

## « L'avion est un moyen de transport peu efficace comparé aux autres »

Dans le débat train vs avion il est souvent mis en avant l'efficacité exceptionnelle du transport ferroviaire face au gâchis énergétique que serait le transport aérien. Certains plaident l'évidence car « le train n'a pas besoin de dépenser de l'énergie pour voler ». C'est un peu comme si vous disiez que les oiseaux sont peu performants face aux animaux terrestres car il doivent se maintenir en l'air (que ça soit en distance ou en vitesse, les oiseaux n'ont pas d'équivalents en performance dans le règne animal).

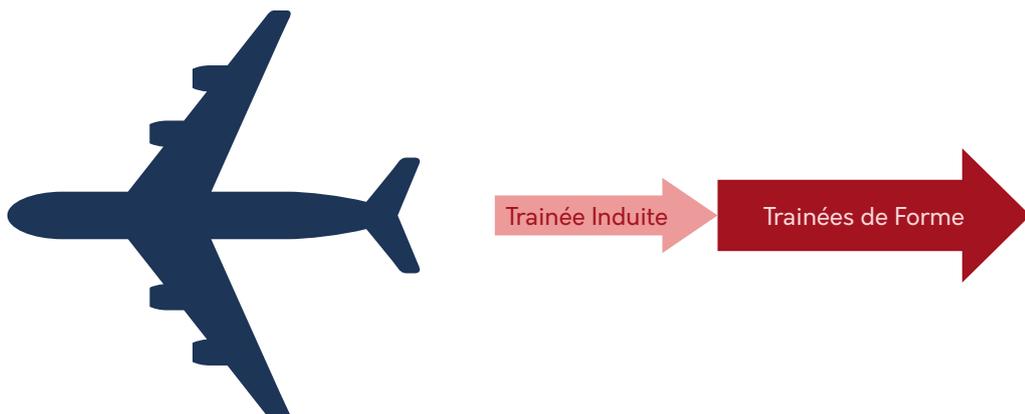
*Quelle énergie doit-on fournir pour faire avancer un train, une voiture ou un avion?*

Afin de maintenir une vitesse constante, il faut que le moyen de transport fournisse une force égale à la totalité des forces qui s'opposent à son mouvement. Pour les engins roulants tels que la voiture ou le train, il existe 2 résistances principales:

- La résistance au roulement
- La résistance aérodynamique (que l'on appelle aussi trainée aérodynamique)

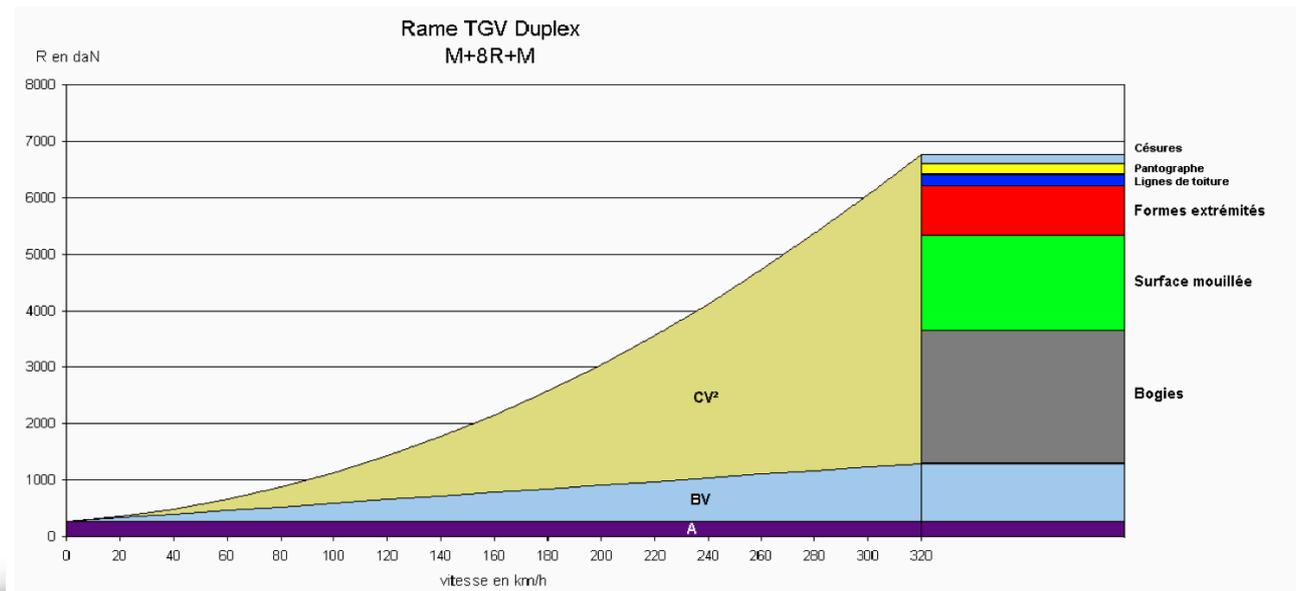


Pour l'avion, il n'y a évidemment plus de résistance due au roulement, mais parmi les résistances aérodynamiques on peut distinguer une résistance particulière, la trainée induite par la portance. En effet, cette trainée est induite par la force de portance (égale au poids) qui permet à l'avion de maintenir en l'air.



Pour les évaluations suivantes, le but n'est pas de réaliser une étude exhaustive mais d'observer des ordres de grandeurs avec quelques cas particuliers. Les estimations seront faites en régime de croisière, phase la plus prépondérante dans le cas de la mobilité longue distance:

## 1. Le cas du TGV



Source: SNCF

Cette courbe représente la résistance du TGV Duplex en fonction de la vitesse. L'intérêt de ce graphique porte dans la distinction des différentes sources de résistances associées au train. On remarque 3 sources principales:

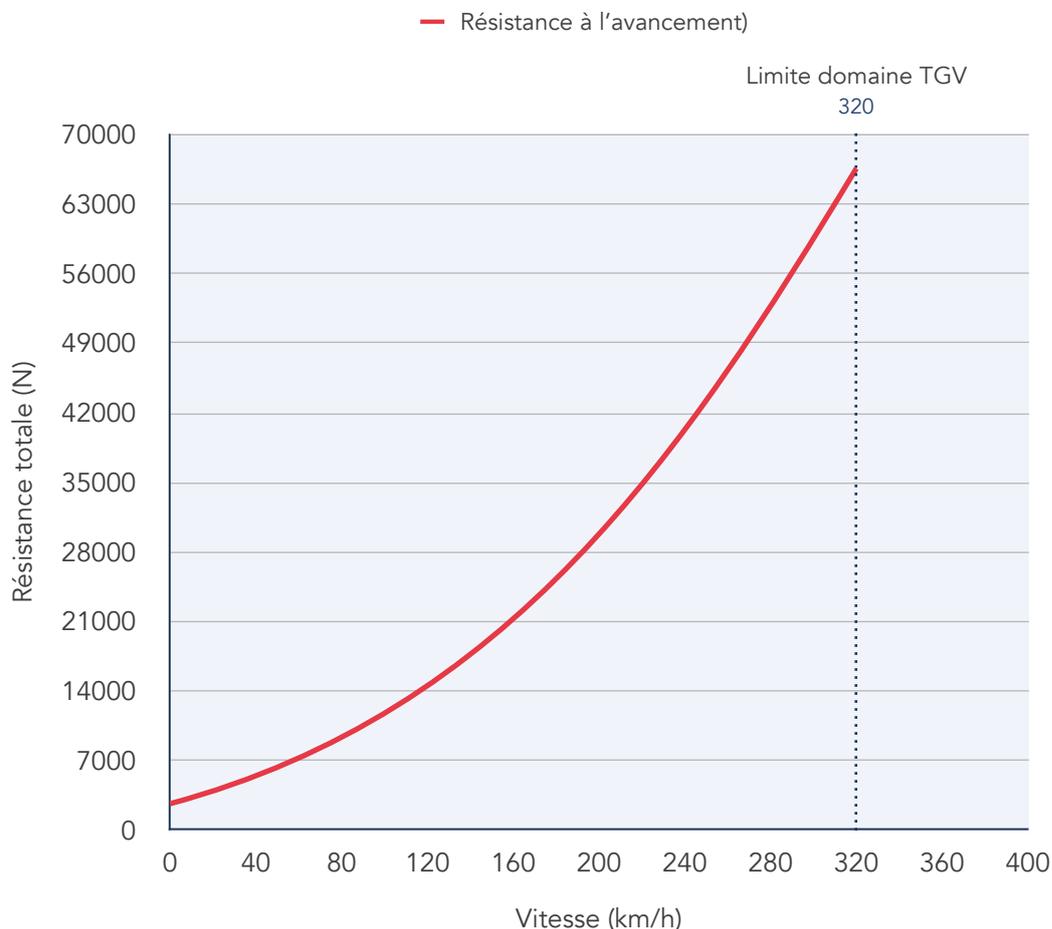
- Une source constante, indépendante de la vitesse (A)
- Une source proportionnelle à la vitesse (Bv)
- Une source proportionnelle au carré de la vitesse ( $Cv^2$ )

Les composantes A et Bv sont liés aux frottements roue/rail (résistance au roulement) et aux frictions internes tandis que la composante  $Cv^2$  est principalement due à la traînée aérodynamique.

Jusqu'à environ 110 km/h, la résistance aérodynamique est à peu près équivalente aux autres résistances. Après 110 km/h, elle devient de plus en plus prépondérante (à 260 km/h, A+Bv sont équivalent à 23% de la traînée totale, puis à 300 km/h, A+Bv ne représentent plus que 19% de la traînée totale).



