

Petite physique à l'usage des automobilistes curieux et conscients

Par Olivier Del Bucchia pour les SUPAERO-DECARBO



Crédit Dessin : « **Boule et Bill** », DARGAUD. Avec nos sincères remerciements.

SUPAERO-DECARBO est un collectif d'anciens élèves de l'ISAE SUPAERO qui pense que la nouvelle donne climatique et planétaire invite urgemment l'humanité à entrer dans un changement sans précédent pour lequel la contribution de chacun sera déterminante. En outre, elle ouvre un champ d'innovation et d'usage, lucide inédit et enthousiasmant, dans lequel les ingénieurs ont un rôle central à jouer. Les Supaero-Decarbo ont pour objectif de proposer, soutenir, accélérer et contribuer à toute initiative permettant d'augmenter le niveau de conscience et de connaissances sur le changement climatique de chacun et d'imaginer le monde de demain, en lien avec l'école et l'industrie. Leur action est dédiée en premier lieu aux étudiants et à la communauté de l'ISAE-SUPAERO, mais s'adresse plus largement à tous ceux qui veulent contribuer avec cœur et détermination à la mobilité et à la société de demain.

A propos de la suite

Si vous êtes un automobiliste conscient, ceci n'est pas un scoop : une bonne partie de la pollution de l'air et des émissions de Gaz à Effet de Serre contribuant au réchauffement climatique, les GES (dont le célèbre CO_2 aka dioxyde de carbone ou gaz carbonique) provient du transport et des moteurs à pétrole.

Cet article se propose d'aller un peu plus loin dans la compréhension des phénomènes physiques à l'origine de la nécessaire consommation de carburant de notre voiture. L'intention n'est pas de dire ce qui est bien et mal, mais de regarder d'un peu plus près les relations de cause à effet qui entrent en jeu dans le transport automobile du quotidien afin d'éclairer les choix que nous sommes amenés à faire à l'aune de la consommation de carburant.

Pour lire cet article, il ne sera pas nécessaire d'avoir un diplôme d'ingénieur ou de Docteur ès Science Physique, mais ce sera plus facile si vous êtes dans l'état d'esprit de l'enquêteur et avez l'envie de creuser les choses. Il faut maîtriser la notion d'addition, de multiplication, de pourcentage, et ne pas être trop allergique aux formules « avec des lettres ». Pour ces formules et ces concepts, si vous ne les connaissez pas déjà, il faudra soit nous croire sur parole, soit aller les vérifier par vous-même, sur Wikipédia ou ailleurs, ce que nous vous invitons grandement à faire. Bien sûr, si vous êtes déjà familier avec le concept d'énergie, au sens scientifique du terme, vous aurez un petit temps d'avance.

Cela dit, la question de l'énergie étant au cœur des enjeux actuels sur le climat et les ressources, on perd rarement son temps à lire et à réfléchir là-dessus.

Table des matières

1. SPOILER	3
2. INTRODUCTION, OU L'ON SE DIT QUE TOUT DEPEND DE SON USAGE.....	3
3. DEBROUSSAILLAGE, OU NOTRE PROPRE EXPERIENCE DU MOUVEMENT NOUS PERMET DE SENTIR LES DIFFERENTS SCENARIOS ENERGETIQUES DE LUTTE CONTRE LA NATURE	4
4. LA PHASE D'ACCELERATION, OU COMMENT LUTTER CONTRE SA PROPRE MASSE	5
4.1. <i>L'énergie cinétique.....</i>	<i>5</i>
4.2. <i>Effet de la masse.....</i>	<i>6</i>
4.3. <i>Effet de la vitesse.....</i>	<i>6</i>
4.4. <i>En synthèse.....</i>	<i>7</i>
5. LA PHASE DE CROISIERE, OU COMMENT LUTTER CONTRE L'AIR QUI FAIT RIEN QU'A NOUS FREINER.....	8
5.1. <i>La traînée, l'œuvre maléfique de l'air.....</i>	<i>8</i>
5.2. <i>Effet de la distance</i>	<i>10</i>
5.3. <i>Effet du Cx.....</i>	<i>10</i>
5.4. <i>Effet de la surface.....</i>	<i>12</i>
5.5. <i>Effet de la vitesse.....</i>	<i>13</i>
5.6. <i>En synthèse.....</i>	<i>13</i>
6. LE DENIVELE, OU COMMENT LUTTER CONTRE LA TERRE QUI NOUS ATTIRE TOUJOURS VERS LE BAS	14
7. WHAT ELSE ?.....	15
8. EN CONCLUSION	15

1. Spoiler

Nous allons nous intéresser ici à la physique du déplacement, et pas à celle du moteur en lui-même. On considèrera que nous avons un moteur « constant », c'est à dire un moteur qui a la même performance énergétique et écologique quelles que soient les conditions de son fonctionnement (température, régime, etc.). En clair, on va s'intéresser à la mécanique au sens de la physique du déplacement, et pas au sens du garagiste. Car agir sur les performances du moteur est une affaire d'experts (ingénieurs, garagistes), alors que choisir son véhicule et agir sur son mode de déplacement est à la portée de tous. Le seul levier sur le moteur, qui ne sera pas développé ici, est de veiller à ce que le régime du moteur soit adapté à la vitesse (en gros être à 120 sur l'autoroute en 3^{ème} ou monter le col du Lautaret en 5^{ème}, on sent bien que ce n'est pas optimal ni pour les performances ni pour la consommation). A partir de là vous pouvez intervenir à volonté et selon votre sensibilité, les expressions « Énergie motrice », « consommation de carburant », « budget essence », « émissions polluantes » ou « émission de GES ». Pour un moteur donné, ces 5 grandeurs sont directement liées les unes aux autres.

Ainsi, on découvrira la physique qui permet de comprendre pourquoi :

- En vitesse de croisière, c'est-à-dire à la fin de l'accélération, la qualité de l'écoulement de l'air, la surface frontale de résistance à l'air (véhicule + chargement sur le toit), et surtout la vitesse sont déterminants, d'autant qu'ils agissent à chaque centimètre parcouru. On constatera que diminuer sa vitesse sur une longue distance, même de 10 km/h, diminue significativement sa consommation, et donc ses émissions.
- Dans le cas de trajets en ville (beaucoup d'accélération, freinages et vitesse plutôt faible) ou dans les trajets avec du dénivelé (route de montagne à basse vitesse par exemple) : la masse du véhicule (à vide + chargement) est déterminante. Plus notre voiture est légère, moins on consomme. Plus notre voiture est grande, plus on optimisera significativement en embarquant du monde plutôt que si chacun prend la sienne. Ayons en tête que, si entre 2 arrêts on cherche systématiquement à atteindre la vitesse maximale possible (dans les bouchons sur la route des vacances par exemple, si on est pressé de se jeter dans l'eau fraîche), l'effet de la vitesse peut prendre le pas sur l'effet de la masse.

