

## **ENERGIE ET ENVIRONNEMENT :**

# **POUR QUE LE RAIL TIENNE LA ROUTE ...**

### **PLANTONS LE DECOR :**

Le transport des personnes fait l'objet de nombreuses comparaisons en termes d'énergie et de production de CO<sup>2</sup>, et le transport par rail y figure en bonne position car la réputation de sécurité, de confort et de rapidité des transports de personnes par trains, et en particulier par TGV, est amplement justifiée.

Outre ces qualités, la traction électrique a également une réputation d'économie d'énergie et de faibles émissions de CO<sup>2</sup>. L'idée que la résistance au roulement métal sur métal est faible, et que le rendement de la traction électrique est bon et ne produit pas de gaz d'échappement dont certains constituants sont dangereux pour la santé, sont les bases de cette réputation.

### **Mais dans ces comparaisons, il n'est pas toujours facile de s'y retrouver : prenons le cas du TGV et de l'automobile :**

- En Annexe, Le diapo (a) - source SNCF - donne 5 GeP (gramme équivalent pétrole) par passager et par km pour un TGV Duplex, et 57 pour l'automobile, qui consommerait donc par passager et par kilomètre 11 fois plus.

- Mais si l'on prend les valeurs de Jean Marc JANCOVICI dans "L'AVENIR CLIMATIQUE" page 167, nous trouvons respectivement 15,2 et 57,6 GeP.

Dans ces deux exemples les valeurs pour l'automobile sont très proches. Par contre, les valeurs pour le TGV sont très différentes ; c'est que les bases de calcul doivent également l'être, mais elles ne sont pas clairement disponibles pour le lecteur (type de véhicule, consommations, coefficient de remplissage).

Remarquons également que la SNCF achète de l'électricité - des kWh électriques, une énergie déjà élaborée - dont les sources de production sont diverses, alors que le car routier s'approvisionne en gazole à la pompe en énergie non élaborée - des kWh thermiques - et à un prix qui ne supporte pas les mêmes taxes que les kWh électriques.

Comment s'y retrouver entre les kWh électriques et les kWh thermiques dont les sources sont différentes, dont les prix sont différents et incorporent des taxes également différentes?

**Si l'on veut comparer entre eux, le TGV, l'autocar, la voiture individuelle et l'avion, de manière accessible et vérifiable par chacun d'entre nous, plusieurs dispositions peuvent être prises en se limitant à l'aspect "énergie":**

### **Le choix des critères d'évaluation :**

Le critère du GeP est couramment utilisé dans les comparaisons entre moyens de transport ; toutefois il n'est pas le plus parlant pour les véhicules routiers.

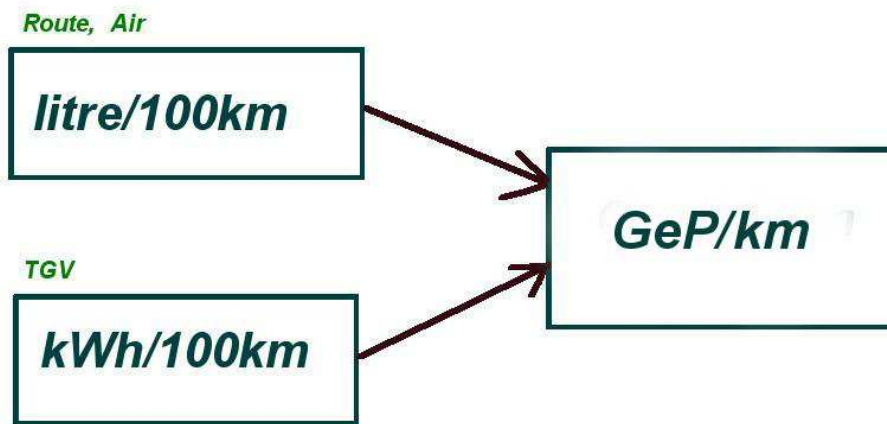
Les consommations des véhicules routiers étant exprimées en litres aux 100 km, ce critère permet de définir des ordres de grandeur facilement vérifiables. Nous parlerons donc de "litre / (100 km . siège-passager)". L'utilisation du siège-passager revient à prendre un coefficient de remplissage de 1 pour tous les moyens de transport. Cela évite les controverses sur le remplissage effectif des véhicules, et c'est aussi l'objectif final à satisfaire. Les litres sont considérés être des litres de gazole, car le gazole est le combustible des autocars et de beaucoup de voitures.