Les graphiques suivants<sup>74</sup> montrent qu'un TGV DASYE (Duplex, 510 places, 430 tonnes) offre une résistance totale de 6,6 tonnes (66595N) à 320 km/h et une énergie « utile »<sup>75</sup> par passager de **0,036 kWh/Pax.km**:



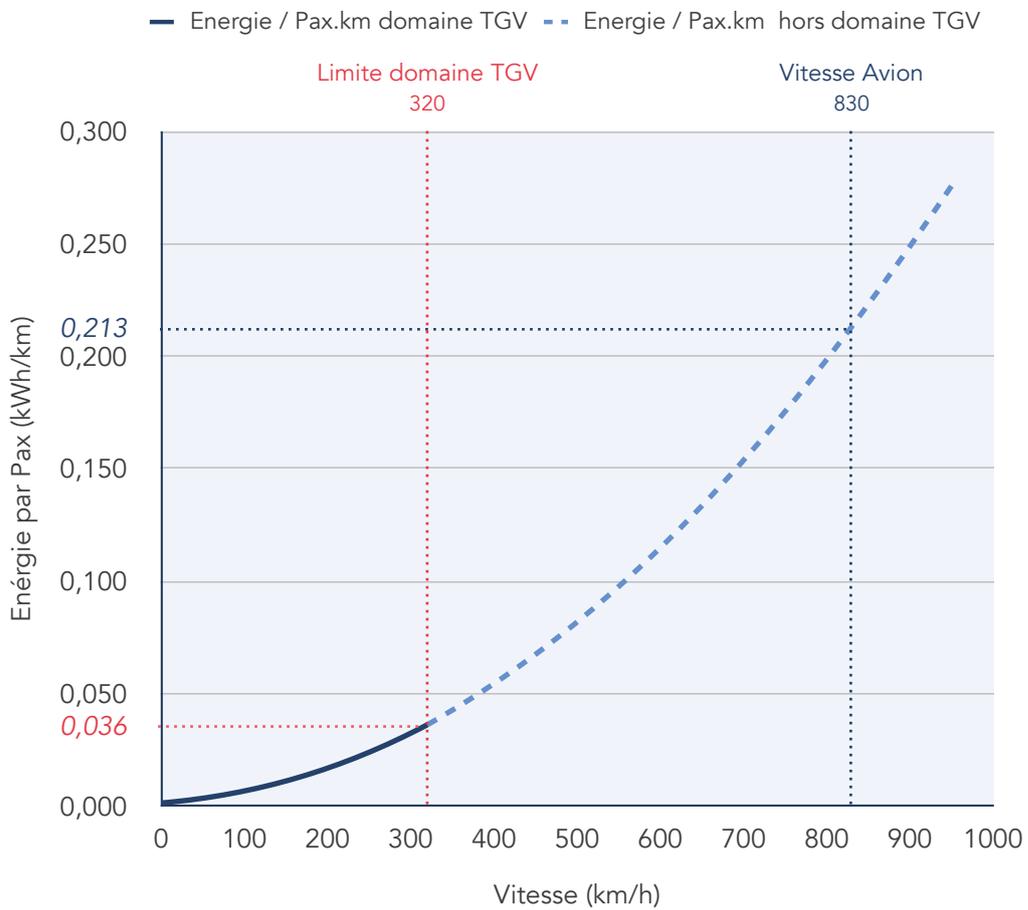
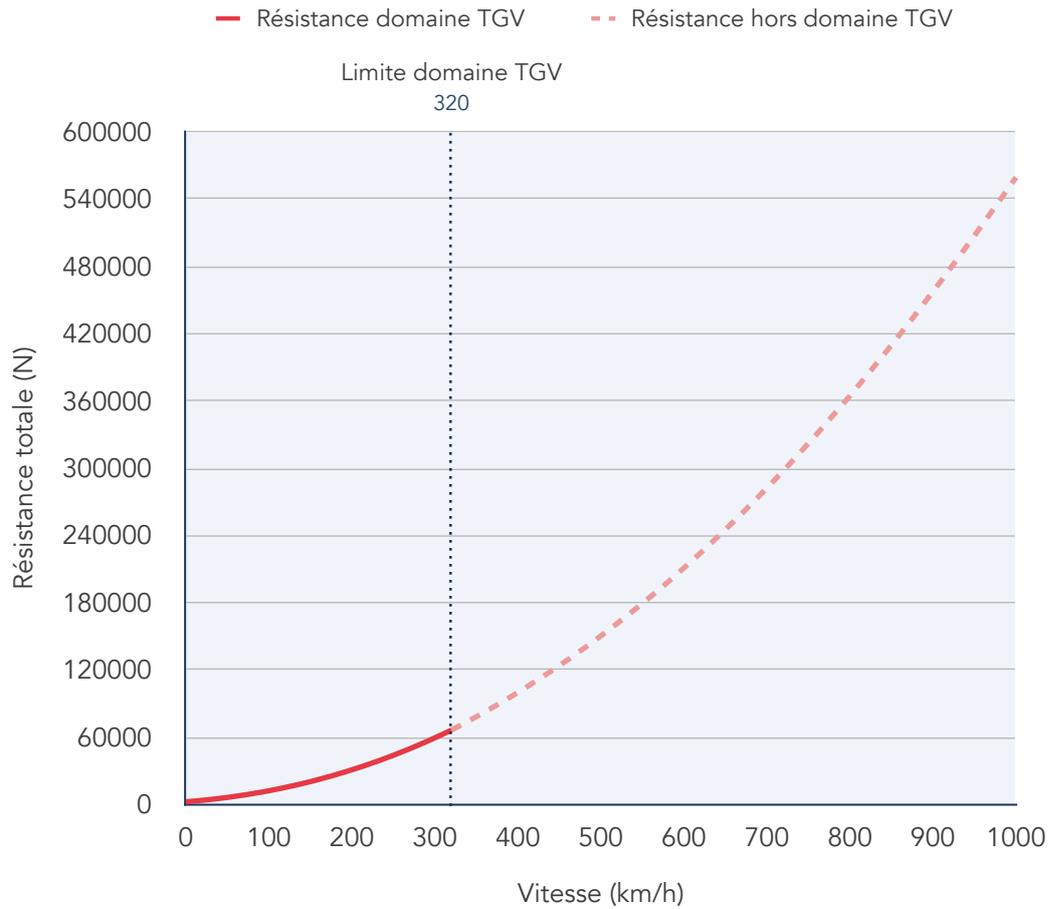
Source: P.48 « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse »

<sup>74</sup> Courbes extraites de « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse » (P.48). Le TGV DASYE est un Duplex de 510 places, la courbe représente une rame unité simple (US). L'extrapolation page suivante est basée sur les paramètres A, B, et C mais ne représente pas une réalité. Le TGV est en effet limité à certaines vitesses en exploitation pour des raisons de durabilité des éléments mécaniques, de confort et de pertinence énergétique.

<sup>75</sup> L'énergie « utile » est l'énergie physique requise pour transporter 1 passager sur 1km. Le moteur devra fournir une énergie supérieure pour tenir compte des pertes liées à la propulsion. De même, la source d'énergie initiale (nucléaire, gaz, pétrole...) devra contenir plus d'énergie pour tenir compte de pertes indissociables au fonctionnement du moteur ou de la centrale électrique.



## Courbes Extrapolées:



**La demande énergétique d'un train rapide est donc majoritairement liée à la vitesse, à cause de la prépondérance des forces aérodynamiques.**

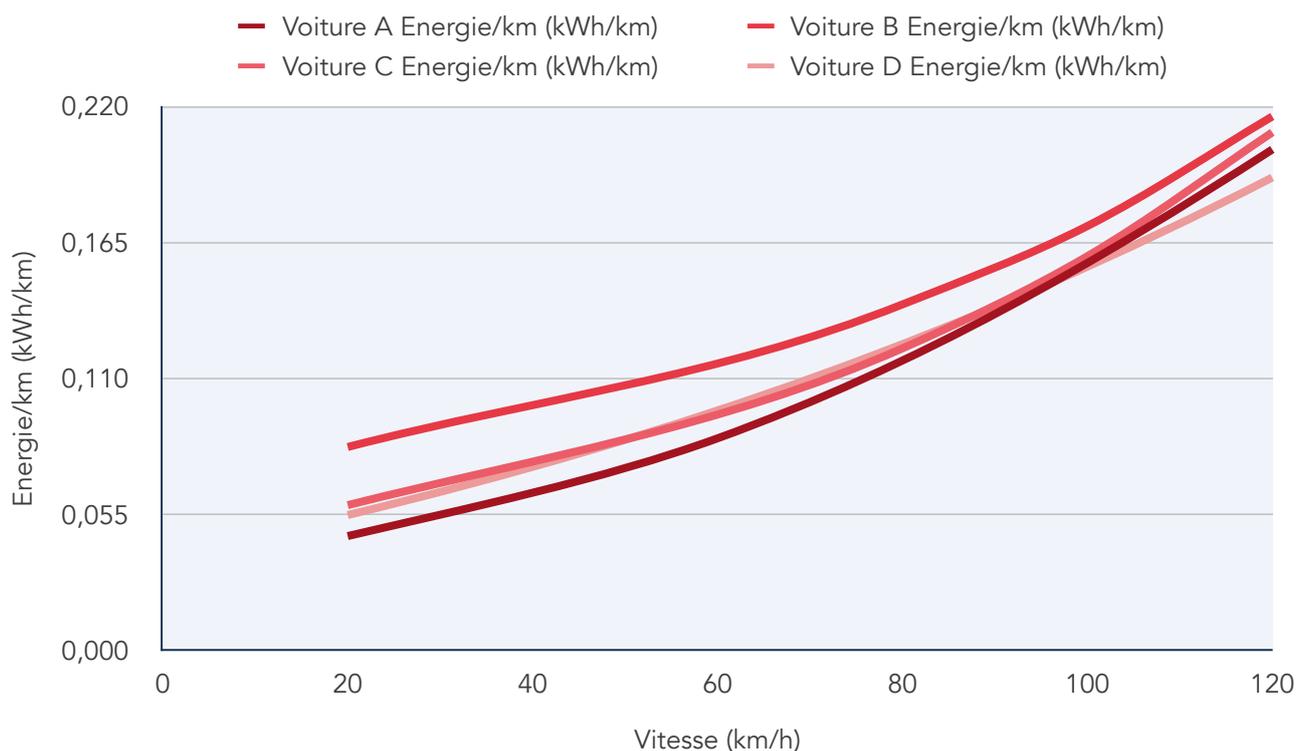
On remarquera qu'en extrapolant les courbes jusqu'à la vitesse d'un avion (830 km/h), l'énergie requise serait multipliée par presque 6 pour atteindre 0,210 kWh/Pax.km.