2. Introduction, où l'on se dit que tout dépend de son usage

Resituons tout d'abord notre moteur de voiture dans le paysage des moteurs à pétrole du monde. Ayons en tête que, quel que soit le moteur (essence, kérosène ou gazoil), il y a un principe de base : on brûle du pétrole avec de l'air le résultat de cette combustion produit 3 choses :

- **De l'énergie motrice** (via une propulsion d'air, d'eau ou une explosion dans un piston)
- **De la chaleur**
- **Des gaz d'échappement** (dont les GES et autres polluants)

Les ingénieurs du monde entier se creusent les méninges pour concevoir des engins qui nécessitent une énergie motrice minimale pour un usage donné. Pour les avions par exemple, c'est le travail des aérodynamiciens qui, pour maintenir une vitesse et une altitude de croisière données font en sorte que la poussée des moteurs nécessaire soit minimale. Les motoristes, eux, travaillent à minimiser le volume de pétrole nécessaire en entrée du moteur pour produire pour une poussée donnée. Tout le monde travaille donc pour optimiser le rapport entre la performance attendue et le pétrole nécessaire pour l'atteindre. Et quand on fait cela, on optimise le volume de gaz d'échappement émis et bien sûr le coût du transport. Le tout pour un usage donné, pour un usage donné et pour un usage donné.

Parlons donc des usages.

Notre moteur pétrolière n'aura pas exactement les mêmes besoins en pétrole si on lui demande de faire décoller un Airbus A380 ou de pousser un Solex jusqu'à la boulangerie du village. Pas les mêmes besoins non plus si on demande au Solex d'atteindre la boulangerie en 30 minutes ou en 5, s'il passe par les vignes ou par la route goudronnée toute neuve, ou si au final, il va au village d'après car le pain y est bien meilleur.

Quel que soit le génie de son ingénieur motoriste, pour un moteur donné, il y a 3 choses qui vont influencer sur sa consommation de pétrole :

- 1 Les caractéristiques physiques de l'engin à transporter (sa masse, sa forme géométrique, les matériaux utilisés...)
- 2 La mission de transport (les distances, le temps de trajet visé, les contraintes extérieures, la masse de son chargement)
- 3 Le pilotage (les trajectoires, la vitesse, l'accélération, les régimes moteur, ...)

Ces 3 grandes familles de paramètres caractérisent l'usage que l'on va faire de son moteur et déterminent sa consommation.

Les aviateurs et les compagnies aériennes sont experts dans l'optimisation de ces 3 domaines. Quel avion et quel moteur construire ou acheter pour faire un Paris Toulouse embarquant 200 passagers en moyenne ? Et le pilote d'optimiser son plein de kérosène si finalement il n'y a que 100 passagers et peu de bagages en route ce jour-là, de trouver la trajectoire d'approche optimale. Le voyageur n'a alors plus qu'à acheter son billet et choisir le mélange sucré ou salé, en conscience ou non de l'incroyable quantité de science, d'histoire, de savoir-faire, de collaboration humaine, de ressources naturelles et de production de GES nécessaires pour que cela puisse arriver ici et maintenant, pour que cet usage soit possible.

En revanche quand on a la charge de transporter la petite famille, on n'a pas tout ça à notre disposition. La patronne, ou le patron, de la compagnie « Cépartimonkiki », c'est bibi. On doit choisir et acheter son véhicule, l'affréter, le piloter, l'entretenir. Alors on peut choisir de se fier aux spots publicitaires, mais on peut aussi essayer de se faire sa propre idée.

Mais si nous commençons par rassembler certaines sensations, certaines idées que nous pouvons avoir sur le mouvement ?

3. Débroussaillage, où notre propre expérience du mouvement nous permet de sentir les différents scénarios énergétiques de lutte contre la nature

Qu'est ce qui influence vraiment sur la consommation de carburant ?

Assez naturellement, on sent bien que le poids du véhicule doit y être pour quelque chose. Les grosses voitures consomment plus que les petites non ? Oui, c'est comme pour le caddie du supermarché : c'est plus dur de le pousser à la fin des courses quand il est plein à craquer, qu'au début quand il est vide. D'un autre côté, avez-vous remarqué qu'une fois qu'il est lancé, le caddie plein n'est pas tellement plus dur à pousser que le caddie vide ? Par cette petite observation, on commence à distinguer 2 phases de fonctionnement : la phase d'accélération, où l'on cherche à augmenter la vitesse, et la phase de croisière où l'on cherche à maintenir la vitesse. Mais du coup la vitesse ça compte ? Et pour une distance donnée, si je roule plus vite, je fais tourner le moteur moins longtemps : est-ce que ça se compense ?

Pour répondre précisément à ces questions, il est temps maintenant d'aller voir un peu ce que nous dit la physique.

L'énergie motrice produite par le moteur sert globalement à lutter contre la nature sur 3 fronts :

- La lutte contre la propre masse du véhicule afin de l'accélérer
- La lutte contre les frottements de l'extérieur (essentiellement de l'air et de la route)
- La lutte contre la pesanteur terrestre si on grimpe le long d'une pente

Pour mieux comprendre, nous allons regarder ces phénomènes séparément, au travers de 3 phases de conduite, comme si l'une pouvait exister sans l'autre :

- La phase d'accélération, sur du plat et sans frottement (imaginez une voiture qui roule dans le vide et avec des pneus parfaits qui ne dérapent pas d'un poil)
- La phase de croisière : une ligne droite sur une route terrestre, à vitesse constante, sans jamais freiner, accélérer ni tourner.
- La phase de montée : une ligne droite en pente ascendante, à vitesse constante et sans frottement

4. La phase d'accélération, ou comment lutter contre sa propre masse

4.1. L'énergie cinétique

Pendant la phase d'accélération, on cherche à faire augmenter la vitesse du véhicule. Une fois qu'il aura la vitesse souhaitée, il aura emmagasiné une énergie particulière qu'on appelle l'énergie cinétique. Pour ressentir et comprendre qu'un objet ayant une masse et une vitesse possède une énergie propre, nous vous invitons à faire l'expérience **de pensée** suivante : imaginez-vous sur une voie ferrée, face à un TGV lancé à pleine vitesse. Au moment de la rencontre entre vous 2, les effets de son énergie cinétique se manifesteront assez clairement sur votre corps... Ou bien si vous percutez une voiture devant vous, à l'arrêt, au point mort, freins lâchés. Après le choc, cette voiture avance, sans avoir besoin de son moteur : vous lui avez transmis tout ou partie de votre propre énergie cinétique.

