les unes aux autres, constitue le meilleur compromis coûts/performances pour un véhicule de sport.**



**S**ELON la conception du vieux sage de Maranello ("Grande Vecchio dit Maranello"), une voiture est et doit rester avant tout un moteur : tout le reste est secondaire. Conformément à ce principe, le châssis sur les sportives Ferrari produites en nombre limité d'exemplaire, a toujours affecté la forme classique du treillis tubulaire.

Même la mythique F 40, qui représente le nec plus ultra en terme de sophistication mécanique, avec son 8 cylindres en V de 2936 cc, biturbo, capable de développer, jusqu'à 480 ch, dispose d'un treillis classique en tubes d'acier, en dépit du fait que des panneaux de rigidification en fibre de carbone ont été intercalés.

La maison de Maranello n'est pourtant pas fixée définitivement dans ce domaine : Ferrari engineering a en fait mené une étude approfondie sur les possibilités technologiques et les matériaux utilisables afin de définir la structure portante la plus appropriée pour une sportive. Les résultats de cette recherche ont débouché sur la réalisation de la voiture expérimentale F 408. Les exigences posées à la nouvelle structure sont :

- résistance à la corrosion, facilité de construction, reproductibilité des caractéristiques (le processus de construction ne doit pas être excessivement contrôlé), possibilité de réparation ;
- rapport rigidité/poids intéressant.

Pour répondre à la seconde exigence, le treillis a été éliminé, seuls les panneaux sont restés. Au vue de la production volontairement limitée, il était impensa-

ble de recourir à des panneaux pressés, même si la solution de la coque pressée et soudée par points demeure l'optimum pour obtenir une excellente rigidité et exploiter d'une manière optimale les volumes.

C'est pourquoi les tôles sont simplement découpées et pliées : le problème étant de trouver les formes appropriées pour ne pas trop pénaliser l'habitabilité. Une fois définie la géométrie (voir la figure 2), il s'agissait de lever tout doute quant au choix du matériau : c'est ainsi que des coques en acier inoxydable, en aluminium, en des matériaux composés (carbone, verre tissé préimprégné), ont été réalisées.

La coque en acier (inoxydable pour éliminer les traitements anti-corrosion qui sont particulièrement coûteux pour une production limitée), intègre une soudure au laser en continue des tôles, ce qui présente de nombreux avantages par rapport à la soudure à points (liberté de réaliser des joints internes et externes, étanchéité, rigidité). A titre d'exemple, la rigidité s'établit ainsi à 620 kg/deg, pour une masse de 99 kg. Il est à noter que sur ces 99 kg, 19 kg peuvent être attribués au polyuréthane cellulaire qui emplit les poutres sous les portes (logerons) et le pare-feu, de manière à stabiliser les tôles de 0,8 mm. C'est là où apparaît l'avantage de l'aluminium : à égalité de poids, les épaisseurs sont trois fois supérieures à celles de l'acier et les problèmes d'instabilité sont résolus sans nécessité de recourir à l'utilisation du polyuréthane cellulaire. La coque en

aluminium a été développée en collaboration avec Alcan International Ltd qui a dégagé la technologie pour la structure en aluminium (ASTV - Aluminium structured vehicle technology : Technologie du véhicule à structure en aluminium) qui permet l'union entre les tôles découpées et pliées à l'aide d'une colle époxyde-monocomposée polymérisée à froid.

(Rigidité 780 mKg/deg, masse 75 kg. Épaisseur des tôles : 1,2 - 2,4 mm). La coque en matériaux composites est constituée d'une espèce de cuve à laquelle les montants et le toit rapporté sont fixés au moyen de boulons. Pour obtenir les meilleures caractéristiques, les matériaux composites ont été polymérisés sous pression en autoclave et afin de simplifier la presse, deux pièces séparées ont été réalisées. (Rigidité 950 mKg/deg, masse 75 kg).