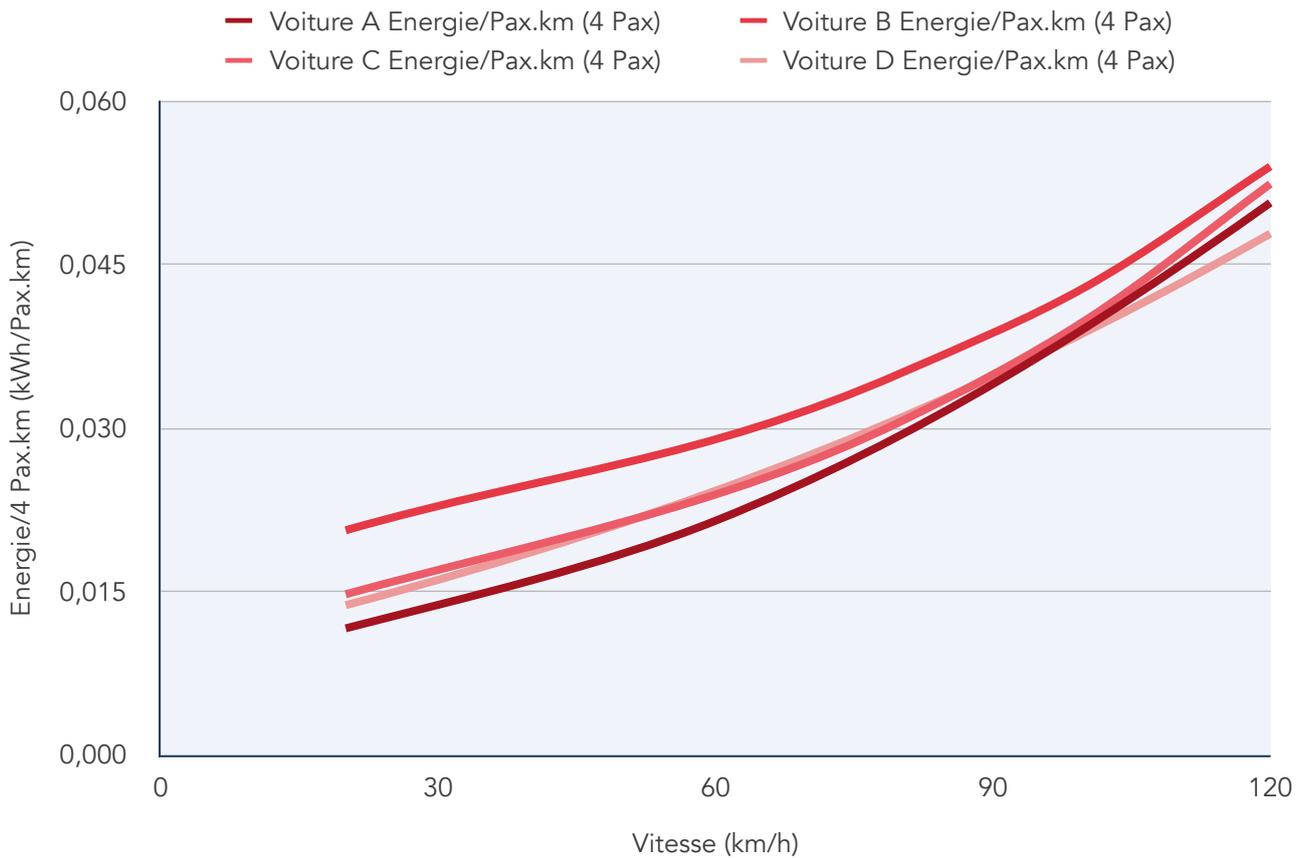
## 2. Le cas de la voiture

Les efforts de résistance s'opposant au mouvement d'une voiture sont très similaires à ceux du train. La différence principale étant le coefficient de roulement pneu/route plus important que le roue/rail du train.

Des essais ont été réalisés en 2012 afin de déterminer l'énergie utile de différents types de voiture en fonction de la vitesse. Voici une synthèse sur 4 types de voitures permettant de rouler sur de longues distances:

	Type	Année	Masse (kg)	Moteur	Puissance Maxi (cv)
Voiture A	Citadine Polyvalente	2012	1180	Diesel	90
Voiture B	Routière	2009	1880	Diesel	200
Voiture C	Monospace Compact	2010	1380	Diesel	110
Voiture D	Familiale	2012	1370	Essence	155



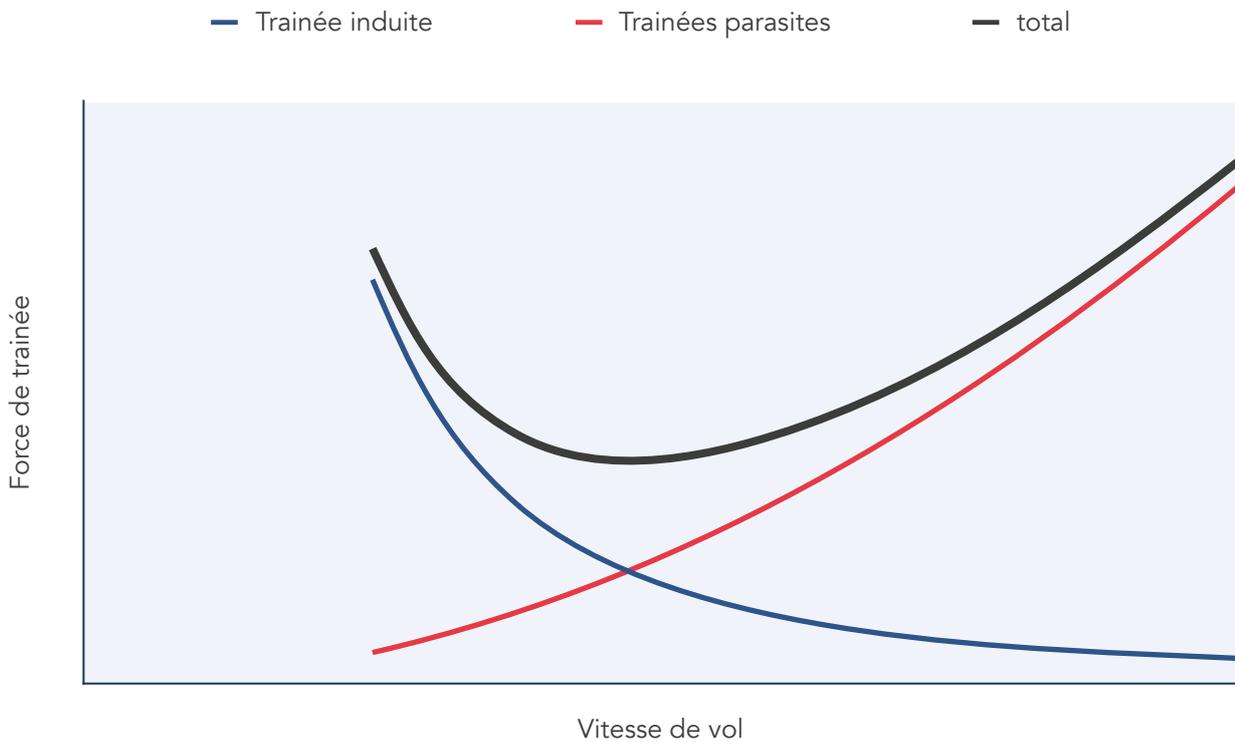


Au taux de remplissage optimal (4 pax), l'énergie requise pour déplacer une personne à 120 km/h sur 1 km est de **0,048 kWh.Pax.km** pour la voiture la plus performante.