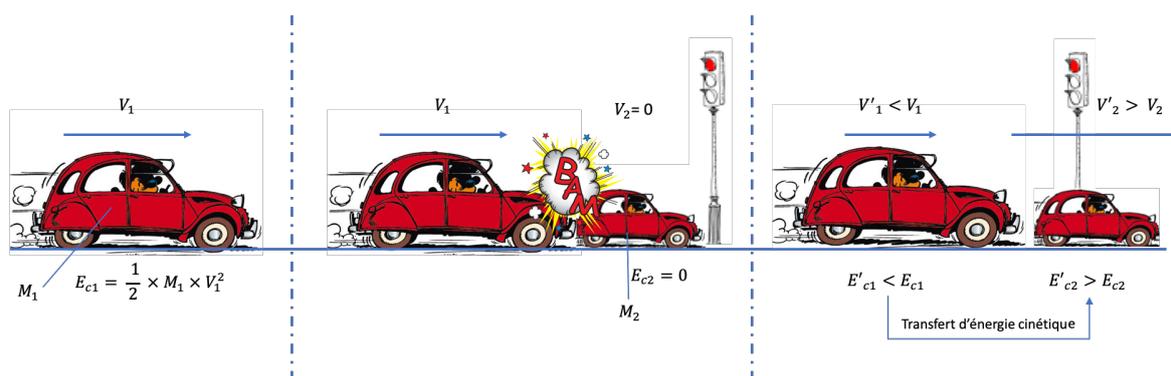


Figure 1 : Transfert d'énergie cinétique lors d'un choc

L'énergie cinétique de la voiture, que nous appellerons E_c , est donnée par la formule suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} \times M \times V^2$$

Dans cette formule :

- M est la masse totale du véhicule et de son chargement (on dit aussi le poids, à tort mais passons pour l'instant).
- V est sa vitesse et V^2 , que l'on prononce « V au carré » ou « V deux », c'est simplement le produit de V par elle-même, donc $V^2 = V \times V$. Dans la phase d'accélération que nous regardons, V est précisément la vitesse atteinte à la fin de l'accélération.

Donc, comme rien ne se crée tout seul en ce bas monde, si on est arrêté à un feu rouge sur une route plate, dans sa voiture de masse totale M, et que l'on veut atteindre la vitesse V une fois le feu passé au vert, il faut que le moteur fournisse l'énergie motrice E_{mt} nécessaire pour passer d'une énergie cinétique nulle (on est à l'arrêt au début, $V=0$) à une énergie cinétique égale à $\frac{1}{2} \times M \times V^2$. Le moteur doit donc fournir la quantité d'énergie motrice équivalente, soit :

$$E_{mt} = E_c = \frac{1}{2} \times M \times V^2$$

On commence à voir ce qui coûte ici en énergie/carburant/euro/GES/microparticule : il y a la masse **M** du véhicule et de son chargement à déplacer (ou le poids) et la vitesse **V** à atteindre.

On peut remarquer aussi que l'intensité de l'accélération, c'est-à-dire plus ou moins la profondeur d'appui sur la pédale, ne change rien à l'énergie motrice à fournir (en faisant abstraction des phénomènes de sur et de sous régime de moteur et toujours sans le frottement de l'air). Autrement dit cela n'est vrai que dans la lutte contre sa propre inertie. Pour croiser les effets avec la lutte contre l'air, il vous faudra lire l'article jusqu'au bout

4.2. Effet de la masse

La formule ci-dessus nous dit que plus notre voiture est lourde plus on consomme d'essence pour atteindre une vitesse donnée. Et bien sûr plus on charge la voiture (en passagers, bagages...), plus on consomme. Ceci dans un rapport de proportionnalité direct. C'est-à-dire que si on est 2 fois plus lourd, on consomme 2 fois plus.

Comme la masse du véhicule à vide est en général bien supérieure à la masse de son chargement, le rapport entre la masse du véhicule à vide et la capacité de chargement **dont on a besoin** (la charge utile) est déterminant dans le choix du véhicule si on veut optimiser sa consommation.

Une autre façon de voir les choses : si on pèse 80 kg, qu'on est seul dans une voiture de 1500 kg (un SUV par exemple), 95% de l'essence consommée à **chaque accélération** sert à faire bouger le SUV à vide, et 5% sert à se faire bouger soi-même, la charge utile. Dans la même idée, si on est 2 personnes de 80 kg et que chacun a une voiture de 1500 kg, on économisera au total 47% de carburant à **chaque accélération** si on monte tous les 2 dans la même voiture plutôt que si chacun prend la sienne. Et bien sûr, si on a l'habitude de laisser tout un tas de choses dans la voiture « au cas où », et bien c'est autant de masse en plus contre laquelle le moteur lutte en consommant de l'essence à **chaque accélération**.

4.3. Effet de la vitesse

Alors ici, on fixe la voiture et son chargement et on regarde l'influence de la vitesse à atteindre sur l'énergie motrice à fournir. La formule $E_{mt} = \frac{1}{2} \times M \times V^2$ nous dit que plus on cherche à atteindre une vitesse élevée

(plus V est grand), plus le moteur doit fournir de l'énergie motrice, certes, mais « au carré ». Ce petit détail ne paye pas de mine, mais il change radicalement la donne.

Cela veut dire par exemple, que si on veut, à partir du feu qui passe au vert, atteindre la vitesse de 60 km/h plutôt que 30 km/h, donc si on veut aller 2 fois plus vite, notre moteur doit fournir 4 fois plus d'énergie motrice (et non 2), donc on consomme 4 fois plus d'essence (et non 2).

Cela veut dire aussi que plus on va vite, plus il faut d'énergie pour aller encore plus vite. Par exemple, si on est à 110 km/h, en ligne droite. On peut éteindre le moteur, on restera à 110 km/h indéfiniment. Oui, rappelons que nous sommes dans un cas imaginaire où il n'y a pas d'air et aucune autre forme de frottement sur la voiture. C'est très important d'avoir cela en tête, c'est un élément fondamental de la mécanique connu depuis Galilée : si rien ne se passe, on garde sa vitesse en ligne droite indéfiniment. Bien donc, dans ce cas, pour passer à 120 km/h, notre moteur doit fournir l'énergie motrice nécessaire pour augmenter l'énergie cinétique qu'on a à 110 km/h à celle qu'on aura à 120 km/h. Elle est donc comparable à $120^2 - 110^2 = 2\,300$ ue (« ue » est une unité d'énergie simplifiée très personnelle qui sert juste aux comparaisons, j'en demande pardon par avance à mes professeurs de physique). Alors que si on est à 120 km/h et qu'on veut aller à 130 km/h, notre moteur doit fournir $130^2 - 120^2 = 2\,500$ ue. Dans les 2 cas, on veut augmenter sa vitesse de 10 km/h mais plus la vitesse initiale est importante, plus l'énergie motrice à fournir l'est aussi.