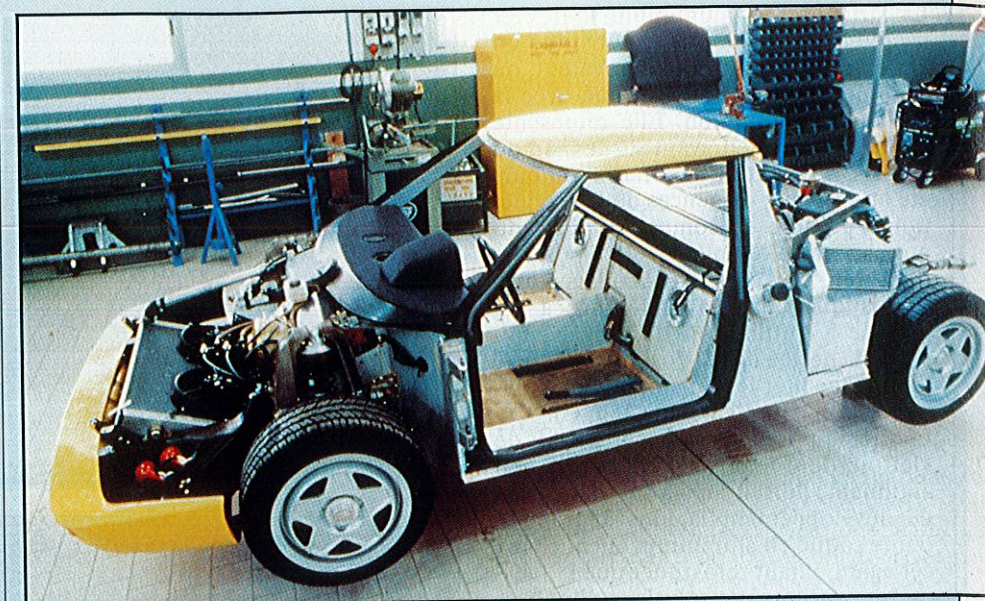
En commentant les valeurs de la rigidité et du poids, il convient de remarquer que la rigidité torsionnelle a été mesurée en appliquant les charges aux points d'attache des suspensions et que celle-ci se rapporte à une coque nue, sans vitres ni portières.

A titre purement indicatif, il est possible de quantifier les influences des divers "accessoires", égales pour les trois coques, qui réduisent les différences, en pourcentage, de la rigidité :

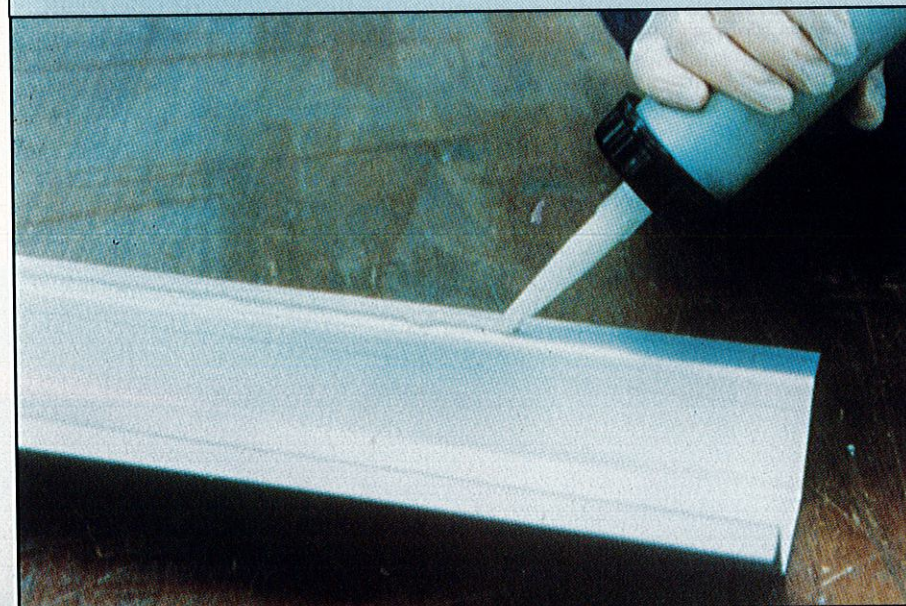
- coque en acier, nue, 620 mKg/deg ;
- en ajoutant le toit, environ 1100 mKg/deg ;
- en ajoutant le plancher, les capots avant et arrière en matériau composite

en sandwich, environ 1000 mKg/deg ; - en ajoutant les vitres encollées, environ 1200 mKg/deg.