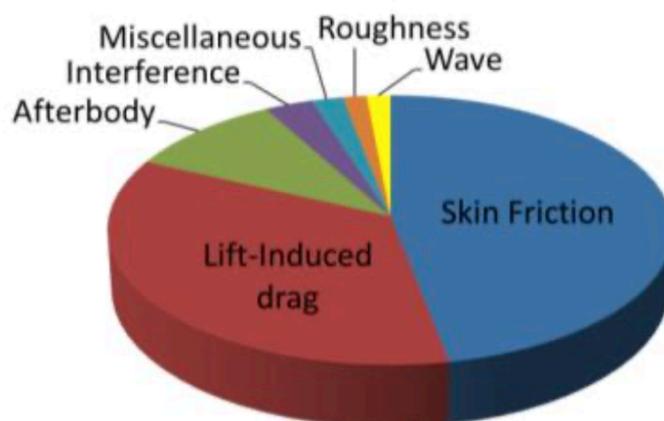
### 3. Le cas de l'avion

La résistance à l'avancement de l'avion est majoritairement composée de la traînée induite par la portance, et de traînées « parasites ». La traînée induite décroît avec la vitesse tandis que les traînées parasites (à l'instar du train et de la voiture) augmentent avec la vitesse. Cela fait de l'avion un cas particulier car sa résistance totale en forme de « cuvette » passe par un point optimal. A la différence des transports terrestres et maritimes classiques, **le fait de réduire sa vitesse en avion ne le rendra pas nécessairement plus efficace d'un point de vue énergétique.**





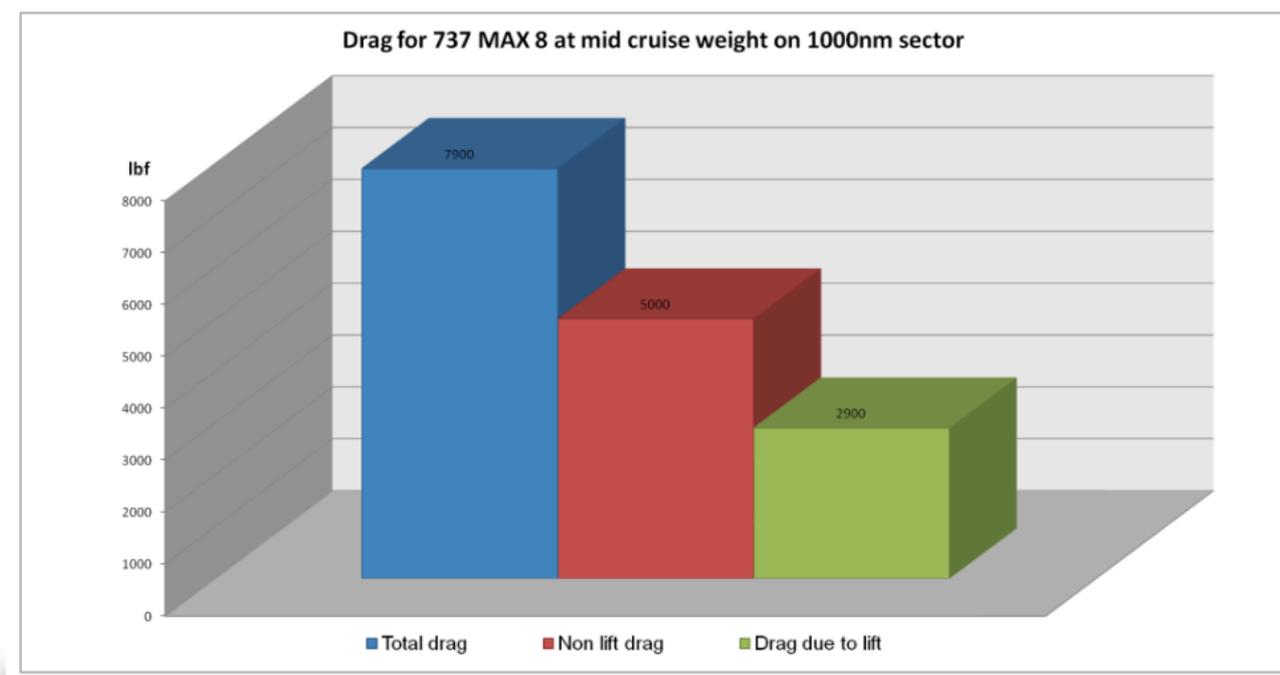
La trainée induite par la portance dépend de paramètres géométriques (dont allongement de l'aile) mais surtout de la portance générée par l'avion, donc de son poids. A vitesse constante, plus l'avion s'allège en vol, plus la trainée induite diminue. La part de trainée induite dépend également de la vitesse de l'avion. Selon la courbe ci-dessus, un avion volant à sa vitesse de trainée minimale aura une trainée induite égale aux trainées parasites (point correspondant au bas de la cuvette). Mais les avions commerciaux volent en général à une vitesse supérieure à la vitesse de trainée minimale afin d'augmenter leur distance franchissable (la vitesse de Longue Range Cruise équivaut à environ 1,32 fois la vitesse de trainée minimale). Selon les configurations, **la part de trainée induite d'un avion commercial en croisière vaut environ 25% à 40%**:



**Fig. 1. Transport aircraft Drag Breakdown**

Source: P.1 « *ERICA tiltrotor airframe wake characterization* »





Source: Leeham & Co. « *Fundamentals of airliner performance, Part 1* »

L'exemple ci-dessus du 737 Max 8 (64 tonnes, en croisière à Mach .78 au FL370, finesse de 18,4), donne une force de traînée induite de 13150N qui correspond à 37% d'une force de traînée totale de 35830N. En faisant l'hypothèse d'une configuration à 189 Pax, **la force qui permet la sustentation de l'avion correspond à 7 kg par passager<sup>76</sup>.**

Et l'énergie utile correspond à **0,053 kWh/Pax.km.**

On notera que cette énergie correspondrait à un TGV roulant à 395 km/h, là où l'avion offre 830 km/h (car à 37000ft, la densité de l'air est plus faible, et l'avion ne « ressent » que 440 km/h)

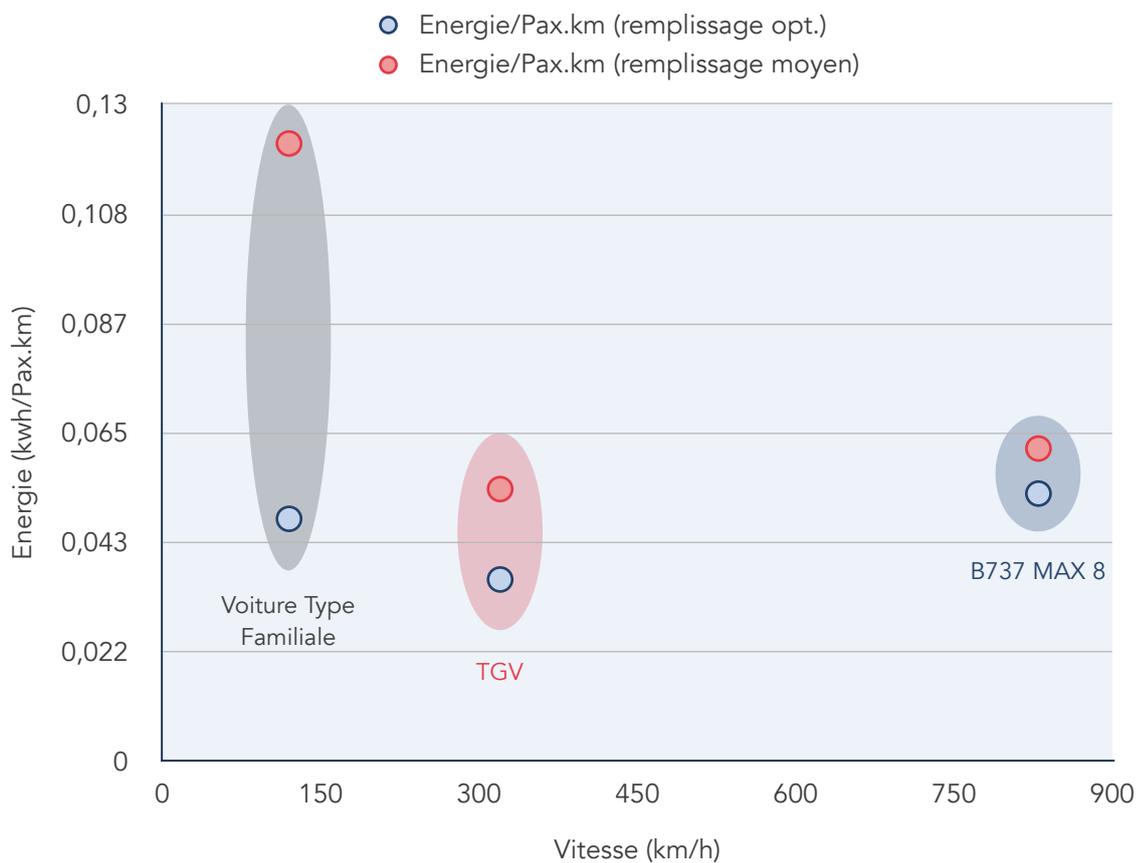
#### 4. Synthèse:

Avec un remplissage optimal, une **voiture familiale** requiert **0,048 kWh/Pax.km** pour rouler à **120 km/h**, un **TGV** requiert **0,036 kWh/Pax.km** pour rouler à **320 km/h** et un avion de type **B737-Max 8** requiert **0,053 kWh/Pax.km** pour voler à **830 km/h**.

Avec leur taux de remplissage moyen, la **voiture** aura besoin de **0,122 kWh/Pax.km**, le **TGV** aura besoin de **0,054 kWh/Pax.km** et l'**avion** **0,062 kWh/Pax.km**:

<sup>76</sup> Afin de sustenter un passager de 85 kg il faut donc produire une force équivalente à seulement 8% de son poids.