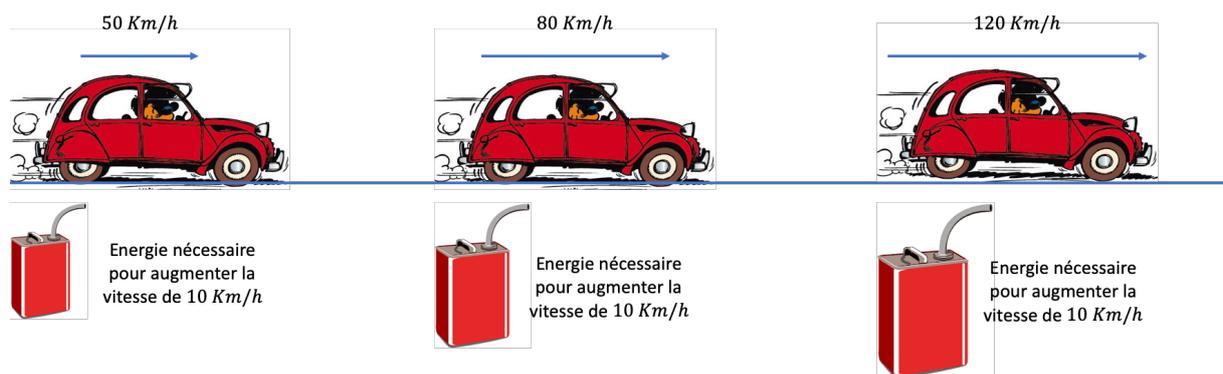


Figure 2 : L'énergie nécessaire pour augmenter sa vitesse de 10 Km/h augmente avec la vitesse de départ

Ca peut paraître étonnant au premier abord. Tout se passe comme si, à chaque fois que l'on augmente « un petit peu » sa vitesse, il fallait d'abord « rattraper » la voiture, et donc plus elle va vite, plus c'est dur de la rattraper.

4.4. En synthèse

En phase d'accélération, plus on est lourd, plus on consomme, et plus on vise une vitesse élevée, plus on consomme, plus on consomme.

Les phases d'accélération sont celles où on lutte contre sa propre masse afin de lui transmettre une vitesse. Dans les trajets en ville, les vitesses restent en général faibles, en revanche on passe son temps à s'arrêter et redémarrer donc le poids total du véhicule (à vide + charge utile) est un facteur déterminant sur notre consommation. Pour ce qui est de la vitesse, gardons en tête que chaque tranche de vitesse supplémentaire demande une énergie plus importante que la tranche précédente pour l'atteindre, et que pour atteindre les 120 km/h, on consomme 4 fois plus que pour atteindre les 60 km/h, et non 2 fois plus.

Cher patron de « Cépartimonkiki », nous nous sommes bien questionnés ici sur les 3 domaines de l'usage du moteur :

- Les caractéristiques de l'engin : masse à vide de l'engin et capacité de charge utile
- La mission de transport : charge utile réelle transportée, « nombre » d'accélération moyen du trajet
- Le pilotage : vitesse à atteindre en fin d'accélération

Mais, direz-vous peut-être, tout ça c'est bien gentil, mais chez « Cépartimonkiki », on ne passe pas son temps à accélérer, et encore moins dans le vide ! Et pourtant, on voit bien que le réservoir se vide au bout d'un long trajet sur l'autoroute, alors quoi ?

5. La phase de croisière, ou comment lutter contre l'air qui fait rien qu'à nous freiner

Nous avons maintenant atteint notre vitesse de croisière et nous avons devant nous une belle et longue ligne droite bordée de platanes. On ne peut malheureusement pas détacher notre ceinture mais par contre, bonne nouvelle, on peut maintenant respirer normalement et notre moteur fonctionne beaucoup mieux puisque nous allons considérer que la voiture roule dans l'air. Il y a quelques années, Galilée nous a dit que s'il n'y avait pas d'air ni rien d'autre pour nous freiner, notre voiture avancerait toute seule en ligne droite, sans ralentir d'un poil et ceci indéfiniment. Or, dans la vraie vie sur terre, si on roule assez vite (disons plus de 100 km/h pour bien le constater) et que l'on passe au point mort, nous verrons notre vitesse chuter assez rapidement. En revanche, si l'on ne va pas vite, on aura l'impression pour le coup que la voiture pourrait ne jamais s'arrêter. La vitesse chute, mais très lentement. Nous avons dans les deux cas été ralentis par les frottements de l'air sur la voiture et de la route sur les pneus. Les frottements de la route existent bien (surtout si on a de vieux pneus sous-gonflés), mais disons qu'en règle générale, leur effet est bien moins sensible que les frottements de l'air et que cet article est déjà très long. On va donc les oublier volontairement. L'air nous a donc ralenti, et il semble qu'il nous ralentisse mieux si nous allons plus vite. Hum, intéressant, il est temps de passer à la physique.

5.1. La traînée, l'œuvre maléfique de l'air

Décidément, la nature fait tout pour que cette voiture reste où elle est, car l'air qui l'entoure exerce une force de frottement, que l'on appelle la traînée. Appelons-la T_a pour « Traînée de l'air ». En avion, avec l'air c'est du « je t'aime moi non plus », car si la traînée existe bel et bien, l'air nous sert aussi à obtenir une force qui permet tout simplement de voler : la portance. En voiture, la portance ne nous intéresse pas vraiment, au pire on doit la contrer et s'assurer que la voiture garde bien les roues au sol en mettant un aileron (ou spoiler), comme c'est le cas pour les formules 1 par exemple. Mais la traînée, c'est pour tout le monde... Et, comme toutes les forces de frottement, T_a s'oppose à la vitesse de la voiture. En voici sa formule :

$$T_a = \frac{1}{2} \times C_x \times \rho \times S \times V^2$$

Pas de panique on va s'expliquer :

- C_x (Prononcer « cé-ix »), c'est un nombre qui caractérise la qualité de l'écoulement de l'air autour de notre voiture. Il dépend de l'adhérence à l'air des surfaces, de la forme géométrique générale, ...
- ρ (Prononcer « ro », c'est la lettre grecque qui correspond à notre « r »), c'est la masse volumique de l'air. C'est-à-dire la masse d' 1 m^3 d'air. Elle varie selon la pression atmosphérique (le temps qu'il fait, l'altitude...). Mais on va dire que ça ne joue pas beaucoup, qu'on n'y peut pas grand-chose et que chez « Cépartimonkiki », on roule plus souvent dans l'air « normal »
- S est une surface (en m^2). On l'appelle aussi « Maître Couple » ou « Surface Alaire ». Cela correspond à la taille de la plus grande section transversale du véhicule. Par exemple si on reprend notre SUV préféré, il fait environ 1,6 m de haut et 1,8 m de large (entre les 2 clignotants), et bien $S_{SUV} \approx 1,6 \times 1,8 = 2,88 \text{ m}^2$, sans tenir compte de l'espace vide entre le bas de caisse et le sol. C'est comme si on voulait faire avancer frontalement une plaque plane de $2,88 \text{ m}^2$.
- V c'est la vitesse de croisière que nous voulons maintenir. En réalité, V est ici la vitesse par rapport à l'air, et pas par rapport à la route. En gros, si on roule face au vent qui souffle à 20 km/h, du point de vue de la résistance à l'air, tout se passe comme s'il n'y avait pas de vent et qu'on roulait à 20 km/h de plus. V^2 n'a plus de secret pour vous.

