



RÉFLEXIONS SUR L'ÉNERGÉTIQUE DES VÉHICULES ROUTIERS



Socema-GREGOIRE, 1952 ($C_{xp} = 0,19$).

« On ne vient pas de nulle part et il serait souhaitable que l'on n'aille pas n'importe où ! »



Automobile Charles DEUTSCH, Le MANS 1964.

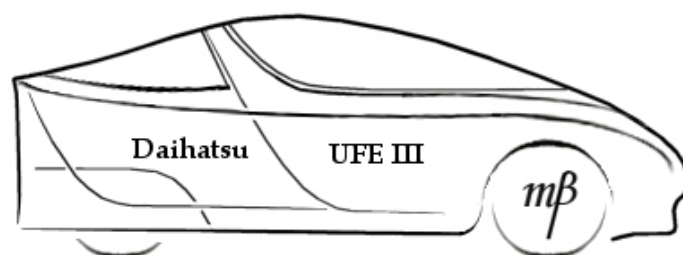
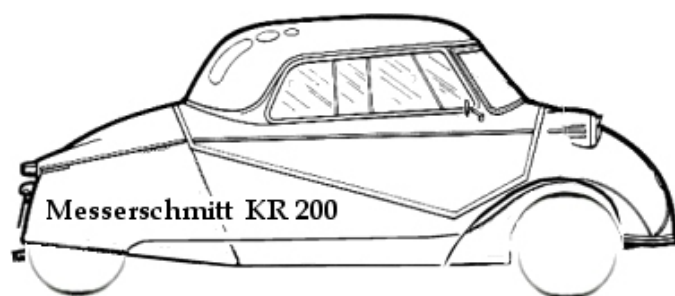
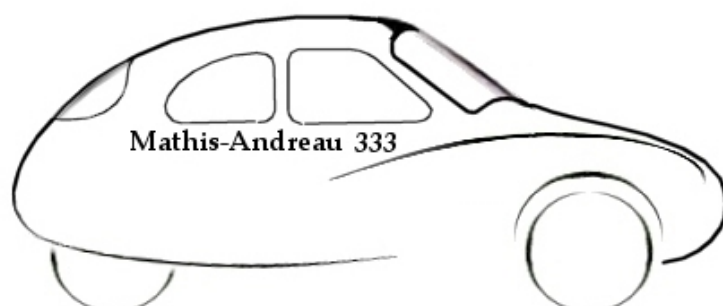
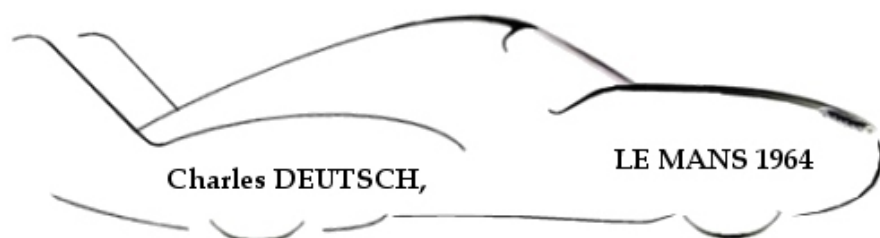
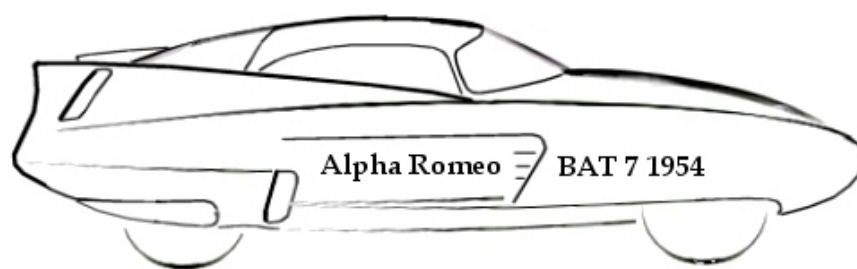
Matthieu BARREAU & Laurent BOUTIN



Illustrations de Sébastien EXTIER et de Matthieu BARREAU

V4-©-juin 2008

Avec la collaboration de Jean ANDREAU, membre d'honneur, posthume de fait, d'INTER ACTION



AU SUJET DE L'ART DU CONCEPTEUR.

Dans l'article qui suit, nous nous efforçons d'appliquer des méthodes rationnelles de conception au problème de l'économie d'énergie dans les transports routiers. Il nous a donc paru utile de rappeler les grandes lignes de « l'art du concepteur ».

L'Art du concepteur, c'est l'**Art d'adapter les moyens aux fins**.

Les moyens étant de fait limités, cet Art consiste à accommoder les restes (comme en cuisine).

Nous énonçons ci-dessous les dix commandements du concepteur qui devraient être placardées dans tous les bureaux d'études.

● Le concepteur doit être capable de rédiger un **cahier des charges** rationnel, d'identifier les **critères d'évaluation** d'une solution sans oublier l'**effet d'échelle** :

« Il n'y a pas de bons ou de mauvais principes, mais seulement des solutions adaptées à un contexte ».

● Ce qui distingue un bon concepteur d'un autre, c'est l'**art de simplifier** plutôt que de complexifier, *i.e.* le goût de la simplification :

« Tout ce qui n'est pas absolument nécessaire est inutile ! »

« Un bon ingénieur résout un problème en le supprimant ! »

« Il est simple de faire compliqué mais difficile de faire simple ! »

« La perfection est atteinte lorsqu'il n'y a plus rien à enlever. »

● Le bon concepteur doit posséder une **large culture technique & historique**. L'étude des échecs passés est toujours enrichissante :

« Personne n'est inutile, au pire, il sert de mauvais exemple ».

« On ne vient pas de nulle part et il serait souhaitable que l'on n'aille pas n'importe où ! »



RÉFLEXIONS SUR L'ÉNERGÉTIQUE DES VÉHICULES ROUTIERS

1. INTRODUCTION

1.1 NECESSITE DU TRANSPORT

Contrairement aux plantes qui reçoivent et convertissent l'énergie solaire directement, les animaux (les hommes en faisant partie) doivent se déplacer pour aller chercher leur énergie, là où elle est.

Dans tous les cas, les êtres vivants doivent stocker de l'énergie pour vivre :

- entre les périodes d'ensoleillements pour les plantes ;
- entre les repas pour les animaux.

Le déplacement est donc une mission vitale pour les animaux, donc pour l'homme qui en fait toujours partie, aux dernières nouvelles.

Mais il ne faut pas que ce déplacement coûte plus en énergie que l'énergie récupérée grâce au déplacement.

Or, la dépense énergétique de certains hommes pour aller chercher leur énergie (en clair : aller au supermarché en voiture), est phénoménalement élevée, dans ces pays qu'on dit développés.

1.2. FORMES D'ENERGIES UTILISEES

La maîtrise de l'énergie est donc fondamentale, spécialement celle de son stockage, "pour passer l'hiver". La création des systèmes de transport ou de stockage de l'énergie est consécutive à la nécessité, pour un être vivant, de disposer de cette énergie à tout moment, même pendant la pire des mauvaises saisons.

Réglons tout de suite la question du moyen de stockage d'énergie. Lorsqu'il faut transporter son énergie, le critère fondamental pour le choix du moyen de stockage est donc la « densité » de stockage de l'énergie, massique et volumique : la quantité d'énergie contenue par kilogramme ou par mètre cube de moyen de stockage.

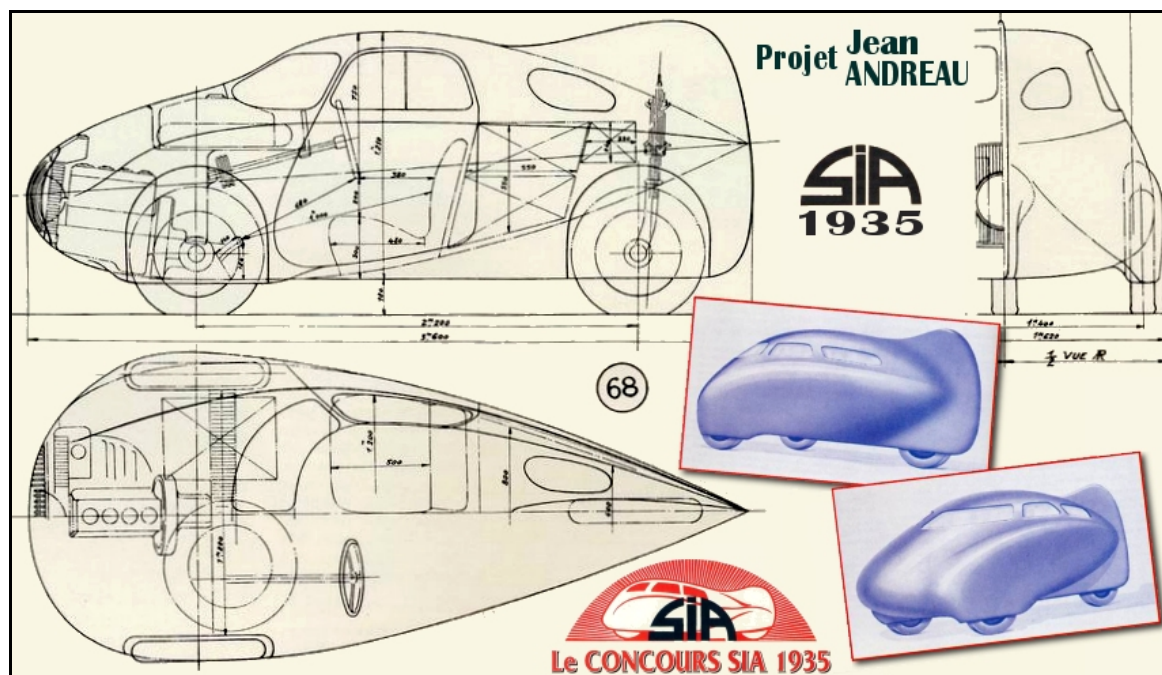
Comparons donc les énergies massiques des différents moyens de stockage (cf. Tableau page 5).

L'étude attentive de ce tableau permet d'éliminer immédiatement le stockage exclusif d'énergie dans des accumulateurs électriques chimiques (batteries) pour les véhicules d'autonomie moyenne (500 à 1000 km). En effet, là où un véhicule au pétrole nécessitera une cinquantaine de kilogrammes de carburant pour faire 1000 km (7 litres au 100 km, densité de l'essence 0,7), un véhicule électrique remorquera (au premier ordre) cinquante à cent fois plus de masse (2500 à 5000 kg) de batterie pour faire la même chose. Evidemment, le remorquage de cette masse de batterie nécessitera un moteur plus puissant; donc une consommation d'énergie supérieure et encore plus de batterie.... (pour une mission d'autonomie réduite, cela peut être envisageable – transpalettes industriels, véhicules urbains, vélos...).

Le couple hydrogène / oxygène n'amène pas de progrès significatifs pour l'instant et le rendement global de la chaîne production / consommateur ne concurrence pas encore les énergies comme le pétrole. De toutes façons, les difficultés liées au stockage entraînent soit des problèmes de sécurité, soit des problèmes de sur masses. De plus les neuf dixièmes de l'hydrogène produit proviennent du pétrole !

La seule forme d'énergie utilisable concrètement, à la suite de millions d'années d'essais/erreurs, par les êtres vivants est celle de la chimie des composés hydrogénés du carbone (les huiles et les sucres). Cette chimie est tellement importante qu'elle fait l'objet d'une branche spéciale de la chimie : la chimie organique.



Il se trouve que, compte tenu de l'exceptionnelle densité de stockage de l'énergie de ces composés hydrogène-carbonés (40 MJ/kg environ – on rappelle qu'un joule représente l'énergie qu'il faut dépenser pour soulever sur Terre d'un mètre une masse de 100 grammes, une pomme quoi !), tous les véhicules (hommes, animaux, voitures, avions, etc.), utilisés par l'homme pour l'assister dans la mission de transport utilisent ce type d'énergie.



Le projet Andreau de 1935, premières esquisses de la Mathis-Andreau 333

Tableau comparatif des moyens de stockage d'énergie pour les transports

L'air est choisi comme carburant le cas échéant et n'est pas inclus dans le bilan de masse.

Symboles	Type de stockage	Energie massique E_m [MJ/kg] (1)	Densité énergétique brute comparée au pétrole (2)	Rendement de stockage (3)	Rendement de conversion en énergie mécanique (4)	Energie mécanique massique restituée Em_m [MJ/kg] (5)	Masse de moyen de stockage comparée au pétrole [kg] (6)	Commentaires
	Nucléaire (fission)	4 000 000	95 238	?	35%	1 400 000	2,9E-07 (7)	Évidemment sans compter les blindages "civils" nécessaires. La sécurité n'est pas un problème car les centrales sont implantées dans des pays où le coût de la vie humaine est élevé. Le problème des déchets est donc assez bien maîtrisé. Le vrai problème du nucléaire c'est le pari sur le niveau technique des générations futures....Nos descendants seront ils aussi bon techniciens que nous ?
	Hydrogène H2	120	2,86	50% liquéfié (8) 70% comprimé	45% (9)	0,53 0,74	24 17	Rendement global moyen de la chaîne de production, stockage difficile, réservoirs lourds (60 fois la masse du H2 contenu) et très encombrants du fait de la masse volumique de l'hydrogène. De plus l'hydrogène est produit majoritairement à partir de pétrole !
	Pétrole et huiles	42	1	99% (10)	30%	12,6	1	De très loin la plus pratique des énergies (d'où son utilisation par tous les êtres vivants). Mais ressources économiquement accessibles bientôt limitées.
	Accumulateurs électriques chimiques (batteries)	0,1 < E_m < 0,5 Plomb acide Li-ion LiPo	1/100	70%	70% - 90%	0,2	56	Recyclage très coûteux et très polluant, nombre de charges limité (coût d'amortissement élevé), assez mauvais rendement de charge/décharge. Avantages pour les véhicules légers de faible autonomie car bénéficie dans ce cas d'un effet d'échelle favorable.
	Chaleur avec changement de phase	0,3	1/140	95%	30%	0,086	147	L'utilisation des changements de phase multiplie par un facteur dix l'énergie stockée et permet en augmentant les températures d'améliorer les rendements de conversion en énergie mécanique.
	Cinétique	0,036	1/1200	95%	95%	0,032	388	Rendement de charge/décharge excellent.
	Gaz comprimés			70%	70%	0,018	714	Mauvais rendement de charge/décharge par perte de la chaleur de compression, réservoirs lourds.
	Chaleur sans changement de phase	0,03 (par kg d'eau à 80°)	1/1400	95%	10%	0,0029	4421	Des cycles mixtes avec détentes partielles et réchauffes intermédiaires permettent d'améliorer un peu les capacités de stockage d'énergie. L'eau, très bon caloporteur, est handicapée par sa faible température maxi en phase liquide, même sous forte pression.
	Supercapacités	0,02	1/2100	50% - 90 %	90%	0,0126	1000	Pas très intéressantes en terme de capacité de stockage, mais intéressantes en nombre de cycles, les supercapacités peuvent permettre d'améliorer les durées de vies de batteries en lissant les consommations.
	Mécanique (ressort)	0,0036	1/11666	95%	>95%	0,0032	3938	très faible capacité de stockage, mais grande fiabilité et grande simplicité d'utilisation.
	Gravité	$1/10000 < E_m < 3/1000$ 10 Joules / mètre / kg	1/4200000	95%	95%	0,0026	4846	Capacité de stockage très faible et difficilement utilisable sur un véhicule.

(1) Energie massique : Quantité d'énergie techniquement accessible contenue par kilogramme d'élément de stockage.

(2) Comparaison des énergies massiques avec le pétrole.

(3) Par rendement de stockage / destockage il faut comprendre le rapport entre l'énergie récupérée du système de stockage et l'énergie que l'on y a introduit initialement.

(4) L'énergie mécanique étant au final la seule utilisable sur un véhicule il est intéressant de comparer les rendements de conversion des énergies brutes en énergie mécanique.

(5) Produit de la l'énergie massique (1) par le rendement de stockage/destockage (3) et par le rendement de conversion en énergie mécanique (4). Quand la masse du réservoir n'est plus négligeable devant la masse du stockeur d'énergie (nucléaire, hydrogène), on introduira un "rendement de réservoir".

"efficacité massique de réservoir" = $1 / (1 + \text{masse réservoir}/\text{masse combustible}) = 1 / (1 + \text{masse réservoir spécifique})$

(6) Masse de moyen de stockage nécessaire pour contenir la même énergie mécanique restituée qu'avec un kilogramme de pétrole.

(7) Cette valeur est calculée sur la base des meilleurs dispositifs de stockage développés pour les applications de propulseurs NEPA (Nuclear Energy for the Propulsion of Aircraft) 30 kg d'isolation par kg d'Uranium.

(8) La liquéfaction de l'hydrogène permet, en augmentant considérablement la masse volumique de ce dernier, de regagner une partie de ce que l'on a perdu pour le liquéfier.

(9) Les rendements pris en compte sont ceux des piles à combustibles (50%) couplées à des moteurs électriques (90%).

(10) Dans le cas des carburants fossiles, ce tableau ne tient pas compte du rendement de stockage de Dame Nature.

Pour les huiles végétales, ce rendement assez faible (1 à 10%) doit évidemment être pris en compte.

1.3 NECESSITE PHYSIQUE DE L'ECONOMIE D'ENERGIE

Les sciences et les techniques, quand elles ne sont pas des dogmes, doivent être envisagées avec le doute comme tâche de fond permanente. Comme il faut bien se reposer sur une fondation minimale, il est d'usage de considérer la conservation de l'énergie comme fait acquis, même en Physique moderne.

La vision énergétique globale d'un système est aussi une nécessité pratique de tous les jours, parce que :

- C'est la seule où l'on ne se trompe pas trop dans un calcul (On manipule des simples quantités et non pas des vecteurs).
- On est à peu près certain du résultat (conservation de l'énergie).
- L'énergie est le seul paramètre important universel, elle représente un coût généralisé d'existence.

Sortons donc du dogme tout puissant : la Terre étant un système fermé, ne recevant qu'une quantité finie d'énergie de la part du soleil (et d'autres corps célestes, rayons cosmiques, météorites), le flux d'énergie est donc fini. Il est donc vital que toute dépense d'énergie soit limitée.

Pour se rendre compte du gaspillage éhonté de nos sociétés "développées", comparons immédiatement ce que consomme un véhicule léger et un être humain. Cette comparaison est justifiée parce qu'ils consomment le même type d'énergie, à savoir les composés hydrogénés du carbone (pétrole, huiles), qui sont la partie centrale du cycle de la vie sur Terre. On appelle cela cycle du carbone / hydrogène.

La puissance moyenne sur une année consommée par un véhicule automobile est d'environ 1,3 kW (puissance moyennée sur une année, correspondant à environ 20000 km et une consommation totale de 1000 kg de pétrole¹). On ne compte pas dans cette dépense énergétique celle qu'il faut pour fabriquer, distribuer, entretenir, assurer, détruire le véhicule, le long de sa durée d'exploitation. Cette dernière dépense, difficile à chiffrer, peut être évaluée en considérant la dépense financière d'un véhicule, statistiquement :

- un tiers de carburant,
- un tiers d'entretien,
- un tiers de frais fixes et d'amortissement.

Si l'on admet que coûts et dépense énergétique sont liés, la puissance moyenne d'un véhicule passe alors à 4 kW.

D'après les expériences de la chambre de Bénédict (un genre de calorimètre géant avec mesures précises des échanges thermiques et énergétiques), un être humain, en moyenne, au cours d'une année complète (pour tenir compte des variations saisonnières) consomme environ 75 W. Cette valeur est bien entendu sujette à de fortes variations, suivant que l'on est du Belgistan oriental ou des États-Unis suisse-monégasques, sédentaire ou nageur(euse) est-allemand(e).

Pour se fixer les idées, on peut arrondir à une centaine de Watts, car il est plus probable que rouler porte plus préjudice alimentaire à un activiste bélouchistanais borgne, noir, aveugle, maigre, et dentiste qui vit en dessous des besoins énergétiques évalués par l'OMS qu'à une personne plus favorisée sur la planète. Pour simplifier la suite du texte, on appellera "epsilon moins", sans pensée péjorative, la personne qui souffre de la faim, plus ou moins directement par l'existence du gaspillage énergétique dû à la personne qu'on appellera "alpha plus", sans pensée péjorative également².

¹ Pmoy = Energie consommée / temps mis à la consommer = $(42.10^6 \text{ J} \times 1000 \text{ kg}) / (365 \text{ jours} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ secondes}) = 1,3 \text{ kW}$

² En référence bien sûr au génial roman d'anticipation d'Aldous HUXLEY : "Le Meilleur des Mondes".

À noter que M. Jean-Marc JANCOVICI dans son excellent ouvrage « Le plein s'il vous plaît » (réf. en fin d'article) propose l'appellation « équivalent esclave » qui nous semble encore plus pertinente.

La disparition programmée des ressources en pétrole³ n'est pas un problème en soi (sauf pour l'industrie des plastiques) car ces carburants sont aisément remplaçables par des huiles⁴. Mais les huiles, produites par l'agriculture, nécessitent de grandes étendues de terres cultivables. La production de carburants « bio » se ferait donc au détriment des cultures alimentaires.

Le flux d'énergie étant donc fini, et la population mondiale étant ce qu'elle est, se posera à un moment donné (plus rapidement que l'on croit) le choix : manger ou rouler ?

Pour le moment, le choix est fait : "alpha plus" roule et mange trop et « epsilon moins » crève de faim et marche péniblement pour ramasser son grain de riz quotidien, largué d'avion par des organisations qui ont le mérite d'exister (et qui servent le plus souvent à régler la "problématique psychologique" de ses bénévoles).

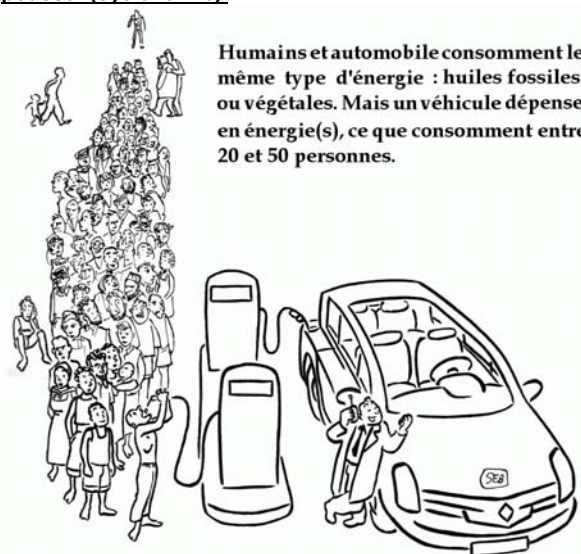
On peut comparer l'économie mondiale à une sorte de réfrigérateur, qui pompe des calories (des ressources) d'un endroit froid (pauvre) et qui les transporte vers un endroit plus chaud (riche).

La question fondamentale de l'économie d'énergie se pose, non pour des raisons morales (on peut toujours en discuter, la morale étant toujours élastique dans ce Monde) mais pour des raisons physiques "bêtes", par le côté fini des quantités : ceci est indiscutable.

Physics don't lie ! (Les faits sont têtus).

Accessoirement, le fait de brûler un carburant à cycle non fermé (fossile) consomme l'oxygène qui aura été fourni par les plantes depuis 200 millions d'années. Ce qui nous ramènera inmanquablement à l'atmosphère primitive.

Règle élémentaire : il faut que le meuble en bois dure au moins le temps qu'il faut à l'arbre dont il est issu pour pousser (cycle fermé).



Humains et automobile consomment le même type d'énergie : huiles fossiles ou végétales. Mais un véhicule dépense en énergie(s), ce que consomment entre 20 et 50 personnes.

³ Il en reste forcément encore beaucoup car la disparition totale des composés carbonés fossiles signifierait le retour à l'atmosphère primitive à base de CO₂ et la disparition de la vie animale sur Terre. Rappelons que le pétrole provient indirectement du carbone stocké par les plantes grâce à la photosynthèse. Ce que l'on annonce comme la fin du pétrole est en fait la fin du pétrole exploitable à des coûts raisonnables.

⁴ Monsieur B. fait fonctionner sa voiture sur piste privée depuis un certain temps avec un mélange d'huiles végétales et de pétrole avec succès. De même pour les Panzer divisions de la Wehrmacht en 39 – 45 avec les carburants de synthèse. Il est intéressant de comparer le prix hors taxes du pétrole et de l'huile végétale. Pour l'instant, l'huile végétale coûte environ cinq fois plus cher que le pétrole. Les carburants « bio » deviendront donc « rentables » lorsque le pétrole aura quintuplé de prix !

2. PROBLEMATIQUE DE LA MISSION DE TRANSPORT

La définition du besoin strict en ce qui concerne la mission de transport et l'optimisation énergétique est impossible par des méthodes analytiques classiques. Ces dernières conduisent systématiquement à des raisonnements de type mono factoriels qui obèrent l'avantage initial.

EXEMPLES :

- Vision « motoriste » : on augmente le rendement du moteur par augmentation du taux de compression donc de la masse, etc.
- Vision « pouvoirs publics » : pot catalytique, masse, pollution métaux lourds, coût.
- Vision « verts » : on interdit les voitures !
- Vision « constructeurs » : on diminue le coût de production au détriment s'il le faut, du coût d'utilisation.
- Vision « consommateurs » : épater ses voisins par la taille de sa... voiture.

Toutes ces visions non globales aboutissent au même résultat : l'augmentation des coûts, du taux de nuisances, etc.

2.1 UTILITE D'UNE METHODE GLOBALE.

Dans l'étude d'un moyen rationnel de transport il convient de sortir des dogmes et des préjugés : "Il n'y a pas une seule solution mais toujours une solution adaptée à une mission".

La conception rationnelle d'un moyen de transport impose l'emploi d'une méthode de travail qui appréhende le problème dans sa globalité.

Le seul inconvénient fort modeste de la méthode globale est que le démarrage des itérations doit se réaliser à l'aide de données initiales. Mais on peut facilement les obtenir par des méthodes statistiques (méthode dite de l'« objet de référence »).

La première chose à faire est donc de définir cette mission, le plus précisément possible.

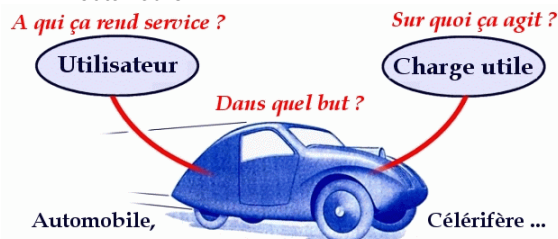
2.2 REDACTION DU CAHIER DES CHARGES : L'ART DE SE POSER LES BONNES QUESTIONS

Nous prendrons dans la suite du document, pour l'illustrer et le chiffrer, un exemple courant de véhicule, et nous nous efforcerons de le définir en respectant les nécessités évoquées en introduction.