**L'énergie utile permettant de mouvoir 1 passager sur 1 km est du même ordre de grandeur pour la voiture familiale, le TGV ou l'avion (avec un remplissage optimal).**

Si ce dernier est un peu plus consommateur, l'écart reste faible au regard du gain de vitesse permis.

En tenant compte du remplissage moyen<sup>77</sup>, l'écart se resserre entre le TGV et le B737. La voiture devient nettement plus consommatrice car elle est particulièrement sous-remplie dans son utilisation standard.

A noter qu'une réduction de vitesse réduira l'énergie utile de la voiture et du train, tandis que l'avion est limité à une plage de fonctionnement aérodynamique beaucoup plus restreinte.

<sup>77</sup> Taux de remplissage moyen du train à 66,8% en 2018 (P.24 « Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs - Vol.1 », celui de l'avion à 85,6% en 2019 en Europe selon l'IATA, et celui de la voiture de 1,57 pax/véhicule (P. 82 « URF - Faits & Chiffres 2018 - Statistiques des mobilités en France et en Europe »)



## Quel est le rendement énergétique de ces moyens de transports?

Nous avons vu l'énergie utile requise pour contrer la résistance à l'avancement de ces moyens de transport à leurs vitesses respectives. Maintenant, il faut trouver une énergie adaptée à la propulsion de ces machines. Et comme des roues motrices ou bien des dispositifs accélérant de l'air ça ne se trouve pas dans la nature, **il faut transformer l'énergie « contenue » dans une ressource naturelle** (pétrole, gaz, combustible nucléaire, biomasse, vent, rayonnement solaire...) **pour l'adapter à ces engins**. Mais si on a la capacité à passer d'un type d'énergie à un autre, **il y a encore beaucoup de pertes en route**:

### 1. Le TGV

On peut estimer les pertes suivantes:

- Pertes liées à la chaîne de traction: **Elles sont estimées à 13%** (soit un rendement de 87% pour un TGV récent type POS - P. 52 « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse »).
- Pertes liées au fonctionnement des systèmes auxiliaires (systèmes de refroidissement, système pneumatique, chauffage/Clim...). **On peut les estimer à 12%** (Rendement global de la chaîne de traction mesuré à 75% - P. 146 « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse »).
- **Pertes liées au transport de l'électricité**: estimées entre 3% et 18,7% en France, avec **une moyenne à 9,3%** (P. 37 « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse »).
- **Pertes liées à la production d'électricité**: Cela dépend fortement de la manière dont est produite l'électricité. Le rendement moyen français entre l'énergie primaire et l'électricité produite est estimé à 30% en 2012 (**70% de pertes totales**, incluant les pertes réseau - P. 57 « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse »). Cela est dû à la forte part d'énergie nucléaire qui a un rendement autour de 30%<sup>78</sup>.

Pour un TGV récent, le rendement entre énergie primaire et énergie au pantographe est estimée à 30% (Mix Français en 2012), puis le rendement entre l'énergie électrique au pantographe et l'énergie à la jante est estimée à 75%. **Le rendement global d'un TGV entre l'énergie primaire et l'énergie à la jante peut donc être estimé à 22,5%.**

<sup>78</sup> Valeurs courantes de rendements:

Moteur thermique = 35 à 40 %

Moteur électrique = 80 à 85 %

Centrale à flamme = 35 à 40 %, jusqu'à 50 % avec cogénération. Et jusqu'à 60 % prévu pour les nouvelles centrales à gaz

Centrale nucléaire = 30 %, 35 % pour EPR

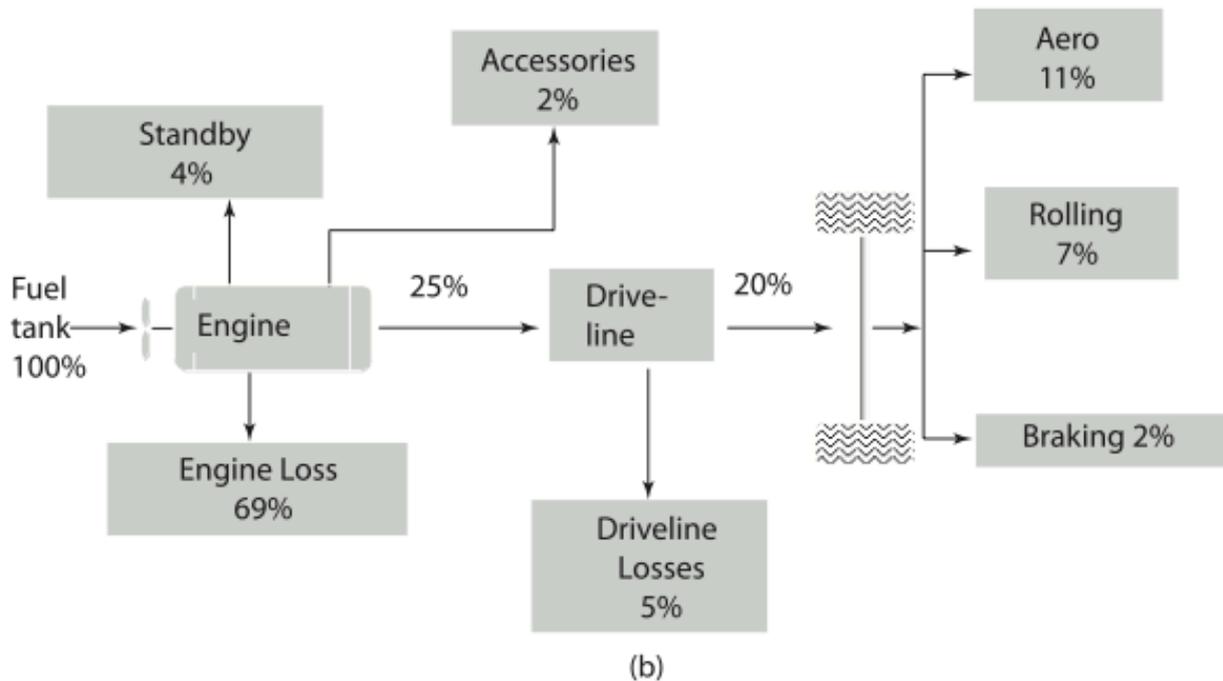
Eolien terrestre = 20 à 25 %, 30 à 35 % en off shore ( pour vents de 10 à 25 m/s)

Solaire PV = 10 % (Si amorphe) à 15 à 20 % (Si cristallin), mais rien la nuit



## 2. La Voiture

Il existe de nombreuses pertes liées au moteur, à la transmission, au fonctionnement des systèmes auxiliaires. Voici un exemple (USA de 2006) concernant une voiture moyenne sur autoroute:



**FIGURE 3-1** Example energy flows for a late-model midsize passenger car: (a) urban driving; (b) highway driving. [SOURCE: U.S. Department of Energy ([www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml)).]

Source: P. 40 « *Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy* »

De nos jours, un moteur à essence a un rendement d'environ 20% sur un cycle route « standard » et jusqu'à environ 30% sur autoroute. Mais **pour connaître le rendement global d'un véhicule fonctionnant aux énergies fossiles, il suffit de faire le ratio entre l'énergie utile (énergie requise au déplacement) et l'énergie consommée (les litres d'essence partis en fumée et un peu en traction).**

Dans l'essai discuté précédemment, la voiture D (voiture de type familiale de 2012, moteur essence de 155 CV max) avait l'énergie utile la plus faible à 120 km/h. Ses émissions de CO<sub>2</sub> ont été mesurées à 179,7 gCO<sub>2</sub>/km sur un cycle NDEC (Vehicle 6 « TNO Report - Road load determination of passenger cars ») donc en prenant le facteur d'émission de l'essence à 2,24 kgCO<sub>2</sub>/litre (ADEME) on en déduit que la consommation moyenne de la voiture était de 8l/100km.



En faisant l'hypothèse d'une consommation à 8L/100km à 120 km/h constants, l'énergie brûlée est d'environ 0,73 kW/h/km (Densité énergétique essence: 33MJ/Litre), ce qui nous donne un rendement énergétique de **26% pour une voiture roulant sur autoroute** (ce rendement augmenterait à 30% en prenant l'hypothèse d'une consommation à 7L/100km)

### 3. L'avion

Le rendement d'un moteur d'avion est particulièrement performant pour une machine thermique grâce aux faibles températures qui règnent en altitude. Le rendement total (thermique + propulsif) d'un moteur double flux moderne est proche de 40% selon P&W:

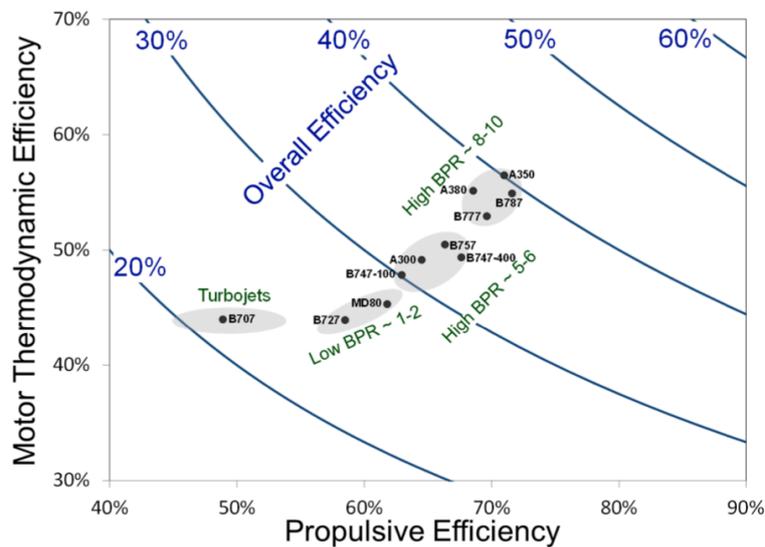


FIGURE 3.2 Commercial aircraft gas turbine engine efficiency trend. BPR, bypass ratio. SOURCE: A.H. Epstein, 2014, Aero-propulsion for commercial aviation in the twenty-first century and research directions needed, *AIAA Journal* 52(5):901-911, doi:10.2514/1.J052713. Reproduced by permission of United Technologies Corporation, Pratt & Whitney.

