



du 9 au 11 juin

GElI Créteil-Vitry 2021

47^{ème} Colloque pédagogique national

Conférence plénière : Les transports du futur, perspectives et illusions

 **Université
Paris Nanterre
● UFR SITEC**

Cursus Master Ingénierie
Aéronautique Transports et
Energétique (CMI-ATE)

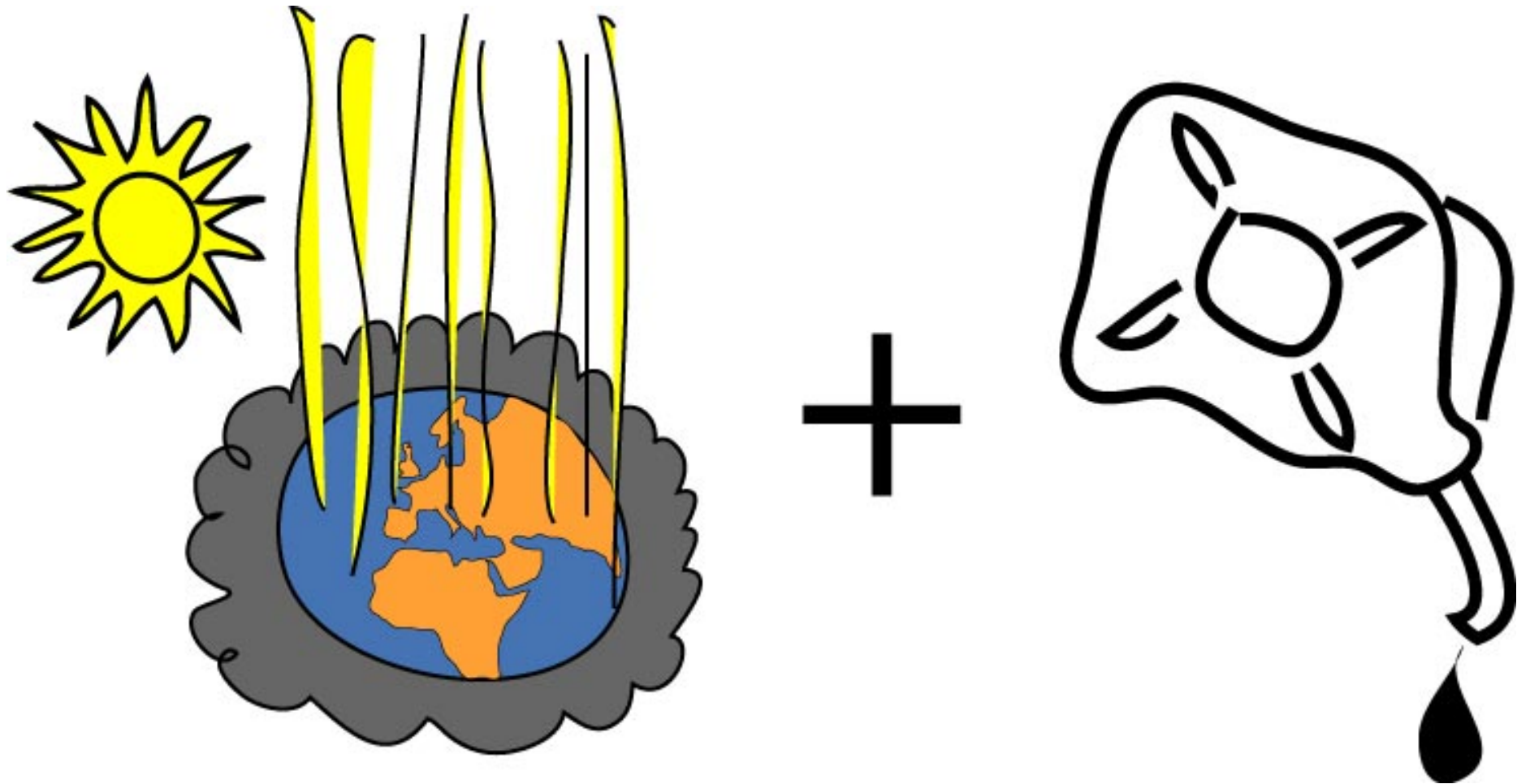
Michel Kieffer

Indice C3 le 10.9.2022

Sommaire

- 1 Introduction, état des lieux
 - 2 Réduction des coûts par la simplification des systèmes
 - 3 Les formes impossibles
 - 4 Projets conceptuels et projets aboutis
 - 5 Gestion des versions, planification, gestion du temps
 - 6 Ce qui relie les voitures, les avions, les bateaux...
 - 7 Zoom sur les matériaux performants et problématique du recyclage
 - 8 Le cas particulier des voitures
 - 9 Un modèle de dimensionnement des voitures
 - 10 Digressions dans le domaine des avions et des bateaux
 - 11 Conclusion
- Annexe : exemples d'études et de projets industriels aboutis réalisés par des étudiants