"Ce qui se conçoit bien s'énonce clairement !" ⁵

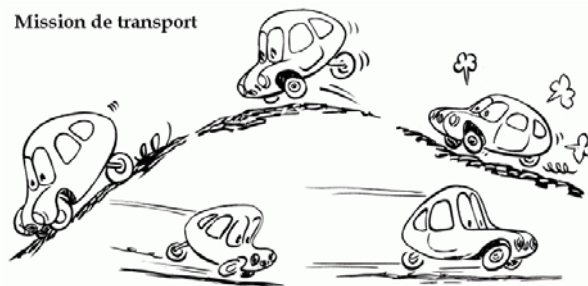
Rédiger un cahier des charges consiste à définir la mission à remplir, à se poser les bonnes questions. Il faut toujours commencer par identifier la mission principale du système de transport, en répondant aux questions :

- À qui l'automobile rend service ?
- Sur quoi cela agit ?
- Dans quel but, autrement dit à quoi sert une automobile ?



⁵ "Ce qui se conçoit bien s'énonce clairement et les mots pour le dire arrivent aisément !" Boileau.

Mission de transport



La mission (énergétique) d'une automobile est de transporter une charge utile sur une distance donnée à une certaine vitesse et au moindre coût et dans des conditions de sécurité et de nuisances acceptables.

"Si cela va sans dire, cela ira encore mieux en le disant."⁶

La définition et la caractérisation précise de cette mission au moyen de **critères objectifs de qualité chiffrés** constituent le cahier des charges. Ce cahier des charges peut être rédigé à objectifs fixés ou à moyens fixés.

Ce qui suit constitue un exemple de cahier des charges. Nous avons listé et chiffré un certain nombre de critères

- Masse à transporter (masse utile : m_u) : 400 kg de personnes et de bagages + pétrole, dans un volume convenable. Véhicule 2+2 (2 grandes places pour deux adultes plus deux petites places pour deux enfants, ou deux adultes plus bagages).
- Masse à vide opérationnelle aussi faible que possible.
- Rapport Masse à vide/Masse max $\leq 0,55$ (valeur issue de l'état de l'art).

- Faibles coûts globaux : achat, entretien, consommation, réparations.

- Performances à la charge maximum : 1000 m d.a. en moins de 40 s. Vitesse supérieure à 90 km/h sur une pente de 5 %, vitesse maximale limitée à 130 km/h.
- Autonomie moyenne supérieure à 2500 km.

- Qualités routières convenables (suspension, tenue de route, direction, freinage).
- Respect des règlements à venir (en particulier émissions polluantes).
- Bruit diminué d'au moins 3 db par rapport aux bons véhicules actuels.
- Fréquence d'utilisation : jusqu'à 16 heures par jour.
- Toutes les données de durée de vie, de M.B.O., d'entretien et de réparation doivent être meilleures que celles en usage courant. Aucune immobilisation n'est tolérable pendant la durée de vie, mis à part les indispensables opérations courantes d'entretien. L'entretien doit pouvoir être assuré par un personnel normal d'entretien de véhicules, pour un coût aussi faible que possible.

- Autres desiderata : confort à bord aussi élevé que possible, compte tenu des conditions d'emploi : ventilation efficace de la cabine, chauffage, climatisation.
- Sièges adaptables, silence intérieur et extérieur. Instrumentation standard issue d'études ergonomiques convenables. Visibilité extérieure aussi complète que possible.
- Choix des matériaux : la très grande majorité des matériaux devra être recyclable.

La mission étant définie, l'art de l'ingénieur consiste à bien choisir les critères objectifs d'évaluation des solutions possibles. On remarquera qu'une étude énergétique du système automobile permet d'identifier et de pondérer ces critères.

⁶ Phrase historique prononcée au Congrès de Vienne - 1814 par Talleyrand.

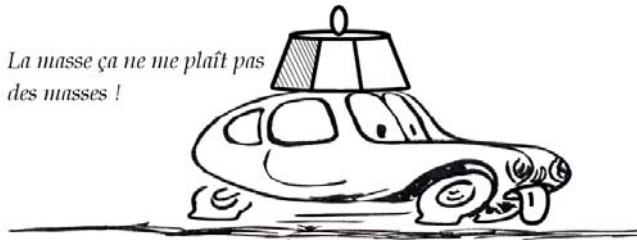
3. REFLEXIONS SUR LA PUISSANCE MOTRICE DES VEHICULES ROUTIERS.

3.1 DETERMINATION DE LA PUISSANCE MOTRICE MINIMALE NECESSAIRE A L'AVANCEMENT

Gardons en permanence à l'esprit que l'automobile est en contact avec la route et qu'elle évolue dans un fluide visqueux, l'air. Pour progresser, l'automobile doit vaincre les résistances suivantes :

LA TRAINEE DE ROULEMENT.

*La masse ça ne me plaît pas
des masses !*



Le poids, un problème de masse ; la masse, un problème de poids !

$$T_{\text{roul}} = C_{rr} \cdot m \cdot g \text{ [N]}$$

Avec :

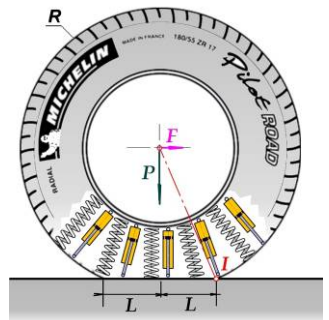
- C_{rr} :** Coefficient de résistance au roulement, [-]
Pneu/route $6/1000 \leq C_{rr} \leq 12/1000$
- m :** masse du véhicule, $m = m_v + m_u$ [kg] avec :
 m_v : masse à vide ; m_u : masse utile
- g :** Accélération de la pesanteur [m/s²]
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ N/kg}$

Cette traînée provient de la **déformation non élastique** (i.e. avec hystérésis) des pneumatiques au contact du sol. Elle est directement proportionnelle au poids, donc à la **masse** du véhicule. C'est la contrepartie à payer pour pouvoir avancer en utilisant l'adhérence que procure le contact avec le sol.

Le coefficient de résistance au roulement est d'autant plus grand que la déformation - **non élastique** - du pneu sera grande, son rayon petit et les pertes par frottement visqueux dans le matériau importantes (par exemple, le caoutchouc dissipe de l'énergie sous forme de chaleur quand on le déforme).

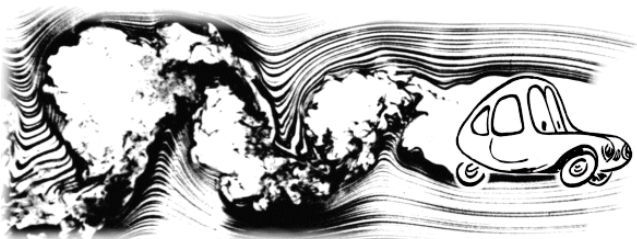
Ce qui explique pourquoi les vélos ont de grandes roues aux pneus gonflés sous forte pression.

- Pneu auto/route
 $6/1000 \leq C_{rr} \leq 12/1000$
- Pneu vélo/route
 $5/1000 \leq C_{rr} \leq 8/1000$
Pneu Compétition vélo/route
 $3/1000 \leq C_{rr} \leq 5/1000$
- Roue de train/rail
 $C_{rr} = 1/1000$



LA TRAINEE AERODYNAMIQUE

$$T_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_f \cdot C_{xp} \text{ [N]}$$



L'automobile joue les filles de l'air !

Avec :

- ρ :** Masse volumique de l'air [kg/m³] ;
On prendra $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ au niveau de la mer.
- V :** vitesse en m/s de l'auto [m/s] ;
- S_f :** Surface frontale projetée de l'auto [m²] ;
- C_{xp} :** Coefficient de traînée de pression référencé à la surface frontale [-].

Cette traînée aérodynamique provient du fait que l'auto se déplace dans un fluide visqueux : l'air.

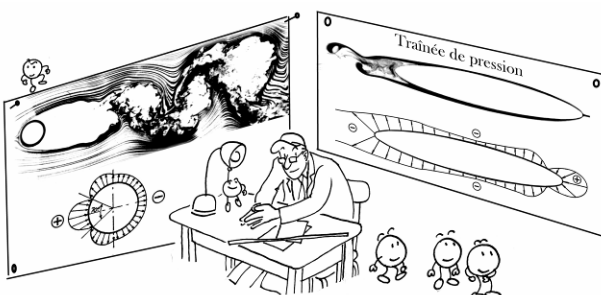
La traînée aérodynamique se scinde en:

- Traînée de pression :
Si l'objet est parfaitement caréné, l'impact du fluide sur celui-ci a pour conséquence la production de zones de surpression sur la proue ainsi que sur la poupe et de zones de dépression sur les flancs.
Les forces de pressions résultantes de ces surpressions et dépressions s'équilibrent, au culot de pression résiduel près. La traînée aérodynamique devient très faible et pratiquement égale au frottement visqueux de l'air sur les parois.

Malheureusement c'est très rarement le cas sur une automobile dont la traînée de culot est largement prépondérante.

Ces culots ne permettent pas aux lignes de courant de se rejoindre à l'arrière du véhicule. Cela entraîne une dépression sur la poupe à l'origine d'une forte traînée de culot qui produit un "ventousage" arrière très violent opposé au mouvement.

- Traînée de frottement visqueux :
Traînée inévitable liée à la nature visqueuse de l'air. Cette traînée est beaucoup plus faible que la traînée de pression. Mais sur les automobiles, la composante de traînée de culot est largement prédominante.



Exemple de véhicule à l'aérodynamique correcte dessous, incorrecte dessus (décollement sur le toit).

LA COMPOSANTE DU POIDS PROJETEE SUR LA TRAJECTOIRE

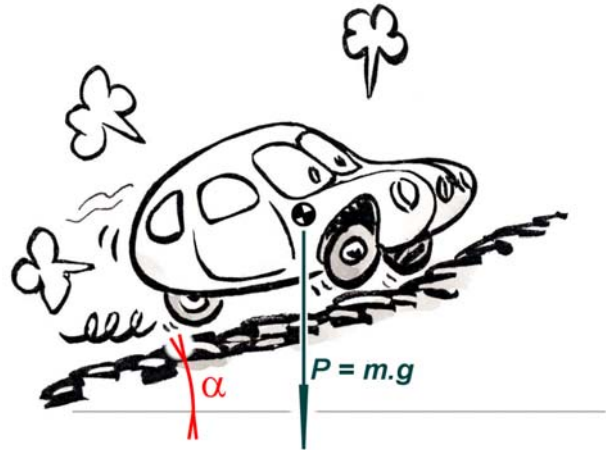
$$T_{\text{poids}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \approx m \cdot g \cdot \text{pente} \text{ [N]}$$

Avec :

- m : masse du véhicule, $m = m_v + m_u$ [kg]
- g : Accélération de la pesanteur [m/s^2] $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- α : angle de la pente [rad]

Cette composante du poids s'oppose à l'avancement en montée ou accompagne le mouvement en descente. Elle est directement proportionnelle à la **masse** du véhicule.

Comme la pente des rampes est toujours de faible valeur (10 à 15% max) on peut en première approximation assimiler le sinus de l'angle α à la tangente de l'angle α et donc à la pente.



LA COMPOSANTE LIEE A L'INERTIE DU VEHICULE

$$F_{\text{acc}} = m \cdot \Gamma \text{ [N]}$$

Avec :

- m : masse du véhicule, $m = m_v + m_u$; [kg]
- Γ : Accélération de l'auto [N/kg ou m/s^2]

L'inertie caractérise la tendance d'un objet à rester dans son état d'équilibre au repos ou à vitesse constante. Plus la masse est importante, plus l'inertie à vaincre est grande pour modifier l'état d'équilibre.

La composante de résistance à l'avancement liée à l'inertie dépend donc de la **masse** du véhicule et de l'accélération.



Les puissances consommées par ces différentes résistances à l'avancement se calculent très simplement en faisant le produit (scalaire) de la force concernée par la vitesse d'avancement. On obtient ainsi :

DEUX COMPOSANTES DE PUISSANCES DISSIPATIVES

$$\underbrace{C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot V}_{\text{Puissance de roulement}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S_f \cdot C_x}_\text{Puissance aérodynamique}$$

Puissance dissipée par la résistance au roulement et puissance dissipée par les frottements aérodynamiques. Ces deux puissances représentent le coût énergétique minimal pour l'avancement à vitesse constante sur le plat ($\alpha = 0$).

Il n'est pas possible de réduire la consommation d'énergie en deçà de la valeur plancher définie par la somme des puissances de roulement et aérodynamique.

On remarquera que l'une dépend de la **masse** et l'autre de la qualité aérodynamique de la carène de l'auto.

DEUX COMPOSANTES DE PUISSANCES CONSERVATIVES

$$\underbrace{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot V}_{\text{Puissance de la composante projetée du poids}} + \underbrace{m \cdot \Gamma \cdot V}_{\text{Puissance pour l'accélération}}$$

Insistons sur le caractère « conservatif » des puissances consommées par le poids et par l'inertie. Ces puissances peuvent être soit motrices (descente, décélération) soit résistantes (montée, accélération).

Si l'on pouvait emmagasiner l'énergie fournie par le poids ou l'inertie lors d'une phase motrice (descente, décélération) pour la restituer lors de la phase résistante suivante (montée, accélération), on pourrait supprimer, au rendement de l'opération près, l'énergie consommée par ces deux puissances.

Malheureusement, ces puissances sont actuellement dégradées sous forme de chaleur dans les systèmes de freinage.

On remarquera enfin que l'une et l'autre dépendent de la **masse**.

En considérant que l'on étudie un véhicule qui roule à vitesse constante sur une route horizontale, on peut déterminer la puissance minimale nécessaire à l'avancement.

On utilise pour cela l'une des grandes lois de la Physique sur la conservation de l'énergie qui stipule que la somme des puissances motrices et résistantes appliquées au véhicule est nulle lorsque l'auto est à l'équilibre (vitesse constante).⁷

⁷ Pour être précis il s'agit du théorème de l'énergie puissance. La somme des puissances des forces extérieures et des forces intérieures fournies et/ou dissipées par un système est égale à la variation (dérivée par rapport au temps) de l'énergie cinétique. En régime permanent, à vitesse constante, l'énergie cinétique est constante donc sa dérivée est nulle et la puissance motrice est dissipée entièrement par les puissances des forces dissipatives (frottements aérodynamiques et résistance au roulement).

3.2 EQUATION FONDAMENTALE DE L'ENERGETIQUE DE L'AUTOMOBILE :

EQUATION FONDAMENTALE DE L'ENERGETIQUE DE L'AUTOMOBILE EN CROISIERE SUR SOL PLAT A VITESSE CONSTANTE :

$$\sum P_{\text{puissances}_{\text{fext}}} = 0 \quad \text{d'où} \quad P_m \eta_t - C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot V - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S_f \cdot C_{x_p} = 0$$

Avec

P_m : Puissance fournie par le moteur. [W]

η_t : Rendement de la transmission mécanique. [-]

C_{rr} : Résistance au roulement. [-] $C_{rr} \approx 12/1000$

m : masse du véhicule, $m = m_v + m_u$ [kg]

g : Accélération de la pesanteur = 9,81 [m/s²]

ρ : masse volumique de l'air [kg/m³];

V : vitesse de l'auto ; [m/s]

S_f : surface frontale. [m²]

C_{x_p} : Coefficient de traînée de pression référencé à la surface frontale. [-]

α : Angle de la route par rapport à l'horizontale. Sol plat : $\alpha = 0$ [rad]

Γ : Accélération de l'auto [m/s²] ou [N/kg]

$$\underbrace{P_m \cdot \eta_t}_{\text{Puissance motrice utile}} = \underbrace{C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot V}_{\text{Puissance dissipée par le roulement}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S_f \cdot C_{x_p}}_{\text{Puissance dissipée par l'aérodynamique}}$$

EQUATION FONDAMENTALE DE L'ENERGETIQUE DE L'AUTOMOBILE (CAS GENERAL)

$$P_{\text{mot}} = \frac{1}{\eta_t} \left(\underbrace{C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot V}_{\text{Puissance des résistances au roulement}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S_f \cdot C_{x_p}}_{\text{Puissance des résistances aérodynamiques}} + \underbrace{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot V}_{\text{Puissance de la composante du poids}} + \underbrace{m \cdot \Gamma \cdot V}_{\text{Puissance pour l'accélération}} \right)$$

3.3 REMARQUES FONDAMENTALES

MINIMISER LA MASSE !!!

- La **masse** intervient dans trois des quatre résistances à l'avancement. Il convient donc avant tout de minimiser les masses des systèmes de transport pour minimiser leur consommation énergétique. La conception légère peut être approchée de deux manières : faire des éléphants moins lourds (c'est ce qu'essayent de faire les constructeurs automobiles avec une masse moyenne des voitures quatre places de 1200 kg à vide !) ou arrêter définitivement de faire des éléphants et commencer à faire des gazelles.

Coupons immédiatement court à une idée reçue bien répandue partout : ce n'est pas l'amélioration technologique qui décide de la qualité massique d'une automobile, mais beaucoup plus le jus de cervelle⁸ des ingénieurs/dessineurs⁹ en charge du projet.

Les gains possibles, statistiquement, sont, dans l'ordre hiérarchique :

- le bureau d'études à hauteur de 70% du gain possible ("le jus de cervelle").
- les procédés de mise en oeuvre et de fabrication pour environ 20%.
- les matériaux pour 10%.

Traduit en français, cela signifie :

- qu'il ne faut pas rêver d'un matériau "miracle" (même à Lourdes) ;
- que gratter partout pour alléger une auto est plus efficace que rêver d'un matériau miracle ;
- qu'embaucher des concepteurs dignes de ce nom, des "dessineurs" est encore plus efficace¹⁰.

SOIGNER L'AERODYNAMIQUE !

- La puissance consommée par les traînées aérodynamiques est une fonction cubique de la vitesse, elle ne devient donc importante qu'à haute vitesse (en gros au delà de 60 km/h). Le concepteur ne peut agir que sur le couple **Sf.Cx_p** pour minimiser la traînée aérodynamique.

ADAPTER LA PROPULSION !

- L'adaptation du moteur au véhicule donc à la mission permet de le faire travailler au mieux. Point besoin de 100 kW lourds là ou 20 kW légers suffisent.

⁸ Expression reproduite avec l'aimable autorisation de Franck Marodon (Nuke pour les intimes).

⁹ Expression de M. René Loire, auteur de l'excellent : "Le Dessineur d'abord". Ce terme de « dessineurs » est une tentative de traduction de l'expression anglaise « designer » qui désigne tout à la fois le concepteur, le styliste, etc De plus, il y a l'idée du dessin en tant que cahier des charges.

¹⁰ On verra plus loin dans l'article, dans les paragraphes consacrés à la Mathis 333 et à son génial concepteur Jean Andreau, comment gagner de la masse avec du jus de cervelle.

3.4 PETITE HISTOIRE DE L'AÉRODYNAMIQUE DES AUTOMOBILES.

L'historique de l'aérodynamique des autos est fortement lié aux progrès de l'aéronautique mais surtout à la compréhension, par certains ingénieurs doués, des spécificités des écoulements autour de formes fuselées proches du sol.

DARWINISME AÉRODYNAMIQUE

Corps fuselé ($3 < L/D < 4$) en écoulement libre. Forme aérodynamique idéale selon Eiffel.



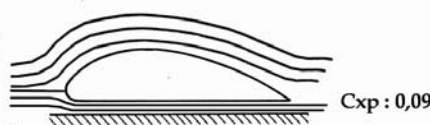
Près du sol, la variation trop brusque de la section du venturi constitué par la carène et la route engendre des décollements importants à l'origine d'une forte traînée.



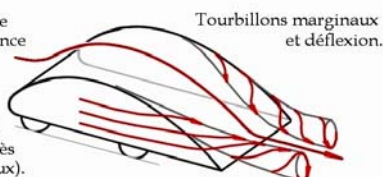
L'adoption d'une demi forme fuselée améliore sensiblement les choses, en particulier si l'on soigne les arrêtes vives qui peuvent être à l'origine de décollements aérodynamiques. Mais le carénage des passagers conduit à des épaisseurs trop importantes du profil ou à des longueurs de véhicule incompatibles avec leur utilisation.



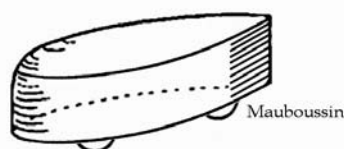
L'introduction des trains de roues engendre des traînées difficiles à éliminer qui viennent perturber l'écoulement à l'intrados de la carène.



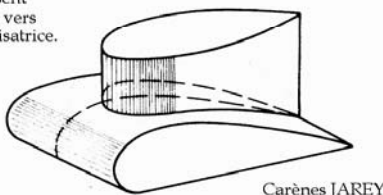
De plus, les carènes en forme d'aile horizontale engendrent une portance générée par la forme convexe de l'extrados. Cette portance déstabilise l'auto et rend précaire la tenue de route. En outre, la portance est à l'origine d'une traînée induite très importante. (Tourbillons marginaux).



Jarey le premier et Mauboussin ensuite prennent conscience des différents problèmes liés aux carènes horizontales (traînée d'interaction, induite par la portance et stabilité). Ils proposent d'abord une carène en forme de tronçon d'aile à profil biconvexe symétrique mais dont l'envergure serait verticale.



Devant les problèmes de stabilité de route Jarey et Mauboussin proposent un étagement des maîtres couples vers la poupe formant une dérive stabilisatrice.



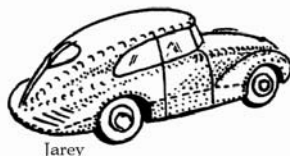
En jouant sur l'incidence de l'ensemble, on peut caler la carrosserie à l'incidence de portance nulle (traînée induite supprimée).

On se rapproche de la forme d'un berlingot, idéal en terme de traînée et de stabilité.

La synthèse de tous ces travaux se retrouve dans le dessin de la Mathis 333 de Jean Andreaud !



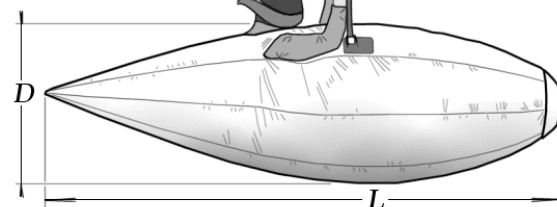
Cxp : 0,2



Nacelle de parapente gonflable dynamiquement
Luc Armand (2006)

(Dessin d'après photo M.B)

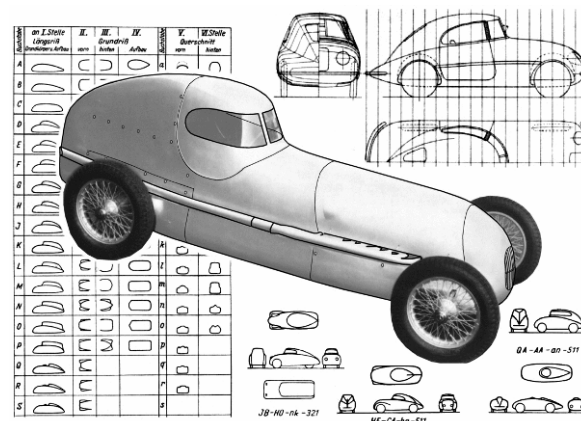
$L/D = 3,20$



Gustave Eiffel ayant démontré au début du siècle qu'un corps caréné de moindre pénétration dans l'air devait adopter une forme fuselée de proportions optimales (Rapport $L/D : 3,5 < L/D < 4$ avec un optimal proche de $L/D = 3,7$), les concepteurs ont commencés par essayer de caréner leurs autos à la manière des avions (cf. Ricotti, La Jamais contente, Vélo Torpille).

Mais Paul Jaray (1889 – 1974) le premier fit remarquer qu'un corps de moindre pénétration avait une forme différente suivant qu'il avait à se déplacer dans l'air ou à proximité du sol (L'aéronautique août 1922). En effet, à l'approche du sol, la traînée d'un corps fuselé augmente sensiblement par décollement de la couche limite (effet de divergent s'accompagnant d'une recompression brutale et de décollements de la couche limite).

L'idée de base expérimentée par Jaray et Klemperer lors d'essais systématiques dans la soufflerie du Comte Zeppelin à Friedrichshafen fut de créer des carrosseries profilées à la manière des ailes d'avion. Le gain fut important mais ces formes engendraient de la portance et donc de la traînée induite par la portance sous la forme de deux intenses tourbillons marginaux (bien visibles en automne sur les routes couvertes de feuilles mortes).



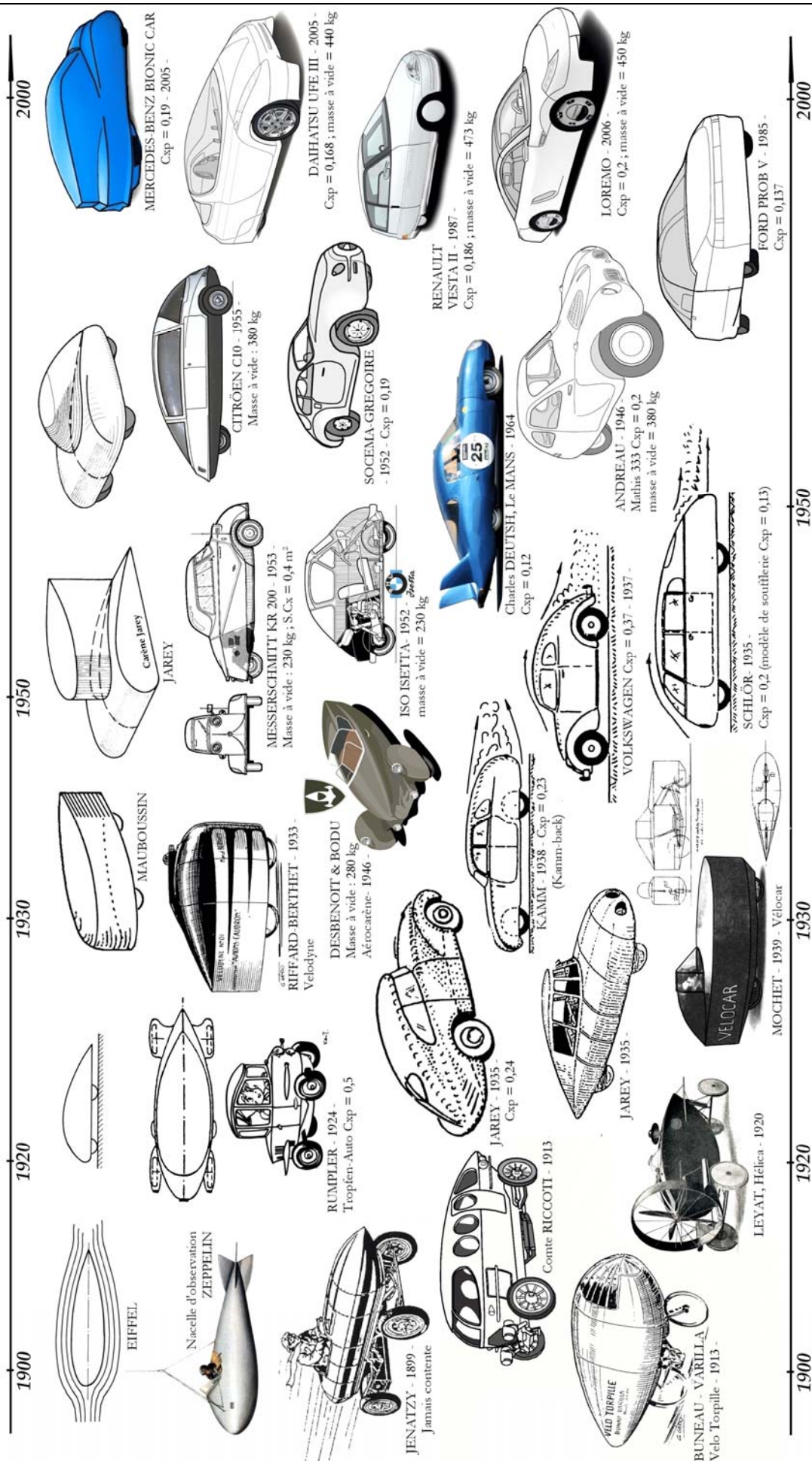
La W25 et des extraits des brevets des théories de Jaray pour améliorer l'aérodynamique et la stabilité de route des autos.