Pour les avions, le kérosène – à quelques pour cents près- peut être assimilé au gazole.

**Les " litre / (100 km . siège-passager)" sont ensuite convertis en GeP par km.**

Par contre, pour le TGV qui consomme de l'électricité, nous utilisons les kWh qui sont facilement accessibles. Nous parlons donc de "kWh / (100 km . siège-passager)".

**Les " kWh / (100 km . siège-passager)" sont ensuite convertis en GeP par km.**



Les consommations par siège-passager sont donc exprimées **au final-** en chiffres arrondis- en **GeP par km**, mais également en litre de gazole et en kWh **pour 100 km**, (le lecteur notera par la suite que les références différentes au "km" et aux "100 km" simplifient la présentation) **avec les équivalences suivantes :**

- 1 thermie => 1,16 kWh
- 1 TeP (tonne équivalent pétrole) => 10000 th => 11600 kWh => 10 expo 6 GeP
- 1 GeP => 0,0116 kWh ; soit aussi : 1 GeP par km=> 1,16 kWh pour 100 km
- 1 Newton . mètre / seconde = 1 Joule / seconde = 1 Watt
- Gazole (ou Fuel domestique) : densité (moy) = 0,83 ; PCI (moy) = 10 000 kcal/kg ou **9,7 kWh par litre**
- Donc : 1 litre de gazole => 830 GeP ; soit aussi 1 litre / 100 km => 8,3 GeP par km (Pour info : Fuel lourd N2 : densité = 0,97 ; PCI = 9 600 kcal/kg)

**Notes :** La définition de la TeP par l'Agence Internationale de l'Energie est de 10000 Thermies ou 11600 kWh. Cette définition correspond bien au pétrole, au gazole, et au fioul domestique. Par contre, 1 tonne de Fuel lourd N2 vaut 0,96 TeP. Néanmoins, dans les statistiques mondiales, on considère aussi que 1 tonne de tout produit pétrolier vaut une TeP.

Le degré d'élaboration de l'énergie est donné par la désignation des kWh :

- **Thermique** pour l'énergie obtenue "à la pompe" ou aux stockages des centrales thermiques.
- **Electrique** pour l'électricité proprement dite.
- **Mécanique** pour l'énergie développée " à la jante des roues"

La dénomination "énergie primaire" désigne normalement l'énergie disponible dans la nature **avant toute intervention humaine**. Toutefois, le pétrole importé dans un pays- c'est le cas de la France- est considéré dans les statistiques nationales comme énergie primaire.

Suivant les objectifs poursuivis, les définitions des degrés d'élaboration de l'énergie peuvent être différentes.

### Les trajets et les types de véhicules :

Le TGV couvre des trajets de quelques dizaines à quelques centaines de km.

Pour rester comparables, nous retenons l'avion court courrier, l'autocar de grand tourisme type "Eurolines", et la berline familiale diesel européenne.

### Une même énergie pour le Rail et pour la Route :

Vaut-il mieux mettre le pétrole directement dans des Diesels, ou vaut-il mieux en faire de l'électricité, dans des centrales au fuel, pour faire rouler des trains et en particulier des TGV ?

La réponse est du ressort de spécialistes très avertis - **que nous ne sommes pas**.

Néanmoins, différentes approches permettent d'accéder à des ordres de grandeur a priori réalistes.

Les ordres de grandeur développés ci-après tiennent compte des dispositions que nous venons de préciser ainsi que des diapos (a) et (b) de l'Annexe.