Source: P. 40 « *Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research* »

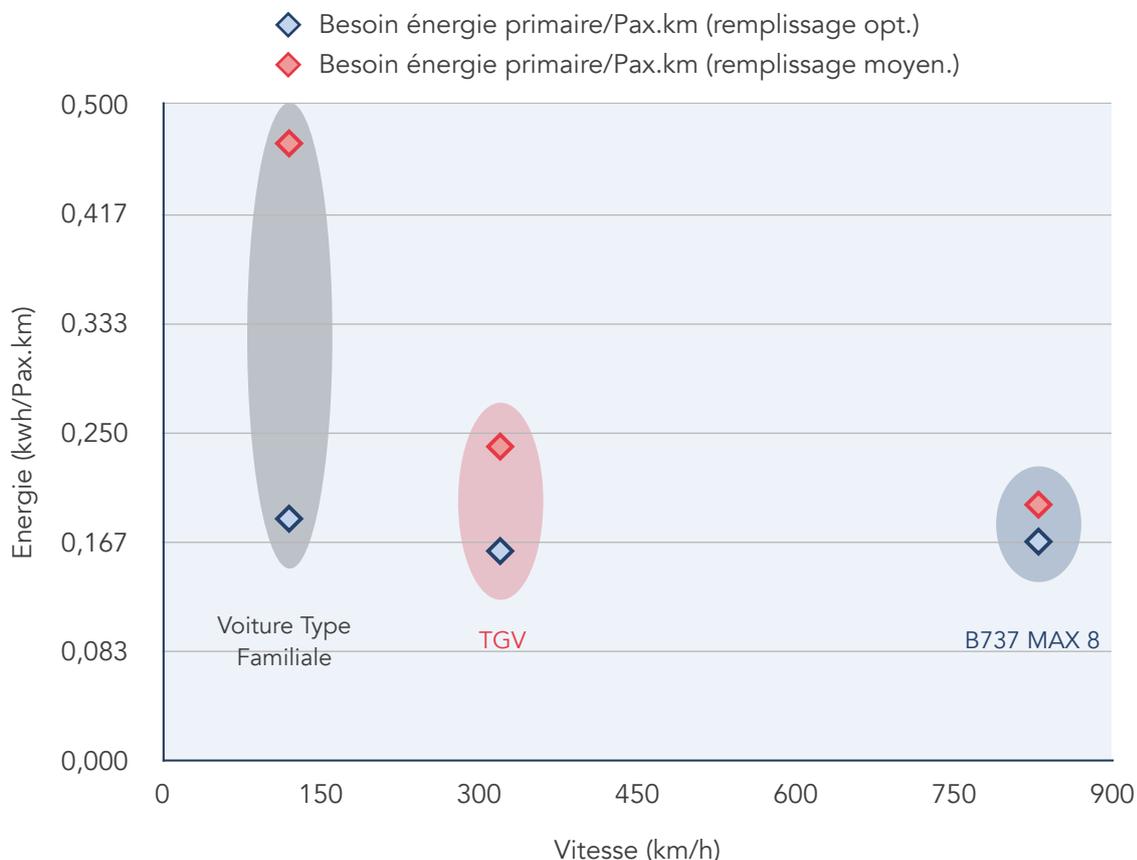
Comme pour la voiture, le meilleur moyen d'obtenir le rendement énergétique global est d'utiliser le ratio de l'énergie utile et de l'énergie consommée. La consommation horaire moyenne de kérosène d'un B737 Max8 s'établit à 2100 kg/heure<sup>79</sup> (hypothèses de vol mach .78, 37000ft, 64t), ce qui représente 3,16 Litres/km. La densité énergétique du kérosène étant de 35,8MJ/Litre, cela nous donne une énergie consommée de 31,42 kWh/km pour une énergie utile de 9,953 kWh/km. **Le rendement énergétique d'un B737 Max 8 est donc de 32% en régime de croisière.**

<sup>79</sup> Selon le modèle développé par Leeham & Co, le Boeing 737 Max 8 consomme entre 1900 kg/h et 2000 kg/h de kérosène (hypothèses de vol mach .78, 37000ft, 64t - TSFC 0,53 à 0,56 lb/lbf/h - *Leeham & Co. Part 2* et *Leeham & Co. Part 6*). Cela semble cohérent avec les valeurs usuelles d'un B737-800 NG équipé de cfm56-7B (2300-2400 kg/h pour des conditions similaires) diminuées des 15% de gain de consommation d'un leap 1B. Afin de prendre en compte l'usure des moteurs, on prendra une valeur de 2100kg/h pour la consommation d'un B737 Max 8 en croisière.



## 4. Synthèse

Voici le bilan du besoin en énergie primaire de ces 3 exemples de moyens de transport:



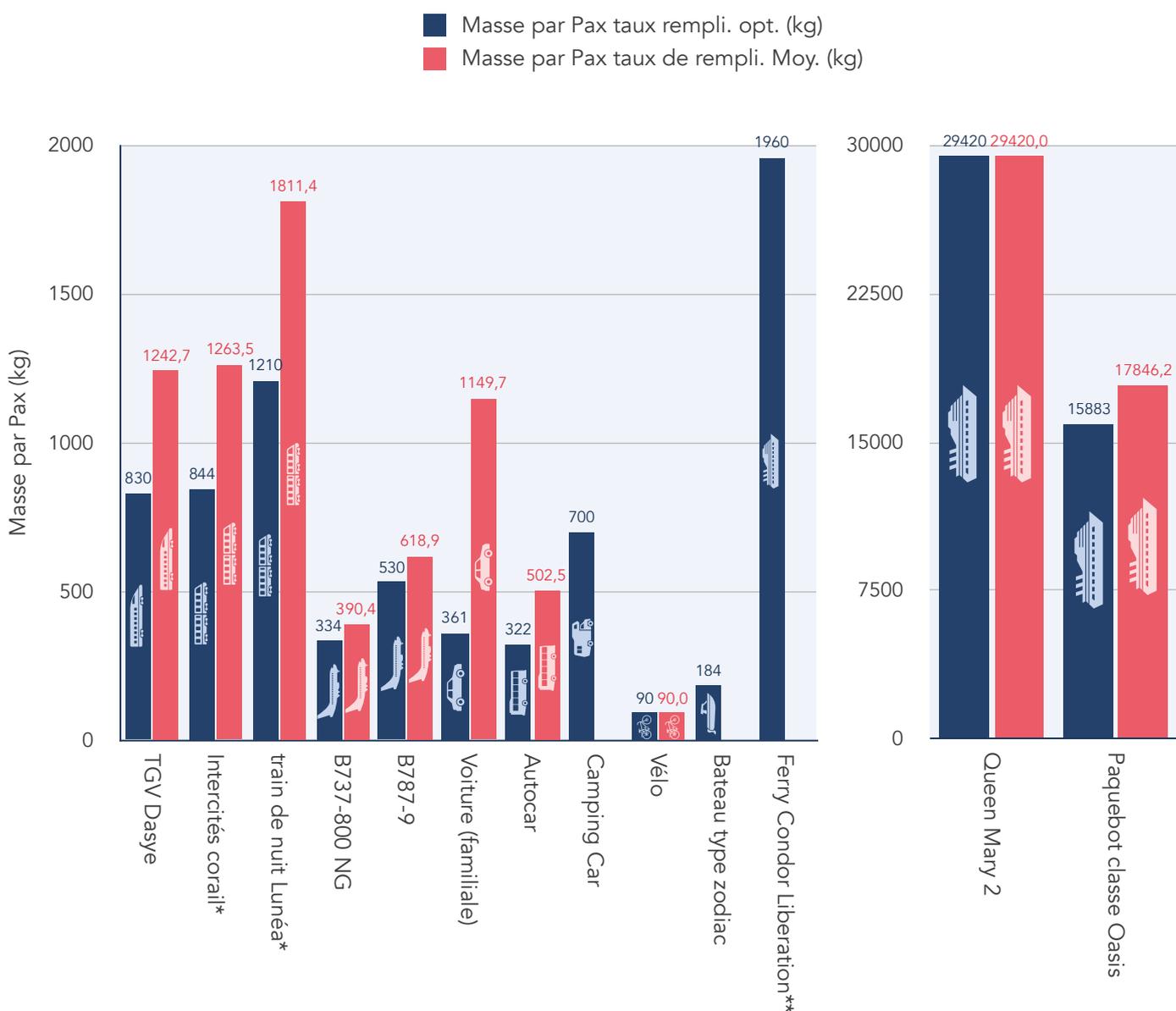
En analysant l'ensemble du cycle énergétique, on s'aperçoit que **le besoin en énergie primaire rapporté au pax.km est très proche pour la voiture, le TGV et le B737 Max 8 en régime de croisière sur un trajet longue distance. L'avantage du TGV n'est donc pas une sobriété énergétique exceptionnelle, mais bien la possibilité d'utiliser une source primaire décarbonnée et renouvelable (électricité nucléaire incluse).** La voiture est en cours de transition vers ce type d'énergie tandis que l'avion ne s'est pas encore adapté.