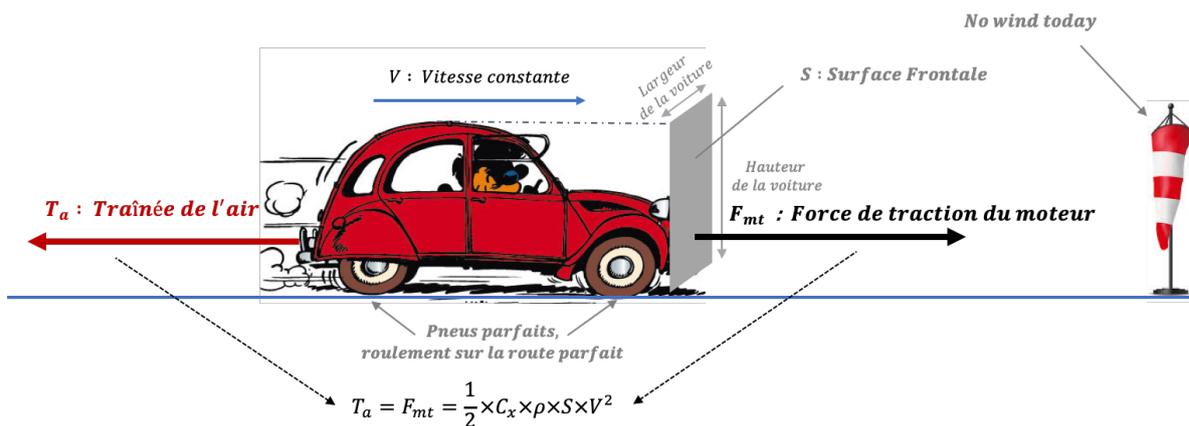


Figure 3 : Le moteur lutte contre la traînée de l'air

Vous aurez noté qu'ici, nous n'avons pas parlé d'énergie mais de force. Il nous manque une étape pour passer à l'énergie. Quand nous avons une vitesse V , la traînée nous ralentit, on dit qu'elle travaille. Dans notre cas, si nous restons à vitesse constante, le travail de résistance de la traînée W_{Ta} , correspond au produit de la traînée par la distance parcourue D , soit :

$$W_{Ta} = T_a \times D$$

Si on est au point mort, la voiture ralentit et le travail de la traînée se traduit par une perte d'énergie cinétique (et par un échauffement de l'air de de la surface de la voiture). Ce travail est une énergie. Pour maintenir la vitesse constante, le moteur doit fournir une force qui s'oppose exactement et à tout instant à la traînée. Le travail de cette force est l'énergie motrice. Elle compense exactement le travail de résistance de la traînée. Donc, pour maintenir notre vitesse V sur la distance D , le moteur doit fournir l'énergie motrice :

$$E_{mt} = W_{Ta} = \frac{1}{2} \times C_x \times \rho \times S \times V^2 \times D$$

Ouf, ça y est, on est au bout de la physique qui nous intéresse, on va pouvoir commencer réfléchir au titre de « Cépartimonkiki ». En quoi est ce que cette formule barbare peut nous intéresser ? Et bien elle permet de voir la aussi ce qui coûte en énergie/carburant/euro/GES/microparticule quand on lutte contre l'air pour se déplacer. Si on ignore le $\frac{1}{2} \times \rho$ sur lequel on ne peut pas grand-chose, il nous reste qu'on peut jouer sur la distance parcourue **D**, la surface **S**, la vitesse de croisière **V** et ce mystérieux paramètre : le **C_x**

Ce qu'on peut remarquer aussi, c'est qu'ici, c'est-à-dire uniquement du point de vue de la résistance à l'air, la masse du véhicule de change rien. Un fois qu'on est lancé, que l'on soit lourd ou léger, on ne consomme pas plus et pas moins pour résister à l'air et maintenir sa vitesse. Encore mieux, si nous lâchons la pédale et passons au point mort, nous irons plus loin avec une voiture plus lourde. Par ailleurs, c'est cohérent avec l'expérience du caddie : ouf !

5.2. Effet de la distance

On le sentait bien, on consomme 2 fois plus si on va 2 fois plus loin. Pas grand-chose à dire de plus, sinon que, si on la parcourt 2 fois par jour en voiture, la distance entre le travail et la maison est très importante dans le budget essence (et dans celui des émissions de GES), vous l'aviez sans doute remarqué. De la même façon, la distance parcourue par notre noix de coco préférée pour arriver jusque dans notre cornet de glace influe sur le coût énergétique du transport et des émissions de GES qui l'accompagne. Qu'elle se traduise dans le prix du cornet ou pas, c'est autre chose ☺

5.3. Effet du C_x

Le **C_x** caractérise donc la qualité de l'écoulement de l'air autour de notre voiture. Plus l'air s'écoule « proprement », en suivant exactement les contours de la voiture, sans turbulence, plus le **C_x** est faible. Par exemple, si on regarde l'écoulement de l'air à l'arrière de la voiture. Quand la voiture avance, l'air de devant, au niveau de la plaque d'immatriculation par exemple, doit contourner la voiture. Une partie de l'air passe par-dessus et une autre partie passe par-dessous la voiture. Arrivés au bout du coffre arrière, la nature ayant horreur du vide, l'air du dessus et celui du dessous vont vouloir se rejoindre. Mais avec la vitesse et leur propre inertie, les 2 tranches d'air ne vont pas se rejoindre tout de suite, en épousant exactement la forme de l'arrière de la voiture. Les 2 parties vont se rejoindre un peu plus loin. Donc entre ce « un peu plus loin » et l'arrière de la voiture, il y a une zone de dépression, presque vide. Cette dépression a tendance à aspirer tout ce qu'elle trouve autour d'elle pour se remplir. Elle aspire donc l'air qui l'entoure, mais aussi la voiture, et se faisant, elle la freine. Si vous êtes amateur du Tour de France, vous comprenez alors pourquoi les coureurs aiment bien se mettre « dans la roue » du coureur de devant : ils profitent de l'aspiration / dépression créée par le coureur de tête. Si vous êtes usager du train ou du métro, vous comprenez alors d'où vient cette rafale de vent qui suit le passage d'une rame : l'air « de derrière » tente de rattraper le train pour combler la zone de dépression laissée à l'arrière.