Mauboussin dans un article de L'aéronautique (N°174, Novembre 1933) fit part de ses travaux consistant à éliminer les principaux défauts de la carène Jarey (traînée induite et instabilité). Il proposa une carrosserie en forme d'aile verticale qui éliminait la traînée induite, puis un étagement des maîtres couples vers la poupe formant dérive stabilisatrice.

Cette évolution darwinienne conduisit les concepteurs à des formes en berlingot idéal en terme de traînée et de stabilité.

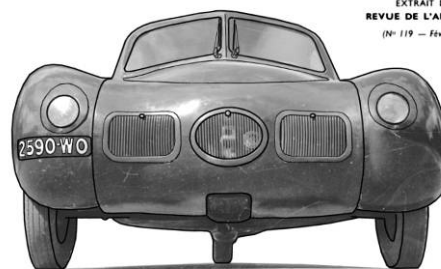
L'aboutissement de cette évolution se retrouve dans des véhicules comme la Mathis 333 ou la plus récente Daihatsu UFE III.

PANEL HISTORIQUE



4. L'AUTOMOBILE ECONOMIQUE : MOYENS D'Y REpondre !

EXTRAIT DE LA
REVUE DE L'ALUMINIUM
(N° 119 - Février 1946)



LA VOITURE MATHIS 333

4.1 MATHIS 333 - JEAN ANDREAU (1946).

Nous prendrons comme véhicule de départ de notre étude itérative l'un des rares véhicules qui soit issu d'une réflexion rationnelle et cohérente, et nous reproduisons ci-dessous des extraits de documents ayant présidé à la création de la Mathis 333 de Jean Andreau en 1946. Il est vrai que les conditions de crise de l'époque de création de ce véhicule étaient favorables à la réflexion.

Ce texte de plus de soixante ans reste un **modèle de cours de conception rationnelle**.

LE PROBLEME DE LA VOITURE ECONOMIQUE LEGERE

Par M. **Jean ANDREAU**, Ingénieur - Conseil

Conférence prononcée à la Société des Ingénieurs de l'Automobile, le 18 décembre 1946. « Le problème de la voiture économique légère ». Journal de la Société des Ingénieurs de l'Automobile ; N°3 mai - juin 1946, Tome XIX ; page 61.

CONSIDERATIONS GÉNÉRALES

COMMENT SE PRESENTAIT LE PROBLEME A L'ORIGINE : EN 1940 ?

A) Carburant. - Dans la première hypothèse, la question du carburant se présentait extrêmement mal car, à admettre qu'il y en ait eu, ce n'aurait été que des quantités infimes.

Dans la deuxième hypothèse, celle qui s'est heureusement réalisée, il apparaissait cependant que les approvisionnements seraient restreints, soit du fait des producteurs, soit du fait des acheteurs.

Dans tous les cas, il importait évidemment de tirer le maximum de services d'une quantité donnée. Les producteurs, en effet, ont pu mesurer le fleuve de carburant que nécessite une guerre moderne et, jusqu'à preuve du contraire, il peut être supposé que leurs propres besoins étant satisfaits, ils ne soient pas tellement désireux qu'on pourrait le croire de nous livrer des quantités illimitées.

Les consommateurs, dont nous sommes, sont obligés, en échange de ce carburant de fournir des produits ou de l'argent et, de toutes façons, du travail, qui vient en déduction de nos autres besoins élémentaires.

De sorte qu'il est sage de prévoir, pendant malheureusement un temps assez long, que nous ne disposerons que de quantités limitées.

B) Charbon. - Le charbon est en connexion avec le problème constructif. Pour l'acier, il faut du charbon : une tonne et demie pour une voiture acier de 1200 kg¹¹.

Il fallait donc se diriger vers des solutions nécessitant une quantité minimum de charbon - car il vaut mieux employer celui-ci pour les usages dans lesquels il est irremplaçable - en utilisant autant que possible des éléments disponibles chez nous.

Alors nous avons envisagé le bois contreplaqué moulé nous faible pression.

Avantages : la résistance mécanique est intéressante - la densité aussi - la réparation est facile la matière peut être facilement trouvée dans les bois indigènes ou dans les bois coloniaux - ils sont insonores.

Inconvénients - La fabrication n'avait pas encore été envisagée sous forme de série - la main d'œuvre est élevée - Il

entre quand même un certain pourcentage de charbon dans la fabrication des colles.

Nous avons donc réalisé nos premières coques en bois moulé avec des résultats d'ensemble relativement satisfaisants.

Mais il s'est produit à la longue une transformation qu'il était impossible de prévoir a priori. Quelques chocs un peu brutaux ont provoqué des dégâts totalement hors de proportion avec leur intensité. Nous nous sommes aperçu que les colles continuent à se modifier avec le temps et se transforment en une poussière ne fournissant - bien entendu - qu'une liaison précaire entre les éléments du bois¹².

Malheureusement, il a fallu, pour s'apercevoir de cette difficulté rédhibitoire plus d'un an et demi.

Entre temps, nous avons déjà décidé de poursuivre également la solution par l'emploi des métaux légers.

Pour ces métaux, en effet, il faut de l'électricité seulement. Nous en avons et en aurons de plus en plus. Nos ressources hydrauliques sont en développement accéléré. Nos ressources éoliennes, qui représentent au moins autant de kWh possibles, peuvent être mises en oeuvre à l'heure actuelle par des solutions modernes qui en feront une réalité prochaine.

Était-il à craindre un prix de revient plus élevé ? L'« Aluminium Français », auprès duquel nous avons trouvé l'appui le plus chaleureux, a apaisé en partie la crainte précédente. Il s'agit ici du prix catalogue.

On sait que ce prix ne joue que la moitié du rôle dans le nombre de voitures en circulation car le coût d'entretien s'applique à l'autre moitié. Or le coût d'entretien, diminué, en carburant, usure de pneus, usure générale, et aussi le coût national également diminué réduisent ce facteur de telle sorte que l'équilibre est largement rétabli¹³.

D'ailleurs il suffirait d'une légère retouche au traitement fiscal sur le prix catalogue, pour rétablir éventuellement la situation sur le premier facteur ; et ce serait certainement le procédé le plus efficace.

Bref, du point de vue de l'économie de charbon, la chose se montre entièrement favorable dans le sens général.

Le résultat atteint actuellement est la réalisation d'une voiture avec seulement 128 kg de métaux ferreux, c'est-à-dire la possibilité de produire environ 6 voitures au lieu d'une avec la même quantité de charbon.

¹¹ À noter la réflexion en profondeur de l'auteur qui chiffre en amont le coût énergétique d'établissement de son projet.

¹² Voici un point sur lequel la technique a beaucoup évoluée depuis les années 50. Les collages actuels sont fiables dans le temps.

¹³ Encore une vision globale satisfaisante de l'auteur.

QUEL MODELE ADOPTER ?

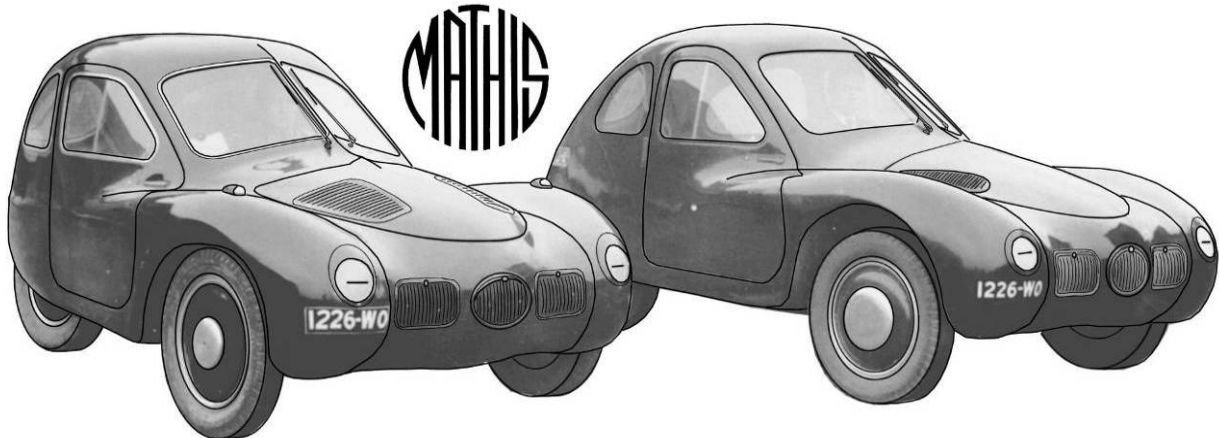
En tenant compte des événements, il apparaissait déjà que, quelle que soit l'issue, nous ne pourrions prévoir de longtemps la pléthore antérieure. Il semblait donc nécessaire d'alléger et de simplifier le problème en prenant une capacité de charge un peu moindre que le standard précédent, mais cependant capable de faire face à la très grande majorité des besoins. Il ne fallait pas diminuer les gabarits habitables sous peine de faire fausse route. Donc large capacité unitaire avec une charge totale légèrement diminuée.

En tenant compte des statistiques de roulage. - Il est connu que dans 80 % des cas, les voitures sont utilisées par une seule personne, avec charge utilitaire ou non, et dans 90 % des cas, avec une ou deux personnes dans les mêmes conditions.

Donc la très grande majorité des cas- peut théoriquement être satisfaite par une voiture deux places, et c'est ce point de vue qui avait guidé M. Goudard lors du concours de la voiture S.I.A. Cependant, la proposition eût été un peu trop étroite, surtout en venant des quatre places antérieures.

De sorte qu'après réflexion, Il est apparu qu'une solution serait le plus généralement adaptée si elle permettait trois très vastes places - au lieu de quatre serrées - et 40 kg de bagages ; ou bien deux personnes et 100 à 110 kg de charge supplémentaire possible (260 kg de charge utile).

D'ailleurs la disposition résultante à l'intérieur de la voiture projetée, était ainsi entièrement homogène à celle-ci et présentait par là même un tout équilibré satisfaisant.



SOLUTIONS APPORTÉES :

1. RECHERCHE DE L'ECONOMIE

Ainsi que je l'ai déjà développé devant vous, il y a quelques années et je ne crains pas de me redire puisque ces vérités n'ont pas l'air d'être encore bien comprises partout - il convient de s'attaquer directement aux trois facteurs principaux qui conditionnent la consommation¹⁴ :

Dans l'ordre :

- A. La résistance de roulement.
- B. La résistance de l'air.
- C. L'adaptation du moteur.

A. RESISTANCE DE ROULEMENT.

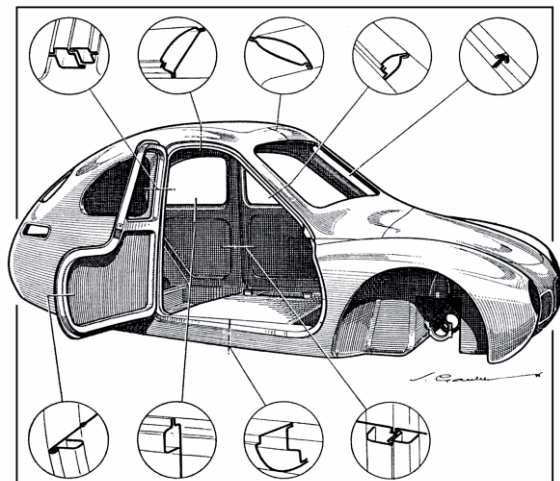
Elle est conditionnée en premier lieu par le poids, qui se relie aussi directement à la performance et au prix. Le poids a donc là une triple connexion capitale.

La Caisse : monobloc complet avec utilisation de caissonnages inférieurs, antérieurs, supérieurs et latéraux¹⁵. La limitation de poids est en quelques endroits, conditionnée par les épaisseurs minima de tôle pour le formage qui sont

¹⁴ Il est plaisant de lire cette phrase 60 ans après les faits ! Notez le raisonnement de type « cahier des charges » de l'auteur.

¹⁵ Ici, on ne parle pas de matériaux composites aïlle-teck mais juste de « jus de cervelle » appliqué à la conception ! Les paragraphes suivants constituent une véritable leçon de conception légère, à méditer dans les écoles d'ingénieurs !

encore nettement trop épaisses si l'on ne considère que leur travail, dans la rigidité même de la caisse, flexion ou torsion.



Structure monocoque à caissonnages multiples.

Le mode d'attache des pièces

Le mode d'attache des pièces subissant des efforts élevés, et la position des liaisons, aussi proches que possible des passagers, ont été établis de façon à réduire la longueur de la poutre intéressée par les gros efforts (assemblages principal sur le tablier pour le train avant, et juste derrière le troisième passager pour le train arrière).

Pour éviter les contraintes locales élevées, les pièces principales répartissent leurs efforts sur de grandes surfaces. L'expérience a largement justifié ces dispositions, dont d'ailleurs le principe provient d'assemblages dans la Marine, où les mêmes problèmes se sont posés.

Ces dispositions qui pourraient sans doute être regardées comme un alourdissement inutile, provoquent au contraire un

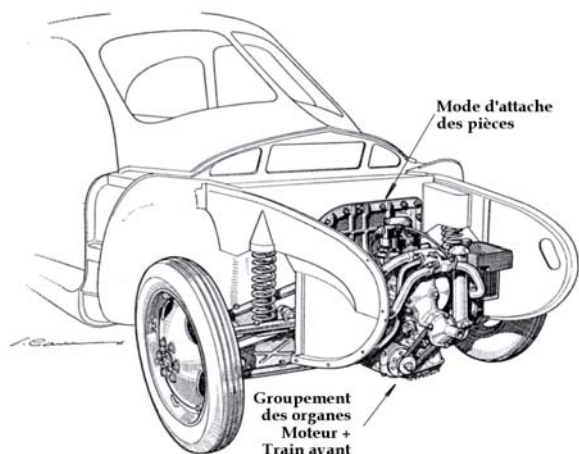
allègement substantiel en évitant par la suite de rajouter les fameuses tôles pliées cornières, et autres renforcements, qui finissent par handicaper une conception initiale saine de principe par l'augmentation de poids qu'ils apportent.

En fait, non seulement il ne nous a fallu rien ajouter pour assurer la résistance aux efforts mais encore il a été possible d'alléger le premier dessin après les essais statiques.

Ceux-ci qui faisaient partie du programme constructif, à cause de la difficulté d'assigner des valeurs correspondantes aux tensions, pour des formes aussi compliquées qu'une caisse de voiture, ont montré qu'on obtenait avec 1200 kg de charge (6,5 fois la charge utile maximum de 265 kg) une flèche élastique maximum de 2,8 mm.

La ligne élastique a été mesurée au cours de ces essais et a permis de constater d'assez grandes différences entre les moments d'inertie réels aux différents points. Il a été alors possible de réduire les plus forts et ainsi de gagner du poids.

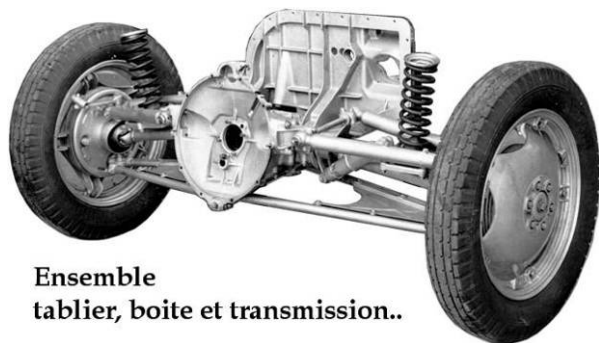
Bref, l'étude théorique et expérimentale de la caisse, tout en assurant un coefficient de sécurité élevé, a permis d'obtenir un poids pratique déjà très réduit et qu'il sera possible, sans doute de diminuer encore. La partie travaillante ne pèse que 48 kg. L'ensemble tôlerie complète en blanc pèse 78 kg à l'heure actuelle (Note du claviste : « c'est remarquable ! »).



Le Groupement des organes.

Le groupement des organes est un autre moyen d'alléger. Il permet en effet d'éviter les multiples fixations qui correspondent aux efforts sur chaque élément en particulier, en utilisant les points de fixation des ensembles pour transmettre ces efforts.

Par exemple en prenant un bloc sur lequel sont montés tous les accessoires, la direction et la suspension, les efforts qui auraient été engendrés par ces éléments séparés, sont tous pour ainsi dire canalisés et concentrés sur le bloc, qui, lui, les transmet une fois pour toutes par son point d'attache principal, établi en conséquence.



**Ensemble
tablier, boîte et transmission..**

La diminution du nombre des pièces.

Il est évident que tout ce que l'on peut supprimer ne figure plus ni au poids ni au prix¹⁶. En prenant trois roues au lieu de quatre, on supprime une suspension et un amortisseur, un bras ou un essieu, un frein et sa commande, une roue, une jante, un pneu et sa chambre, mais aussi les tôleries des ailes et des carènes de liaison arrière qui seraient nécessaires pour les deux roues arrière, si l'on employait quatre roues, avec une voiture convenablement carénée.

Lorsqu'on compare les projets ainsi faits, on constate, rien que sur le poids, une augmentation en 4 roues de 25 à 30 %, suivant les solutions, par rapport à une 3 roues de même charge utile - et encore, sans tenir compte de l'augmentation de puissance donc de poids nécessaire à l'obtention de la même vitesse maximum compte tenu aussi de la variation du Cx.

La pression de gonflement

Ainsi que vous le savez, la pression de gonflement joue un rôle très important puisque la résistance de roulement, est à peu près inversement proportionnelle au carré de ce facteur et à une puissance élevée de la vitesse. Au lieu de demander aux pneus, en utilisant des coussins à 1 kg (1kg/cm² soit 1 bar) d'assurer à eux seuls la plus grande partie du confort, nous avons admis des pressions plus élevées de l'ordre de 2 kg avec comme but de réduire ainsi le coefficient de résistance au roulement.

Il a fallu alors reprendre le problème complet de la suspension, à la fois pour le confort et la tenue de route. Problème dont la difficulté était encore accrue du fait de la grande légèreté et, par conséquent de la variation relative de charge qui est considérable. En somme, à une autre échelle, le problème du camion en charge et à vide, mais un camion qui devait rester confortable dans tous les cas. Ce problème a donc été traité très soigneusement et a vu plusieurs réalisations, ainsi qu'il sera expliqué plus loin.

La chasse au poids.

1° - Dans le tracé des pièces¹⁷ ;

2° - par l'emploi de métaux légers au maximum, partout où il est possible de le faire avec avantage;

3° - dans le fait qu'il peut être parfois avantageux de prévoir certaines opérations d'usinages supplémentaires qui, bien qu'elles semblent coûter à priori, ont au total une répercussion heureuse sur l'ensemble, en permettant de limiter soit la puissance totale, soit la cylindrée à des chiffres inférieurs à ceux qui auraient été nécessaires. Par voie indirecte on peut donc réaliser un ensemble moins onéreux.

C'est d'ailleurs semble-t-il la tendance américaine dans la réalisation des voitures prochaines, où l'on n'a pas hésité à incorporer les procédés d'usinage d'aviation, qui paraissent chers à priori par rapport à ceux de l'automobile avec toutefois un résultat total plus avantageux.

En somme, mettre la bonne matière adaptée copieusement là où il faut mais là où il faut seulement¹⁸.

Naturellement ceci suppose une étude très attentive de chacune des pièces. Celles-ci sont en effet travaillées on peut le dire, gramme par gramme car c'est bien en retranchant des grammes que l'on supprime des kilos.

C'est ainsi qu'entre le premier prototype qui avait déjà pourtant été sérieusement étudié dans ce sens, et le troisième, nous sommes passés de 460 à 380 kg.

Cette recherche nous a amenés à revoir bien des points dans leur conception même, par exemple les roues (technique de l'« Aluminium Français »), qui incorporent en une seule pièce le voile, le tambour de frein et sa garniture fonte incorporée dans

¹⁶ Comme le claviste le dit à ses étudiants : « Tout ce qui n'est pas absolument nécessaire est inutile ! ».

¹⁷ Encore et toujours le « jus de cervelle » !

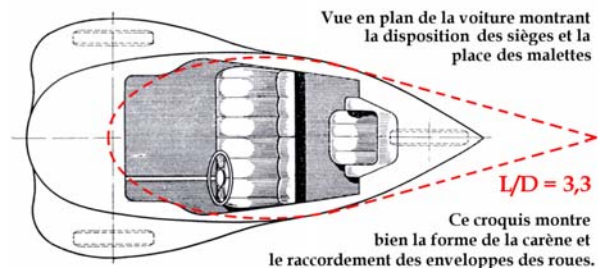
¹⁸ Une phrase à placarder dans tous les bureaux d'études sérieux.

le moule, en évitant par là, les doubles emplois de matière - un poids important a été gagné ainsi.

De même, dans la traction avant, les assemblages de disposition revus à différentes reprises, ont amené des simplifications substantielles. Les suspensions ont elles-mêmes été simplifiées et allégées. Tous les accessoires, mécanique et carrosserie ont été refaits dans le même but et sur l'ensemble du standard de poids minimum d'avant guerre plus de trente kilos ont été gagnés. Tout y est passé : distributeur carburateur, dynamo, démarreur, accus, câblage et connexions, freins, serrures, charnières, glaces, feux de position, tableau, sièges, etc. Bref, sur le poids, gros travail de conception légère et de réalisation qui s'est poursuivi et se poursuit encore sans égard pour quoi que ce soit, sauf pour le service correct et la fonction à assurer.

B. RESISTANCE DE L'AIR

C'est le deuxième facteur important d'absorption d'énergie. En vue de sa réduction au minimum possible, la voiture a été carénée avec grand soin. La disposition 3 roues est, sur ce point nettement plus avantageuse que les autres.



Dans une 4 roues bien carénées l'ensemble des roues avec les ailes et les carènes de liaison parfaitement étudiées et sans décollement, double la résistance unitaire de la carène. Avec une 3 roues, toutes choses égales, la résistance n'est augmentée que de 20 à 30 % de celle de la carène qui devient alors le facteur prépondérant.

Les tracées de cette voiture ont donc mis en jeu les principes fondamentaux que j'ai indiqués ici même.

Un corps de base, de profil longitudinal ellipse ogive ou parabole, en section verticale et horizontale, est placé convenablement dans le vent et englobe l'infrastructure de la voiture. Sur ce corps est raccordé un habitacle de telle façon que toutes les courbes utilisées présentent des raccordements avec tangence du second ordre des éléments entre eux.

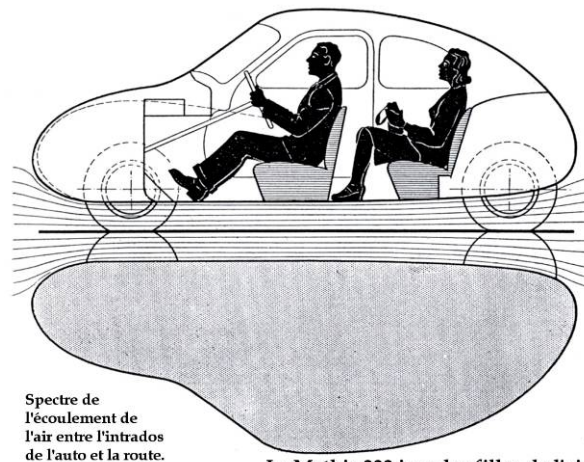
Il s'est présenté ici une difficulté particulière.

Le pare-brise a été fait plat en dièdre et incliné car il était impossible d'envisager des glaces à simple ou à double courbure pour l'avant. Il a donc fallu établir des raccordements avec des glaces planes évitant des décollements locaux ou tout au moins des amorces de tourbillons venant réagir sur le décollement arrière. Pour obtenir ce résultat les courbes de raccordement ont comme rayons de courbure ceux du corps principal et aboutissent aux glaces par des points d'inflexion. Des courbes du cinquième degré permettent d'obtenir des résultats.

L'ensemble de la carène ainsi déterminé est placé au voisinage de l'incidence de portance nulle, de façon à assurer le coefficient minimum de résistance, compte tenu de l'interaction du sol.

La corde de carène est donc inclinée vers l'avant, d'un angle négatif qui dépend du rapport flèche sur corde, comme ce serait le cas pour une aile d'avion. Cet angle est augmenté d'une petite quantité qui atténue en partie l'interaction du sol. Mais, comme vous le savez, l'aspect de la voiture seul sur la route est incomplet pour se faire une représentation de la résistance de l'air, il faut envisager deux voitures disposées en

image et considérer le plan médian qui, à peu de choses près, représente alors la route par raison de symétrie.



La Mathis 333 joue les filles de l'air.

On se rend compte alors que, pour que l'écoulement se fasse autour de la carène de la voiture avec la contrainte minimum, il faut que le fond de la voiture et son image représentant sensiblement un convergent divergent plan parallèle. En d'autres termes, le sol malgré sa vitesse égale à celle du vent à l'infini constitue un obstacle à la circulation. Il faut alors assurer en dessous de la voiture le débit maximum possible afin de réduire la contrainte d'écoulement extérieur.

L'interaction est aussi sous la dépendance de la hauteur relative de la voiture au-dessus du sol et varie très rapidement au carré et à la quatrième puissance de ce terme à mesure qu'il augmente. Il faut donc se maintenir aussi haut que possible au dessus de la route.

Mais là existe une limite imposée par la stabilité en virage et le problème est assez étroitement circonscrit.