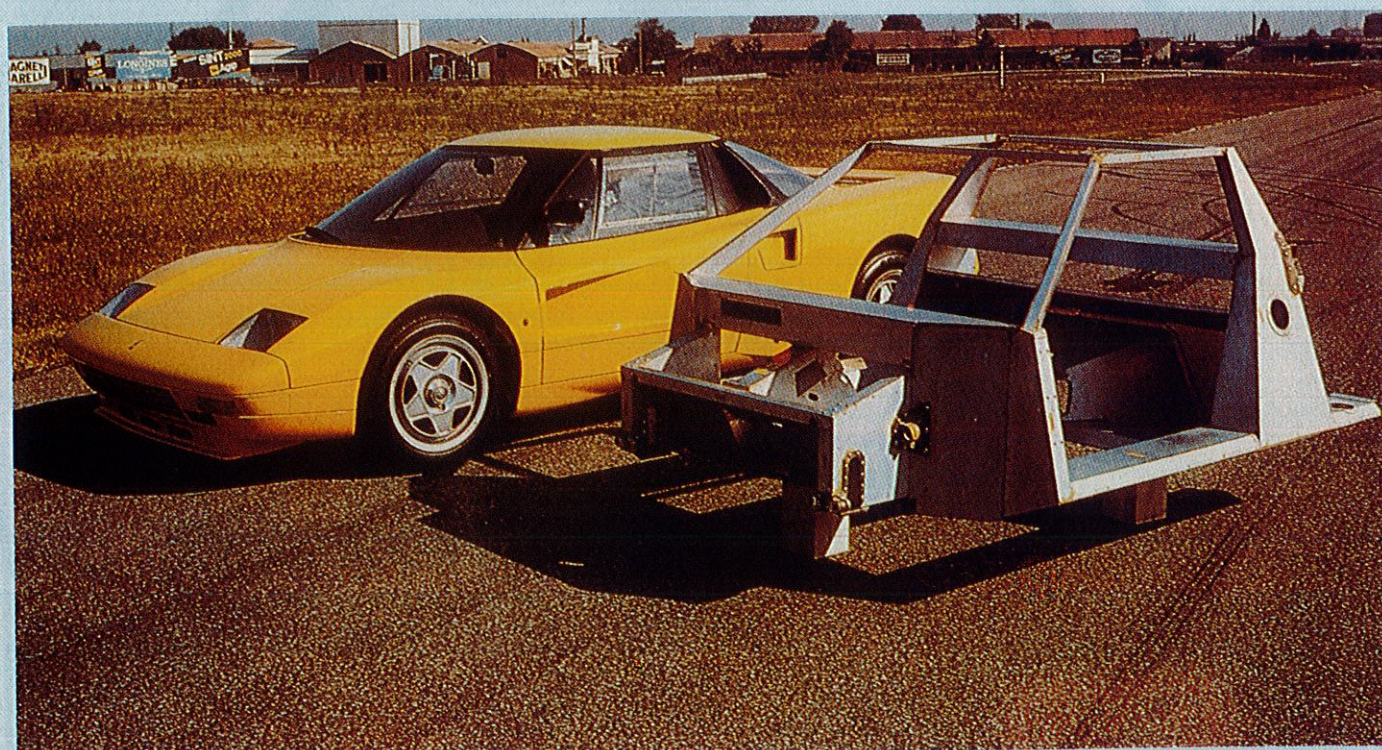
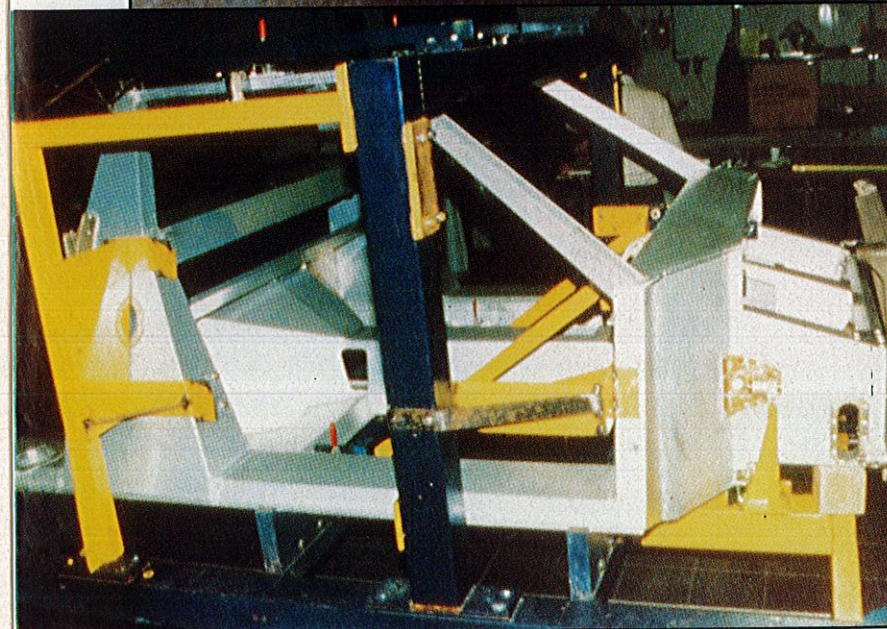
La structure en matériau composite, comme on pouvait s'y attendre, a atteint le rapport rigidité/poids le plus élevé, mais l'absence de réponse aux spécifications du point 1 fait qu'on lui a préféré la structure en aluminium, dont les performances sont meilleures que celle en acier et dont la construction est beaucoup plus simple. Selon le directeur technique de Ferrari engineering, l'ingénieur Cassese, les matériaux composites n'auront pas d'avenir dans la production de série tant que les matrices thermoplastiques pouvant être pressées à 350 °C ne seront pas disponibles et que les pièces ouvragées ne conservent pas leur forme profilée à température ambiante exactement comme une pièce de tôle ; avec les méthodes actuelles, il est impensable d'industrialiser un procédé lent et coûteux comme la production de pièces en matériaux composites en autoclave.