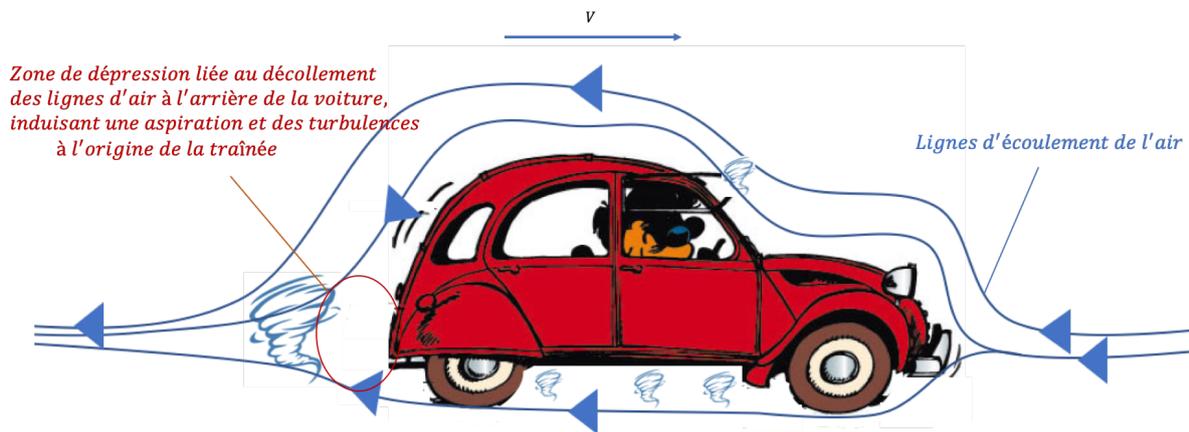


Figure 4 : Le moteur lutte contre la traînée de l'air due aux perturbations de l'écoulement de l'air autour de la voiture

Le C_x est donc l'un des sujets principaux du constructeur de notre voiture (forme, adhérence à l'air des matériaux choisis). Il essaie de minimiser ces phénomènes d'aspiration et de turbulence de l'air autour de la voiture. Mais nous aussi pouvons influencer sur notre propre C_x .

Rouler les fenêtres ouvertes perturbe l'écoulement de l'air autour de la voiture, et augmente donc le C_x , surtout à grande vitesse. Alors la question se pose, quand il fait chaud : Clim ou vitres baissées ? La réponse n'est pas immédiate mais si vous en êtes là dans l'article ça devrait aller. Ouvrir les fenêtres augmente son C_x et l'effet sur sa consommation augmente avec le carré de la vitesse (voir plus loin). Donc plus on va vite, plus l'effet de la fenêtre ouverte est important. La consommation de la climatisation ne dépend pas, elle, de la vitesse, mais de la différence entre la température ambiante et la température souhaitée. Donc pour une température extérieure donnée, il y a une vitesse à partir laquelle la clim consomme moins que la vitre baissée. Cette vitesse de « bascule » se calcule au cas par cas, en fonction du véhicule et de la différence de température. De manière générale, on peut retenir qu'à basse vitesse, on consomme moins en baissant les vitres mais que, sur l'autoroute, si on ne cherche pas à transformer sa voiture en frigo, la clim peut rester raisonnable **par comparaison à la fenêtre ouverte**. Car attention, d'après ce qu'on trouve sur le net, la clim augmente tout de même la consommation de 3 à 10%, donc c'est loin d'être neutre. Ici la nature est bien faite car rouler vitres ouvertes à plus de 100 km/h est plutôt désagréable. A noter que si son véhicule a déjà un gros C_x (parfois on dit « une aéro dégueulasse ») baisser les fenêtres ne le modifiera pas significativement. Donc par exemple, pour les 4X4 et les SUV, mieux vaut baisser la fenêtre !

Tirer une remorque, en général, augmente largement le C_x (en plus du poids à tracter bien sûr). Il y a tout un tas de turbulences qui naissent du fait de la rupture de forme entre l'arrière de la voiture et la remorque. Disons que la vieille remorque chargée, claudiquant à l'arrière ferait enrager les ingénieurs qui se sont cassés la tête à optimiser au millimètre notre écoulement d'air à l'arrière. Mais au-delà des états d'âme des ingénieurs, gardons en tête que tirer une remorque « pour rien » augmente son C_x (et donc sa consommation) « pour rien »

5.4. Effet de la surface

Pour comprendre et ressentir l'effet de la surface sur la traînée, rien de plus simple. Montez dans une voiture en passager et, pour les besoins de la science, allez sur l'autoroute. Ouvrez la fenêtre, regardez bien qu'aucune autre voiture ne passe trop près de vous et sortez votre main, doigts tendus et serrés. Amusez-vous à modifier la position de votre main en la faisant tourner autour de votre poignet. Vous verrez bien que quand la paume de la main est face au flux d'air, votre bras doit faire beaucoup plus d'effort pour la maintenir que si vous mettez la tranche de la main face au flux d'air. On dit que votre main « paume face au flux » traîne plus que votre main « tranche face au flux ». La différence entre les 2, c'est la surface que vous présentez au flux d'air. Par ailleurs, entre ces 2 situations, vous verrez que, quand votre main fait un angle intermédiaire (on alors dit que votre main est en incidence) et bien elle décolle si cet angle est « vers le haut » ou plonge s'il est « vers le bas ». Pas de panique, vous expérimentez simplement le principe du vol d'un avion. Si une émotion particulière vous submerge, alors foncez au 10 avenue Édouard Belin à Toulouse et (re)lisez Vol de Nuit.

Mais revenons sur terre. Peut-on influencer sur cette surface ? Eh bien oui de 2 façons.

Premièrement dans le choix du véhicule. Si on compare le maître couple de notre SUV d'amour ($S_{SUV} \approx 1,6 \times 1,8 = 2,88 \text{ m}^2$) avec celui d'une Smart par exemple ($S_{Smart} \approx 1,56 \times 1,56 = 2,43 \text{ m}^2$), celui d'un utilitaire de 15 m^3 ($S_{U15} \approx 2 \times 2,8 = 5,6 \text{ m}^2$) ou celui d'une formule 1 ($S_{F1} \approx 2 \times 0,9 = 1,8 \text{ m}^2$), on comprend bien que la résistance à l'air, donc l'énergie motrice nécessaire pour la contrer, sera différente. Toute chose égale par ailleurs, plus la surface est petite, moins on consomme.

Et puis dans la disposition de son chargement. Et là on arrive au glamour du coffre de toit (pour les skis ou le surplus de bagages), aux vélos sur le toit, au frigo harnaché sur les galeries ou aux touchantes Peugeot en transit nord-sud, surchargées de sacs de jute et de bagages en tout genre qui tiennent miraculeusement fixées par des cordelettes sur le toit. Bref, quand on met des choses sur le toit, on augmente non seulement sa masse (cf. chapitre précédent), mais aussi sa surface, donc sa traînée, l'énergie motrice nécessaire pour la contrer, sa consommation de carburant etc. etc. Si ce n'est pas utile (si le coffre de toit est vide par exemple), on luttera contre l'air pour rien.