Etant donné qu'il faut avoir des flexibilités très grandes à cause de la légèreté de la voiture, nous avons en effet constaté une variation nette du C_x entre la charge minimum et la charge maximum due à cette cause d'une part et aussi au fait que l'incidence de portance nulle est plus près de la charge minimum. Autrement dit, le C_x augmente dans une certaine proportion à mesure que la charge de la voiture augmente, c'est pour cela que nous nous référons au C_x en charge moyenne avec deux passagers aux places avant.

Interruptions de la carène.

- Il est peu opportun de caréner le braquage, ce qui revient à un alourdissement et à une augmentation du maître couple. Les roues avant ont donc été laissées apparentes. Mais les profils d'aile autour des roues ont été établis de telle façon que le vent décolle franchement sur les bord de fuite amont, alors qu'il vient s'enrouler aux bords d'attaque aval, sur de larges congés aménagés à cet effet. C'est un saute vent. L'essai montre que l'air parcourt un trajet qui serait celui de la carène si elle avait été continue et ainsi le coefficient de résistance n'est sensiblement pas affecté. Toutes les ouvertures sont traitées de cette façon¹⁹.

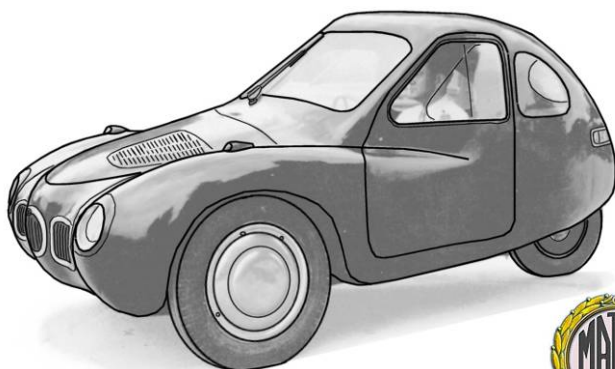
Les ailes avant.

- Elles sont définies par un corps symétrique de faible résistance, coupé en deux, dont chaque moitié est enroulée de part et d'autre du corps de base avec des congés de raccordement avant et arrière. Leur résistance, compte tenu de leur propre Interaction avec le sol s'ajoute à celle de la carène.

Les roues.

- Elles sont munies de flasques de chaque côté, de façon à atténuer un peu les discontinuités de leurs profils et pour supprimer aussi le brassage de l'air par les rayons.

¹⁹ Solution très pertinente reprise depuis par de nombreux constructeurs (voir en fin d'article la Daihatsu UFE III)



Le Cx.

- Le Cx global ainsi obtenu est : $C_{x_p} = 0,22$.

Ce résultat concorde très nettement avec le calcul, avec les essais de maquettes en images, et avec les essais de résistance à la fois de roulement et à l'air effectuée sur des pentes connues à différentes charges.

La carène étant cependant très courte, il n'a pas été possible d'éviter un léger décollement sur 5 à 6 dm², à hauteur de la lunette arrière. Une voiture d'allongement plus grand verrait ce décollement disparaître et son Cx serait alors de l'ordre de 0,18. Il semble très difficile d'obtenir des chiffres plus faibles²⁰. La valeur de ces chiffres extrêmement réduite, en venant de Cx de l'ordre de 0,7 à 0,6 explique en partie les performances de cette voiture, tenues pour impossibles a priori par certains.

C. ADAPTATION DU MOTEUR.

On est ainsi arrivé à utiliser le moins d'énergie possible pour une vitesse donnée. Il faut maintenant obtenir cette énergie au meilleur prix en carburant. Quand on considère les courbes d'iso consommation d'un moteur en fonction du nombre de tours, on constate qu'une certaine région est favorisée à proximité de la courbe pleins gaz. Si l'on s'écarte de cette région, les consommations augmentent. Il est donc indiqué de faire passer la courbe d'utilisation de la voiture au voisinage de cette région. C'est ce qui a été fait et ceci, compte tenu des accélérations, montées de côtes et rapports de démultiplication, fournit une valeur de la cylindrée dont on ne peut s'écarter beaucoup si l'on veut de très faibles consommations.

Ainsi donc sont accordés les trois points principaux :

- Poids.

- Résistance de l'air.

- Adaptation du moteur.

Puissances absorbées.

Celles-ci, comptées à la jante en CV au poids de 570 kg et avec une pression de gonflement de 2,25 kg/cm², sont les suivantes :

Vitesse [Km/h]	10	60	80	100
Puissance aérodynamique [cv]	0,49	1,67	3,94	7,75
Puissance de roulement [cv]	1,12	1,75	2,25	3,68
Puissance totale [cv]	1,62	3,42	6,20	11,38

On voit les valeurs très faibles de ces puissances et il est facile d'en déduire que le moteur sera de cylindrée réduite.

²⁰ Andreau est visionnaire sur ce point car les meilleurs concept car arrivent à des $C_x = 0,17$ soixante ans après (Daihatsu UFE III, voir plus loin).

PROBLEMES PARTICULIERS

Stabilité aérodynamique.

- Une stabilité suffisante est assurée dans cette voiture sans qu'il ait été nécessaire d'ajouter une dérive. Les profils en effet se terminent par une arête verticale partant de la lunette arrière, et le dépassement de la roue arrière constitue aussi un élément de dérive, imparfait il est vrai. Les vitesses par ailleurs ne sont pas suffisantes pour donner lieu à un moment perturbateur horizontal élevé, eu égard au moment d'adhérence²¹.

La polaire n'a pas été relevée. En pratique, la voiture fuit un peu sous une rafale transverse, mais cependant moins qu'une voiture normale. Une dérive ne serait réellement nécessaire qu'au delà de 140 à 150 km/h à l'heure, vitesses supérieures à celles qu'on peut atteindre même en surmultiplication.

La suspension.

- Des solutions approximatives de la suspension ont causé l'échec de bien des réalisations de voitures légères dans le passé.

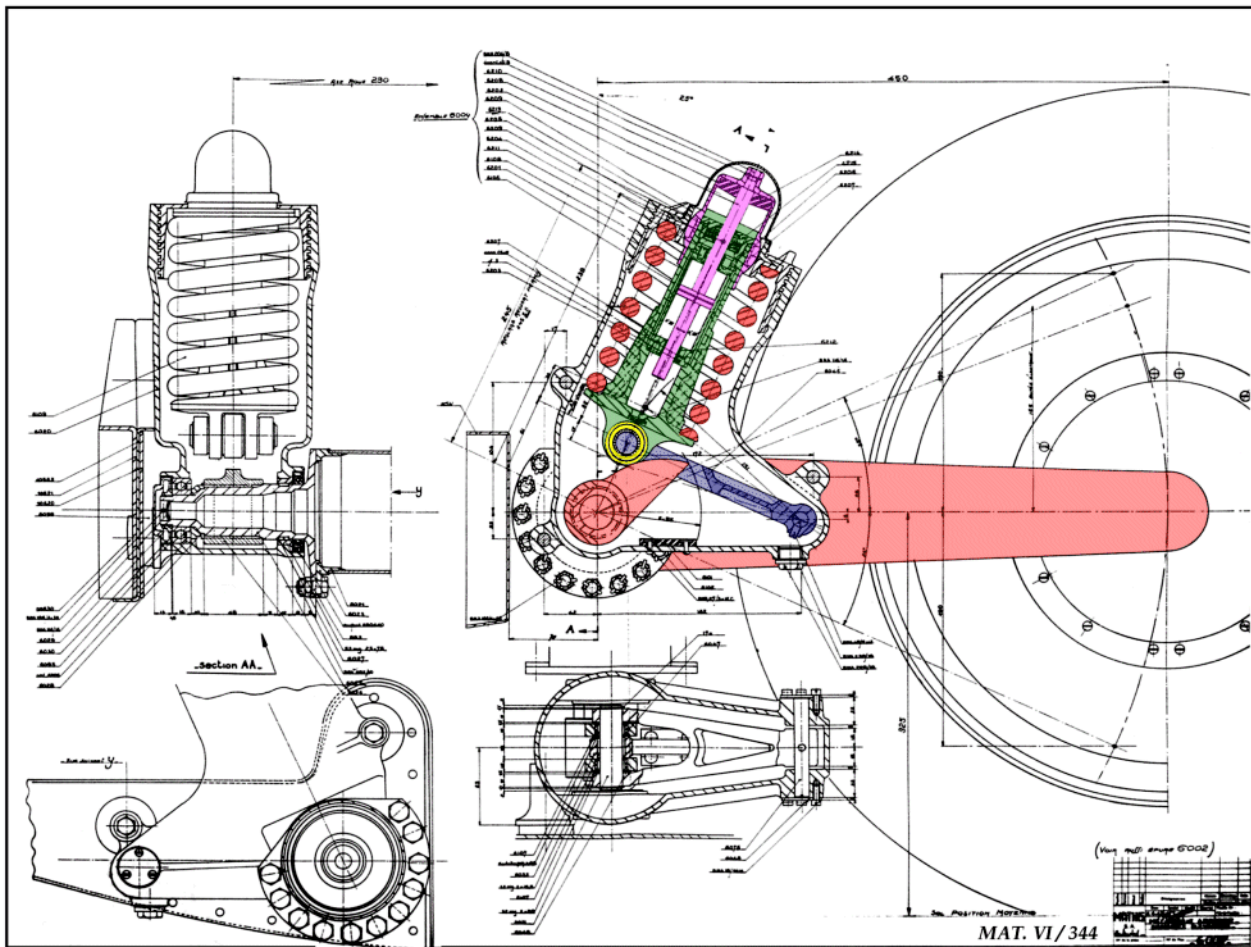
Il a fallu ici un effort particulier car il n'était pas question de revenir en arrière sur ce point, mais au contraire de le résoudre parfaitement malgré sa difficulté accrue.

Les principes suivants ont été adoptés :

- suspension isochrone, c'est-à-dire à fréquence propre constante de la pleine charge à la charge minimum quelle que soit la masse suspendue.
- mouvement apériodique des roues par rapport à la caisse dans tous les cas de charge.
- frottement local optimum pour toutes les charges.



²¹ Jean ANDREAU fait une synthèse parfaite des travaux de Jarey et Mauboussin sur les problèmes de stabilité aérodynamique (Cf. encadré « Darwinisme aérodynamique » plus tôt dans l'article).



Système de suspension isochrone du monobras du train arrière

Isochronisme²²

- La fréquence propre dans un système élastique est fournie par la formule suivante:

$$N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Avec :

N :	nombre d'oscillations par seconde [Hz]
K :	Rigidité [N/m]
M :	Masse [kg]

On voit donc que si la rigidité augmente comme la masse, on obtient une fréquence constante. Donc il faut réaliser $K=M$. Seulement il faut passer par la flèche ou le chemin parcouru pour obtenir ce résultat.

On démontre facilement qu'il faut alors que la charge soit une exponentielle de la flèche de la forme $P = a.e^{mf}$.

Ce résultat est atteint de façon très simple en comprimant un ressort cylindrique par l'intermédiaire d'une came en spirale logarithmique, liée par exemple au déplacement angulaire d'un bras. Il est alors loisible, en conformité avec l'espace disponible ou le poids que l'on admet, de choisir une fréquence propre ultraconfortable de l'ordre de 1 Hz par exemple. C'est-à-dire qui s'apparente aux meilleures suspensions de grosses voitures²³. C'est ce qui a été fait.

²² La forte variation de masse induite par la charge utile sur un véhicule léger entraîne de grandes variations dans la fréquence propre (cf. formule de la fréquence propre) du système d'amortissement ce qui est très désagréable pour le confort et la tenue de route. D'où l'utilisation d'une suspension isochrone qui solutionne ce problème.

²³ Cette fréquence propre de 1 Hertz n'est pas choisie au hasard. C'est en effet celle qui procure le confort maximal pour

Amortissement

- L'expérience portant sur de nombreuses suspensions et beaucoup d'années a montré que le frottement était optimum lorsqu'il permettait un décrément de l'ordre de 4/5^{ème} à 5/6^{ème} sur l'oscillation propre d'amplitude moyenne. C'est en partant et en réalisant des amortisseurs coulissants à section de passage variable comme pour les récupérateurs de recul par exemple, - qu'il a été possible d'obtenir ce résultat.

Apériodicité des roues.

- Connaissant alors la masse non suspendue et les rigidités, locales, il fallait en outre que le frottement déterminé dans le cas précédent soit suffisant, même à faible charge, pour rendre le mouvement des roues apériodique par rapport à la caisse.

Ceci a une grande importance pour la tenue de route. Supposons qu'il n'y ait pas de frottement. La roue tombe dans un trou. La percussion quelle reçoit se transmet par la suspension, aboutit à la caisse, point quasi-fixe, se réfléchit et revient à la roue, changée de signe. Elle soulève donc la roue, et lui fait quitter le sol un instant, ce qui suffit à compromettre la tenue de route. Ici le mouvement étant apériodique, cela veut dire que le frottement est tel qu'il absorbe l'énergie des percussions entre l'aller et le retour et qu'ainsi les roues ne quittent pas le sol, et cela, sans la brutalité des réactions que produisent les amortisseurs serrés qu'on monte sur les voitures de course.

l'être humain car elle correspond à la fréquence de la marche (un pas par seconde).

Dévers en virage.

- Sur une voiture 3 roues le dévers en virage est une fois et demie celui d'une voiture 4 roues, à masse et fréquence propres égales.

Nous avons donc placé un stabilisateur sur la première voiture exécutée. Cet engin s'est montré trop brutal et a introduit un roulis de fréquence élevée inadmissible. En outre, la voiture tournait verticale comme un fil à plomb. Il a été constaté qu'il aurait pu être dangereux d'avoir une voiture ne prévenant pas le conducteur qu'il s'approchait de la limite d'adhérence au cours d'un virage. Nous avons donc été amenés à rétablir le dévers dans une certaine mesure. Grâce à la rigidité variable, il est possible de lui donner des valeurs courantes qui ont fait leurs preuves et qui sont entrées dans les habitudes des passagers et dans les réflexes des conducteurs.

L'équilibre et la stabilité de route.

- Ce sont des facteurs capitaux dans une 3 roues comme dans toute autre voiture.

Les charges relatives des roues et les positions du centre de gravité le long des trois axes doivent répondre à plusieurs conditions.



- Le dérapage à la limite d'adhérence doit précéder le retournement.

- Le freinage au maximum d'adhérence sur une seule roue avant, l'autre étant libre ne doit pas amorcer un dérapage.

- Le freinage au maximum d'adhérence ne doit pas mettre la voiture en pylône.

Les conditions précédentes étant traduites dans les équations d'équilibre, fournissent un triangle de sustentation de forme non arbitraire et une zone dans laquelle doivent se trouver les centres de gravité dans différentes hypothèses de charge. C'est aussi une indication sur la structure même de la voiture qui, de ce fait, n'est pas arbitraire non plus.



La mécanique, par exemple, doit se trouver en avant de l'axe avant pour que le centre de gravité le plus reculé soit encore dans la zone précédente.

On constate également qu'il est important de laisser dans tous les cas son maximum d'adhérence à la roue arrière, c'est-à-dire de ne pas lui affecter de couple, ou moteur ou de freinage et par conséquent d'adopter la traction avant. Celle-ci, d'ailleurs, constitue dans cette conception un ensemble si homogène et si séduisant qu'il s'impose par ailleurs.

Il est évident que si au jour des règles énoncées, en ce qui concerne la suspension et l'équilibre, on analyse les précédentes conceptions de 3 roues connues, on voit sans peine les raisons qui les ont tenues éloignées du public, et on peut mesurer là la cause justifiée d'une certaine méfiance envers ces engins.

Cependant, les règles du jeu étant respectées, on peut dire qu'on aboutit à des véhicules absolument corrects en tous points, entièrement comparables, aux véhicules ordinaires pour la sécurité et le confort, et qui présentent par surcroît des avantages marqués de poids, de résistance à l'air, de performance et de consommation.

L'expérience faite maintenant sur plus de 50 000 Km, avec différents conducteurs et différentes solutions, est là pour le confirmer. Nous n'avons encore jamais rencontré une hésitation ou une faute des véhicules eux mêmes au cours des multiples épreuves que nous leur avons fait subir jusqu'à présent.

La direction.

- La grande flexibilité, indispensable au confort pour une voiture si légère, oblige à des débattements importants ; ceci vient interférer avec les braquages élevés nécessaires à une bonne maniabilité.

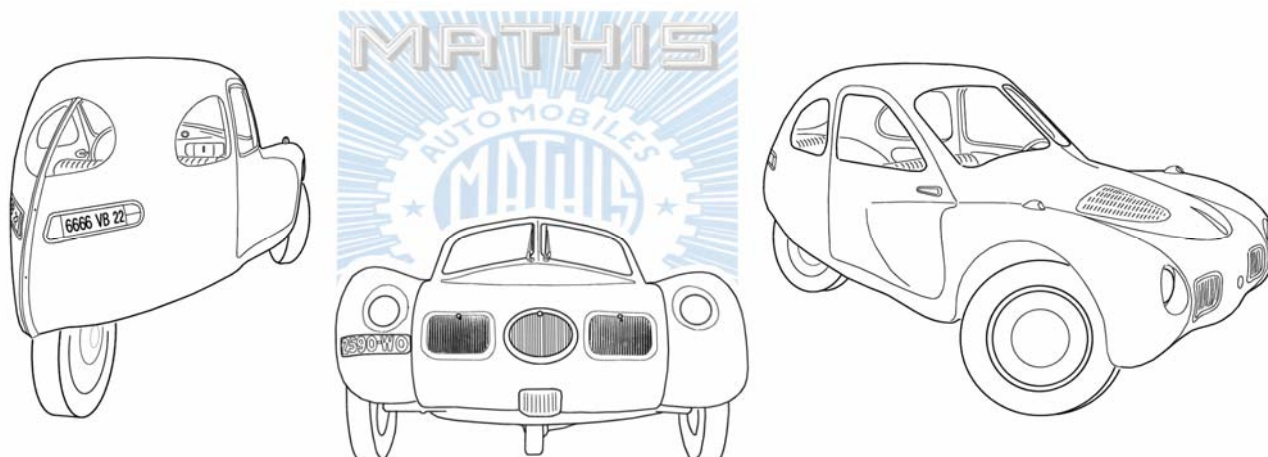
Sur la première voiture, nous avons établi l'épure de direction et de débattement des roues avec les approximations usuelles, sans nous méfier suffisamment des écarts secondaires.

L'expérience s'est chargée de nous montrer assez rapidement qu'il fallait reprendre le problème de beaucoup plus près car ces facteurs, secondaires dans le problème orthodoxe, devenaient prépondérants dans le nôtre.

C'est ce qui a été fait avec un très bon résultat actuellement, le seul inconvénient ayant été de compliquer encore un peu notre tâche.

Les principes d'établissement de cette voiture qui, par sa définition même incorpore sans nul doute le maximum de difficultés de conception et de réalisation pour une automobile, ayant été énoncés, les dispositions, résultantes deviennent claires et se comprennent aisément.

2. DESCRIPTION DE LA VOITURE

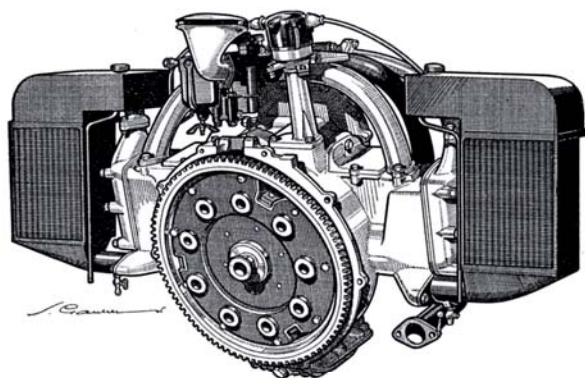


Elle se compose de trois éléments :

- Le bloc moteur avec tous ses accessoires suspension et direction.
- La caisse avec la pièce de fixation du bloc avant.
- La roue porteuse arrière avec sa suspension.

Bloc moteur

Il comprend dans l'ordre : le moteur, l'embrayage, la boîte et le démultiplicateur avant.



Le moteur Mathis, vu de l'arrière, avec ses deux radiateurs indépendants fixés sur les culasses.

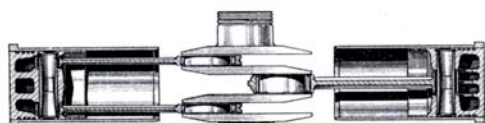


Schéma de principe du moteur flat-twin sans désaxage pour supprimer le couple alternatif dans le plan horizontal.

Le dispositif comporte un vilebrequin à plateaux avec trois manetons; le piston de gauche est attelé avec deux bielles identiques et jumelées.

Le moteur.

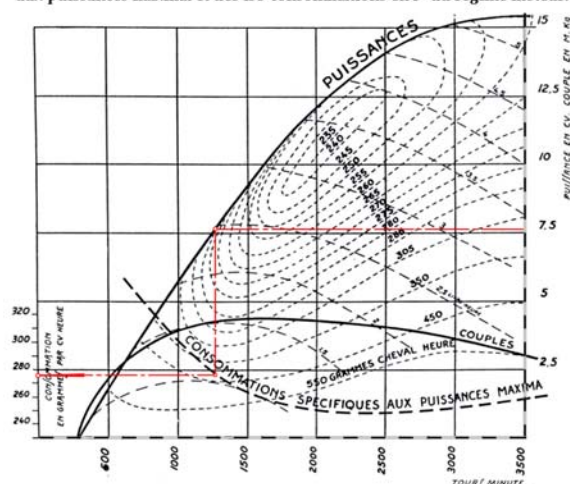
- C'est un flat-twin bicylindres de 700 cm³, alésage et course 75 x 80 mm. Les cylindres sont coaxiaux de façon à annuler le lacet d'inertie usuel. Ce résultat est obtenu au moyen d'un vilebrequin trois coudes avec une bielle d'un côté et deux bielles de l'autre. Cette disposition, due à M. Raymond Georges et utilisée avec succès sur des moteurs de moto planeurs, s'est montrée efficace à l'usage et permet de réaliser un moteur presque rigoureusement équilibré.

Les soupapes sont latérales. L'arbre à cames comporte deux cames seulement, et est actionné par une denture celoron à jet d'engrènement, le tout est dans l'huile. Les cylindres à chemise fonte noyée, les culasses alu sont refroidies par eau. Les radiateurs, un par cylindre, sont montés sur la culasse

directement par plans de joint. La circulation est à thermo siphon.

Cette disposition a comme effet, en portant le moment d'inertie du moteur autour de son axe à un maximum, de diminuer l'amplitude d'oscillation polaire du bloc, sous l'influence du moment moteur, et de réduire ainsi la transmission des réactions dues à ce facteur.

Courbes des puissances, des couples, des consommations spécifiques aux puissances maxima et des iso-consommations en l' du régime moteur.



Le moteur en effet, dans un but de durée et de service, ne tourne au maximum qu'à 3300 tours et développe seulement 15 ch à 3000 tours. Par contre, son étude est faite pour assurer un couple élevé à la reprise. Sa consommation avec une essence à 65 d'octane, est au minimum de 230 g.ch/h. La courbe d'utilisation passe près de ce point.

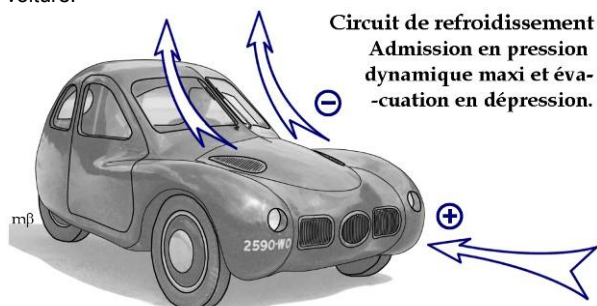
Afin d'éviter l'emploi de ventilateurs et de faire ainsi l'économie de la puissance nécessaire à leur fonctionnement, le refroidissement est de conception particulière.

Une entrée d'air est aménagée au centre, en face du bloc moteur qui est ainsi directement refroidi. D'autant mieux qu'il est entièrement en aluminium. On sait que ceci diminue le nombre de calories à évacuer par l'agent de refroidissement, de 15 à 20 %. Devant chaque radiateur, une entrée d'air est ménagée, placée également sur la ligne neutre, c'est-à-dire au maximum de pression.

Les sorties supérieures et inférieures sont placées dans les zones de dépression maxima qui ont été déterminées au laboratoire sur les maquettes.

La vitesse d'air à laquelle on a droit dans ces conditions, est environs une fois et demie la vitesse de la voiture²⁴. Dans la disposition orthodoxe on n'a droit en général qu'à la moitié de cette vitesse et le ventilateur la ramène alors au voisinage de la vitesse à l'infini. Leur remultiplication est donc largement satisfaite.

Il a été vérifié, par la mesure des Cx, que les ouvertures ainsi réalisées n'augmentent pas sensiblement la résistance de la voiture.



Circuit de refroidissement
Admission en pression
dynamique maxi et évacuation en dépression.

Il eut été facile de faire un moteur à régime plus élevé. On y aurait gagné sur le poids et l'encombrement, mais il a semblé préférable, au point de vue consommation et endurance, d'accepter dans ce cas la différence de poids en vue d'augmenter la durée sans révision et de simplifier le service.

Embrayage.

- Du type classique à disque unique. Il est de grand diamètre, dans le même but que plus haut.

Boîte.

- À 4 vitesses. Elle est classique et incorpore les solutions modernes silencieuses avec synchros pour la 2^{ème} et 3^{ème} vitesse. La 4^{ème} est en prise. Taille droite rectifiée.

Démultiplicateur.

- Classique à taille Gleason. Les joints de cardan de sortie de boîte et de braquage sont des joints Glaenzer à aiguilles. Les freins Lockheed hydrauliques de 10 pouces assurent le service normal de circulation.

Sur le démultiplicateur et la boîte s'insèrent par des articulations les bras d'attache des roues. Ces bras sont des tubes en acier chrome - molybdène largement établis pour supporter les efforts de flexion et de torsion auxquels ils sont appelés à faire face.

Dans une de nos dispositions de suspension, les bras sont réunis par une plaque nervurée au droit des brancards avant et sur ces plaques reposent les ressorts de suspension par l'intermédiaire de plaques en caoutchouc. Les amortisseurs se relient à ces plaques et au carter. Les ressorts sont tronconiques et établis de façon que leurs spires les plus larges se posent progressivement sur leur point d'appui. Leur longueur libre varie donc d'une façon continue. On peut ainsi réaliser une loi définie de la rigidité en fonction de la flèche et en particulier, l'isochronisme.

Cette solution est plus simple, plus légère et moins onéreuse que la précédente.

Elle permet en outre, tout en élargissant la base d'appui, sur la voiture, de demander à l'inertie du bloc moteur une meilleure répartition entre l'effet dû au moment moteur et celui dû aux réactions des roues. On introduit ainsi une variable supplémentaire favorable.