1 Introduction, état des lieux



Canada :
17 tonnes /

Australie :
18 tonnes / habitant

Europe de l'Ouest :
8,3 tonnes / habitant

Etats-Unis :
20 tonnes / habitant

CO2

CO2

CO2

Chine :
3,9 tonnes / habitant



Amérique Latine :
2,1 tonnes / habitant

CO2

Afrique :
0,9 tonnes / habitant

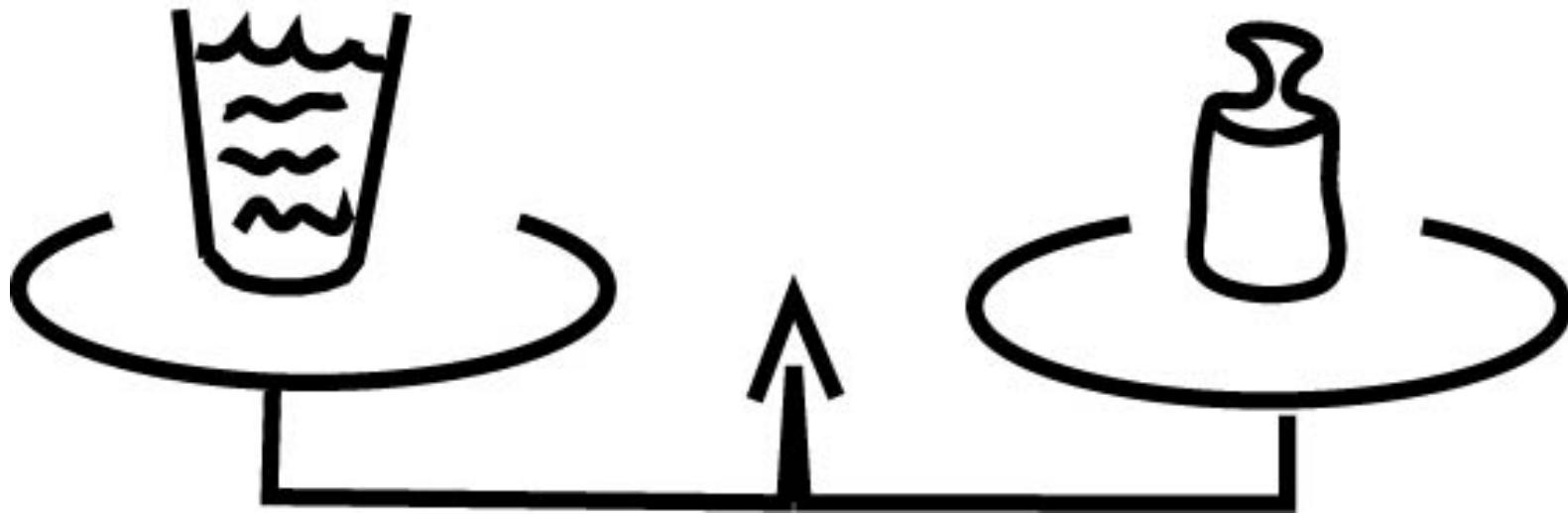
CO2

Russie :
10,8 tonnes / habitant

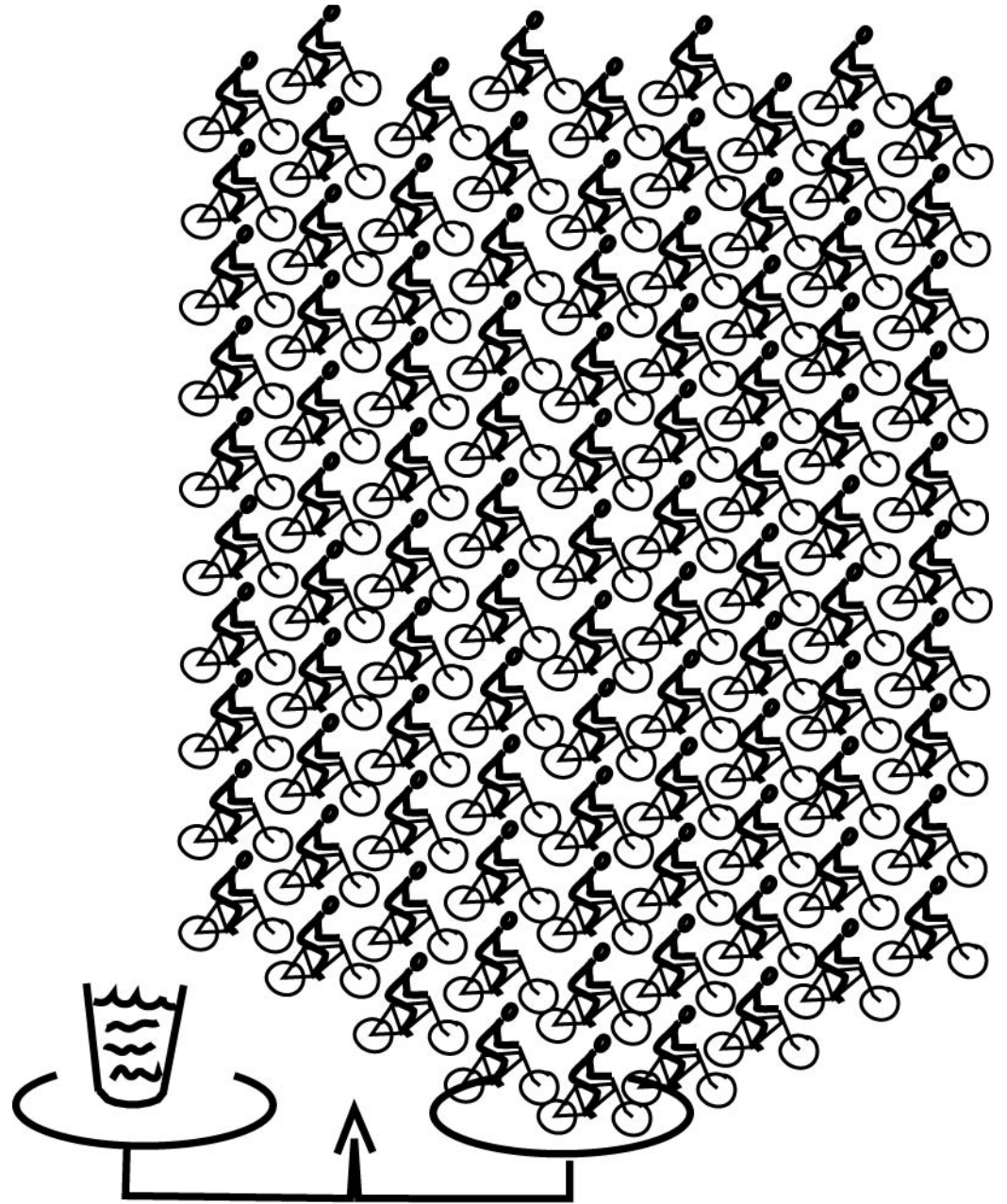
CO2

Quelle énergie contient 1 kg de carburant fossile ?