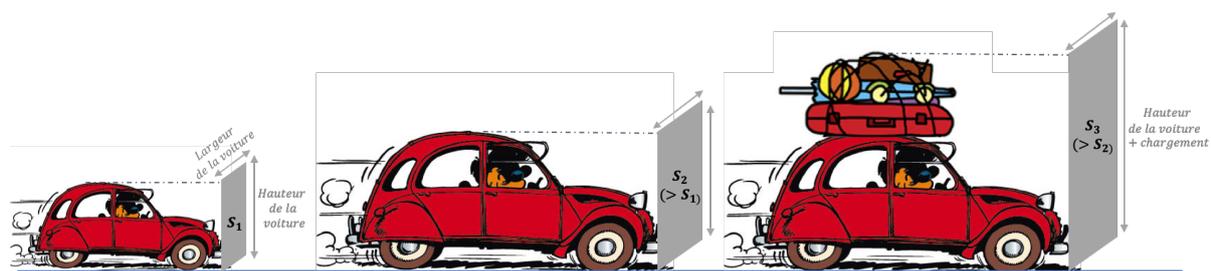


Figure 5 : La surface de résistance à l'air dépend de la taille de la voiture et du chargement extérieur

5.5. Effet de la vitesse

Nous vous avons réservé le meilleurs pour la fin et si vous avez tout lu attentivement jusqu'ici, tout d'abord bravo, vous avez peut-être compris pourquoi : parce qu'elle est encore « au carré » !

Donc, si nous roulons à 80 km/h nous consommons une quantité de $80^2 = 6\,400$ ue, à 90 : 8 100 à 110 : 12 100 et à 130 : 16 900. Donc en roulant à 130, on consomme 2 fois plus qu'en roulant à 90. On peut donc bien dire que rouler plus vite ne compense pas le fait de rouler moins longtemps, pour la bonne et simple raison que la résistance de l'air dépend du carré de la vitesse, et non de la vitesse seule.

Lorsqu'il est demandé de rouler à 110 plutôt qu'à 130 pendant les pics de pollution, l'effet recherché est de réduire de l'ordre de $\frac{16900-12100}{16900} = 28\%$ les émissions de gaz d'échappement dus à la résistance à l'air. De la même façon, si on roule à 80 plutôt qu'à 90, on diminue de 21% sa consommation et ses émissions en croisière.

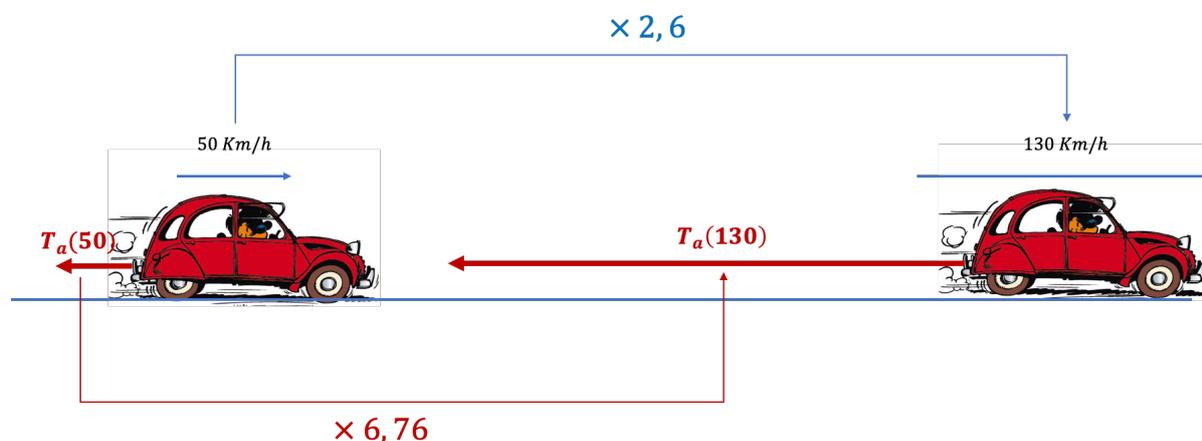


Figure 6 : La traînée de l'air travaille contre le mouvement à chaque centimètre parcouru en fonction du carré de la vitesse

5.6. En synthèse

Dans la lutte contre l'air sur du plat, plus on fait de kilomètres, plus on consomme, plus on présente une surface importante au flux d'air, plus on consomme, et plus on roule vite, plus on consomme plus on consomme.

On s'est donc encore questionné ici sur les 3 domaines de l'usage :

- Les caractéristiques de l'engin : géométrie de l'engin et du chargement sur le toit
- La mission de transport : distance à parcourir
- Le pilotage : vitesse de croisière

OK, mais même si on n'est pas de grands aventuriers chez « Cépartimonkiki », on ne roule pas toujours sur du super plat. Même sans aller à la montagne, on a parfois des petites côtes, ou des petites bosses, à grimper. Et quand on grimpe, même à pied, on sent bien que c'est plus difficile. Que dites-vous de cela alors ?

6. Le dénivelé, ou comment lutter contre la terre qui nous attire toujours vers le bas

Dans tout ce que l'on a dit jusqu'à présent, nous avons fait l'hypothèse que la route était parfaitement plate. Bien sur ce n'est jamais le cas et quand on doit monter, le moteur lutte contre l'effet de la pesanteur. C'est ici qu'on est obligé de faire la différence entre la masse et le poids. Le poids est la force qui s'applique sur une masse sous l'effet de la pesanteur. En phase d'accélération le moteur lutte contre l'inertie, effet de la masse (m), en phase de montée, il lutte contre son poids (P) sous l'effet de la pesanteur (g). Alors pourquoi on les confond ? Et bien parce que :

$$P = m \times g$$

Donc, si on considère que la pesanteur est à peu près la même partout sur terre (ce qui n'est pas tout à fait exact mais acceptable dans le cadre des missions de « Cépartimonkiki »), et bien si on a la masse, on a le poids, et vice versa. D'ailleurs, notre pèse personne sait très bien faire la conversion. Quand on monte dessus, on lui applique son poids (la force qui va comprimer le ressort sous le plateau) et il nous affiche notre masse (en kg).