Ces ordres de grandeur donnent un éclairage, à notre avis, trop méconnu.

- La consommation aux 100 km du TGV Duplex à 300 km / h est supérieure à celle de l'autocar de grand tourisme, car la vitesse coûte cher, non seulement pour l'automobile et l'avion, comme nous le savons tous, mais aussi pour le TGV, et ceci est joyeusement ignoré par une large majorité.

- La consommation aux 100 km du TGV Duplex à 300 km / h est environ le double de ce qu'elle serait à 200 km / h et le triple de ce qu'elle serait à 150 km / h.

- Sous l'aspect économies d'énergie uniquement, il faudrait limiter sa vitesse aux environs de 200 km/ h – ce qui n'est déjà pas si mal - pour que le TGV "tienne la route" et devienne meilleur que l'autocar.

- Si nous voulons conserver au TGV tous ses attraits, y compris la vitesse, ce que nous souhaitons tous ; il faut alors disposer d'une électricité fiable, abondante et bon marché.

### **CAS DE LA VOITURE :**

Le résultat est immédiat en considérant que la plupart des berlines européennes Diesel consomment, à plus ou moins 10% près : 7 litres / 100 km sur route et autoroute avec 4 personnes à bord ;

soit **1,75 l/(100 . passager) ou 14,5 GeP par km.**

L'intérêt de pratiquer le covoiturage, chaque fois que possible, est évident car avec une seule personne à bord la consommation atteint des sommets avec **58 GeP par km.** Nous retrouvons ainsi les chiffres donnés par la SNCF (57 GeP) et par Jean-Marc JANCOVICI (57,6 GeP) ; ce qui conduit à penser que l'approche du TGV et celle de l'automobile sont probablement différentes.

### **CAS DE L'AUTOCAR DE GRAND TOURISME TYPE EUROLINES :**

L'autocar de grand tourisme classique comprend 55 à 58 sièges-passagers. On trouve également des autocars double essieu avec 61 sièges, et même double étage qui peuvent offrir 66 sièges.

Ces véhicules, sur route et autoroute, consomment, à plus ou moins 10% près, 30 litres aux 100.

La valeur peut être facilement vérifiée en parlant avec leurs conducteurs qui, en général, donnent volontiers ces informations, dès lors que l'on s'intéresse à leur métier et à leur véhicule.

Avec 60 sièges-passagers, la consommation est alors de

**0,5 l/(100 . siège-passager) ou 4 GeP par km.**

### **CAS DE L'AVION COURT-COURRIER :**

Un Airbus A320 avec 172 sièges-passagers, sur le trajet type ORLY- MARSEILLE de 750 km, consomme - de la mise en route des moteurs jusqu'à leur arrêt à destination- entre 3500 et 4000 litres de kéro; car pour les vitesses de croisière habituelles, la consommation dépend des conditions météo et des temps d'attente au sol et en vol.

Soit une fourchette de : 2,7 l/(100 km . siège-passager) à : 3,1 l/(100 km.siège-passager).

De manière prudente, nous retenons une valeur moyenne de

**2,9 l/(100 km . siège-passager) ; ou 24 GeP par km.**

Cette valeur ne tient pas compte de l'arrivée des A320 NEO qui consomment moins que les A320 actuels.

*Remarques :*

- la SNCF indique 53 GeP, sans précision du type d'avion: le rapport est du simple au double.
- Jean Marc JANCOVICI dans "L'AVENIR CLIMATIQUE" page 167, indique 80 GeP pour l'avion court-courrier : le rapport est du simple au triple.

Ces divergences montrent l'intérêt de prendre des exemples représentatifs dont on peut vérifier les bases de calcul.

## **CAS DU TGV DUPLEX- 8 VOITURES- 545 SIEGE-PASSAGERS:**

L'approche de la consommation aux 100 km par siège-passager peut se faire de différentes manières, d'abord par la valeur de **5 GeP** par km donnée par la SNCF, ensuite par l'estimation du coefficient de passage des kWh thermique aux kWh mécaniques et enfin en considérant les coefficients conventionnels existants et définis pour différents pays.