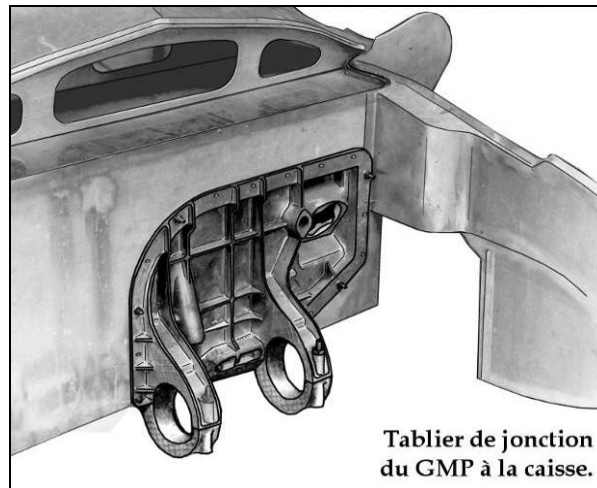
²⁴ Jean Andreau se trompe en souhaitant une accélération du flux d'air dans la veine de refroidissement. C'est exactement l'inverse que l'on essaye d'obtenir par l'installation d'un divergent-convergent dans le système de refroidissement. L'air en ralentissant dans le divergent, augmente sa pression, passe lentement dans le radiateur puis réaccélère dans le convergent, minimisant ainsi la traînée de refroidissement.

Fixation du bloc.

De part et d'autre du démultiplicateur et entourant les joints de cardan de sortie des boîtes, sont venus avec le carter deux tourillons de gros diamètre servant à la tenue du bloc côté caisse.

Ces tourillons sont entourés de bagues de caoutchouc dont l'épaisseur est de l'ordre du centimètre et pris dans des coussinets solidaires de la plaque de liaison du tablier. La partie intérieure de ces tourillons se démonte au moyen de 4 vis et libère entièrement le bloc avec tous ses organes et accessoires.

Le nez avant du bloc est tenu par un autre bloc de caoutchouc sur le mentonnet avant.



**Tablier de jonction
du GMP à la caisse.**

Les conséquences de ce mode de fixation sont les suivantes :

- Concentration des efforts principaux par le bloc sur la pièce de liaison.

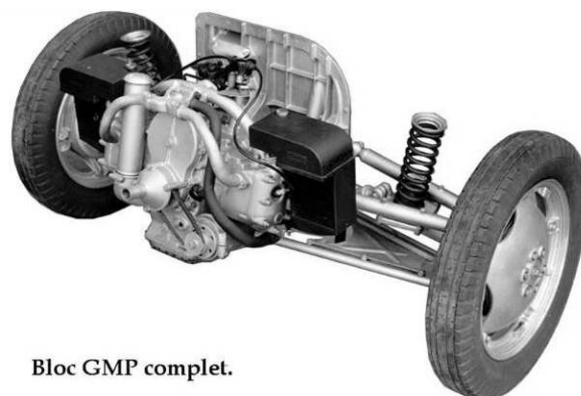
- Le moment moteur est transmis à la caisse par les tourillons arrière et la souplesse peut être réglée par celle du caoutchouc et par sa surface. C'est une sorte de floating, mais toutefois très atténué.

- montage et démontage de la mécanique avec le minimum de temps pour permettre une meilleure organisation du service, des échanges standard et de la réparation.

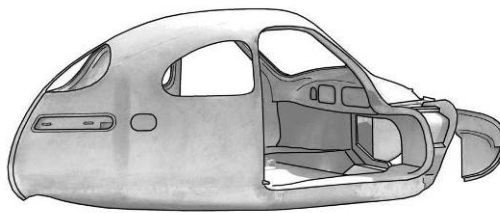
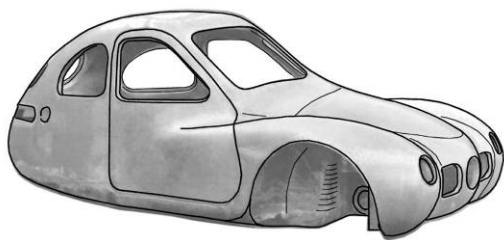
On peut en effet, par exemple, prévoir des blocs de service loués pendant la durée d'une réparation. Ceci aurait l'avantage de permettre une organisation rationnelle de la réparation en n'immobilisant les voitures qu'un temps très court.

La pièce de fixation dans le tablier est une pièce en alliage léger coulée et usinée, qui porte le boîtier de direction, le pédalier et le relais de passage des vitesses.

L'avantage d'un assemblage mécanique de ces éléments est évident. Cette unité vient se monter sur la caisse et y intéresse une grande surface de contact.



Bloc GMP complet.



Carrosserie de la Mathis 333

Forme en berlingot arrondie, surfaces à double galbe.

La carrosserie.

Elle est du type monolithe (monocoque) construite sur une embase constituée par des caissons légers. Sur ceux-ci viennent se raccorder des membrures caissonnées de liaison pour les panneaux latéraux, le pare-brise et le pavillon. Ces éléments concourent à la résistance globale et annulent les voiles locaux qui se produiraient sous les efforts. D'une façon générale les éléments résistants convergent vers le tablier, centre des efforts principaux, et s'épanouissent de là pour intéresser la caisse entière et venir se raccorder à nouveau à l'attache de la suspension arrière.

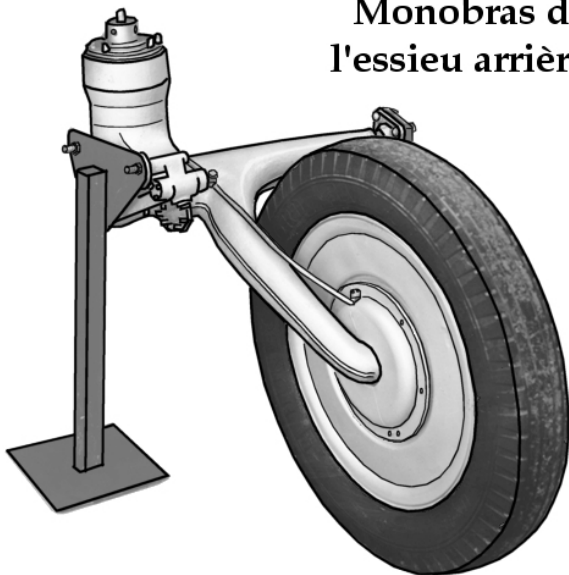
Tous les éléments comportent de légers galbes, de façon à proscrire les surfaces planes dans le but d'augmenter la rigidité en vue du silence et de diminuer les résonances possibles dont les parois, planes sont affligées.

La visibilité est considérable et en particulier le pare-brise permet la vue à la verticale en se penchant un peu. La visibilité arrière, déjà bonne par la lunette arrière, est augmentée de celle que procure l'obliquité des parois par les baies de custode.

Les pièces et le découpage sont étudiés pour un emboutissage facile. Leur jonction se fait par points électriques. Des caisses en circulation depuis deux ans n'ont pas bougé. Il n'y manque encore aucun point et les qualités d'origine sont restées inchangées, silence compris.

La carrosserie est aménagée en trois vastes places en trèfle face à la route, avec l'espace nécessaire à 40 kg de bagages de chaque côté de la place arrière et dans des coffres sous les sièges avant.

Monobras de l'essieu arrière



La roue arrière.

Elle est maintenue par un simple bras articulé sur l'axe transversal, dont les attaches se font également par grandes surfaces sur la partie arrière des caissons inférieurs.

L'ensemble suspension, bras, moyeu, frein et roue constitue une unité séparée.

En soulevant l'arrière de la caisse, la roue dégage presque entièrement et l'échange du pneu se fait du côté droit sans aucune difficulté.

LES RESULTATS OBTENUS (AU REGLAGE NORMAL)

Dimensions de la voiture

Longueur : 3.40 m

Largeur : 1.74 m.

Hauteur en charge : 1,425 m.

Voie : 1.5 m.

Empattement : 2,3 m.

Consommation sur base (3 juillet 1942: Contrôlé officiellement)

A la masse totale en charge de 612 kg. Vent léger de côté.

Palier :

Vitesse moyenne en km/h	40	50	60	70
Litres aux 100 Km	1,95	2,08	2,3	2,45

Consommation dans Paris (mars 1945)

Masse totale : 537 kg.

Parcours 55 km. Vitesse maximum: 50 km/h.

Consommation : 3,7 litres aux 100 km.

Vitesse et consommation sur route (Essai 7 septembre 1942, sur parcours Gennevilliers – Alençon – Gennevilliers ; 2 passagers)

Parcours de 300 km

Masse totale en charge : 625 kg

Vitesse maximum palier: 105 km/h.

Vitesse moyenne : 65 km/h.

Consommation : 3,475 litres aux 100 Km.

Accélération

En surmultipliée. 0,5 m/s²

En 3eme. 0.82 m/s²

La 3e permet de démarrer et d'atteindre 90 km/h en palier.

En surmultipliée. Sur déclivité de 5% sans vent, la vitesse dépasse 120 km/h.

A la charge totale, il est possible en conduisant normalement d'atteindre des moyennes de 70 à 75 km/h sur routes nationales ordinaires avec des consommations de l'ordre de 3 litres aux 100 km.

CONCLUSIONS

Les performances que nous venons de présenter illustrent bien les possibilités réelles d'une voiture moderne vraiment économique ; elles montrent que les buts initiaux assignés à cette étude ont été atteints.

Cette réalisation est, en outre, un exemple de voiture très légère réussie grâce à l'emploi rationnel et généralisé des métaux légers. Elle ouvre ainsi de vastes perspectives sur l'automobile de demain en raison de ses facilités de construction en grande série.

© Jean ANDREAU 1946



Une photo particulièrement rare : La Mathis-Andreu 333 à la pompe !



Jean ANDREAU (l'homme au béret) devant son œuvre : la Mathis-Andreu 333

VERIFICATION DES CHIFFRES ANNONCES :

Calcul de la consommation de carburant avec les données techniques de la voiture Mathis 333 de M. Andreau (1946) pour une distance de 100 km (sur le plat) parcourue à la vitesse $V = 90 \text{ km/h}$.

Calcul de la consommation de pétrole nécessaire au parcours d'une distance de 100 km (sur le plat) par un véhicule léger:

La puissance nécessaire à l'avancement sur sol plat à vitesse constante est directement proportionnelle à la masse et à l'aérodynamique de l'automobile :

$$P_m = \frac{1}{\eta_t} \left(\underbrace{C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot V}_{\text{Puissance dissipée par le roulement}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S_f \cdot C_{xp}}_{\text{Puissance dissipée par l'aérodynamique}} \right)$$

Avec pour la Mathis/Andreau 333

Masse à vide $m_v = 380 \text{ kg}$	$g : 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
Masse utile $m_u = 330 \text{ kg}$	$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
Masse max $m_{\max} = 710 \text{ kg}$	$V = 25 \text{ m/s (90 km/h)}$
Masse lors de l'essai: $m = 625 \text{ kg}$	$S_f = 1,887 \text{ m}^2$
$C_{rr} = 12/1000$	$C_{xp} = 0,22$
Rendement de la transmission mécanique $\eta_t = 0,95$	
4 ^{ème} vitesse : Prise directe	
[train d'engrenage 0,97 ou 0,98; couple conique du différentiel 0,97 ; cardan 0,98 ; pont et arbres de roues 0,95]	

CALCUL DE LA PUISSANCE MOTEUR :

$P_m = (1/\eta_t)[C_{rr} \cdot m \cdot g \cdot V + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S_f \cdot C_{xp}]$
 $P_m = 1/0,95[12/1000 \times 625 \times 9,81 \times 25 + 0,5 \times 1,225 \times (25)^3 \times 1,887 \times 0,22]$
 $P_m = 6118 \text{ W} = 8,30 \text{ cv}$

CALCUL DE LA CONSOMMATION MASSIQUE HORAIRE :

Consommation spécifique à cette puissance :
 $C_{sp} = 0,275 \text{ kg/cv.h}$

Consommation à l'heure :

$M_{\text{carburant/h}} = P_m \cdot C_{sp}$
 $M_{\text{carburant/h}} = 2,285 \text{ kg}$ soit 3,17 litres d'essence (densité 0,72).

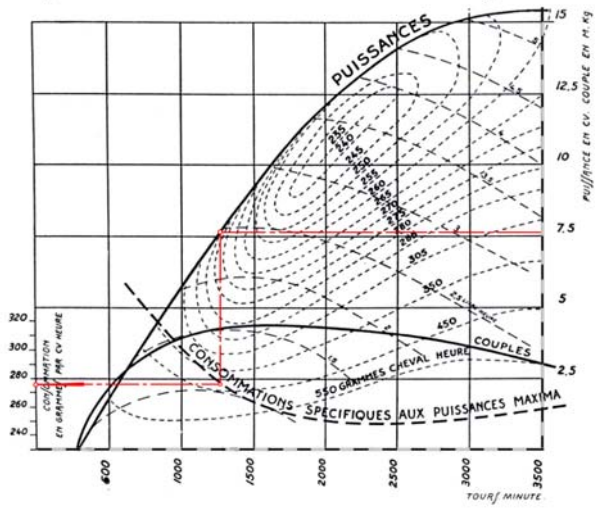
CALCUL DE LA CONSOMMATION KILOMETRIQUE :

Consommation aux 100 km :

$E_{100\text{km}} = M_{\text{carburant/h}} \cdot L/V(\text{km/h})$
 $E_{100\text{km}} = 2,54 \text{ kg}$ soit 3,53 litres aux 100.

Cette consommation spectaculaire pour 1946 fut obtenue avec un moteur de rendement médiocre (23%).

Courbes des puissances, des couples, des consommations spécifiques aux puissances maxima et des iso-consommations en F° du régime moteur.



CALCUL DU RENDEMENT MOTEUR A PARTIR DE LA CONSOMMATION SPECIFIQUE :

Le terme de consommation spécifique désigne la consommation d'un moteur en fonction de la puissance développée et de la durée pendant laquelle cette puissance est développée. Elle est usuellement chiffrée en gramme par cv ou par kW et par heure, soit g/(cv.h) ou g/(kW.h) .

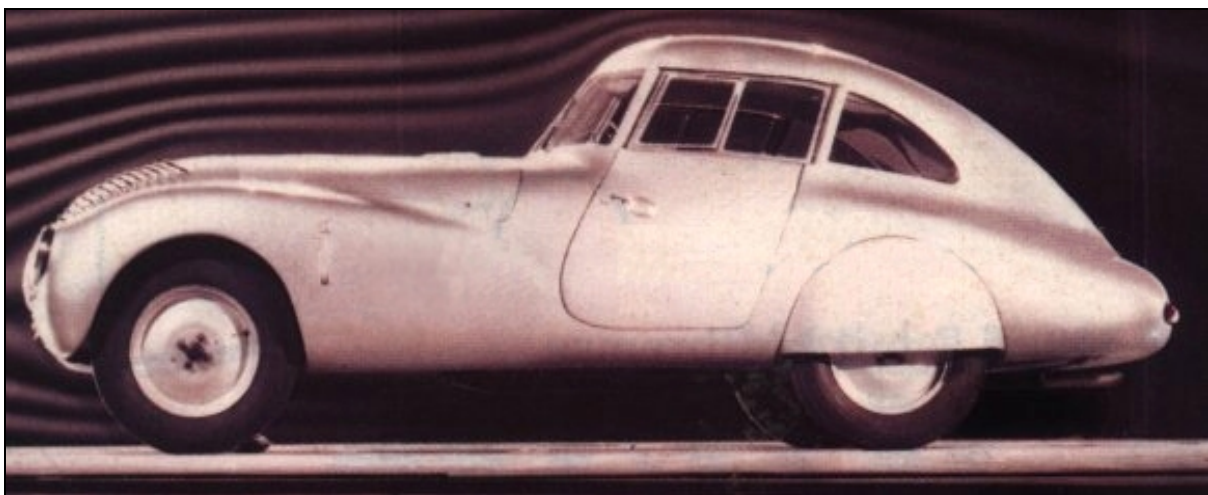
Cette consommation spécifique (c_{sp} , en français et sfc ou $bsfc$ en anglais) est inversement proportionnelle au rendement thermique η du moteur selon la relation suivante :

$$\eta = 85,7 / c_{sp} \text{ si la puissance est donnée en kW et la consommation spécifique en g/(kW.h).}$$

$$\eta = 63,1 / c_{sp} \text{ si la puissance est donnée en CV et la consommation spécifique en g/(cv.h).}$$

On voit qu'un moteur qui consomme 180 g/(cv.h) a un rendement de 0,35, soit 35%.

C'est entre 75% et 100% de charge qu'un moteur à sa consommation spécifique la plus faible et cette consommation augmente fortement sous faible charge. Elle augmente aussi sous forte charge à partir d'un certain régime.



Etude de JARAY pour la BMW 328

MESURE DES TRAINEES AERODYNAMIQUE ET DE ROULEMENT DE VOTRE AUTOMOBILE.

Lors d'une décélération avec moteur débrayé sur sol plat et sans vent, deux forces s'opposent à l'avancement :

- La traînée de roulement indépendante ou presque de la vitesse.
- La traînée aérodynamique proportionnelle au carré de la vitesse.

$$\sum \vec{F}_{ext/ auto} = m \cdot \Gamma(G; auto / sol)$$

$$-\left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{moy}^2 \cdot S_f \cdot C_{xp}}_{\text{Trainée aérodynamique}} + \underbrace{C_{rr} \cdot m \cdot g}_{\text{Trainée de roulement}} \right] = m \cdot \underbrace{\Gamma(G; auto / sol)}_{\text{Décélération}}$$

METHODE DES DECELERATIONS.

- La méthode consiste à faire rouler en roue libre (moteur débrayé) votre auto sur sol plat et sans vent et à mesurer les décélérations moyennes à petite et grande vitesses. La décélération à petite vitesse permet de mesurer la traînée de roulement et la décélération à grande vitesse permet de mesurer la traînée aérodynamique.

TRAINEE DE ROULEMENT.

En mesurant la décélération sur une courte période à petite vitesse (<10 km/h) on peut estimer la traînée de roulement en négligeant la traînée aérodynamique.

Procédure expérimentale :

- Sur sol horizontal, sans vent, rouler à vitesse constante faible (par exemple 15km/h).
- Débrayer complètement.
- Au passage de l'aiguille du tachymètre devant la graduation $V_0 = 10 \text{ km/h}$ (2,8 m/s), déclencher le chronomètre (t_0).
- Au passage de l'aiguille du tachymètre devant la graduation $V_1 = 5 \text{ km/h}$ (1,4 m/s), arrêter le chronomètre (t_1).
- Relever la durée mesurée à l'aide du chronomètre $\Delta t = t_1 - t_0$.
- Après plusieurs séries de mesures dans les deux sens (pour annuler l'effet d'une éventuelle brise), la détermination expérimentale du coefficient de roulement se fait très simplement à l'aide du calcul suivant :

Avec

$C_{rr} = \frac{V_0 - V_1}{g \cdot \Delta t_{01}}$	$C_{rr} \approx 10/1000$ [-]	Coefficient de résistance au roulement.
	V_0 et V_1 [m/s]	Vitesse à t_0 et t_1
	$g : 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$	Accélération de la pesanteur.
	Δt_{01} [s]	Durée mesurée à l'aide du chronomètre entre t_0 et t_1

TRAINEE AERODYNAMIQUE :

En mesurant la décélération sur une courte période à grande vitesse (>100 km/h) on peut estimer la traînée aérodynamique. Vous devez connaître parfaitement la **masse de l'auto** lors de l'essai ainsi que sa **surface frontale**.

Procédure expérimentale :

- Sur sol horizontal, sans vent, rouler à vitesse constante faible (par exemple 130 km/h ; 36,1 m/s).
- Débrayer complètement.
- Au passage de l'aiguille du tachymètre devant la graduation $V_0 = 120 \text{ km/h}$ (33,33 m/s), déclencher le chronomètre (t_0).
- Au passage de l'aiguille du tachymètre devant la graduation $V_1 = 115 \text{ km/h}$ (31,94 m/s), arrêter le chronomètre (t_1).
- Relever la durée mesurée à l'aide du chronomètre $\Delta t = t_1 - t_0$.
- Après plusieurs séries de mesures dans les deux sens (pour annuler l'effet d'une éventuelle brise) et à grande vitesse (pas moins de 100 km/h pour minimiser les erreurs expérimentales), on calculera le coefficient de traînée de pression (C_{xp}) à l'aide de la formule suivante :

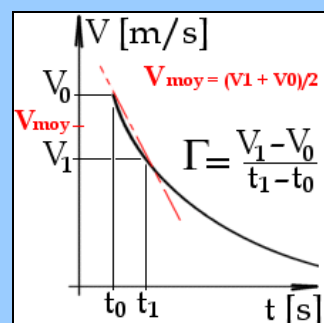
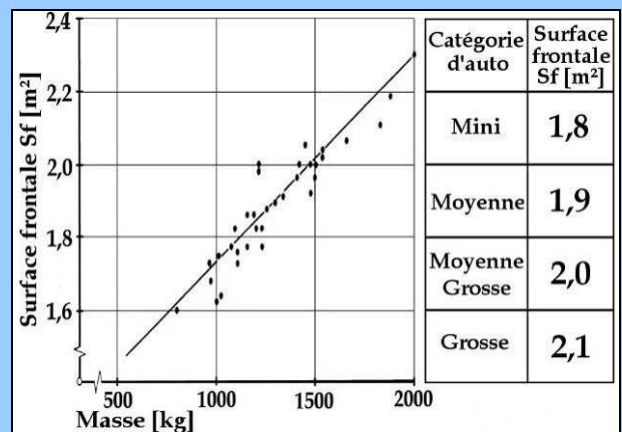
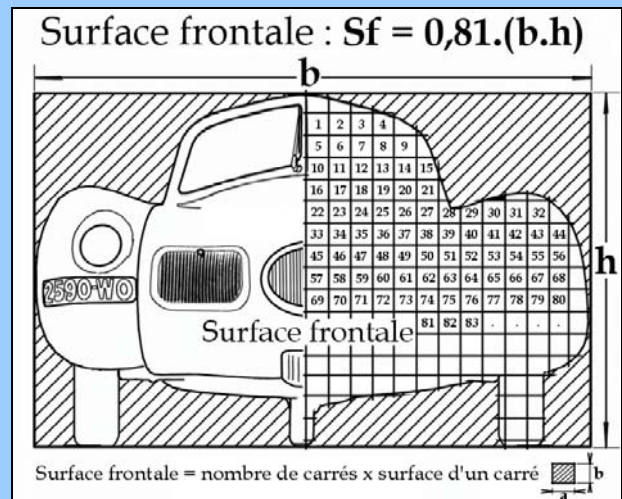
$$C_{xp} = \left[\left(\frac{V_0 - V_1}{t_1 - t_0} \right) + C_{rr} \cdot g \right] \cdot \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot V_{moy}^2 \cdot S_f}$$

Avec

m [kg]	Masse de l'auto lors de l'essai.
ρ [kg/m ³]	Masse volumique de l'air ; $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
V_{moy} [m/s]	Vitesse moyenne $V_{moy} = (V_0 + V_1)/2$
S_f [m ²]	Surface frontale ; maître couple.

EVALUATION DE LA SURFACE FRONTALE [m²] :

La surface frontale peut se mesurer avec la méthode des « petits carrés ». Sinon, elle peut s'évaluer avec la formulation ou les valeurs statistiques suivantes :

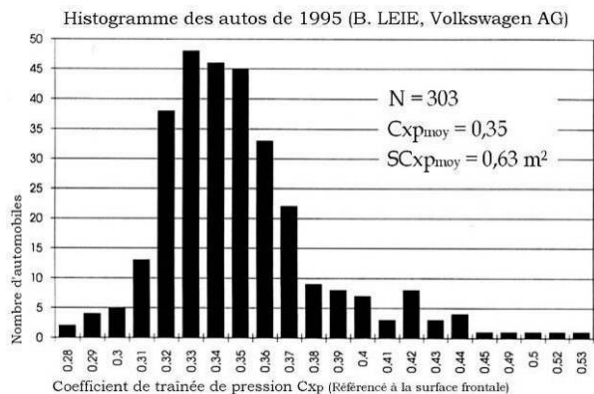
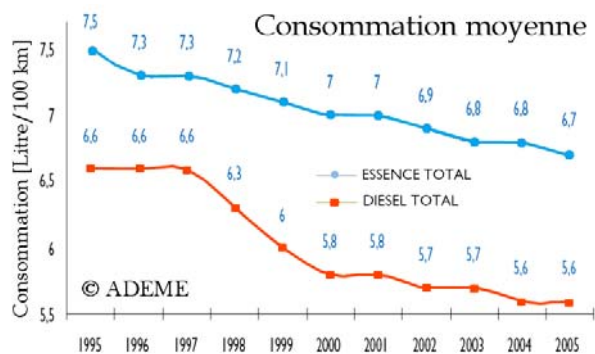
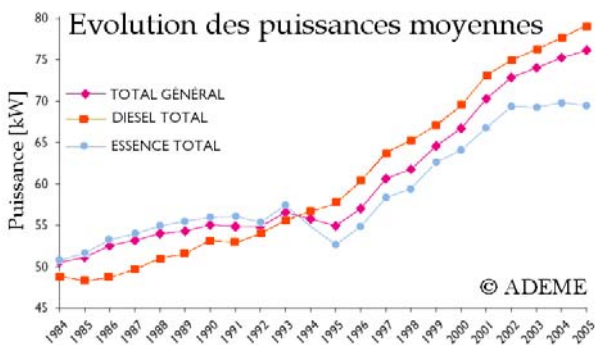
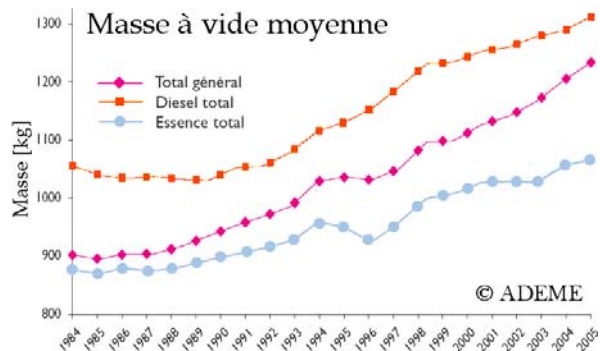


© Matthieu BARRREAU & Laurent BOUTIN 2008

5. EVOLUTIONS POSSIBLES ?

5-1. ETAT DE L'ART ACTUEL :

L'analyse des données statistiques sur les véhicules en circulation (cf. graphes ci dessous), indique que les véhicules automobiles actuels sont, comparés à tous les autres moyens de transport utilisés par l'homme, des catastrophes énergétiques ambulantes, et ce malgré les progrès réels accomplis par les constructeurs sur les consommations spécifiques.