**La F 408 nue. A remarquer, les petits châssis avant et arrière qui relient les suspensions à la structure centrale, et le radiateur d'eau en position avant fortement incliné, pour les besoins de l'aérodynamique.**



**L'encollage des tôles. La colle est appliquée à la main (en haut) ou à l'aide d'un pistolet à jet (à droite), mais le processus peut être facilement automatisé à l'aide d'un petit robot semblable à ceux utilisés pour étendre les joints d'étanchéité dans les moteurs. En bas, le dispositif d'assemblage.**

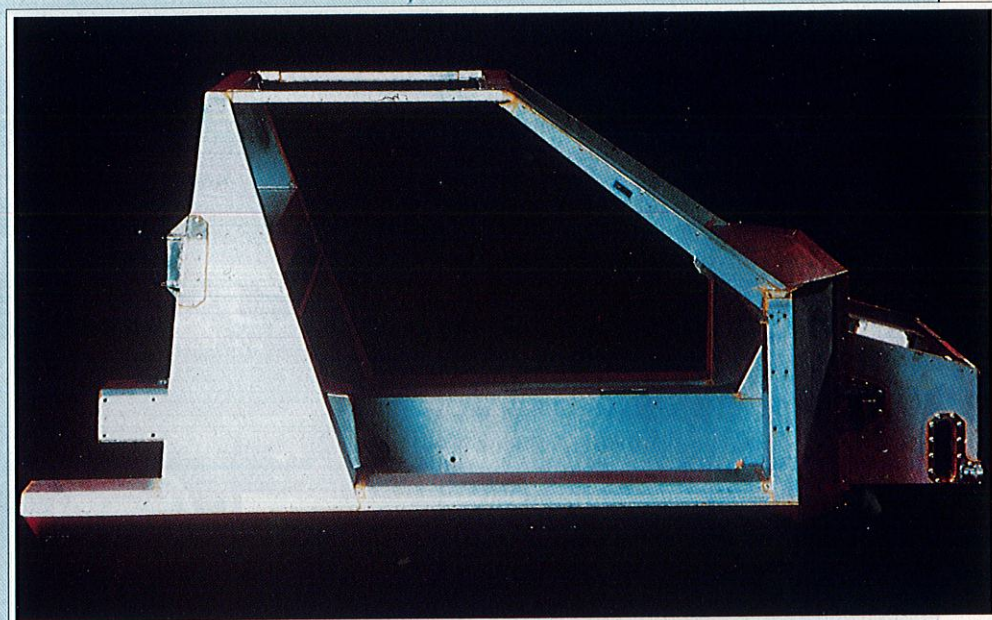


**La F 408 et la nouvelle coque en tôle d'aluminium découpée, pliée et encollée.**

La structure en aluminium, qui s'est avérée la plus appropriée, constitue un bel exemple d'un projet innovateur, où le moindre détail a été évalué avec la plus grande attention. Elle représente un bond décisif en avant sur le plan du châssis, d'autant que Ferrari a toujours été attentif aux exigences de la production à prendre en compte au stade du projet : par exemple, il était possible d'utiliser un cycle d'encollage plus sophistiqué, mais la préférence a été donnée à l'utilisation de moyens qui sont à la portée des carrossiers qualifiés, afin de faciliter les réparations (la polymérisation est effectuée à 180 °C). Le thème principal du congrès SAE de Détroit, dont le présent article tire son argument, portait sur la méthodologie de développement la plus appropriée d'une coque en aluminium encollé, et à cet égard, il faut remarquer que la F408 est un concentré de solutions d'innovation.