1 kg de carburant fossile



1 kg de carburant fossile
correspond à l'énergie
produite, pendant une heure,
par 100 cyclistes entraînés
...



Objectif européen 2050, le facteur 4...



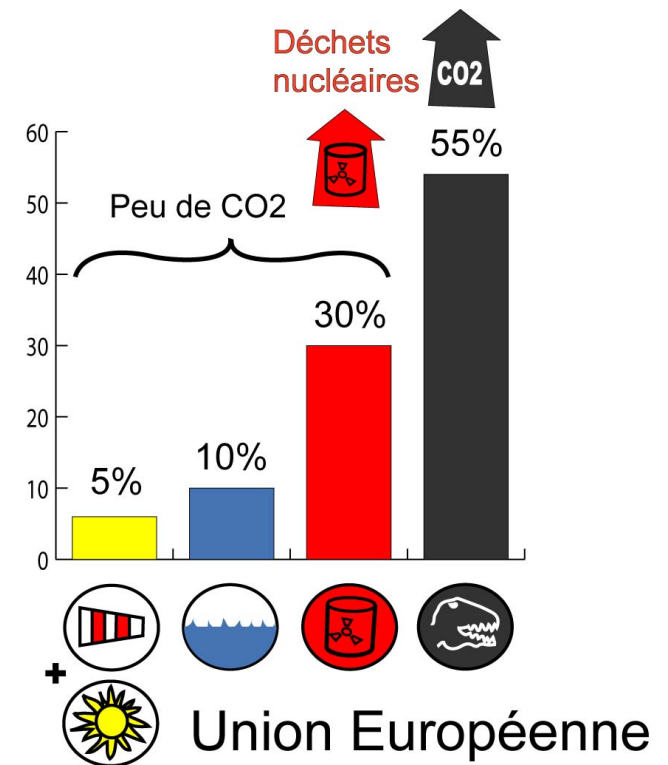
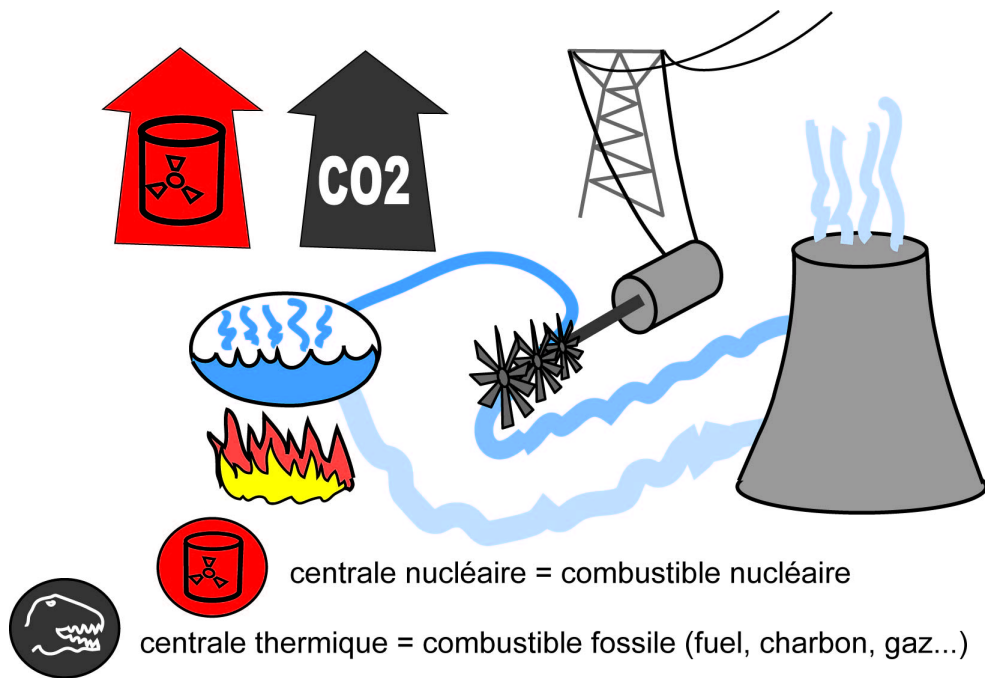
CO₂

Objectif Europe de l'Ouest :
diviser les consommations par 4

...soit 2 tonnes de CO₂ par année toutes consommations confondues.

Électricité et CO2 : En prenant pour référence la production Européenne :