Pour transporter une charge utile d'environ 400 kg (4 personnes) il faut actuellement en moyenne :

- **1250 kg de ferraille** (masse à vide moyenne des véhicules en 2005).
- Une **centaine de chevaux** (75 kW) de puissance motrice installée.
- Pour une consommation de **6 litres de pétrole aux 100 km !**

Le simple retour à l'état de l'art démontré par Jean Andreau avec sa Mathis 333 de 1946 permettrait :

- **De diviser par deux (+2)** la consommation (**3 litres/100 km** en 1946 !).
- **En divisant par trois (+3)** la masse à vide (380 kg pour la Mathis 333).
- **En divisant par deux (+2)** la traînée aérodynamique (Surface de traînée SCx = 0,3 m² au lieu de 0,63 m² en moyenne actuellement).
- **Et en divisant par cinq (+5)** la puissance motrice installée (20 cv au lieu de 100 !!).

De telles perspectives de progrès de performance feraient rêver les autres constructeurs de moyens de transport (aéronautique, maritime, ferroviaire etc ...).

COMMENT EN EST-ON ARRIVÉ LÀ ?

- **Constructeurs = fabricants + vendeurs.**

L'objectif d'un constructeur automobile, dans nos sociétés libérales, n'est pas de concevoir des véhicules économiques mais de réussir à fabriquer des autos en Occident et à les vendre à prix compétitif. Tous leurs efforts sont portés dans ce sens, il est donc difficile d'imputer cette situation aux « lobbies des constructeurs ».

Tout au plus pourraient-ils dès maintenant proposer à la vente des produits valables aux utilisateurs-payeurs que nous sommes, comme l'expérience des plus grands succès commerciaux le prouve. Cela revient à être en avance sur son temps, et non pas en retard.

- **Consommateurs ≠ utilisateurs.**

Le futur client potentiel, qui n'est pas nécessairement physicien, ne possède en général pas de références chiffrées lui montrant ce qu'il est possible de faire. Il ne connaît en général pas les limites théoriques et pratiques, i.e. l'état de l'art.

De plus, l'utilisateur est de plus en plus souvent remplacé par un consommateur qui achète impulsivement (rappelons au passage que dans utilisateur il y a la racine « utile » alors que dans consommateur).

- **Prix scandaleusement bas du pétrole.**

La consommation kilométrique n'est pas encore l'argument n°1 lors du choix d'un véhicule. Il intervient en général en troisième position derrière l'esthétique et la sécurité. Autant dire qu'il n'intervient presque pas. La preuve : tous les automobilistes se contentent de véhicules qui consomment 4 à 6 fois ce qu'il serait possible de faire aujourd'hui !!!

Cela est dû au prix anormalement bas du pétrole. Que l'on se rassure, les lois de la Physique et de dame Nature étant immuables, l'argument énergétique va redevenir inévitablement un critère de choix, ce n'est qu'une question de temps.

La Physique et les auteurs affirment que oui !

Objectif immédiatement envisageable :

1,5 litre aux 100 km*

Soit une division par **quatre (+4)** de la consommation pour un véhicule familial de quatre places.

*Trajet sur route à 90 km/h.

COMMENT ?

- **En divisant par trois (+3)** la masse à vide des véhicules actuels. (passage de 1200 à 400 kg).
- **En divisant par deux (+2)** la résistance aérodynamique. (Surface de traînée diminuée de 50%)
- **En divisant par cinq (+5)** la puissance motrice installée. (20 cv au lieu de 100 !)

5-2. AXES D'AMELIORATIONS :

Objectif envisageable dans un futur proche :

<1 litre aux 100 km*

Soit une division par **six (+6)** de la consommation pour un véhicule familial de quatre places.

*Trajet sur route à 90 km/h ou trajet urbain.

COMMENT ?

- **En divisant par trois (+3)** la masse à vide des véhicules actuels. (passage de 1200 à 400 kg).
- **En divisant par cinq (+5)** la puissance motrice installée. (20 cv au lieu de 100 !!).
- **En divisant par deux (+2)** la résistance aérodynamique. (Surface de traînée diminuée de 50 %).
- **En adoptant une propulsion hybride adaptée** à chaque type de résistance. Un moteur irréversible (moteur thermique) pour les résistances de roulement et aérodynamiques (dissipatives) et un moteur réversible (accumulateur cinétique ou chimique + moteur/alternateur électrique) pour les résistances à l'accélération - freinage et montée - descente (conservatives).

Les limites des paramètres massiques et aérodynamiques ont été atteintes dès les années quarante (Mathis/Andréau 333) :

Masse à vide = 380 kg ; $S.Cx_0 = 0,4 \text{ m}^2$.

Le seul paramètre sur lequel des progrès significatifs sont possibles est le **Groupe Moto Propulseur²⁵** et son adaptation à la mission.

²⁵ Le Groupe Moto Propulseur comprend l'ensemble moteur + transmission et accessoires (+ pétrole pour le bilan de masse).

* LA PROPULSION :

C'est dans ce domaine que les gains possibles nous seront les plus importants. La spécificité du cahier des charges d'une propulsion d'auto est à prendre en compte dès la conception du GMP.

LE MOTEUR THERMIQUE :

- Il doit se contenter de fournir la puissance moyenne, et de compenser les pertes par frottement.

QUELLE PUISSANCE ?

En partant d'une masse maximum en charge **m = 850 kg** (masse à vide 450 kg + 400 kg de charge utile) ; d'une vitesse de croisière oscillant entre 90 (25 m/s) et **V_{cr} = 125 km/h** (35 m/s), d'une surface de traînée **S_f.C_x_p = 0,4 m²**, et d'un moteur adapté, on arrive à une puissance nécessaire inférieure à 12 kW (6 kW à 90 km/h), ce qui correspond à une consommation comprise entre deux et trois litres aux cent kilomètres.

Une puissance continue installée de **18 kW (25 cv)** garantirait des taux de montée acceptables (vitesse 65 km/h sur une pente de 10%).

- Avec le cahier des charges évalué ci-dessus, une petite trentaine de poney²⁶ suffisent. Il doit tourner à vitesse constante ce qui permet d'améliorer son rendement.

- Les critères de qualité exigent une masse du groupe motopropulseur (masse moteur + masse carburant) aussi faible que possible pour une durée de vie suffisante.

La puissance spécifique (puissance / masse) doit donc être maximisée et la consommation spécifique minimisée.

Critères de base (rappels) :

- masse et encombrement spécifiques
- consommation spécifique
- fiabilité, durée de vie
- faibles nuisances (bruit, pollution)

Puissance = 18 kW = 25 cv

V_{max} = 140 km/h ; vitesse 65 km/h sur pente 10%

QUELLE MASSE ?

La **masse du groupe motopropulseur** est le paramètre d'étude le plus intéressant, parce que c'est de loin **le plus sensible** quant au résultat final. Il impose une prise en compte synthétique de tous les autres paramètres, donc un point de vue de conception non cloisonné. Il implique naturellement l'existence d'un ingénieur généraliste à compétences étendues, scientifiques, technologiques et économiques : Un **DESSINEUR** !²⁷

Les critères de qualité, ramenés à la puissance maximale continue fournie par le groupe motopropulseur, sont les suivants :

- faible masse spécifique (entre 1 kg/kW et 1,5 kg/kW)
- faible consommation spécifique. (0,25 kg/kW.h)
- fiabilité particulièrement élevée.
- faible coût de fabrication, modularité indispensable.
- durée de vie suffisante et adaptée.
- facilité et faible coût de l'entretien.
- régime de sortie adapté.
- faibles nuisances : bruit et pollution, en particulier.

²⁶ Le « poney » correspond pour les auteurs à l'unité de puissance équivalente au cheval vapeur européen (736 W) :-)

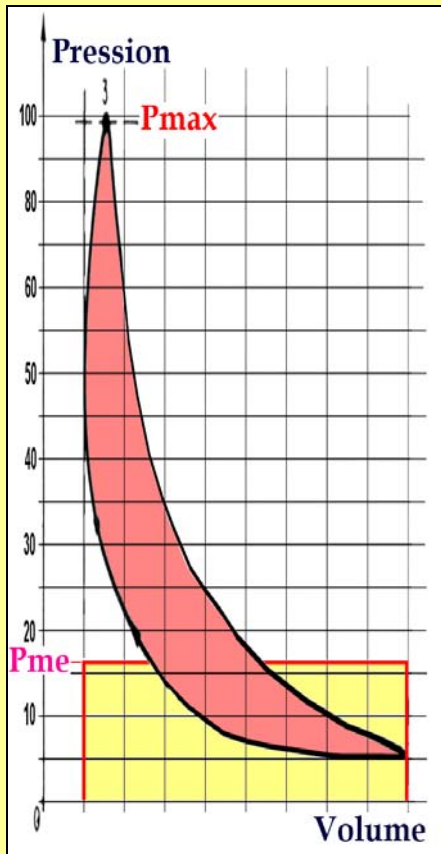
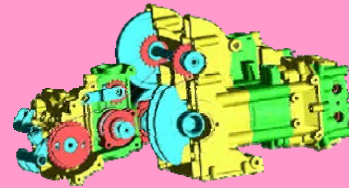
²⁷ « Dessineur » terme inventé par René LOIRE dans son excellent plaidoyer sur la conception : « Le Dessineur d'abord ». Références en fin d'article.

ELEMENTS DE CONCEPTION RATIONNELLE D'UN MOTEUR THERMIQUE LEGER.

$$P = P_{me} \cdot V \cdot n$$

Avec :

P : Puissance [W]
P_{me} : Pression moyenne effective [Pa]
V : cylindrée [m³]
n : nombre de cycles thermodynamiques par seconde [s⁻¹]
 n = N [tr/s] pour un deux temps
 n = N/2 [tr/s] pour un quatre temps



Ecart entre Pmax et Pme

L'impératif de légèreté du moteur impose une **pression maximale (P_{max})** faible dans le cylindre (dimensionnante pour les efforts de pression) et un régime faible (dimensionnante pour les efforts d'inertie proportionnels à la vitesse de rotation au carré). Cependant un régime élevé permet d'obtenir de la puissance par le nombre de cycles moteurs par unité de temps. Un compromis doit donc être établi en tenant compte de la durée de vie exigée.

La puissance impose une **pression moyenne effective (P_{me})** élevée qui en augmente le couple (rappel : puissance = couple x régime)

L'idée d'amélioration est la suivante :

Pour une masse donnée de moteur (cylindrée donnée, régime donné dimensionnant les forces d'inerties et P_{max} donnée dimensionnant les forces liées à la pression max), pour augmenter la P_{me} (i.e. la puissance), il n'y a qu'une solution :

Augmenter la pression d'admission et diminuer le rapport volumétrique ou, si l'on préfère, séparer la compression préalable en :

- une pré compression à l'aide d'un compresseur (style centrifuge) fonctionnant en continu (très léger) ;
- et la compression finale dans le cylindre.

La pression avant inflammation est la même, la pression max est la même, mais la pme est supérieure (la pression dans le cylindre évolue entre une Pression d'admission élevée et une P_{max} donnée = pression moyenne plus élevée), donc la puissance aussi. (Notons que dans ce cas, le compresseur fait partie de la chaîne de fiabilité. La perte de pression d'admission entraîne une baisse sensible de la puissance)

On peut voir aussi la chose en considérant que le compresseur préalable (léger) fait une première partie du travail de compression pour des pressions et températures raisonnables, EN CONTINU (contraintes dans les matériaux acceptables) et le piston finit le travail de compression, (puis combustion DISCONTINUE) pour les pressions et surtout les températures peu raisonnables si elles étaient continues (intérêt majeur des combustions discontinues).

Accessoirement, une turbine à l'échappement peut récupérer par détente prolongée (ce qui ne s'est pas produit dans le cylindre) de quoi entraîner le compresseur.

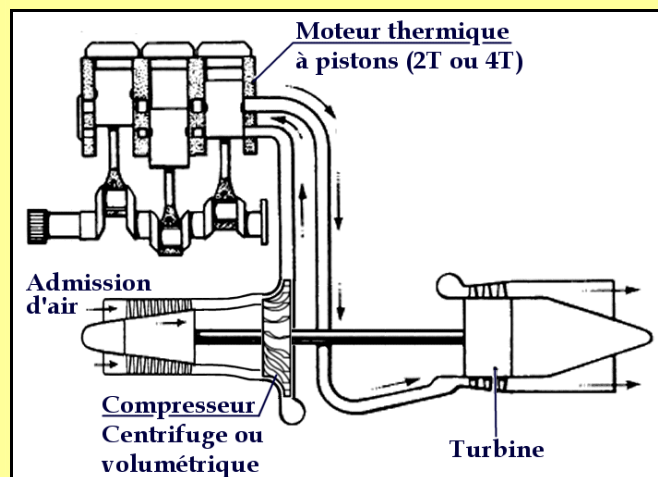
A puissance constante, l'augmentation de la Pme permet une diminution de la cylindrée = compacité + légèreté + rendement + coût.

Le passage au cycle improprement dit "à deux temps" est aussi à étudier car il permet de doubler le nombre de cycles moteurs et donc la puissance, toutes choses restant égales par ailleurs. Cependant, la nécessité de balayage en air obère la situation :

- en balayant par le carter, on diminue la Pme et les possibilités de graissage.
- en balayant par pompe externe, on augmente la masse, ce d'autant plus que le moteur est petit.

Le passage au moteur 2 temps pour les très faibles puissances est donc à étudier attentivement alors que pour les fortes puissances la question ne se pose pas (2T).

Conclusion : on vient de réinventer le moteur à piston « turbo compound » (Napier Nomad...).



Architecture de moteur « turbo compound »

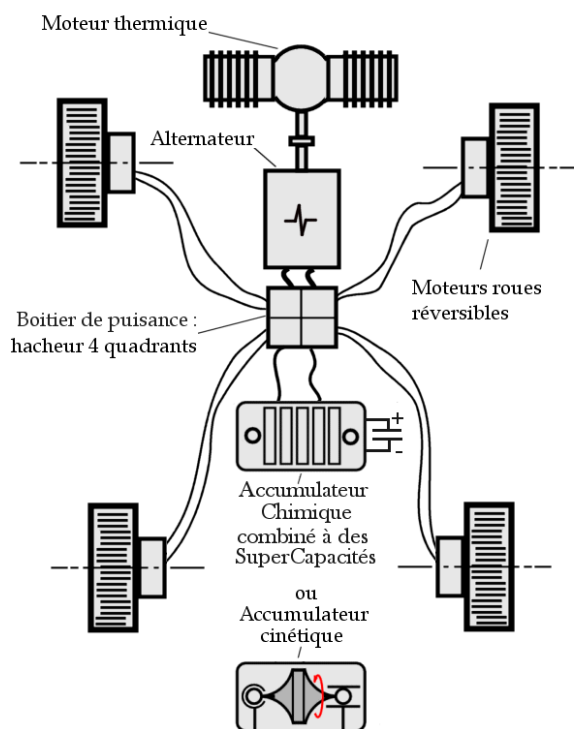
* UNE CHAÎNE DE PROPULSION HYBRIDE

Avec l'installation d'un dispositif de récupération de l'énergie cinétique à bord du véhicule, la consommation en trajet urbain peut être sensiblement réduite en raison des très faibles vitesses de déplacement.

Pour justifier la description qui suit, remarquons qu'un moteur de voiture n'utilise en moyenne que 10 % de la puissance installée (la puissance maximale sert très brièvement lors de la fin d'une accélération, quand le régime atteint la valeur de puissance maximale).

Installons un moteur **irréversible** pour fournir la puissance liée aux frottements (de roulement et aérodynamiques), eux-mêmes irréversibles (forces de traînées dissipatives), et un moteur **réversible** pour fournir la puissance d'inertie, elle-même réversible (forces de traînées conservatives).

Une chaîne de propulsion hybride permet d'utiliser au mieux chaque type de moteur et d'améliorer la qualité massique des véhicules (un moteur thermique de 18 kW – 25 cv - qui tourne à régime constant, c'est très léger).



Architecture d'un véhicule hybride combinant les avantages des moteurs irréversibles et réversibles.

En faisant les bons choix cités ci-dessus, on peut atteindre sans difficultés 30 à 35 % de rendement pour une puissance fournie d'environ 18 kW, pour une masse totale du groupe motopropulseur inférieure à 55 kg.

Moteur thermique : 25 kg (1 kg/cv)

Alternateur : 12,5 kg (0,5 kg/cv)

Moteurs roues : 17,5 kg (0,7 kg/cv)

L'étude d'une transmission de puissance totalement électrique semble amener un avantage massique en autorisant une puissance de crête instantanée largement supérieure à la puissance moyenne (une transmission mécanique casse là où une transmission électrique passe).

En prenant soin de l'aérodynamisme interne du moteur, et compte tenu de la faible puissance fournie, les problèmes de bruit sont réglés automatiquement avec un très petit silencieux, léger et peu coûteux.

*Masse GMP (moteur + transmission) = 55 kg
pour 25 cv*

* LA STRUCTURE

MASSE :

Diminution du nombre de pièces par intégration des fonctions (climatisation intégrée au moteur par surdimensionnement du compresseur de balayage, recharge solaire)

La qualité de conception pour la tenue aux crashes est beaucoup plus importante que l'augmentation de l'épaisseur des tôles. Contrairement à l'opinion commune, il n'y a pas contradiction entre légèreté et sécurité.

La diminution de la masse du véhicule impose de concentrer les masses utiles autour du centre de gravité (évidence bonne à rappeler).

AERODYNAMIQUE :

L'état de l'art ayant été définie par Andeau et sa Mathis 333 ($C_{x_p} = 0,22$; $S_f.C_{x_p} = 0,4 \text{ m}^2$) les gains possibles se situent surtout dans l'amélioration des écoulements internes et dans le perfectionnement de détail (raccords de carrosserie). Il semble cependant que l'on atteigne l'asymptote avec des surfaces de traînées de $0,3 \text{ m}^2$ pour une voiture quatre places.

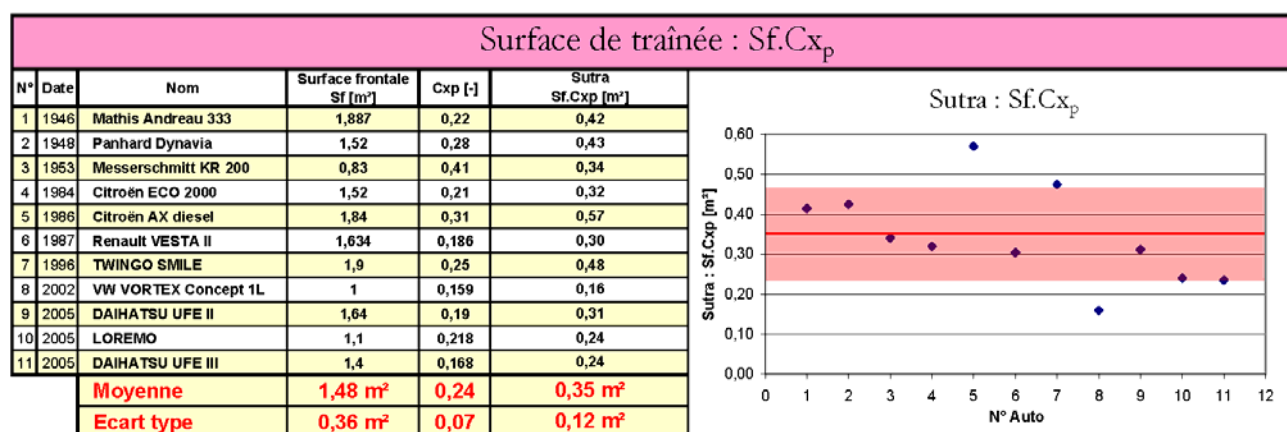
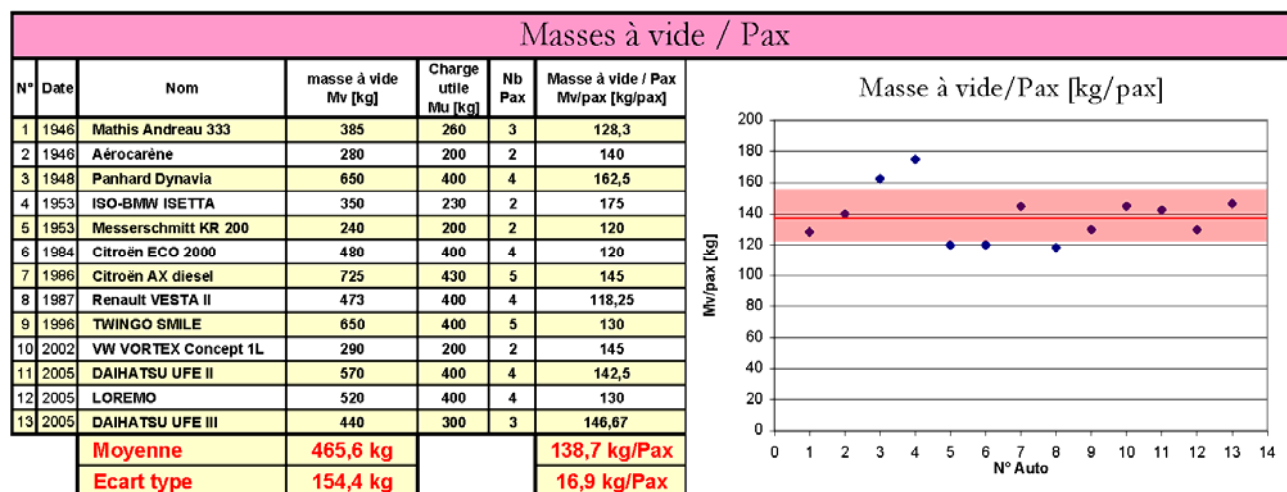
* LES EQUIPEMENTS

La règle générale dans l'étude des équipements est la suppression physique de ceux-ci. La chasse au superflu devient automatiquement une chasse au kilogramme de masse superflu, ce qui va dans le bon sens de l'amélioration des performances et du coût.

« Tout ce qui n'est pas absolument nécessaire est inutile ! »

* ETAT DE L'ART STATISTIQUE

Une étude statistique d'une sélection de véhicules remarquables (cf. « chapitre 7 : Des exemples à suivre ») permet de fixer les valeurs dimensionnant les véhicules économiques futurs.



Pour un véhicule quatre places (formule 2 + 2 : deux places confort à l'avant, deux places enfants à l'arrière) il est raisonnable de viser une masse à vide de 490 kg (122 kg/pax) et une surface de traînée 0,3 m². Ces valeurs combinées à une motorisation hybride correctement dimensionnée (Csp = 185 g/cv.h au point de fonctionnement) permettent d'envisager les performances suivantes :

Consommation $\approx 1,5$ litre aux 100 km sur route à 90 km/h

*Trajet sur route à 90 km/h, masse lors de l'essai = 650 kg (2 personnes à bord).

Consommation < 1 litre aux 100 km sur trajet urbain

*Trajet urbain à 50 km/h, masse lors de l'essai = 650 kg (2 personnes à bord).

6. CONCLUSION : LE FUTUR, C'EST LE RETOUR AUX SOURCES !

L'ESSENCE DU RETOUR AU MINIMUM :

La tendance générale de l'humanité a toujours été d'augmenter la vitesse de ses déplacements. De ce point de vue, le XX^{ème} siècle fut celui de l'accélération. Suivant la formule : « pas de bras, pas de chocolat », cette accélération n'aurait pas eu lieu sans pétrole.

La dimension finie des ressources (« l'or noir » entre autre) et le gaspillage amphigourique²⁸ et léviathanesque²⁹ de nos sociétés modernes conduit inévitablement au développement explosif d'un esclavagisme, lui aussi moderne, par délocalisation ! En effet l'inévitable compétition entre "alpha plus" qui roule et mange trop et « epsilon moins » qui crève de faim et marche péniblement se traduit par l'asservissement automatique du deuxième au profit du premier !

« Noblesse oblige », notre confort et notre sécurité, c'est-à-dire, la conservation de nos privilèges à long terme imposent la redistribution d'une partie des richesses. Il est donc indispensable de réduire nos consommations d'énergie.

Il se trouve que c'est possible ! (Le désire t'on vraiment ?)

- Premièrement par un retour à l'état de l'art démontré par Jean Andreau et par ses successeurs. On l'obtient par diminution des masses et des surfaces de traînées, grâce au « jus de cervelle », beaucoup plus efficace que les technologies aïlletée !

- Deuxièmement par une diminution des vitesses de déplacement, paramètre dominant de la dépense énergétique. On rappelle que la puissance nécessaire au déplacement croît comme le cube de la vitesse. Une diminution même modeste de la vitesse permet une diminution importante des consommations.

De ce point de vue, le XXI^{ème} siècle sera celui de la décélération !



La destruction du Léviathan

²⁸ Amphigouriques : « qui n'a ni ordre, ni sens » !

²⁹ Léviathanesque : Qui se rapporte au Léviathan. Le Léviathan est un monstre marin dont le nom désigne un monstre colossal. Ce monstre, dont on ignore la forme, peut être considéré comme l'évocation d'un cataclysme terrifiant capable de modifier la planète, et d'en bousculer l'ordre et la géographie sinon d'anéantir le monde.