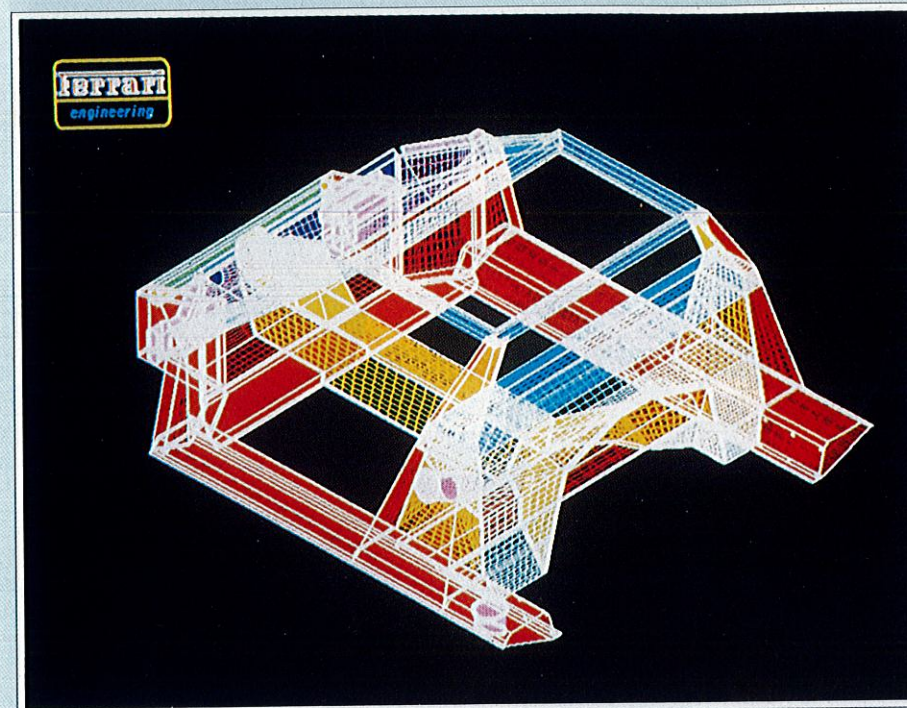
En voici le résumé :

— quatre roues motrices (distribution du couple moteur : 70 % à l'avant, 30 % à l'arrière) avec blocage du différentiel central de nature progressive (joint hydraulique analogue aux convertisseurs de couple) pour faciliter le contrôle en cas d'embarquée ; permet des légères différences de vitesse de rotation entre les deux axes ;



**Il est possible de distinguer sur cette photo plusieurs rivets : ceux de l'attache de la suspension avant sont de nature structurelle (affecter toute la charge à la colle comportait le risque de créer des zones d'encollage trop larges), tandis que les autres rivets servent à maintenir en position les composants avant la polymérisation de la colle. Cela permet d'obtenir une plus grande maniabilité de la structure.**

**Nes très bas, arrière haut, un soin extrême apporté à l'aérodynamique. Au détriment de la beauté peut-être, mais la F 408 est une voiture de laboratoire.**



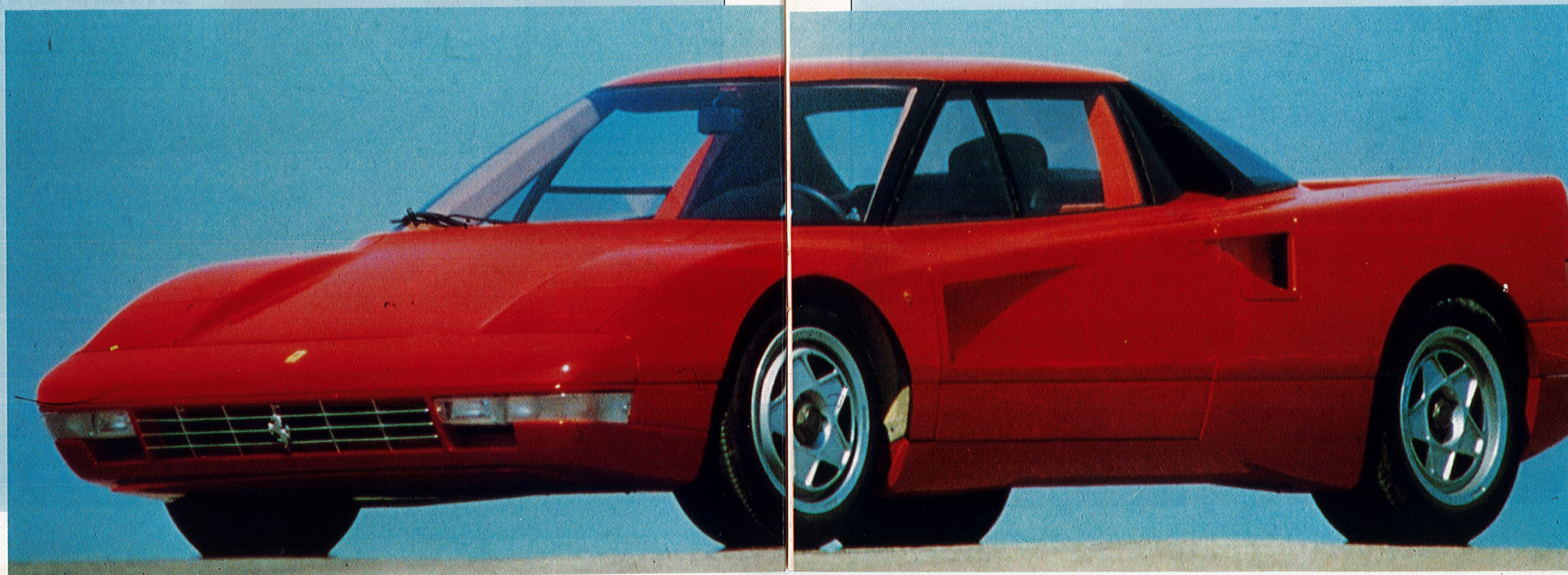
**Analyse de la structure avec la méthode des éléments finis. Ces techniques de recherche permettent, à condition qu'elles soient correctement employées, d'obtenir des résultats d'une haute précision, conduisant ainsi à optimiser un projet sans avoir à recourir des prototypes supplémentaires.**