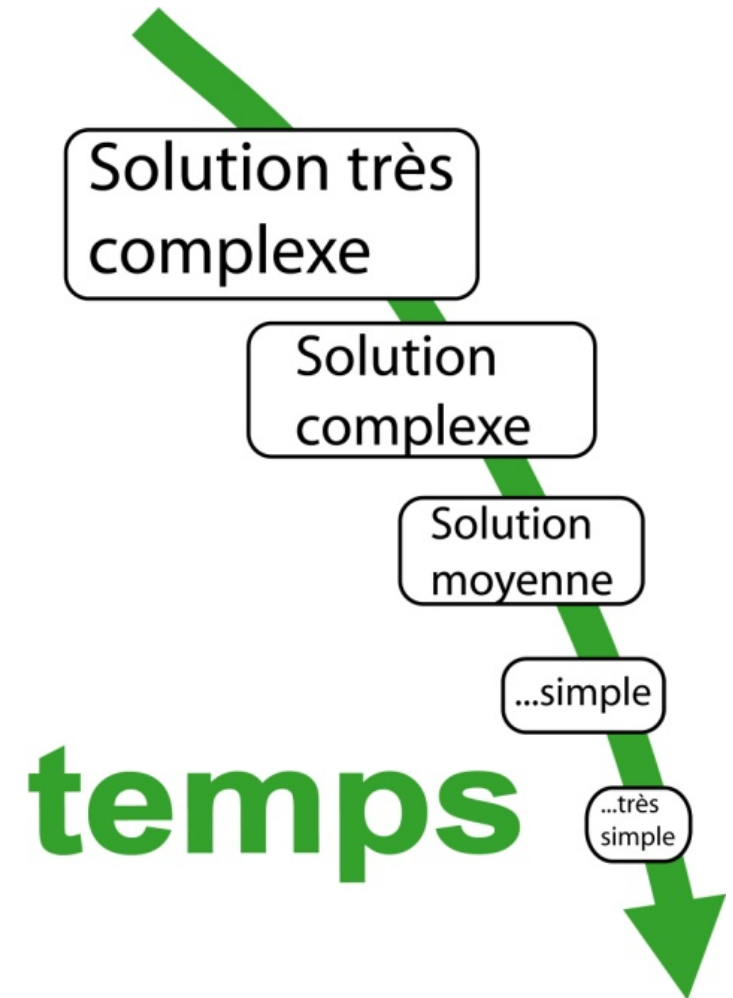
- 1 joule d'énergie finale = 2,8 joules d'énergie secondaire ;
- 1 MJ d'énergie finale émet 0,128 kg de CO2.



2 Réduction des coûts par la simplification des systèmes

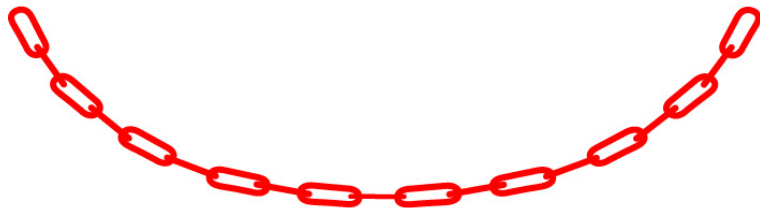
Même si elles semblent évidentes après coup, les solutions les plus simples sont les plus difficiles à trouver.

Ces solutions débouchent sur des économies considérables, clé majeure de la compétitivité de nos entreprises.



Dans le cas d'un produit, le coût de gestion des références représente l'essentiel du coût de revient => réduire le nombre de références composant un produit, un processus ou une organisation.

Analogy with a chain...



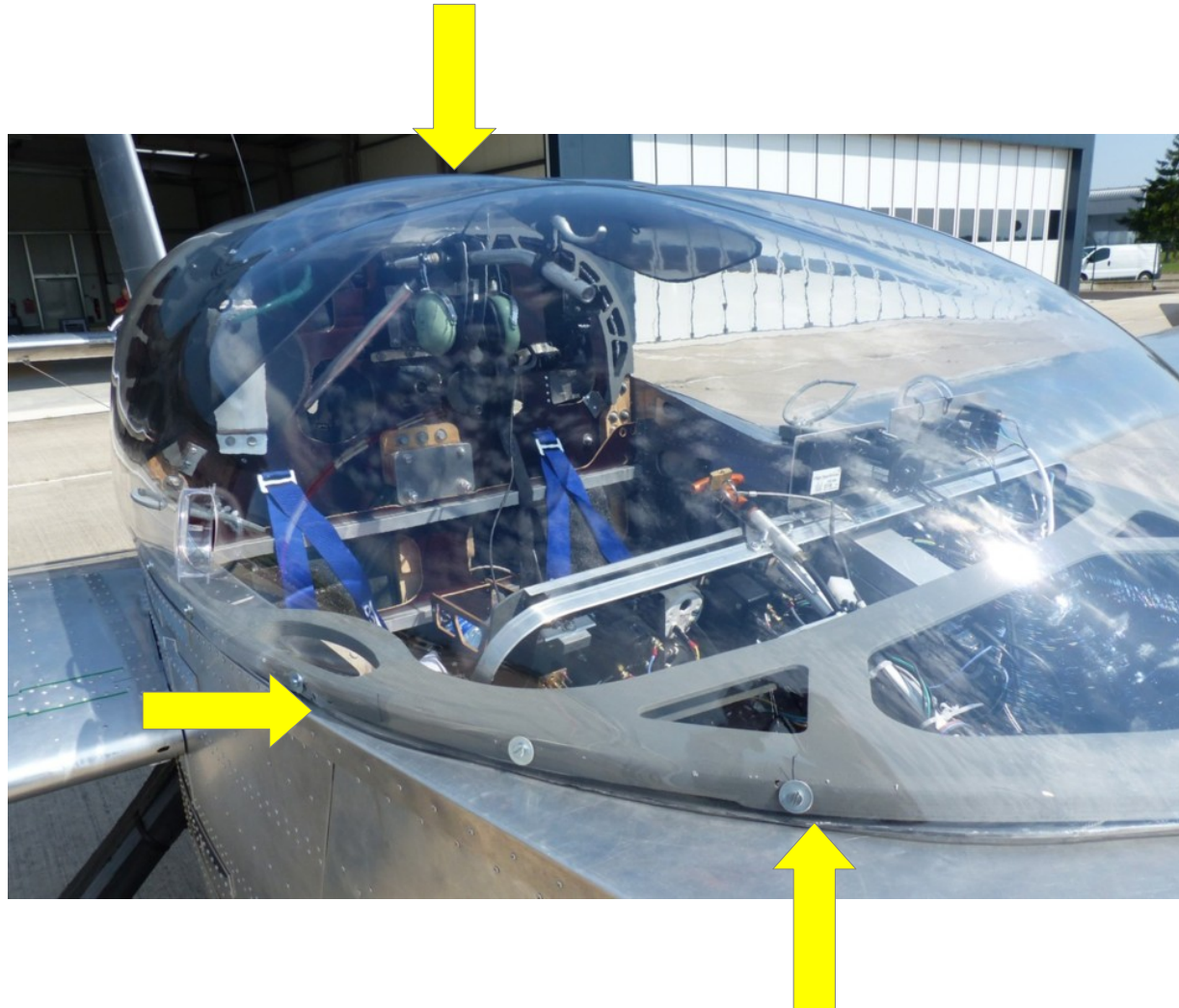
Simplicity = safety, costs and mass reduced