### **Première approche : par la valeur donnée par la SNCF :**

Les bases exactes de calcul des 5 GeP par km et par passager ne sont pas évidentes pour le lecteur et on le comprend aisément, car il faudrait connaître : les profils des vitesses sur les différents trajets TGV, les pertes retenues aux différents stades de la transformation de l'énergie, les puissances réactives des réseaux alternatifs qui s'ajoutent aux pertes sans transmettre de puissance utile.....et le coefficient de remplissage retenu.

Et seul un spécialiste très averti, et disposant de toutes les informations, pourrait s'y retrouver. Toutefois il est probable que la valeur de 5 GeP correspond à des paramètres de calcul optimisés, (et on le comprend aussi aisément ...) Elle représente probablement un Mini. Indépendamment de ces considérations marketing, retenons que 5 GeP par km ou 500 GeP pour 100 km, représentent : 0,6 l / (100 km . siège-passager) -en admettant que tous les sièges sont occupés-

Et cette valeur est d'environ 20 % supérieure à celle de l'autocar type Eurolines

### **Deuxième approche : par l'estimation du coefficient kWh thermique / kWh mécanique**

*Cette approche est une tentative, elle a consisté à prendre des ordres de grandeur intermédiaires avec les avis pertinents de collègues.*

**Les données retenues sont les suivantes :**

**-1- A partir des courbes de Résistance à l'avancement** données par le **Diapo (b)** - de l'Annexe, on calcule la puissance à la jante en kW mécaniques.

Nous lisons sur le graphique :

**6000 DaN à 300 km / h** , soit 5000 kW mécaniques (  $60\,000 \cdot 300 / 3\,600 = 5\,000\,000$  W)

**3100 DaN à 200 km / h** , soit 1722 kW mécaniques

**2000 DaN à 150 km / h** , soit 833 kW mécaniques

*Lorsque la vitesse est multipliée par 2, la puissance à la jante est multipliée par 6...*

*Par contre la consommation en kWh thermiques pour 100 km varie comme la résistance à l'avancement ; En effet la Résistance à l'avancement est une Force, et l'analyse dimensionnelle indique que la consommation par unité de distance est de la forme: **Force .Vitesse . 1/Vitesse** ;*

***Lorsque la vitesse est multipliée par 2, la consommation aux 100 est multipliée par 3 ...toutes choses égales par ailleurs.***

**-2- Estimation du coefficient de conversion kWh thermiques => kWh mécaniques :**

- On suppose une production d'électricité à base de Fuel lourd (kW thermiques) avec un rendement classique de centrale de 45 % (kW électriques),

- des pertes en lignes de 7 % : lignes EDF, lignes SNCF, postes de transformation,

- des pertes entre pantographes et roues estimées à 5 % et comprenant les pertes liées à l'électronique de puissance, aux moteurs électrique, à l'entraînement des annexes (ventilateurs, clim, asservissements ...)

En outre, la non utilisation de la puissance réactive - qui s'ajoute aux pertes - est liée à la technologie des machines.

La SNCF donne un éventail de valeurs du facteur de puissance, et nous avons retenu la valeur intermédiaire de 0,94.

Avec les valeurs estimées ci-dessus, le coefficient de passage des kW thermiques aux kW mécaniques devient :

$$2,67 (1/ 0,45 \cdot 0,93 \cdot 0,95 \cdot 0,94) .$$

### -3- Consommations aux 100 km :

Nous admettons, en première approximation, que la valeur de 2,67 est applicable aux différentes vitesses :

**A 300 km / h**, 5000 kW mécaniques nécessitent 13350 kW thermiques.

Pour 100 km, la consommation est de  $13350 / 3 = 4450$  kWh.

Soit **par passager**  $4450 / 545 = 8,16$  kWh thermiques / (100 . siège-passager), ou 7,02 GeP, soit **7 GeP par km** [équivalant en gazole à 0,85 l / (100 . siège-passager)].