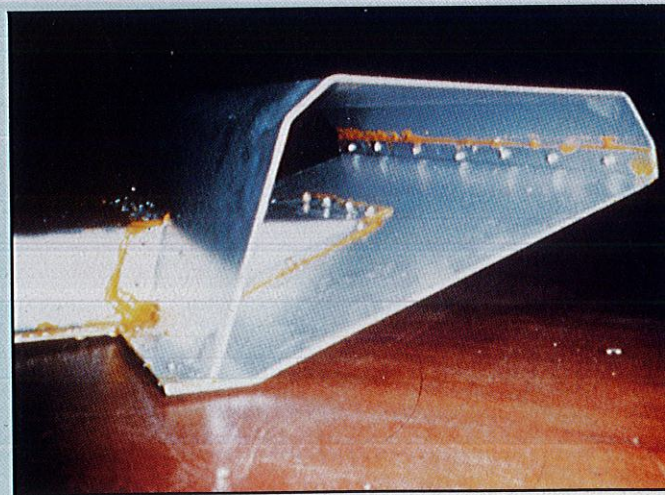
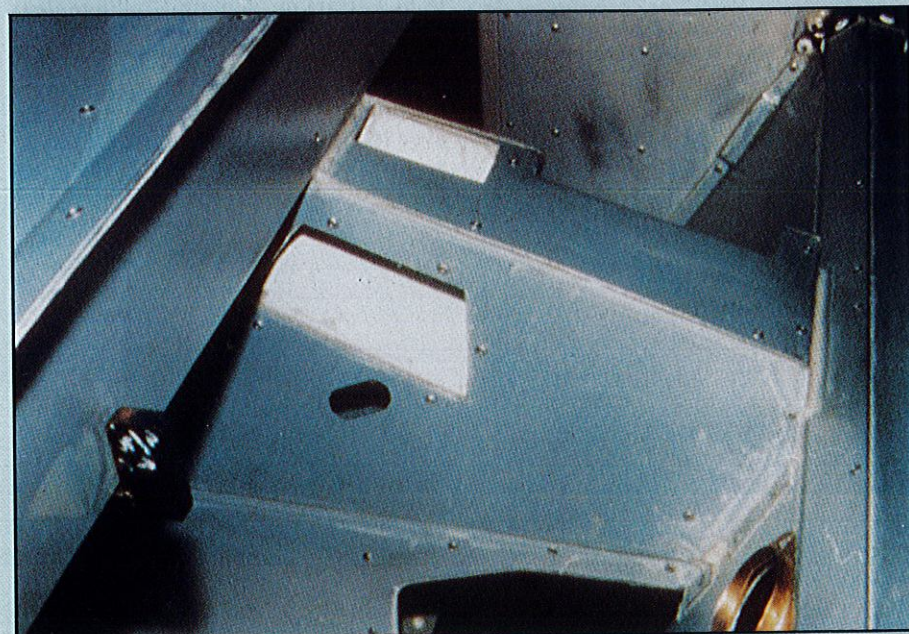
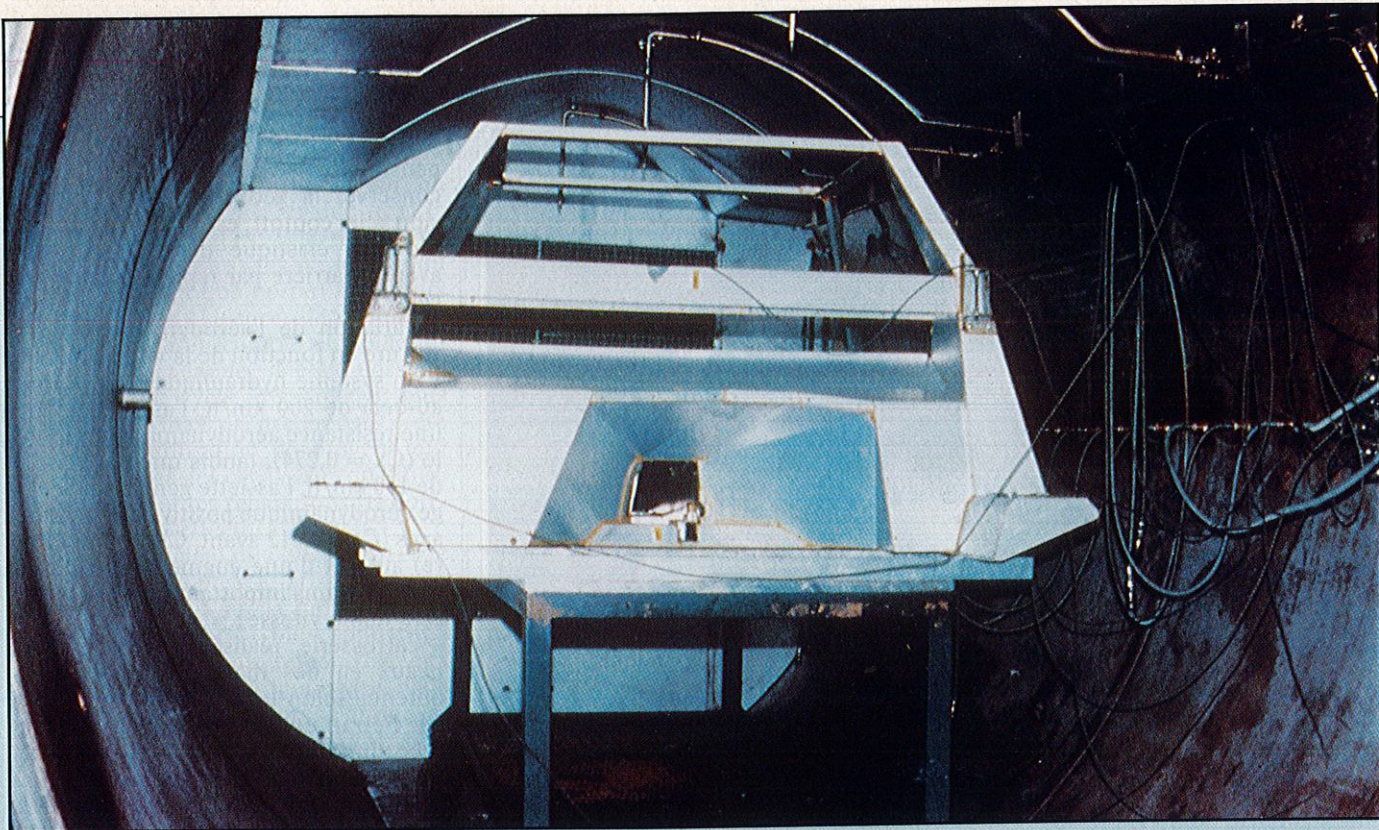
— montage rigide des attaches des suspensions sur des uni-ball, afin de conserver la géométrie de la suspension : le confort est garanti grâce au montage élastique des petits châssis avant et arrière par rapport à la cellule centrale ;