7. DES EXEMPLES A SUIVRE :



MATHIS ANDREAU 333 (1946)

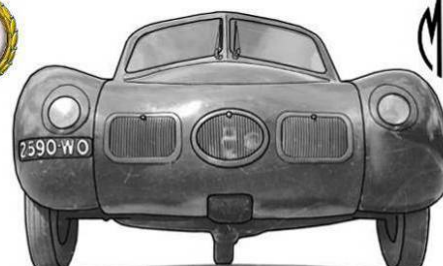
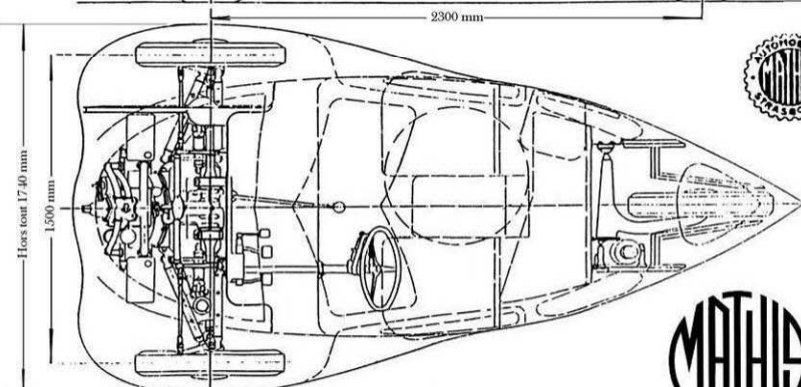
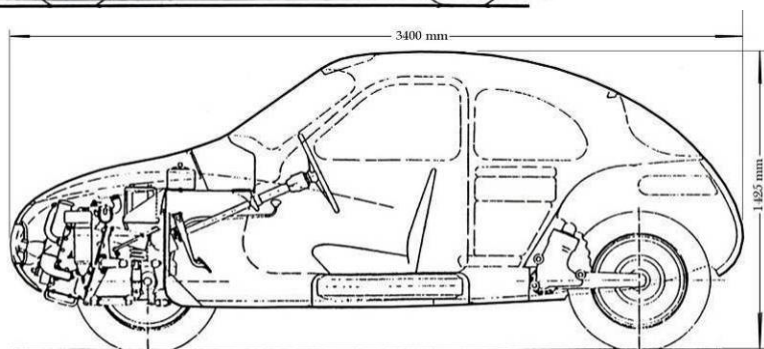
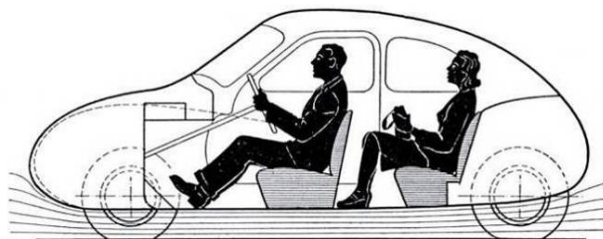
Description

Dimensions	3,400 m x 1,740 m x 1,425 m (L x l x h) Voie 1,5 m ; Empattement 2,3 m
Sièges	3
GMP	Bicylindre 4 temps 700 cm ³ Refroidi par liquide
Puissance	15 cv à 3000 t/min
Boîte de vitesse	4 vitesses

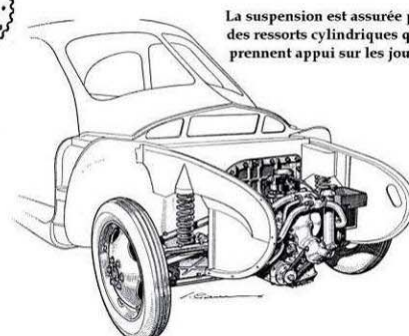
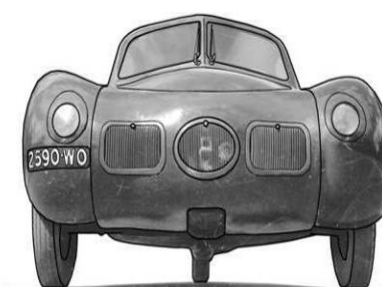
Performances

Masse à vide [kg]	385 kg
Charge utile [kg]	260 kg
C _x [-]	0,22
S _f [m ²]	1,887 m ²
S _f C _x [m ²]	0,41 m ²
Vitesse max	105 km/h
Consommation	3,5 Litres/100 km
Vitesse moyenne [km/h]	40 50 60 70
Litres aux 100 km	1,95 2,08 2,3 2,45
Autonomie	Environ 500 km (réservoir de 18 litres)

Quintessence de la bonne combinaison "aérodynamique - masse - gmp", pondue par un gars qui savait optimiser, la 333 aurait dû être la "4L" d'après guerre. Malheureusement, des considérations non techniques en ont décidé autrement.



LA VOTURE MATHIS



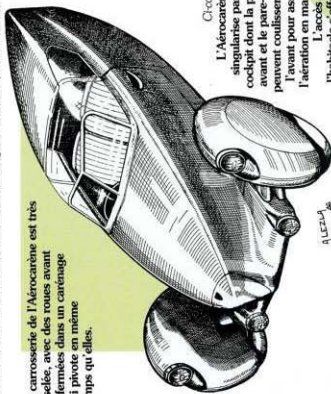
La suspension est assurée par des ressorts cylindriques qui prennent appui sur les joues.

AÉROCARÈNE

Cet engin original à trois roues est l'un des nombreux modèles d'après-guerre qui ne dépasseront pas le stade du prototype.

ANNONCÉE À L'OCCASION DU SALON DE PARIS 1946, l'Aérocarène sera exposée au Salon suivant puis elle disparaîtra définitivement, ses prototypes n'étant parvenus à convaincre les pouvoirs publics et n'ayant pu réunir les moyens nécessaires pour le lancement d'une production en série. L'Aérocarène a été créée par MM. Desbessnoit et Bodu, deux jeunes ingénieurs qui ont déjà une bonne expérience en technique aéronautique et en mécanique automobile. Pour leur curieux prototype « 700 », ils ont adopté la formule économique à trois roues et moteur bicylindre deux temps entraînant directement l'unique roue arrière. L'Aérocarène est prévue pour transporter deux passagers à 120 km/h environ en consommant moins de 4 litres aux 100 kilomètres, ceci grâce au faible poids et au bon profil.

La carrosserie de l'Aérocarène est très fuselée, avec des roues avant enfermées dans un carénage qui pivote en même temps qu'elles.



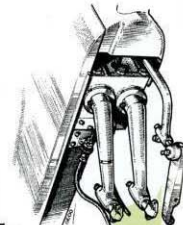
Contre L'Aérocarène se singularise par son cockpit dont la partie avant et le pare-brise pivotent ensemble vers l'avant pour assurer l'aération en marche.

L'accès dans l'habitacle s'effectue en faisant avancer toute la partie avant, montée sur glisseurs, L'ensemble de la partie arrière se relève pour accéder au moteur.



L'Aérocarène n'ayant pas de portières, on y accède en faisant glisser tout le capot, faisant pivoter le capot, La solution est sans doute ingénieuse mais l'espace dégagé est très réduit, ce qui ne permet pas au strictement pas au strictement serré le long des trottoirs de nos grandes villes.

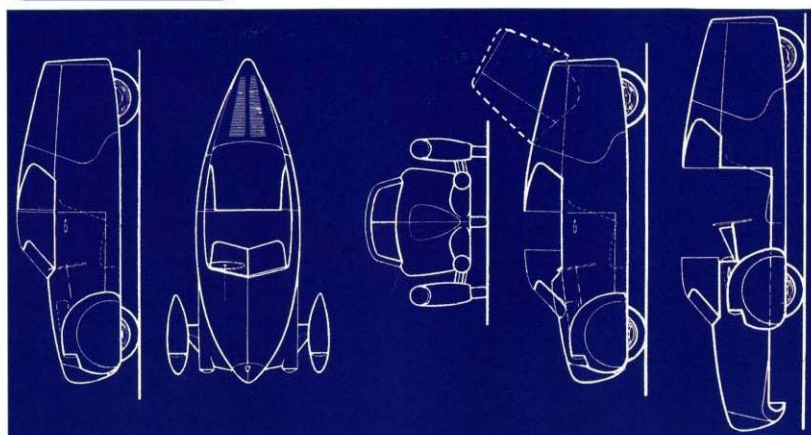
La suspension avant comporte deux bras associés à une barre de torsion transversale.



fil de la carrosserie en duralinox. Celui-ci est conçu comme un véritable fuselage d'avion, avec un cockpit en plexiglas et un pare-brise en verre triplex. Les roues avant directrices se trouvent à l'extérieur de la carrosserie et sont cachées dans un carénage incorporant les phares ; ces derniers s'orientent donc automatiquement dans le sens de la trajectoire du véhicule (comme le feront dix-neuf ans plus tard les phares des ID et DS Citroën).

CARACTÉRISTIQUES

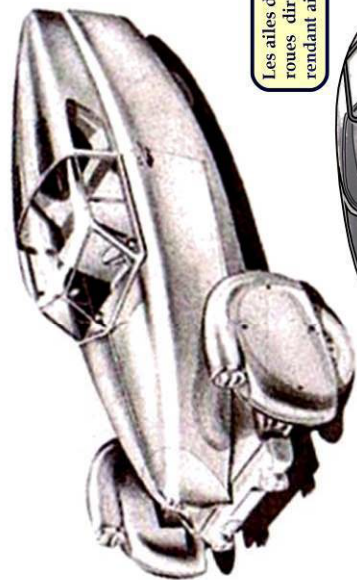
TYPE 700 - Moteur AMC « CV » dispose à l'arrière, 2 cylindres en ligne, 2 temps, 684 cm³ (76 x 76 mm), 25 ch à 4 000 tr/min, refroidissement par air direct. Transmission à 4 vitesses (sans rapport surmultiplicateur). Freins hydrauliques. Direction à crémaillère, avec volant à gauche ou à droite. Suspension AV à roues indépendantes avec barres de torsion transversales ; AR avec ressort hélicoïdal. Pneus : 135 x 400. Empattement : 242,5 cm. Voie AV : 152 cm. Longueur hors tout en position levée : 343 cm. Poids : 280 kg. Vitesse : 120 km/h. Prix : non indiqué (prototype).



0 1 2 3 m

SALON 1946 - 9 ANNEE 1947

DESBESNOIT-BODU AEROCARENE (1946)



Les ailes de l'aérocarène enveloppent les roues directrices et pivotent avec elles rendant ainsi les phares orientables.



Les rédacteurs aiment bien cette jolie automobile issue du "système D" à la française.



Masse à vide Mv = 280 kg
Charge utile Mu = 200 kg
Surface Frontale Sf = 1,15 m²
Cxp = 0,55 (estimes)

AEROCARENE



PANHARD DYNAVIA (1948)

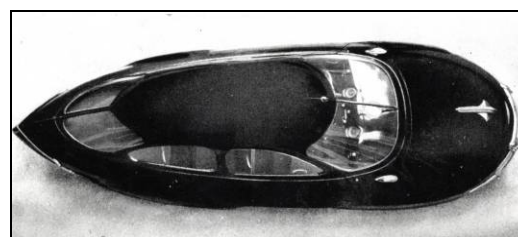
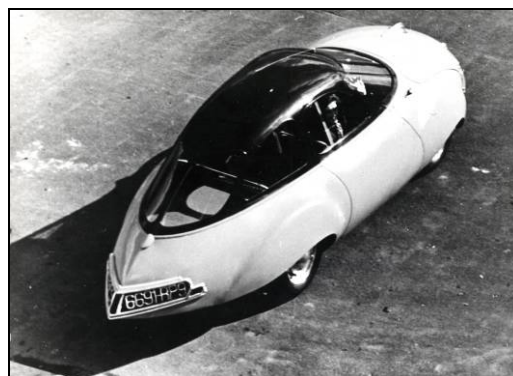
Description

Dimensions	4,400 m x 1,700 m x 1,450 m (L x l x h) Empattement : 2,120 m ; Voie : 1,220 m
Sièges	4
GMP	Bicylindre 4 temps 610 cm3 refroidi par air
Puissance	28 cv à 5000 t/min
Boîte de vitesse	4 rapports

Performances

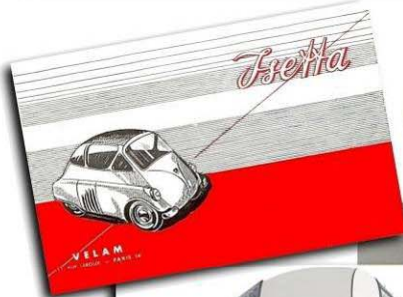
Masse à vide [kg]	650 kg
Charge utile [kg]	≈ 400 kg
Cx _p [-]	0,172 (maquette soufflerie)
	0,28 (Prototype)
	0,244 (prototype en configuration maquette - entrées d'air obstruées - etc ...)
Sf [m²]	1,52 m²
S _f .Cx _p [m²]	0,426 m²
Vitesse max	131 km/h seul à bord 111 km/h avec 4 personnes à bord
Consommation	3,5 L/100 à 80 km/h
Autonomie	?

Allez la voir au musée des arts et métiers et pleurez sur vos tas de ferraille roulants au passage à la pompe !

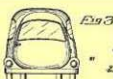
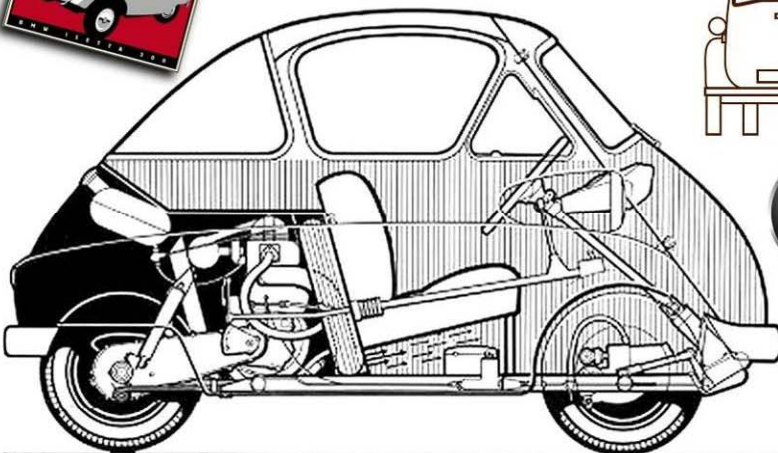
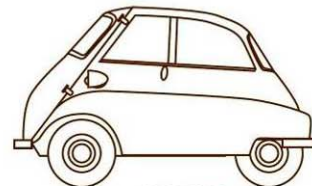
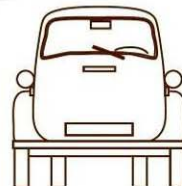


La Dynavia devant le Triton, premier avion à réaction français.

ISO-BMW-VELAM ISETTA (1953)



Un bruit élevé en usage, certes, mais une conception rationnelle adaptée à la ville.



Description

Dimensions (L x l x h) :
2,285 m x 1,340 m x 1,380 m
Sièges : 2,5
GMP : Monocylindre, 247 cm³
Rapport volumétrique : 6,8:1
Puissance maxi : 8,8 kW (12 cv)

Performances

Masse à vide [kg] : 350 kg
Masse Max [kg] : 580 kg
Charge utile [kg] : 230 kg
Cxp [-] estimé : 0,5
Sf [m²] : 1,39 m²
Sf.Cxp [m²] : 0,695 m²
Vitesse max : 85 km/h

Isetta

Consommation [L/100]

3,3 L/100 à 57 km/h
5,8 L/100 (Test de consommation)
Autonomie : 300 km
(capacité de réservoir 13 l)

MESSERSCHMITT-FEND KR 175 (1953) & KR 200 (1955)

Description	KR 175	KR 200
Dimensions	2,820 m x 1,220 m x 1,200 m (L x l x h) Voie 0,92 m ; Empattement 2,03 m	
Sièges	2,5	
GMP	Monocylindre deux temps Fichtel & Sachs refroidie par air.	
	173 cm ³	191 cm ³
Puissance	9 cv à 5250 t/min	10,2 cv
Boîte de vitesse	4 vitesses	


Performances	KR 175	KR 200
Masse à vide [kg]	220 kg	240 kg
Charge utile [kg]	140 kg	200 kg
Cx _p [-]		0,41
Sf [m ²]		0,83 m ²
S _f .Cx _p [m ²]		0,34 m ²
Vitesse max	80 km/h	98 km/h
Consommation	4 L/100	4,5 L/100
Autonomie	280 km	280 km
Réservoir	11,5 L	12,5 L

Messerschmitt




Né de l'association d'un inventeur de génie, Fend et d'un grand industriel de l'aéronautique, Messerschmitt, les KR 175 et 200 furent fabriqués à environ 50 000 exemplaires, un beau succès pour un produit conçu et fabriqué exactement au moment et à l'endroit voulus.....parfaite réponse à une question jamais posée !

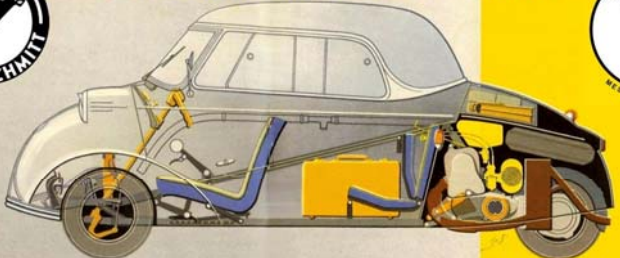

Quelle fierté pour les enfants d'être accompagnés à l'école par leur papa en Messerschmitt !!!



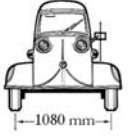
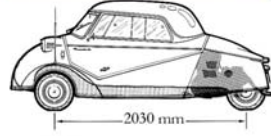
Messerschmitt Kabinenroller KR 200






MESSERSCHMITT KR 200


H = 1200 mm
l = 1220 mm
L = 2820 mm



2,5 passagers
Réservoir essence : 14 litres
Réservoir huile ; 2,5 litres
Consommation : 3,2 litres/100



Masse à vide : Mv = 230 kg
Charge utile : Mu = 200 kg
Surface frontale : Sf = 0,83m²
Coef. traînée : Cxp = 0,41
S.Cx = 0,34 m²

Moteur monocylindre 2 temps
Refroidissement par air.
Cylindrée : C = 191 cm³ ; s = 6,6:1
Alésage x Course : 65 mm x 58 mm
Puissance : P = 10 cv à 5250 t/min

Vitesse max :
V_{max} = 100 km/h
Vitesse croisière
V = 85 km/h



FIAT 500 (1957)

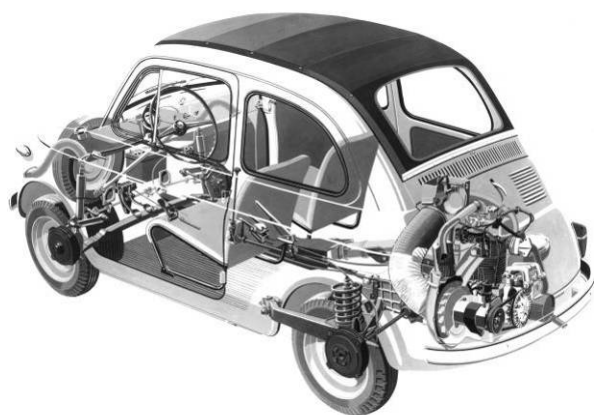
Description

Dimensions	2.970 m x 1.320 m x 1.325 m (L x l x h) Empattement 1,84 m ; voie AV 1,12 m ; voie AR 1,135 m
Sièges	4
GMP	Bicylindre 4 temps 499,5 cm ³ refroidi par air
Puissance	17 cv à 5000 t/min
Boîte de vitesse	4 rapports

Performances

Masse à vide [kg]	500 kg
Charge utile [kg]	≈ 400 kg
C _x [-]	≈ 0,47
S _f [m ²]	≈ 1,41 m ²
S _f .C _x [m ²]	≈ 0,66 m ²
Vitesse max	95 km/h
Consommation	5,5 L/100
Autonomie	380 km (21 litres)

Petite et donc légère, la fiat 500 fut une bonne citadine.





CITROEN Eco 2000 (PROTO SA 109 -SL10 -1984)

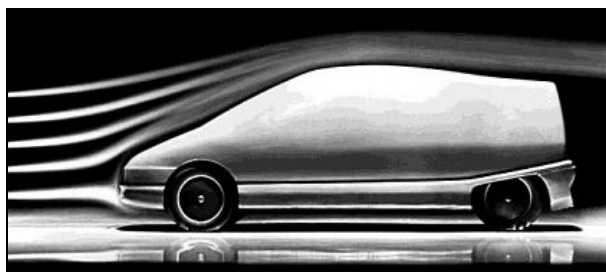
Description

Dimensions	3,49 m (L x l x h)
Sièges	4
GMP	Tri cylindres FIRE d'origine Fiat ; 749 cm ³
Puissance	26 kW, 35ch à 4750 t/min, 56 N.m ; Pme 8,84 bar

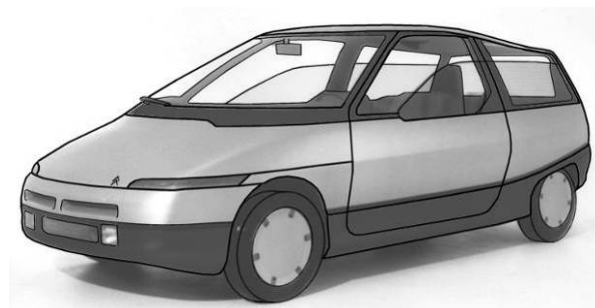
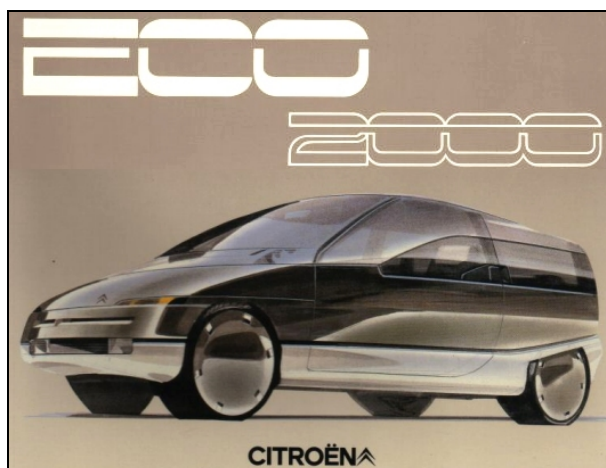
Performances

Masse à vide [kg]	480kg
Charge utile [kg]	≈ 400 kg
Cx _p [-]	0,210
Sf [m ²]	1,52 m ²
S _f .Cx _p [m ²]	0,32 m ²
Vitesse max	140 km/h
1000 m D.A	41,4 sec / 126 km/h
Consommation	3,1 à 3,5 l/100
	2,5 l/100 à 90 km/h

La Citroën Eco 2000 a été développée dans la période 1981 - 1984 pour étudier la conception d'une voiture sobre et légère. L'objectif était d'atteindre une consommation moyenne de 2 litres de fioul aux 100 km. L'expérience acquise avec la conception de ce prototype a été utile pour le développement de l'AX.



Le savoir faire de Citroën appliqué à l'économie d'énergie. Pour réveiller les cerveaux rien de tel qu'un bon p'tit choc pétrolier !



CITROEN AX DIESEL (1986)

Description

Dimensions	3,495 m x 1,555 m x 1,355 m (L x l x h)
Sièges	5
GMP	Diesel
Puissance	50 cv
Boîte de vitesse	5

Performances

Masse à vide [kg]	725 kg à 745 kg (640 kg pour la version essence)
Charge utile [kg]	430
Cx _p [-]	0,31
Sf [m ²]	1,84 m ²
S _f .Cx _p [m ²]	0,5704 m ²
Vitesse max	145 km/h
Consommation	3,3 L/100km à 90 km/h; 4,8 L/100km à 120 km/h
Autonomie	1000 km



Remarquable véhicule économique arrivé au stade de la production en grande série, sans gadget ni fioriture technologique. Le résultat à l'utilisation (4 l/100 en moyenne pour une voiture de 470 000 km au compteur) est une conséquence du jus de cervelle. Le coût total d'exploitation n'inclut donc pas l'amortissement de systèmes aïlleteck compliqués et coûteux. Ce véhicule combine économie d'achat ET économie d'utilisation/entretien ET économie de consommables, tout en étant opérationnel, par un risque de panne réduit lié à la simplicité des systèmes à bord, par ses capacités de chargement des plus honnêtes, par son confort, par sa vitesse de croisière suffisante pour lui permettre une insertion dans le trafic normal. L'AX fut la crête d'économie des années post-second choc pétrolier.

RENAULT VESTA II (PROTO PV9 - 1987)



Description

Dimensions	3,540 m x 1,540 m x 1,300 m (L x l x h)
Sièges	4
GMP	Transversal 3 cylindres, 6 soupapes, 716 cm ³ Rapport volumétrique 10,5:1.
Puissance	Puissance maxi 20 kW (27 ch) à 4 250 tr/min Couple maxi 5,7 mkg à 2 250 tr/min

Performances

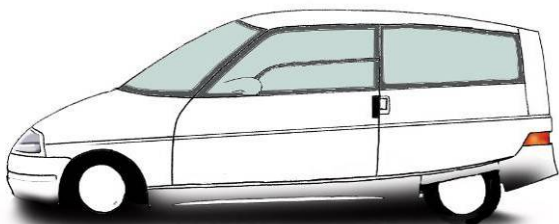
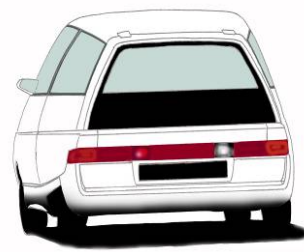
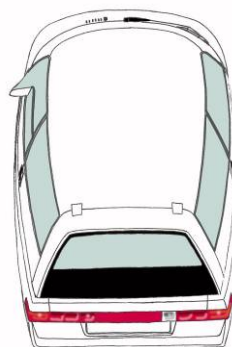
Masse à vide [kg]	473 kg
Charge utile [kg]	≈ 400 kg
C _x [-]	0,186
S _f [m ²]	1,634 m ²
S _f C _x [m ²]	0,304 m ²
Vitesse max	Vitesse maxi 138,2 km/h

Consommation

Vitesse constante [km/h]	Consommation [L/100]
50	1,6
70	1,75
90	2,15
110	2,60
130	3,30
Maxi 138,2	3,70

En utilisation (1 personne à bord)

Ville	4,25 litres/100 km
Route	2,81 litres/100 km
Autonomie	640 km (Capacité du réservoir 18 l)



La Vesta II est l'aboutissement des recherches de Renault en matière de réduction de la consommation de carburant des automobiles au cours des années 1980. Le nom Vesta est l'acronyme pour **Véhicule Econome de Systèmes et Technologies Avancées**. Ces recherches, menées par le styliste et ingénieur-aérodynamicien Gaston Juchet alors Directeur du style, constituaient la réponse de Renault au défi proposé par le Ministère de l'Industrie en 1980, qui demandait de réaliser une voiture capable de consommer moins de 3 litres/100 km (en moyenne pondérée des consommations normalisées ville / 90 km/h / 120 km/h).

Conformément aux objectifs, Vesta II a réalisé le 23 juin 1987 le **record mondial de consommation** sur l'autoroute de Bordeaux à Paris : 9,447 litres de super ont été consommés pour ce trajet, soit **1,94 l/100 km à 100,9 km/h de moyenne**. La vitesse maxi mesurée par les journalistes en octobre 1987 est de 138,2 km/h.

LA MASSE :

Les concepteurs font appels à des solutions originales pour réduire la masse au maximum :

Les boucliers sont en polyester armé de fibre de verre. Le hayon est en thermoplastique et la vitre est collée dessus. Les portes sont constituées d'un cadre en métal couvert de tôle fine. Le capot est aussi en tôle fine collée sur un caisson composite.

Saint Gobain a réalisé des vitrages ultraminces de 2 mm collés à la structure et participant à la rigidité globale. Les vitres de portes sont d'épaisseur classique. Seule la vitre de la porte conducteur a une zone qui s'ouvre. Cette même vitre intègre l'unique rétroviseur extérieur.

Le plancher est en matériau composite : fibre de verre et résine. Le pavillon est aussi en composite avec une âme en mousse polyuréthane renforcée par un mat de verre. De très nombreuses pièces sont en matériaux ultras légers. Le poids total gagné est d'environ 25 % par rapport aux véhicules de conception classique à rigidité et endurance égales. Vesta II a été conçue pour résister aux crash-tests en vigueur en 1987.