Cette valeur est supérieure de 40 % environ à celle de la SNCF (5 GeP), mais reste du même ordre de grandeur.

**A 200 km / h**, le même raisonnement donne 4,21 kWh / (100 . par siège-passager)

Ou 3,62 GeP, soit **3,6 GeP par km** .

**A 150 km / h**, le même raisonnement donne 2,72 kWh / (100 . siège-passager),

Ou 2,33 GeP, soit **2,3 GeP par km**.

### Troisième approche : par les données statistiques du coefficient Primaire / Electricité

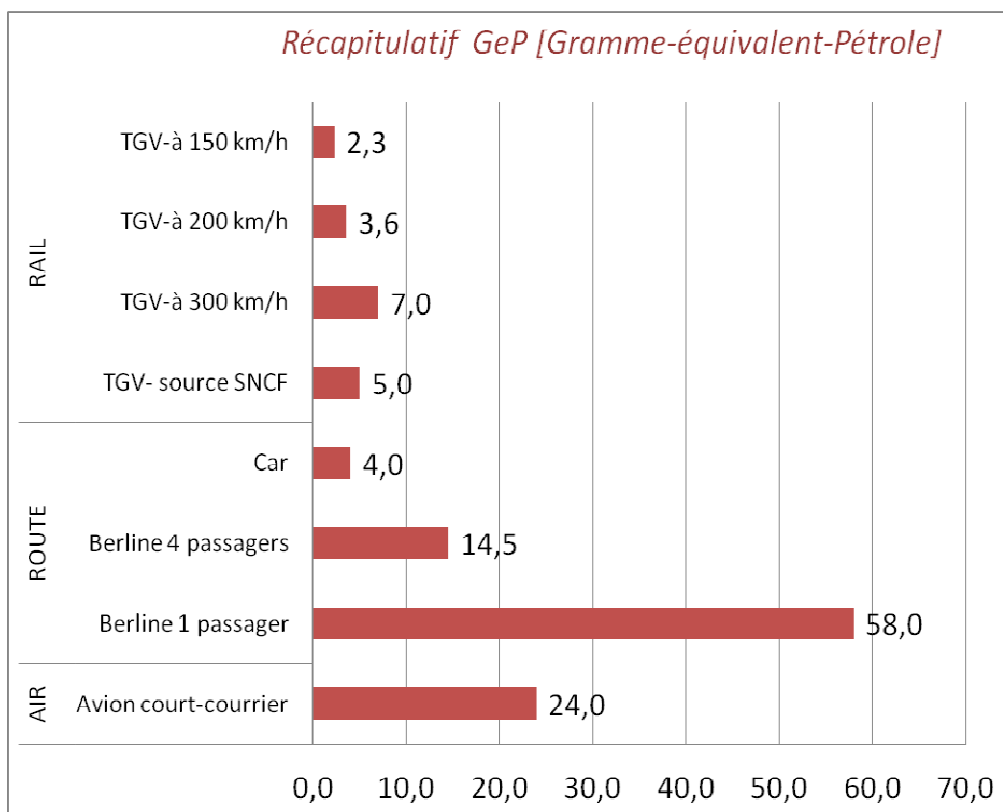
La littérature est abondante, et l'on trouve des coefficients de conversion par pays établis en fonction de leur mix énergétique. Pour la France le coefficient standard est de 2,58, la moyenne Européenne serait à 2,7. En outre, il varie suivant les critères retenus.

Finalement, en considérant les pays qui produisent leur électricité surtout avec des combustibles fossiles, on trouve un coefficient de conversion d'environ 3 (à plus ou moins 10% près) qui n'est pas directement comparable à celui défini dans notre cas. Toutefois il est permis de penser que le coefficient estimé de 2,67 est valable en tant qu'ordre de grandeur.

### **LES GeP par km RESUMES :**

Le graphique ci-après reprend les valeurs "GeP par km" des différents cas examinés.