3 Les formes impossibles

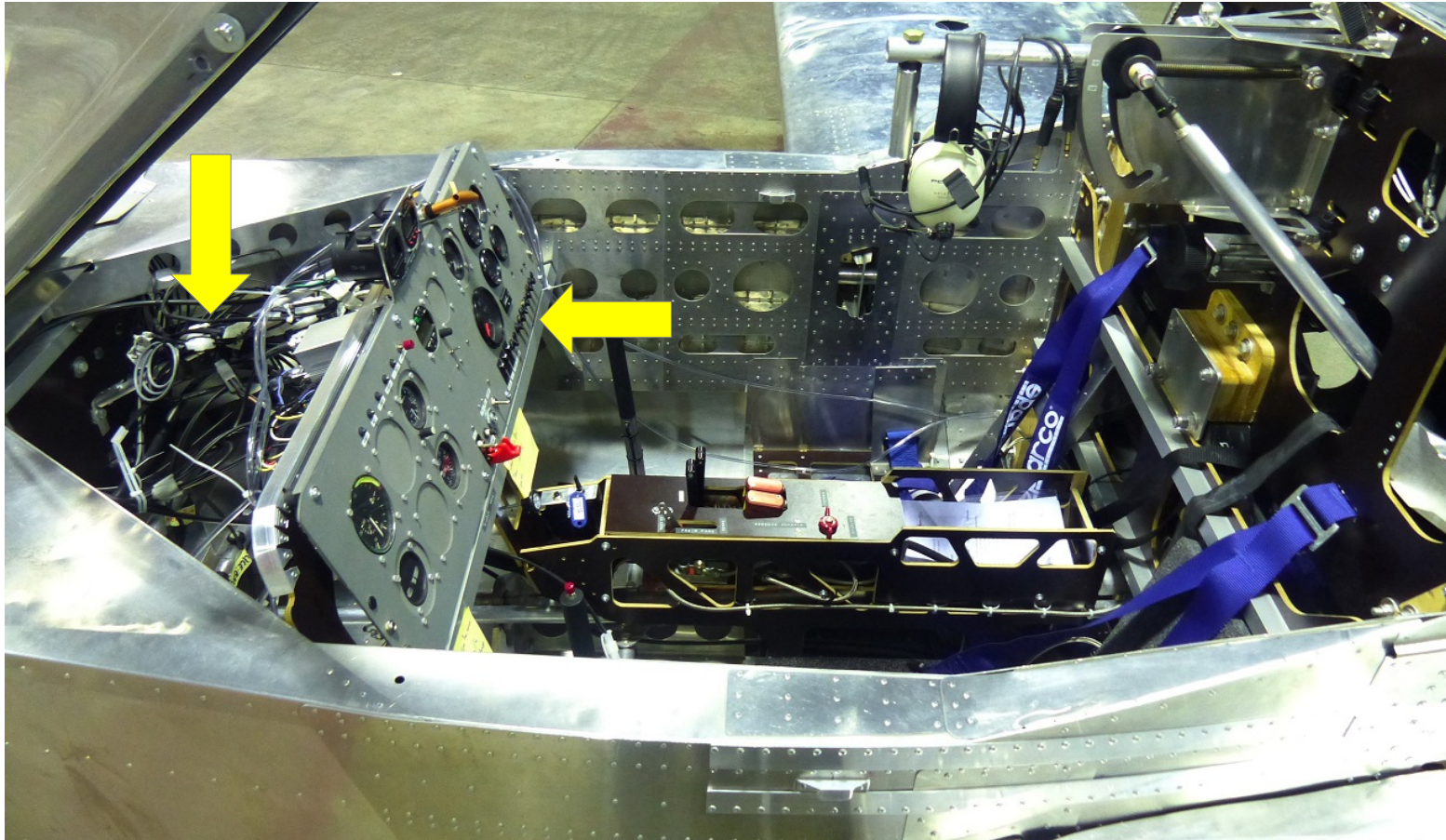
Les produits réalisés en grandes séries (électroménager, voitures, appareils électroniques...) nous ont familiarisé avec des finitions irréprochables. Ceci est renforcé par les images numériques « parfaites » que nous obtenons avec nos logiciels de CAO.

Mais qu'en est-il des produits réalisés en petites ou moyennes série ou en début de production ?

Ajuster une forme 3D sur une autre forme 3D s'avère une tâche particulièrement difficile et coûteuse...



« L'objectif numérique » est loin de la réalité :)

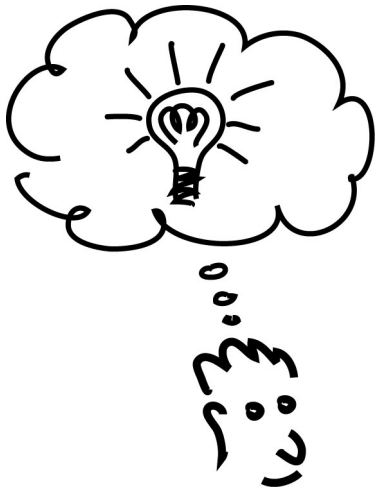


4 Projets conceptuels et projets aboutis

Contrairement à un « projet conceptuel », un « projet abouti » nécessite de multiples re conception au fil du développement. Il est notamment nécessaire d'avoir une très bonne connaissance des moyens de productions en interne ou en sous-traitance.