Comme la traînée, quand on monte une pente pour atteindre une altitude h , notre poids travaille contre nous et ce travail vaut :

$$W_p = P \times h = m \times g \times h$$

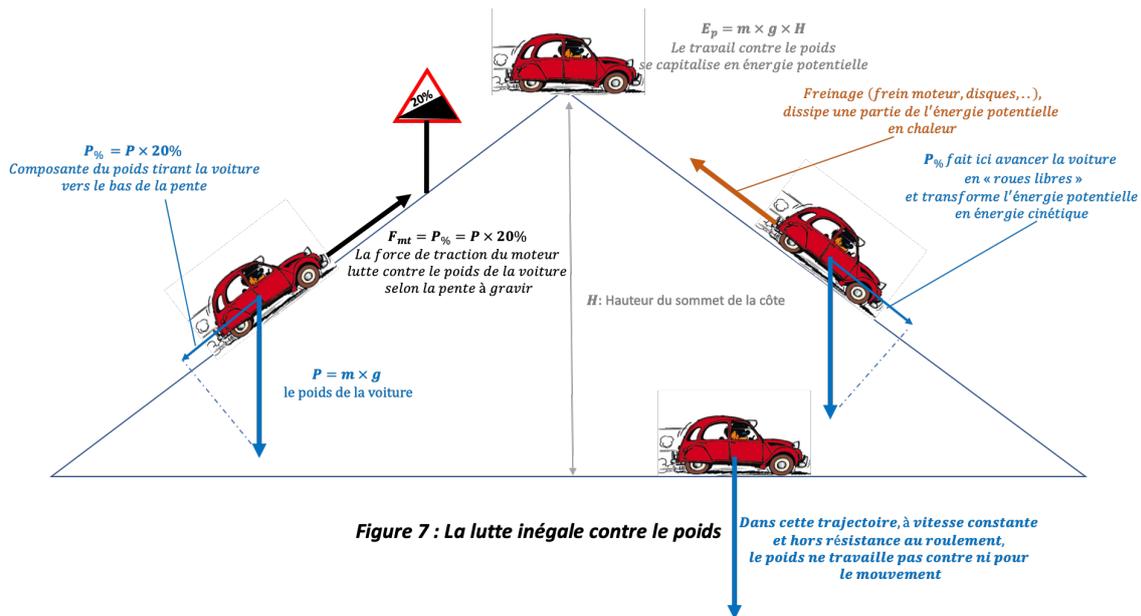
Donc notre moteur doit lutter contre le travail du poids et fournir l'énergie motrice équivalente :

$$E_{mt} = W_p = m \times g \times h$$

La différence de taille avec la lutte contre la traînée est qu'ici, la lutte n'est pas à pure perte. Le produit de cette lutte ne se dissipe pas en chaleur dans l'atmosphère mais se stocke en une énergie appelée Énergie Potentielle dont on récupère les fruits... quand on redescend ! Et oui, quand on redescend, on augmente notre vitesse, donc notre énergie cinétique, sans fournir d'énergie motrice, simplement sous l'effet de la pesanteur, cette fois-ci positif pour nous. L'énergie motrice stockée en énergie potentielle en montant se transforme en énergie cinétique en descendant.

Dans un monde sans frottement (donc sans air), et sans danger (sans besoin de freiner), on pourrait récupérer en descente toute l'énergie motrice fournie pour monter. Malheureusement, une bonne partie se dissipe en chaleur dans les frottements de l'air, dans les frottements salutaires avec vos disques de freinage et même en gaz d'échappement sous l'effet du frein moteur.

C'est la raison pour laquelle, entre 2 trajectoires possibles pour aller d'un point A à un point B, celle qui présentera le moins de dénivelé sera plus économe en énergie motrice. On le sentait déjà pas mal, mais maintenant on peut le quantifier.



7. What else ?

Disons un mot de la résistance au roulement. Cette force de résistance provient du fait que les pneus s'aplatissent légèrement sous l'effet du poids du véhicule. Le fait qu'ils ne soient pas parfaitement circulaires oblige le moteur à travailler un peu plus pour les faire rouler, et ce quelles que soient la vitesse ou l'accélération. Retenons que l'énergie motrice supplémentaire à fournir est proportionnelle à la masse du véhicule (plus on est lourd, plus on consomme), le niveau d'aplatissement des pneus (plus ils sont sous-gonflés, plus on consomme) et bien sûr à la distance parcourue (plus on va loin, plus on consomme).

Il y a beaucoup d'autres éléments qui entrent en jeu dans la consommation d'essence : la climatisation (on en a un peu parlé), la consommation électrique à bord (lumières, tous les systèmes électriques, GPS, tableau de bord, rechargement de l'iPhone, essuies glace, etc.), les frottements avec la route (surtout si les pneus sont lisses et sous-gonflés), les jeux dans la mécanique interne, le mélange qui ne se fait pas bien, le régime moteur, etc.

A la question : est-ce que tout cela consomme de l'essence, la réponse est oui car l'essence est notre unique ressource permettant de transformer de l'énergie à bord. Les mécanismes physiques sont un peu différents selon les cas, mais tout consomme, car en physique, on n'a rien sans rien !

A noter tout de même que le chauffage vient en général de la récupération de la chaleur générée par le moteur, donc mettre le chauffage n'augmente pas la consommation.

8. En conclusion

Bien sûr, pour tenter de comprendre la physique, nous avons étudié des situations qui, prises séparément, sont irréalistes (accélérer dans le vide, rouler à vitesse exactement constante sur du plat, monter régulièrement, etc.). En réalité, tous ces effets se combinent et quand on accélère dans une côte, on lutte à la fois contre sa masse, son poids, l'air et la résistance au roulement. Ce dernier point mis à part, nous comprenons pourquoi faire décoller un avion ou mettre une fusée en orbite nécessite tant d'énergie.

Les 2 leviers les plus accessibles et efficaces sont la masse et la vitesse. Gardons en tête que

- La masse joue essentiellement sur 3 terrains : les accélérations, la résistance au roulement à chaque centimètre parcouru et les montées à chaque centimètre parcouru. Sur ces 3 terrains, les voitures légères consomment moins et optimiser son chargement optimise sa consommation.
- La vitesse joue sur le terrain de l'accélération et de la lutte contre l'air à chaque centimètre parcouru. Elle est redoutable car elle joue « au carré », ce qui veut dire que l'effet de la vitesse s'emballe à mesure qu'elle augmente. Cela consomme plus de continuer à accélérer quand on est déjà à haute vitesse, et en croisière, baisser sa vitesse, même un peu, diminue significativement sa consommation.

Pensons aussi à l'« aéro » (chargement sur le toit, remorques, vitres ouvertes), à vérifier régulièrement la pression des pneus, à la clim et à toute l'énergie électrique qui provient aussi du moteur.

Ce qui ressort de cette petite revue, c'est que si on souhaite optimiser sa consommation de carburant, et donc ses émissions polluantes et réchauffantes, la première chose à faire, comme dans toute démarche de changement, c'est de se questionner sur son besoin et sur ses envies. Si possible avec le plus d'honnêteté, de lucidité et de bienveillance envers soi-même.

De là, on peut regarder les missions principales que sa voiture doit mener en ayant en tête ce qui consomme vraiment selon les cas.

Avoir ces éléments en tête au moment du choix du véhicule (achat, location, voire même taxi ou VTC, c'est la même physique pour tous !), au moment du chargement, du choix de la route, de la contrainte réelle en temps de trajet ou au moment d'appuyer sur l'accélérateur pourra peut-être aider à être plus lucide sur ses besoins, ses envies et donc éclairer ses choix en conscience.

C'était en tout cas l'unique objectif de cet article, s'il a pu y contribuer, les Supaero-Decarbo trinqueront volontiers à votre belle santé !