On notera que les 3 premières valeurs de consommations pour le TGV à 150, 200 et 300 km / h sont établies à **vitesse constante**, alors que toutes les autres sont des **moyennes**. Elles ne sont pas strictement comparables, toutefois elles rappellent que la vitesse coûte cher. D'autre part, sur des trajets rapides et légèrement accidentés comme PARIS-LYON, la consommation aux 100 km à la vitesse de croisière est probablement peu différente de la consommation moyenne aux 100 km pour la totalité du trajet.



**La sécurité, le confort et la rapidité des transports de personnes par train, et en particulier par TGV, sont des acquis.**

**Mais la réputation d'économies d'énergie et de faibles émissions de CO<sup>2</sup> n'est justifiée que si l'électricité d'origine fossile est peu utilisée. L'éolien et le photovoltaïque n'ont pas la réputation de fournir une électricité fiable de manière continue et bon marché. Reste alors le nucléaire civil, tellement décrié par certains. Tout de même, c'est grâce à lui que la réputation dont nous parlons s'est établie.**

**Comment peut-on vouloir se déplacer souvent, vite, et pas cher, et ne pas reconnaître qu'il faut beaucoup d'électricité ?**

**Et puis, on parle également de la voiture électrique.. ; pensons également que les clics à répétition sur internet sont énergivores : cliquer pendant une heure sur de nombreux sites pourrait représenter un verre de pétrole...**

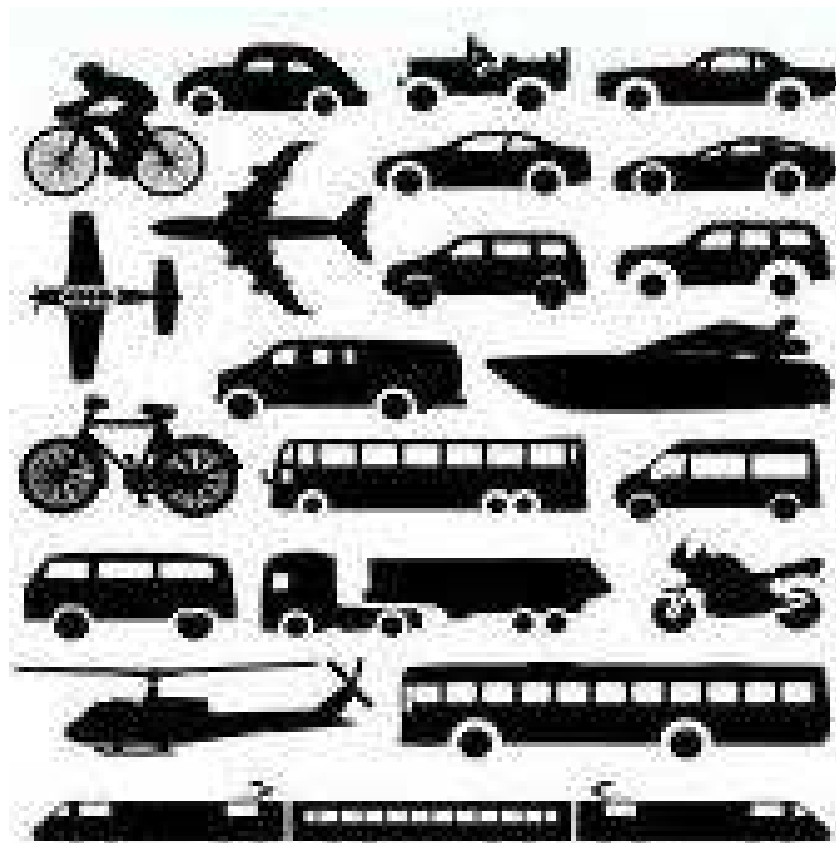
**Alors que le débat sur le nucléaire civil prend de l'ampleur, ne serait-il pas souhaitable de se dire que l'utilisation de telle ou telle filière n'est pas du ressort de la foi mais de la raison et du bon sens ?**