Cet aspect concerne tout autant la résistance des matériaux et les méthodes de calculs associées.

Les essais imposés pour les engins de transport soulignent que le calcul n'est qu'une approximation de la réalité => imaginer en permanence des solutions correctives ou d'autres méthodes de calcul.



5 Gestions des versions, planification, gestion du temps

Gestion des versions :

Les projets aboutis nécessitent de gérer l'évolution des versions, au fil d'un développement, des composants et des documents.

Planification :

Les systèmes de transport sont par nature complexes et rencontrent en permanence des imprévus. Ceci nécessite de reconcevoir à tous moments les systèmes ou les méthodes de conception.

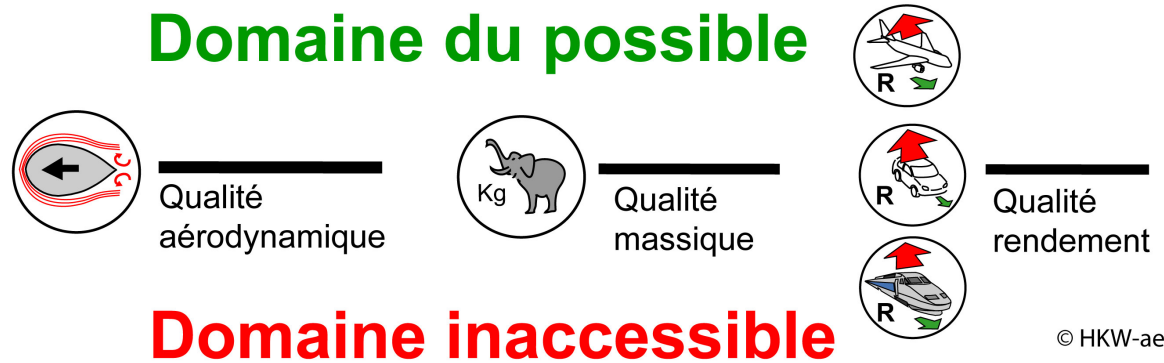
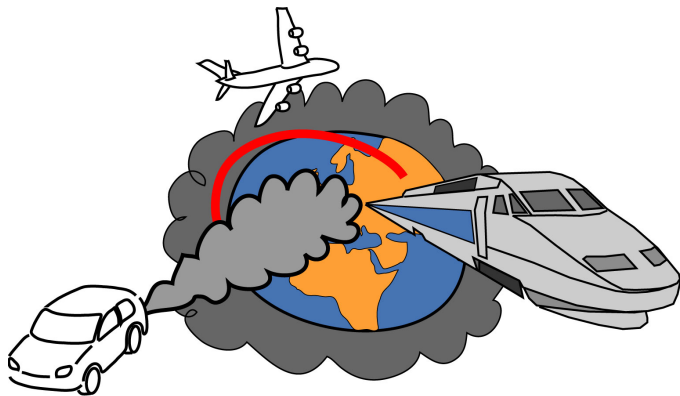
Gestion du temps :

Au delà de la conception de la machine, il est indispensable de gérer au mieux le temps et les moyens humains et matériels disponibles afin d'atteindre l'objectif principal. A savoir, disposer du système dans les temps prévus avec les performances souhaitées.

Dans ce contexte, il faut imaginer en permanence des « modes dégradés » acceptables afin de pouvoir atteindre l'objectif principal. C'est à dire à éviter le piège des « méthodes idéales » qui s'avèrent souvent énergivores sans bénéfices significatifs tout en dégradant le timing du projet donc son aboutissement.

6 Ce qui relie les voitures, les avions, les bateaux...

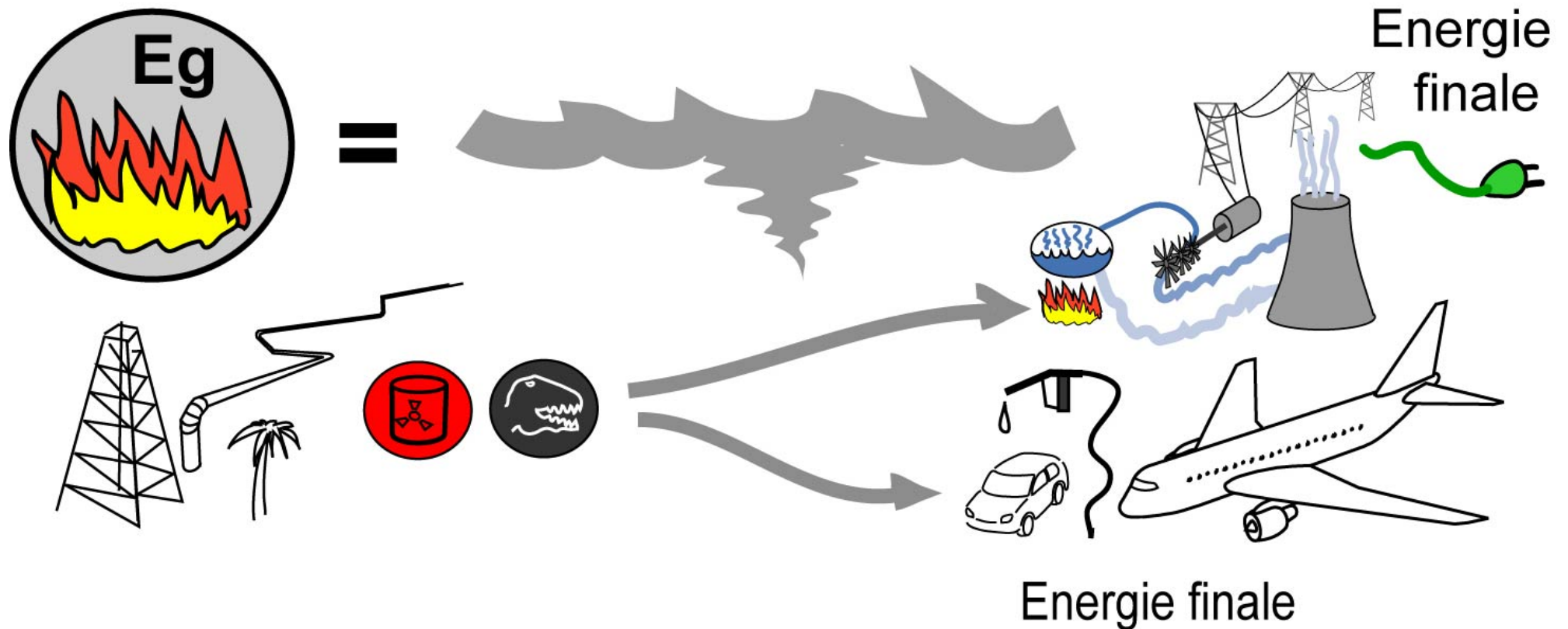
Il s'agit ici de présenter les critères de qualité qui régissent les consommations d'énergie de nos principaux moyens de transport.