**Note:** Cette étude est limitée à des exemples en phase de croisière. Elle ne prend pas en compte certains paramètres comme les pertes liées aux opérations sols et montée de l'avion (les pertes liées à la montée sont en grande partie récupérées lors de la phase de descente), les pertes liées à l'augmentation des distances par des routes non directes, aux phases de freinage/accélération des transports terrestres, au relief de la trajectoire, à la courbure des voies terrestres... La prise en compte de ces pertes défavoriserait l'avion sur de courtes distances et l'avantagerait sur de longues distances.



## Quelle est l'influence du temps de transport sur la masse à transporter?

Comme on l'a vu précédemment, **La vitesse coûte cher en énergie si l'on a pas de solution pour réduire les forces aérodynamiques** (en évoluant dans un air moins dense, comme l'avion, l'hyperloop ou la sonde spatiale voyager 2). Une plus grande sobriété énergétique peut donc être atteinte en réduisant la vitesse de déplacement. Si cela ajoute l'inconvénient d'augmenter le temps de transport, il y a également une conséquence énergétique parfois oubliée dans les comparaisons: **plus le temps de voyage est long, plus la masse associée au confort du passager est importante**. Voici quelques exemple de masse totale rapportée au passager (voir sources en encadré):



\* Le train intercités corail et le train de nuit Lunéa sont composés d'une rame fictive de 498 places incluant 5 voiture de 2nde classe, 1 voiture de 1ère classe et une voiture service tractée par une locomotive de type BB22200. Cette composition « fictive »



permet d'avoir une capacité proche de celle d'un TGV Duplex permettant une meilleure comparaison.

\*\* Le ferry condor libération est un ferry rapide transportant voyageurs + fret (voitures/camions). La masse par passager est donc légèrement surestimée.

Lorsqu'un moyen de transport est destiné à accueillir des passagers sur des trajets de longue durée, alors la masse à transporter par passager augmente avec les équipements de confort installés. Au taux de remplissage maximum, un paquebot de luxe comme le Queen Mary 2 à une masse par passager 88 fois supérieure à un avion de type B737-800NG. **Si la vitesse à un coût énergétique en terme de résistance aérodynamique, la lenteur à un coût énergétique en terme de masse à transporter.**

En corollaire, cela signifie que la comparaison brute de plusieurs moyens de transport en transposant les charges utiles à un nombre de passagers n'a pas beaucoup de sens. On ne peut pas dire qu'un porte conteneur emportant 100 000 tonnes de fret soit équivalent à un bateau transportant 1 170 000 passagers de 85kg... De même, un poids lourd transportant 40 tonnes de marchandises n'offrira pas le confort suffisant pour transporter 471 passagers de 85 kg.



## Sources:

Donnée masse TGV Dasye (P. 106 « Modélisation énergétique et identification des trains pour l'écoconception des lignes ferroviaires à grande vitesse » ; nombre de places TGV Duplex ; Train corail intercity (et Lunéa): Rame fictive de 5 voitures de 2nd classe (types B11tu jour / Bc10ux nuit), 1 voiture de 1ère classe (types A10tu jour / Ac9ux nuit) et une voiture service/bar pour un total de 498 places (similaire au TGV Duplex) + une locomotive BB22200. L'utilisation de cette composition de rame fictive permet une meilleure comparaison avec le TGV. Caractéristiques des voitures Lien & Lien ; caractéristiques locomotive BB22200 ; B737-800 NG, Configuration 189 Pax pour un vol de 1200km (1h30) avec 7000 kg de carburant au départ (consommation totale de 3800 kg) et une masse à vide en ordre d'exploitation de 42 t ; B787-9, configuration 344 Pax pour un vol de 6000 km (7h) 40000kg de carburant au départ (consommation totale de 32000kg) et une masse à vide en ordre d'exploitation de 129 t ; Autocar type Iveco Magelys (Flixbus) masse à vide 13250 kg et capacité de 56 Pax ; Les Camping Cars sont limité réglementairement à 3500 kg Max de PTAC. Le nombre de places de couchages max est défini à 5 pour l'exemple ; Voiture de type familiale utilisée dans les exemples précédents (Véhicule 6 - « TNO Report - Road load determination of passenger cars ») ; Bateau pneumatique de type Zodiac ProZ, homologué à 16 places mais estimé à 8 places pour un confort suffisant ; Ferry Rapide (P. 45 & P. 55 « Condor Liberation, Safety, Suitability and Performance » ; Paquebot classe oasis ; Paquebot Queen Mary 2

Taux occupation Autocar 2019 (P. 33 « Rapport annuel sur le marché du transport par autocar [...] en 2019 » ; Taux d'occupation Paquebot de croisière estimé à 103% en cabine double soit 103% de 2 x 2706 cabines ou 89% du remplissage maxi.

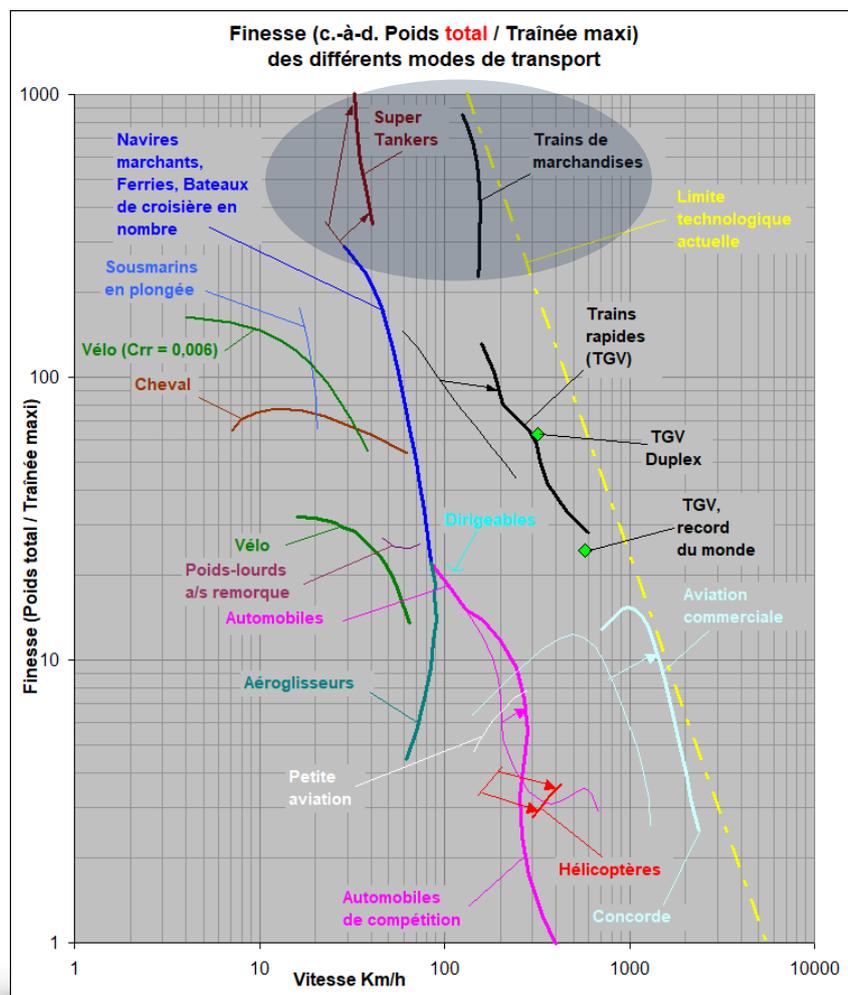
La masse moyenne d'un passager incluant ses bagages a été définie à 85kg. Une étude de 2009 publiée sur le site de l'EASA indique une masse moyenne de 84,1 kg sur les routes européennes (P. 83 « Survey on standard weights of passengers and baggage »).



## Un petit mot sur les bateaux

Pour transporter des masses élevées (fret), les bateaux (et les trains) ont un avantage énergétique significatif. En effet, ces moyens de transport bénéficient à la fois du meilleur rendement lié à une taille élevée (avec l'augmentation de la taille, la résistance à l'avancement augmente moins vite que la capacité en charge utile<sup>80</sup>), et de peu de contraintes physiques favorisant leur agrandissement (les transports rapides sont limités en taille par l'infrastructure et les matériaux).

Le diagramme suivant<sup>81</sup> permet de visualiser cet avantage:



<sup>80</sup> Le poids d'un bateau est supporté par la poussée d'Archimède, le prix énergétique à payer d'un agrandissement sera donc lié au déplacement plus important du bateau (volume d'eau déplacé, dont le poids est égal à celui du bateau) qui provoquera l'augmentation de la surface mouillée et de la trainée hydrodynamique.

<sup>81</sup> Ce diagramme provient à l'origine de l'étude de T. Von Karmann et G. Gabrielli « What price speed? Specific power required for propulsion of vehicles » publié en 1950 et remis à jour en 2004 par l'Imperial College's Railway Research Group. La forme présentée est celle d'un contributeur de Wikipédia qui offre l'avantage de représenter la finesse en ordonnée à la place de la puissance spécifique dans l'étude originale. Ce diagramme présente néanmoins certains inconvénients comme le fait de tenir compte seulement du moyen de transport (ce qui avantage artificiellement les moyens transport ayant un fort ratio Masse à vide / Charge utile) et de ne pas tenir compte du coefficient de remplissage moyen.