**Pour terminer, nous citons Bernard Werber, écrivain**

**« L'important n'est pas de convaincre, mais de donner à réfléchir. »**

*Ce document a été élaboré grâce aux avis pertinents de plusieurs d'entre nous et aux données qu'ils ont fournies. La rédaction finale a été faite par :*

Charles Vernin – Sept 2011-



## ANNEXE, source SNCF :

<http://proxy.siteo.com.s3.amazonaws.com/aste.siteo.com/file/astelab.pdf>

### Adaptation du TGV aux contraintes environnementales

Par : Olivier BRUN ; Direction du Matériel - Département des TGV

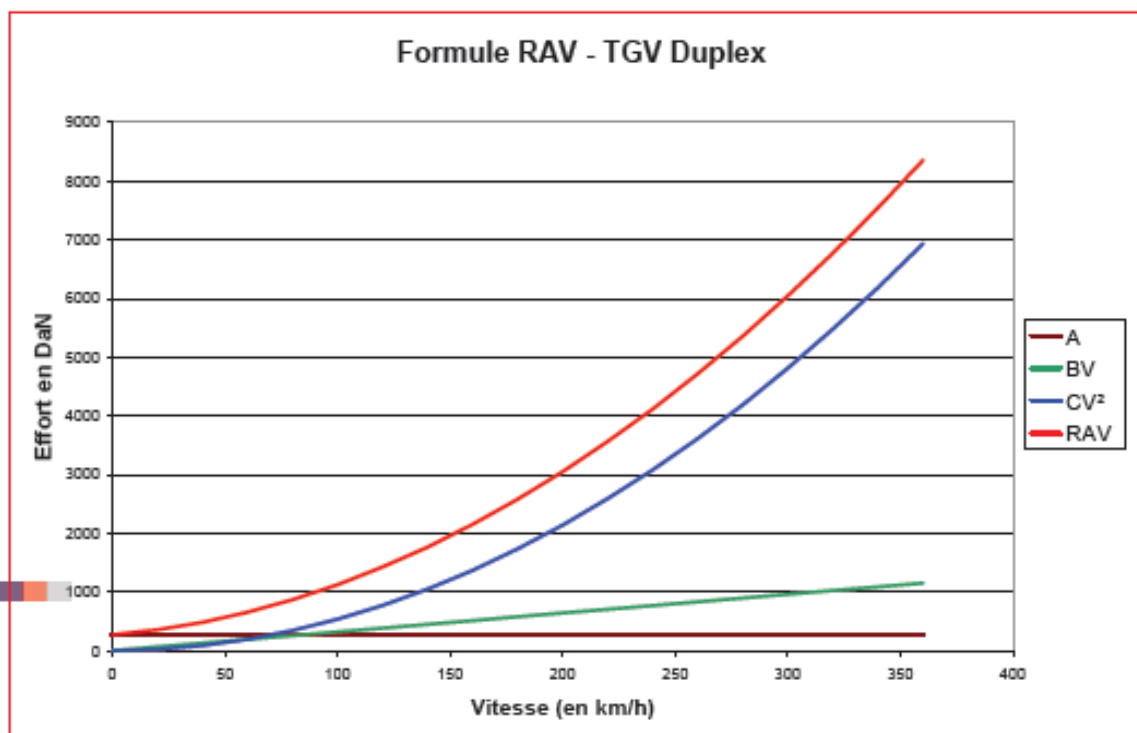
#### - Diapo (a) -

- Efficacité énergétique des nouvelles chaînes de traction informatisées
  - TGV SE (CC + thyristor) : facteur de puissance = 0,7
  - TGV A et R (synchrone et GTO) : facteur de puissance = 0,94
  - TGV DASYE et POS (asynchrone et IGBT) : facteur de puissance = 1
- Simplification et gain de masse
- Au total ; un TGV Duplex consomme par voyageur et par km 5 GeP (53 pour l'avion et 57 pour l'automobile)

donner au train des idées d'avance



#### - Diapo (b) -



donner au train des idées d'avance