Energie totale que va mobiliser un composant (pièce isolée ou sous ensemble) d'un moyen de transport quel qu'il soit :

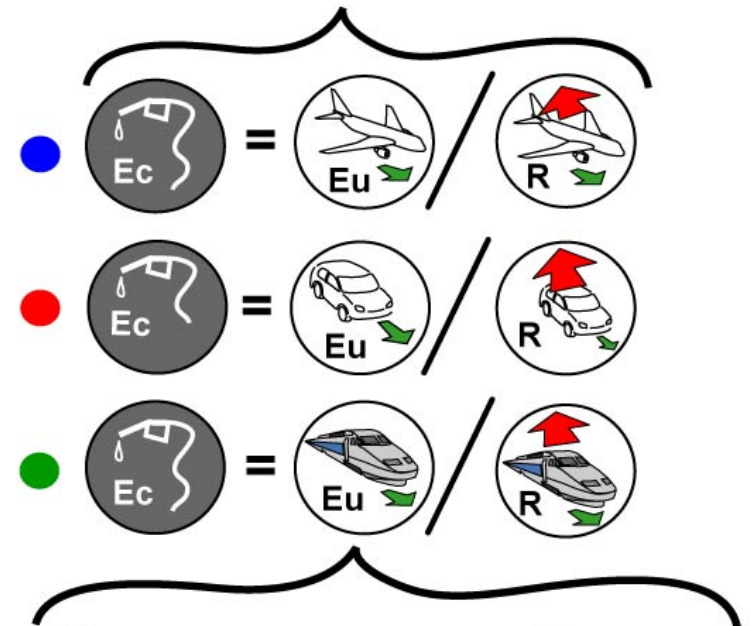


Mais l'énergie grise concerne aussi l'énergie. Nous parlerons alors d'énergie grise de l'énergie (CegE).



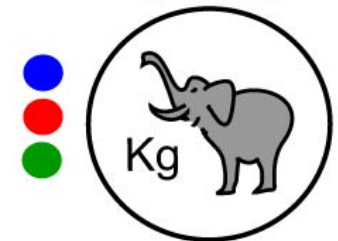
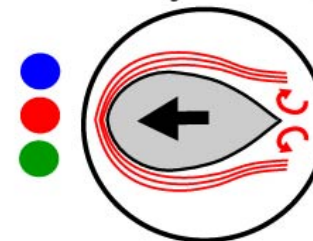
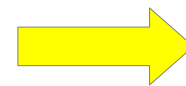
Aussi, quel que soit le moyen de transport, l'énergie utile (Eu) au déplacement a deux causes :

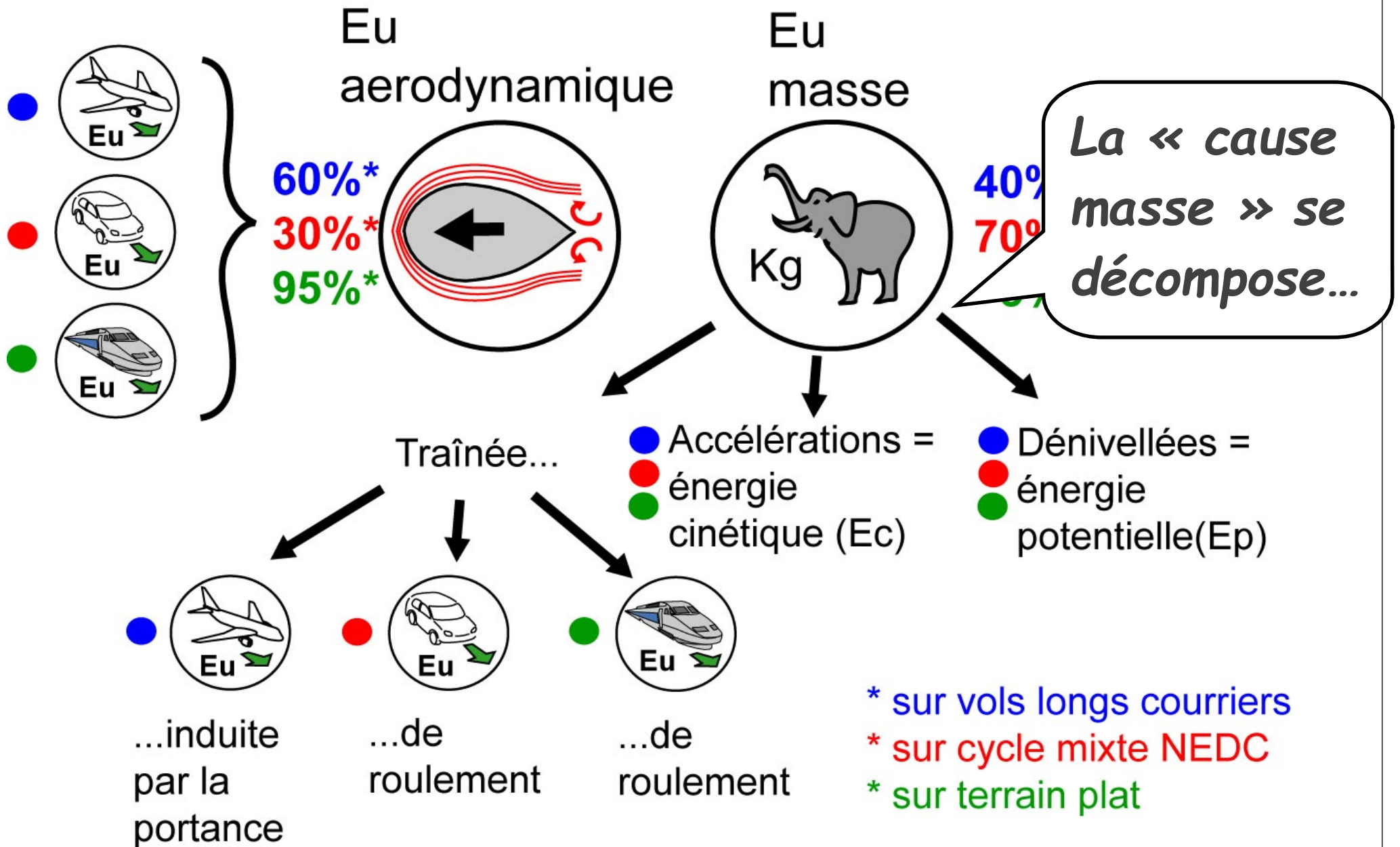
$$E_{\text{totale}} = E_g + E_c \cdot C_{EgE}$$