L'AÉRODYNAMIQUE :

Renault a apporté un soin extrême à l'aérodynamique de la voiture pour aboutir à un **C_x de 0,186** (en comparaison, l'excellent C_x d'une Toyota Prius s'élève à 0,26. Le record mondial automobile étant détenu par la Ford Probe V de 1985 avec 0,14).

Les flux d'air dans le compartiment moteur sont soigneusement canalisés. Un volet régulant automatiquement l'arrivée d'air maintient la température du moteur dans des limites optimales. Elle oscille de 90 °C à pleine charge à 110 °C en charge partielle. L'étanchéité des différentes parties de la carrosserie, et plus particulièrement de la zone frontale est poussée à son maximum.

La suspension pneumatique est à assiette constante. Chaque ressort pneumatique est constitué d'une chaussette en caoutchouc concentrique de l'amortisseur. Le système comprend un compresseur électrique reliant un réservoir basse pression à un réservoir haute pression. Le système est complété par des sphères, comparables à celles existantes dans la suspension hydropneumatique Citroën. Le système de régulation électronique de l'assiette maintient la voiture horizontale et lui permet de s'abaisser de 20 mm au fur et à mesure que la vitesse augmente, réduisant ainsi le SC_x. (Position haute : jusqu'à 60 km/h ; position intermédiaire : de 60 à 100 km/h ; position basse : au delà de 100 km/h)

LA PROPULSION :

Le moteur de seulement 716 cm³ et 27 ch a été considéré comme suffisant pour obtenir des performances équivalentes à celles de la Supercinq SL. Un moteur trois cylindres a été préféré à un classique quatre cylindres pour réduire les frictions. Son fonctionnement est optimisé par différents systèmes de régulation électronique pour diminuer la consommation. Le poids de chaque pièce a été réduit au minimum, faisant appel à des matériaux de pointe comme l'aluminium ou le magnésium.

TWINGO SMILE (SMALL, INTELLIGENT, LIGHT, EFFICIENT - 1996)

Description

	SMILE (WENKO AG)	TWINGO (RENAULT)
Dimensions	3,480 m x 1,760 m x 1,423 m	3,433 m x 1,630 m x 1,423 m
Sièges	5	
GMP	Bicylindre à plat 358 cm ³ suralimenté à 2,6 bar. Tx de compression 9 :1.	4 cylindres en ligne. 1239 cm ³ , atmosphérique. Tx de compression 9,2 :1.
Puissance	55 cv (40 kW) à 5500 t/min.	55 cv (40 kW) à 5300 t/min.
Masse moteur	35 kg	105 kg



Performances

Masse à vide [kg]	650 kg (23% + léger)	845 kg
Charge utile [kg]	400 kg	330 kg
Cx _p [-]	0,25	0,35
Sf [m ²]	1,90 m ²	1,95 m ²
S _f .Cx _p [m ²]	0,475 m ²	0,665 m ²
Vitesse max [km/h]	+150 km/h	150 km/h
0 – 100 m	14 s	14,2 s
Consommation	3,3 l/100 km	6,7 l/100 km
Autonomie	20 l – 600 km	40 l – 600 km



SmILE est un démonstrateur conçu pour illustrer les améliorations immédiatement applicables aux automobiles. Basé sur la Renault Twingo, le proto ramène la consommation à 3,3 litres aux 100 km. L'une des contraintes du cahier des charges était de n'utiliser que des « technologies sur étagère » (off-the-shelf technology).

LA MASSE :

La masse est diminuée de 23% (650 kg au lieu de 845 kg) :

- 80 kg de gain grâce à un moteur plus petit et des accessoires plus légers (batterie, radiateur et échappements).
- 80 kg de gain dans l'aménagement intérieur et dans les roues, les suspensions, les freins etc A noter qu'au moins 80 autres kg pourraient être gagnés par l'utilisation de matériaux composites, un petit réservoir et le remplacement des vitres en verre par polycarbonate.

L'AÉRODYNAMIQUE :

La traînée aérodynamique est réduite de 30% (Cx_p = 0.25 au lieu de 0.37)

LA PROPULSION :

Le moteur est remplacé par un bicylindre quatre temps quatre soupapes turbocompressé de 358 cm³ (75 N.m à 2900 t/min). Ce moteur de plus faible cylindrée impose une charge plus élevée et plus proche du régime de consommation optimale. Le revers de la médaille est un refroidissement plus délicat.

Une réalisation intéressante sur la base d'une Renault Twingo. La Twingo a réintroduit le concept de voiture 2+2 (2 places confort + 2 places enfants). Idée géniale de la banquette arrière qui translate pour augmenter le volume cabine au détriment du volume coffre et vis versa.

A noter : l'essuie-glace dans l'axe.

VOLKSWAGEN VORTEX CONCEPT 1 LITRE (2002)



Les performances annoncées sont les suivantes :

Description

Dimensions	3,646 m x 1,248 m x 1,117 m (L x l x h)
Sièges	2 places en tandem
GMP	Moteur monocylindre (culasse – cylindre monobloc) diesel atmosphérique. 299 cm ³ de cylindrée (69 x 80 mm). ACT + 3 soupapes ; injection directe. Faible rapport volumétrique e 16,5 : 1.
Puissance	6.3 kW (8.56 cv) à 4000 t/min 18,4 N.m à 2000 t/min
Boîte de vitesse	6 rapports semi - automatique
Equipements	Double embrayage piloté + volant cinétique-alterno-démarrreur. ABS + ESP Volume de stockage de 80 litres.
Prix	5000 €

Performances

Masse à vide	290 kg
Charge utile	≈ 200 kg
Cx _p	0,159
S _f	1 m ²
S _f .Cx _p	0,159 m ²
Vitesse max	120 km/h
Consommation	0,89 à 0,99 Litres/100 km
Autonomie	650 km ; réservoir 6,5 litres



Au terme d'un trajet de plusieurs centaines de kilomètres lesté de 2 occupants, ce drôle d'engin, qui n'est pas sans évoquer la bonne vieille Messerschmitt KR200, a réalisé l'exploit de consommer moins de 0,89 l/100 km .

LA MASSE :

Utilisation d'une coque en composite carbone/époxy sur une structure en magnésium. Tous les composants ont été allégés (moteur, transmission, suspension, roue carbone, freins aluminium, moyeux en titane, roulements céramiques). Résistance aux impacts similaire aux autos GT.

L'AERODYNAMIQUE :

Rétroviseurs remplacés par des caméras diffusant sur écrans.
Roues arrières rapprochées afin d'affiner la carène.

LA PROPULSION :

Double embrayage piloté. L'un connecté au moteur l'autre à la boîte de vitesse. Entre les deux, le volant cinétique-alterno-démarrreur. Lors d'une décélération, le moteur s'arrête déconnectant les deux embrayages. Ceci permet au volant de tourner librement sur l'énergie cinétique emmagasinée. A l'accélération suivante, le volant redémarre le moteur sans consommation d'électricité.



L'évolution du vortex qui devrait être produite sous peu.

Un peu exclusive dans son usage, la vortex rappelle furieusement la Messerschmitt kr200. Elle démontre l'efficacité que l'on obtient en jouant uniquement sur la masse et l'aérodynamique.

DAIHATSU UFE II (2005)



Les performances annoncées sont les suivantes :

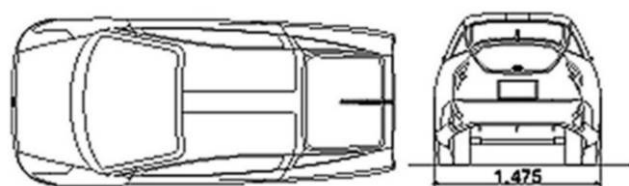
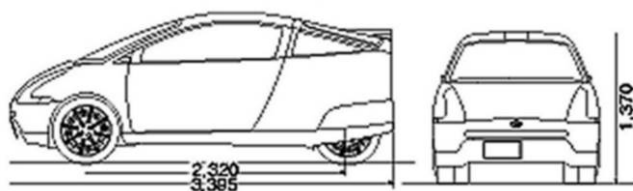
Description

Dimensions	3,395 m x 1,475 m x 1,32 m (L x l x h)
Sièges	4
GMP hybride	Moteur thermique tri cylindre 660 cm ³ + Moteurs électriques.
Puissance	? ≈ 20 à 25 cv
Boite de vitesse	?
Equipements	?

Performances

Masse à vide [kg]	570 kg
Charge utile [kg]	≈ 400 kg
Cx _p [-]	0,19
Sf [m ²]	1,64 m ²
S _f .Cx _p [m ²]	0,3116 m ²
Vitesse max	? ≈ 150 km/h
Consommation	1,66 litre aux 100 km à 90 km/h (60km/litre).
Autonomie	?

Très performante sans être exclusive, la Daihatsu UFE II est notre étalon de sobriété énergétique !



LOREMO - LOW RESISTANCE MOBILE - (2005)

Lors du Salon de l'automobile 2006, à l'écart des véhicules 4x4 amphigouriques³⁰ aux consommations léviathanesques³¹ se trouvait une petite auto bien discrète et pourtant remarquable : La LOREMO Ls.
Les performances annoncées sont les suivantes :

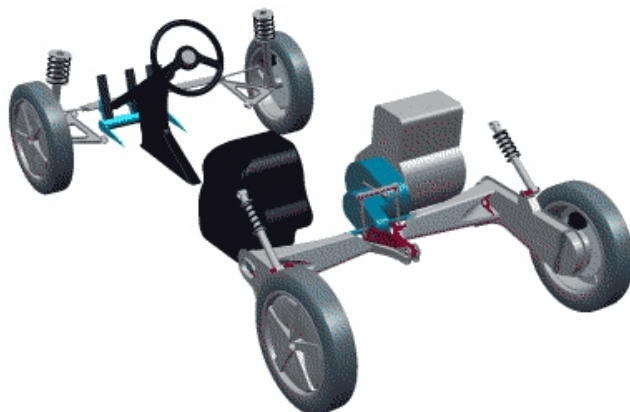
Description

Dimensions	3,84 m x 1,36 m x 1,10 m (L x l x h)
Sièges	2 + 2 dos à dos
GMP	Bi cylindres turbo diesel
Puissance	15 kW / 20 Cv
Boîte de vitesse	5 vitesses
Equipements	Airbags ; filtre à particules ; radio ; ordinateur de bord ; air conditionné ; lecteur MP3 ; GPS
Prix	11000 €

Performances

Masse à vide	520 kg
Charge utile	400 kg
Cx _p	0,218
S _f	1,1 m ²
S _f .Cx _p	0,24 m ²
Vitesse max	160 km/h
Consommation	1,5 litre / 100 km
Autonomie	1300 km (réservoir 20 litres)

Démonstrateur intéressant malgré des choix discutables d'ergonomie.



30 Amphigouriques : « qui n'a ni ordre, ni sens » !

31 Léviathanesque : Qui se rapporte au Léviathan (Livre de Job). Le Léviathan est un monstre marin évoqué dans la Bible. Ce monstre, dont on ignore la forme, peut être considéré comme l'évocation d'un cataclysme terrifiant capable de modifier la planète, et d'en bousculer l'ordre et la géographie sinon d'anéantir le monde.

DAIHATSU UFE III (2005)

Les performances annoncées sont les suivantes :

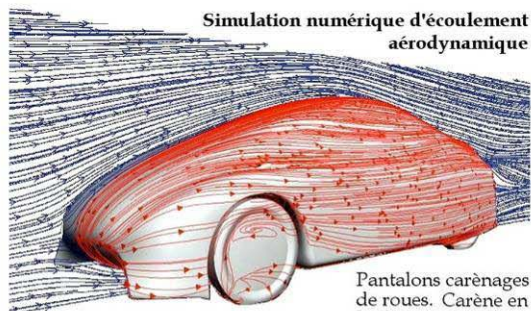
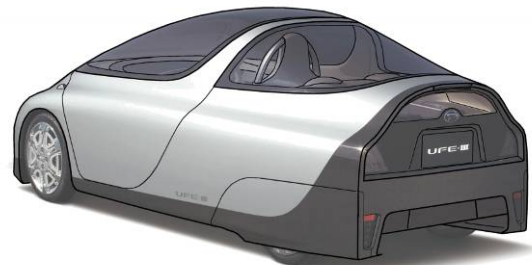
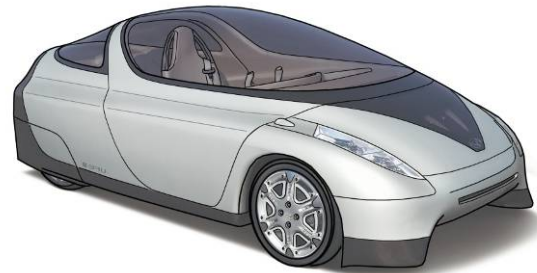
Description

Dimensions	3,395 m x 1,475 m x 1,200 m (L x l x h)
Sièges	1 pilote + 2 passagers (trèfle inverse)
GMP hybride	Moteur thermique tri cylindres 660 cm ³ + 2 moteurs électriques synchrones.
Puissance	? ≈ 20 à 25 cv
Boite de vitesse	Accouplement par train planétaire.
Equipements	

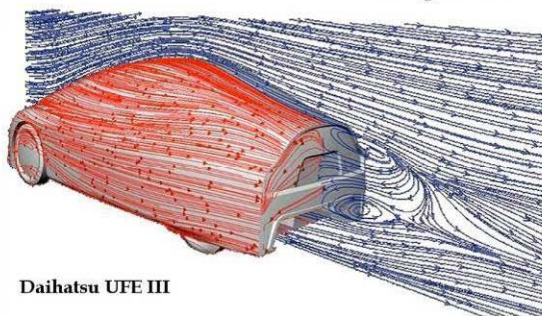
Performances

Masse à vide	440 kg
Charge utile	≈ 300 kg
Cx _p	0,168
Sf	1,4 m ²
Sf.Cx _p	0,235 m ²
Vitesse max	?
Consommation	1,39 litre aux 100 km. (72 km/litre)
Autonomie	?

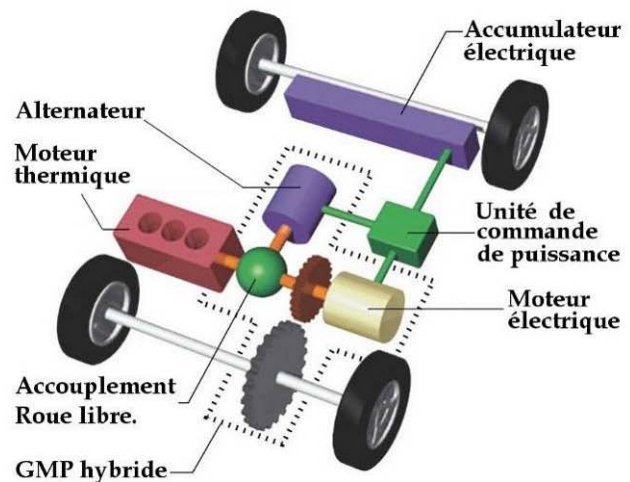
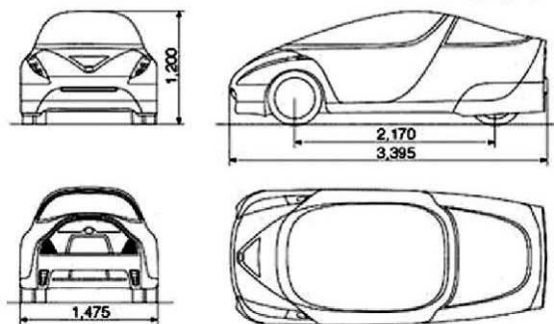
Digne héritière de la Mathis-Andreu 333 malgré le choix discutable d'une architecture non monocoque. Une chaîne de propulsion hybride bien conçue.



Pantalons carénages de roues. Carène en berlingot arrondie.



Daihatsu UFE III





Carène en "berlingot"

Micro-cameras
pour retrovision.

Carénages de roues
"pantalons"

AXON (2008)

Axon

Les performances annoncées sont les suivantes :

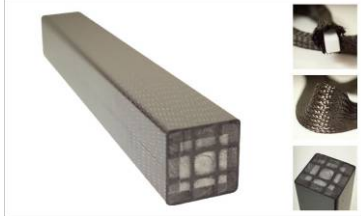
Description

Dimensions	3,51 m x 1,59 m x 1,48 m (L x l x h)
Sièges	2 adultes + 1 enfant ou bagages (trèfle)
GMP hybride	Moteur à essence bicylindre 500 cm ³
Puissance	35 cv, 25 kW
Boîte de vitesse	Automatique
Equipements	Châssis en composite carbone

Performances

Masse à vide	450 kg
Charge utile	≈ 300 kg
Cx _p	0,25
S _f	2 m ²
S _f . Cx _p	0,5 m ²
Vitesse max	130 km/h
Consommation	2,8 litre aux 100 km.
Autonomie	4 à 500 km

Décidément le coût élevé du pétrole donne des idées aux constructeurs. Voici une petite auto qui démontre qu'en soignant uniquement la masse on peut baisser sensiblement les consommations.



Châssis en composite carbone

REMERCIEMENTS ANTHUMES :

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement les personnes suivantes :

Marcel LECOQ

Propriétaire du dernier prototype existant de la Mathis-Andreau 333 qui par sa gentillesse nous a autorisé l'accès à ce remarquable véhicule.

Jean-François BLATTNER & les Amateurs de Mathis

Le club des amateurs de Mathis conserve une grande quantité d'informations. <http://club.mathis.free.fr/>

Martin PETER

Ancien directeur de la Soufflerie Eiffel, précieux conservateur des documents et essais de Gustave Eiffel.

René LOIRE

Passionné d'histoire, de sciences, d'arts, de techniques et d'opéra, René LOIRE, ingénieur dans le BTP et dans les plates-formes pétrolières est un personnage particulièrement brillant. Il nous présente ses réflexions sur l'art de l'ingénieur dans ses ouvrages "le Dessineur d'abord", "place au Dessineur" et "le frappeur", Encore un gars qui raisonne mieux qu'un tambour crevé.

Eric SOUFFLEUX

A lire : Son avis d'utilisateur sur la Citroën AX 14 TRD, ainsi que son coût kilométrique réel ». Ah ! si tous les amateurs étaient des utilisateurs au lieu d'être des cons...ommateurs !
http://generationsfutures.chez-alice.fr/velo/citroen_ax_diesel.htm

Sébastien EXTIER.

Membre d'Inter Action, Sébastien a la gentillesse d'illustrer par ses dessins humoristiques nos articles. Qu'il soit ici remercié.

Marc ALIAS journaliste technique CP n° 94236

Journaliste passionné, grand défenseur du moteur 2 temps.

Patrice SARLIN

Membre d'interaction que l'on remercie pour ses précisions sur le nucléaire.

L'association INTER ACTION :

Association de Sauvetage Créatif du Savoir Aérotechnique
16, rue des Poules - 67000 STRASBOURG (FRANCE)

Tél. : +33 (0)3 88 35 26 94

Site : <http://inter.action.free.fr>

Véritable incubatrice de réflexions énergétiques, cette association œuvre pour la conservation des savoir techniques au service de l'optimisation énergétique.

REMERCIEMENTS POSTHUMES :

ANONYME

Inventeur de la roue. On ne le remerciera jamais assez !

Isaac NEWTON (1643 - 1727)

Et oui, que ferait-on sans lui en mécanique ?

Newton, bien connu des amateurs de Gosciny/Gotlib, était à la fois anglais et génial, ce qui redonne confiance dans le côté bon de la nature humaine. Ses réflexions concernent :

- la philosophie ; - la mathématique ; - la physique ; - la mécanique ; - astronomie ; - etc.

Grâce à la peste qui a sévit à Londres, sa fuite à la campagne lui a permis de déterminer les lois fondamentales de la mécanique.

Sadi CARNOT (1796 – 1832)

Théoricien des machines thermiques. Il ne publia qu'un seul livre "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance" (Paris, 1824), dans lequel il exprima, à l'âge de 27 ans, ce qui s'avèrera être le travail de sa vie. Base théorique incontournable des moteurs thermiques. Il formula l'exposé raisonné du moteur thermique et les principes de bases selon lesquels toute centrale énergétique, toute automobile, tout moteur à réaction est aujourd'hui conçu en s'appuyant dans sa démarche sur l'art de l'ingénieur. Plus remarquable, cette genèse se fit alors même qu'aucun prédécesseur n'avait encore défini la nature comme l'étendue du sujet.

En résumé, transformer de la chaleur en travail mécanique ne peut se faire à rendement unité.

Gustave EIFFEL (1832 – 1923)

Les premiers essais aérodynamiques systématiques.

Paul JARAY (1889 – 1974)

La prise de conscience des problèmes d'interaction aérodynamique entre le corps fuselé et le sol et des problèmes de stabilité en lacet des véhicules fuselés.

Jean-Joseph Étienne LENOIR (1822-1900) ; Nikolaus OTTO (1832 – 1891) ; Alphonse Eugène BEAU de ROCHAS (1815 – 1893)

Respectivement inventeur du moteur à combustion interne pour le premier, et du cycle 4 temps à compression préalable et allumage commandé pour les deux derniers.

Rudolf DIESEL (1858 – 1913)

Son ouvrage : « Théorie et projet d'un moteur thermique rationnel » est révélateur d'une méthode de travail rare (même de nos jours), l'étude théorique d'un objet avant sa réalisation, et la vérification a posteriori du bien fondé de la théorie.

Son moteur prototype a atteint 25 % de rendement dès les premiers tours, ce qui est exceptionnel.

L'intérêt majeur du moteur Diesel est la possibilité d'utiliser des rapports volumétriques importants, source de bons rendements.

L'inconvénient qui en résulte est une masse de moteur élevée. Dans l'automobile, les moteurs diesels s'imposent dans les moteurs fonctionnant le plus souvent à charge partielle.

Jean ANDREAU

Génial créateur de la Mathis 333, nous ne le remercierons jamais assez d'avoir publié son travail.

SOURCES:

VOITURES AERODYNAMIQUES

P. JARAY

Article paru dans l'Aéronautique de août 1922.

VOITURES AERODYNAMIQUES

P. MAUBOUSSIN

Article paru dans l'Aéronautique n° 174 de novembre 1933 ; pages 239 à 245.

LA RESISTANCE DE L'AIR ET L'AUTOMOBILE

Jean ANDREAU, Ingénieur – Conseil

Conférence du 23 janvier 1934 à la SIA.

Journal de la société des ingénieurs de l'automobile (SIA);

Février 1934 ; 8^{ème} année, Tome VII ; Pages 2577 à 2594

& La science aérienne ; Vol. III ; n°4 ; 1934, pages 285 à 311

LA RESISTANCE DE L'AIR ET L'AUTOMOBILE, RECHERCHE DE LA RESISTANCE MINIMUM

Jean ANDREAU, Ingénieur - Conseil

Conférence du 8 janvier 1935 à la SIA.

Journal de la société des ingénieurs de l'automobile (SIA);

Janvier 1935 ; 9^{ème} année, Tome VIII ; Pages 34 à 45.

LE PROBLEME DE LA VOITURE ECONOMIQUE LEGERE

Jean ANDREAU, Ingénieur - Conseil

Conférence prononcée à la Société des Ingénieurs de l'Automobile, le 18 décembre 1946.

Journal de la Société des Ingénieurs de l'Automobile; N°3 Mai - Juin 1946, Tome XIX ; 20^{ème} année ; pages 61 à 68.

LE CARENAGE DE LA VOITURE DE COURSE DU CAPITAINE EYSTON

Jean ANDREAU, Ingénieur - Conseil

Journal de la Société des Ingénieurs de l'Automobile; N°1 Janvier 1938, Tome XI ; pages 3 à 8.

L'ALLEGEMENT DES VOITURES AUTOMOBILES, POSITION ACTUELLE DE LA QUESTION

Jacques VALEUR, Ingénieur Civil des Mines

Conférence SIA du 16 octobre 1945

Journal de la Société des Ingénieurs de l'Automobile ; 20^{ème} année ; N°1 janvier - février 1946, Tome XIX ; pages 1 à 9.

LA VOITURE MATHIS 333

Jean ANDREAU, Ingénieur - Conseil

Revue de l'Aluminium; N° 119 février 1946 pages 1 à 12.

VOITURE ECONOMIQUE LEGERE

V.E.L type 337 ; **MATHIS SA**

Brochure technique 1945

RESISTANCE A L'AVANCEMENT DANS LES FLUIDES

S.F. HOERNER

Ed. Gauthier Villars 1965

N° dépôt légal : 1305

LE PLEIN S'IL VOUS PLAÎT

Jean-Marc JANCOVICI, Alain GRANDJEAN,
Ingénieur – Conseil

Ed. SEUIL ; février 2006 ; ISBN : 2-02-085792-8

<http://www.manicore.com/>

"MEMENTO DE TECHNOLOGIE AUTOMOBILE"

2^{ème} édition novembre 2000 ; traduction française de la 23^{ème} édition allemande de septembre 1999

Editeur : Robert Bosch GmbH

ISBN : 3-934584-19-5

"AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES"

Wolf-Heinrich HUCHO

4^{ème} édition 1998 ; Editeur : Wolf-Heinrich HUCHO

ISBN : 0-7680-0029-7

<http://www.aerowolf.de/>

AUTOMOBILIA HORS SERIE N°4

Toutes les voitures françaises 1947 (salon 1946)

René BELLU

Histoires & Collections ; N° Editeur : 2-908182

Dépôt légal 3^{ème} trimestre 1997.

AUTOMOBILIA HORS SERIE N°7

Toutes les voitures françaises 1948 (salon 1947)

René BELLU

Histoires & Collections ; N° Editeur : 2-908182

Dépôt légal 3^{ème} trimestre 1998

LA PANHARD DYNAVIA, UN AVION SANS AILES

Greg VIGNALE

Automobilia n°73

Histoires & Collections ; mars, avril 2005

TOYOTA PRIUS

Le site pédagogique sur les technologies utilisées sur la Prius de TOYOTA. <http://www.hybridsynergydrive.com/>

TOUT SUR LES VEHICULES ELECTRIQUES

<http://pboursin.club.fr/pdgve.htm>

ZERO PETROLE : LE VELOMOBILE !

Le Vélomobile à assistance électrique, un hybride musculaire / électrique qui illustre bien la conséquence de l'effet d'échelle sur la pertinence de la source d'énergie ! De masse réduite et d'aérodynamique correcte, la puissance consommée est si faible que quelques kilogrammes de batteries suffisent à assister le véhicule sur des trajets pendulaires jusqu'à 30 km (trajets maison – boulot).



lβ & mβ

Les auteurs :

Matthieu BARREAU

IUT de Cachan, Département GMP
9 avenue de la division LECLERC
BP 140, 94234 Cachan Cedex.
+33 1 41 24 11 90
matthieu.barreau@u-psud.fr

Laurent BOUTIN

303 av. Mont de Marsan
33850 Léognan France
+33 6 76 58 95 44
laurentboutin@yahoo.com