— variation de l'aérodynamique de la voiture en fonction de la vitesse à l'aide d'un système hydraulique d'élévation : au-delà de 200 km/h, l'assiette génère une résistance aérodynamique minimale ( $C_x = 0,274$ ), tandis que en-dessous de 150 km/h, l'assiette génère une charge aérodynamique positive sur les deux axes ( $C_I = 0,012$  avant,  $C_I = 0,028$  arrière) au prix d'une augmentation du  $C_x$  (0,314) moins important que l'adhérence à faible vitesse ;

— carrosserie réalisée avec des panneaux en des matériaux polymérisés obtenus selon un processus développé par Ferrari engineering, qui est constituée d'une structure similaire aux matériaux composites en sandwich, mais pressables et profilables avec facilité.

A la question : "la F 408, préfigure-t-elle la Ferrari de demain ?", l'ingénieur Cassese a ébauché un sourire, en ajoutant, diplomatiquement, "pas de commentaires". Étant donné la grande lucidité qui entoure le projet et le soin avec lequel le moindre détail est analysé, nous pensons que l'on peut répondre par l'affirmative. ■





La colle est polymérisée dans un four à 180°C. Les dimensions sont soigneusement contrôlées avant et après la polymérisation et aucune distorsion n'a été relevée.

Diverses jonctions encollées. La partie en vert qu'on remarque en bas à gauche est une protection en plastique qui revêt les tôles. Elle n'est retirée qu'immédiatement après l'encollage.

## SOUFFLERIE ACOUSTIQUE RECRÉER LES CONDITIONS DE ROULAGE

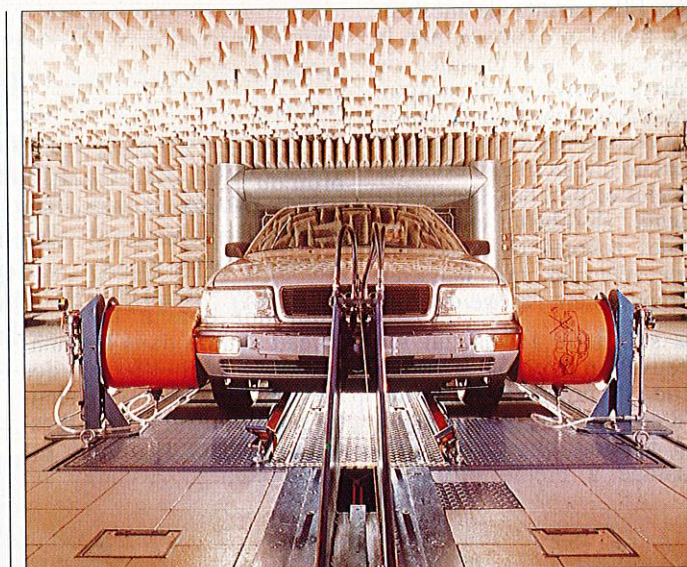
Dans son centre d'études, Audi a réalisé en 1987 un banc d'essai doté d'une technique nouvelle, unique au monde. La combinaison d'une soufflerie silencieuse avec un banc d'essai à rouleaux pour voitures à quatre roues motrices dans une chambre sourde.

**A** PREMIÈRE vue, cette salle d'essais acoustiques ne se distingue guère de celles utilisées dans d'autres centres d'études. Des structures bizarres en forme de coins jaunes, réalisées en fibres de verre, sur les murs et le plafond, absorbent le bruit. Au centre, un banc d'essai à rouleaux qui présente une première particularité : les quatre rouleaux sont entraînés individuellement. Les réglages électroniques remplacent la liaison des rouleaux entre eux. Ils sont utilisés entre autres pour simuler les différences de vitesse de rotation des roues dans les virages et permettent, par exemple, d'améliorer le confort ou de réduire les vibrations de la transmission quatre au maximum. L'empattement est variable.

La place entre les rouleaux est utilisée pour une fosse avec plate-forme réglable en hauteur. Elle permet de procéder à des observations et à des mesures précises sous le véhicule en mouvement, à toutes les gammes de vitesse. Le caractère unique de cette salle d'essais acoustiques se manifeste par une ouverture de deux mètres carrés sur sa face avant. Il s'agit de la buse

de la soufflerie, une sortie d'air qui provoque les "vents violents" : l'air de refroidissement sort à une vitesse de 230 km/h au maximum et de façon parfaitement silencieuse grâce au grand nombre d'amortisseurs et d'éléments de guidage d'air dont l'agencement raffiné a été réalisé au cours d'importants essais types. L'air peut être réglé à n'importe quelle température choisie entre + 10°C et + 50°C, maintenue à un niveau constant par une régulation électronique sophistiquée.

Cette conception technique révèle également son caractère unique lorsque l'air artificiel balaye le véhicule qui repose sur les rouleaux. Par rapport aux souffleries conventionnelles, dont les soufflantes provoquent un bruit désagréable, il règne ici un silence absolu. Seuls les bruits de vent sur la voiture même sont perceptibles. Par cette combinaison de salle d'essais acoustiques et de soufflerie, les ingénieurs d'Audi ont conçu une technique entièrement nouvelle. Ils ont maintenant la possibilité d'examiner à fond les oscillations et problèmes acoustiques, même à pleine charge.



▲ Cette combinaison d'un banc d'essai à rouleaux pour voitures à quatre roues motrices avec une soufflerie silencieuse dans une chambre sourde est unique au monde. Les sacs remplis d'air comprimé – un brevet de Audi – retiennent le véhicule sur les rouleaux.

En parallèle à cette soufflerie acoustique, Audi a installé un banc d'essai pneumatique qui recrée les conditions de surface trouvées sur une autoroute. Le bruit généré par les pneumatiques est une constante prépondérante dans l'étude acoustique globale d'un véhicule.