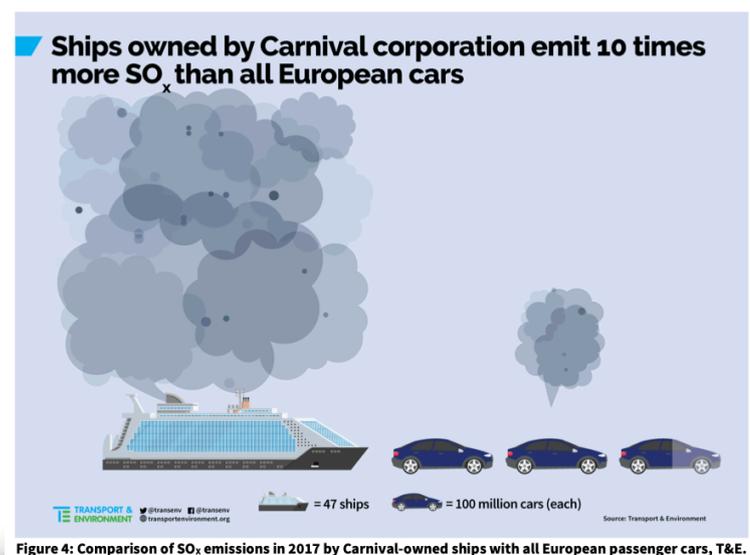
Attention néanmoins, ce diagramme est peu représentatif des moyens de transport de voyageurs. En effet, il tient compte de la trainée **maximale** et surtout de **la masse totale du moyen de transport** (sans distinction entre charge utile et masse à vide). Or comme on l'a vu précédemment, **pour 1 kg de voyageur transporté en TGV, il faut transporter 8,7 kg de train** tandis que **pour 1 kg de voyageur transporté en B737-800, il faut transporter « seulement » 3 kg d'avion**. Les moyens de transports légers (faible ratio masse à vide / charge utile) sont donc désavantagés face aux aux moyens de transport plus lourds.

Ce n'est donc pas une surprise si en 2015, **70% du fret (en tonnes.km) a été transporté par la mer, 18% par la route, 9% par voies ferrées et seulement 0,25% par voie aérienne**. L'avion n'est pas adapté pour transporter des charges lourdes, mais il est indispensable lorsque qu'il faut transporter des marchandises rapidement et/ou sur des territoires enclavés.

*Si le bateau permet de transporter du fret si efficacement, alors pourquoi parle-t-on de leur pollution très importante?*

Il faut distinguer **la pollution** (Emissions de gaz et particules nocifs pour la santé des personnes et des écosystèmes) des **émissions de gaz à effet de serre** (qui provoquent un réchauffement climatique).

Les bateaux émettent beaucoup de NOX, de SOX et de particules à cause de la teneur en soufre et de la mauvaise qualité de leur carburant. Une étude produite par Transport and Environnement, (Organisation Européenne qui regroupe une 50aine d'ONG environnementales), indique que les 47 paquebots de croisière détenus par Carnival corporation émettent plus de SOX que l'ensemble des voitures individuelles européennes (cf ci-contre)



Source: T&E - P.7 « One Corporation Pollute Them All - Luxury Cruise air emissions in Europe »



Les émissions de CO2 des bateaux de voyageurs varient beaucoup selon la masse des équipements de confort associés aux passagers et à leur taux de remplissage :

Les bateaux de croisière (à fort taux de remplissage) de type OASIS auraient une consommation de **3,7 L/Pax.100km seulement pour la propulsion** et selon une étude norvégienne (P.18 de Simonsen et AL.), le Norwegian Star consomme 329,1 kg/nm ce qui représente **8 L/Pax.100km (dont 48% pour la fonction propulsion et 52% pour la fonction hôtel, avec un taux de remplissage maximal)**.

Les ferries sont très émetteurs car leur taux de remplissage est plutôt faible. Selon un rapport de l'ADEME de 2009<sup>82</sup>, on peut atteindre 900 gCO<sub>2</sub>/Pax.km pour un ferry de jour en profil moyen d'utilisation :

**Tableau 17 : Efficacité environnementale générale passagers**

TYPE	TAILLE	NOMBRE ANNUEL MOYEN PASSAGER (M de passagers/milles)	REJETS ANNUEL DE CO2 Profil moyen (tonnes)	REJETS ANNUEL DE CO2 Profil optimisé (tonnes)	EFFICACITE ENVIRONNEMENTALE Profil moyen (g CO2/pax.km)	EFFICACITE ENVIRONNEMENTALE Profil optimisé (g CO2/pax.km)
<b>FERRY</b>						
Ferry de nuit	6 300 tpl	40	31 252	30 686	422	94
Ferry de jour	5 700 tpl	30	48 584	48 033	901	159
Navire Ro-Pax	3 800 tpl	29	25 156	24 250	470	184

Source: P. 60 ADEME

**Le transport de Fret est beaucoup plus efficace** avec des émissions inférieures à 10 gCO<sub>2</sub>/tonne.km pour les gros bateaux (vraquiers, pétroliers, porte-conteneurs), là où l'avion aura du mal à descendre en dessous de 500 gCO<sub>2</sub>/tonne.km et un camion poids lourd en dessous des 30 gCO<sub>2</sub>/tonne.km (conso. de 39,2 L/100km à pleine charge de 40t):

**Tableau 15 : Efficacité environnementale générale marchandises**

TYPE	TAILLE	REJETS ANNUEL DE CO2 Profil moyen (tonnes)	REJETS ANNUEL DE CO2 Profil optimisé (tonnes)	EFFICACITE ENVIRONNEMENTALE Profil moyen (g CO2/tonne.km)	EFFICACITE ENVIRONNEMENTALE Profil optimisé (g CO2/tonne.km)
<b>VRAQUIERS</b>					
Capesize	180 000 tpl	40 606	40 990	3,2	2,7
Panamax	75 000 tpl	25 752	27 189	4,6	3,8
Handymax	52 000 tpl	14 222	15 615	4,5	3,5
Handysize	28 500 tpl	13 592	14 311	9,4	7,7
Petit vraquier / fluvio-maritime	5- 6 000 tpl	5 284	5 526	15,9	12,5
<b>PETROLIERS</b>					
VLCC	300 000 tpl	84 845	84 195	3,4	2,5
Aframax	100 000 tpl	35 777	38 239	4	3,2
<b>TRANSPORTEURS DE PRODUITS PETROLIERS</b>					
Handy product	37 000 tpl	29 917	30 124	16,4	13
Petit product tanker	16 000 tpl	14 683	14 825	21,7	18,1
<b>GAZIERES</b>					
Petit GPL	6 500 m3	17 404	17 363	47	44,4
VLGC	53 000 m3	69 579	68 680	13,3	12,4
<b>PORTE CONTENEURS<sup>18</sup></b>					
PC 800 evp	10 000 tpl	21 266	24 767	24,4	17,64
PC 1 600 evp	21 500 tpl	38 439	41 551	17,1	12
PC 2 200 evp	30 500 tpl	60 108	62 595	16,1	14,4
PC 5 500 evp	73 500 tpl	132 564	137 763	11,2	9,45
PC 9 500 evp	115 000 tpl	172 011	180 680	8,3	7,18

P. 56 ADEME

<sup>82</sup> P. 60 « Etude de l'efficacité énergétique et environnementale du transport maritime »



Le transport maritime de voyageurs est relativement émetteur de CO2 (par Pax.km) car la plupart des bateaux longues distances associent des fonctions hôtels, coûteuses en masse et en énergie, et les ferries ont un faible taux d'occupation. Cependant, le transport de voyageur reste une activité marginale comparé au transport de fret qui lui est très efficace et peu émetteur de CO2 (en Europe en 2018, il y a eu 410 millions de passagers transporté plutôt sur des petites distances - dont 3,5% de croisière - vs 3600 millions de tonnes de fret plutôt sur de longues distances).

**L'impact principal des bateaux sur l'environnement n'est pas tellement leurs émissions de GES (équivalent à environ 2% des émissions mondiales) mais plutôt leurs émissions de polluants (SOX,NOX, particules...).**

## *Bilan*

D'un point de vue énergétique, **il n'existe pas aujourd'hui de transport de voyageurs longues distances « magiques »**. La vitesse permet aux personnes de voyager « léger » au prix d'une importante résistance aérodynamique tandis qu'un transport lent demandera plus de confort et donc de la masse « inutile » à transporter. Dans tous les cas il subsiste une perte importante entre l'énergie primaire et l'énergie utile au transport.

L'avion a pour particularité de pouvoir voler en altitude dans un air peu dense et de réduire ainsi sa résistance aérodynamique. **Cela en fait un moyen de transport à grande vitesse inégalé et très efficace par rapport aux machines terrestres.** La « contre-partie » c'est que l'avion ne peut pas réduire sa consommation énergétique en volant plus lentement car cela augmenterait également sa résistance aérodynamique.

Les transports terrestres ont aujourd'hui **l'avantage de pouvoir utiliser l'électricité comme vecteur d'énergie** ce qui peut réduire significativement leurs émissions de CO2 selon le mode production de l'électricité.

Le transport de marchandise, qui est en général moins contraint par le confort ou la vitesse, permet d'utiliser le bateau ou le train à de très bons rendements énergétiques. Cependant ils ne sont pas adaptés au transport rapide ou sur des maillages fins. Cette demande particulière ne pourra se passer du transport routier et aérien.