Eu
aerodynamique

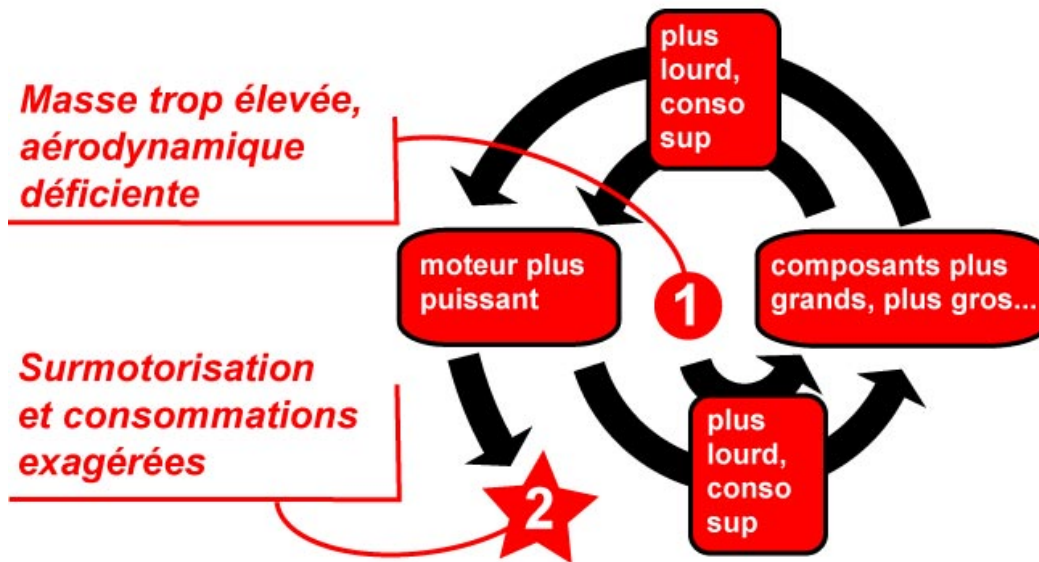
Eu
masse



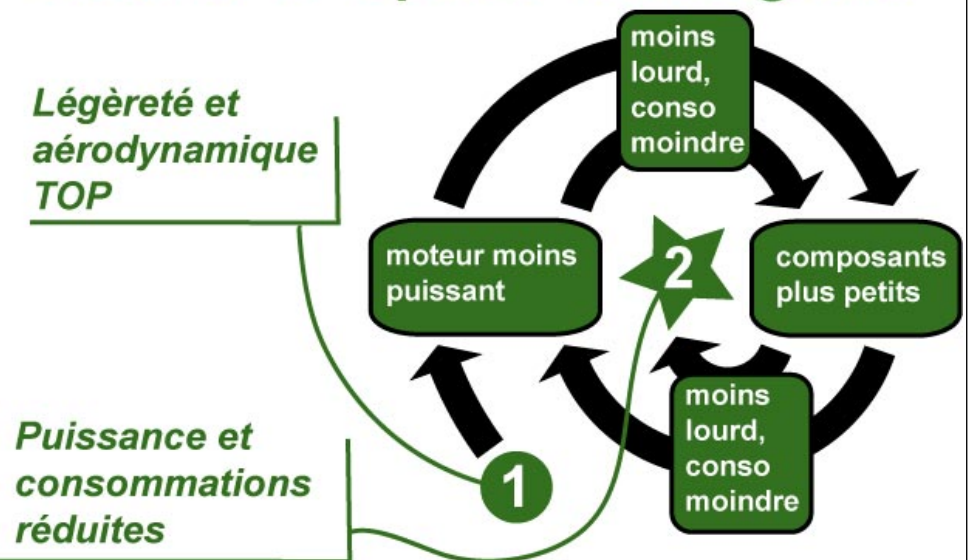


Les interactions sont multiples, ceci étant formalisé par le coefficient spirale (C_s) :

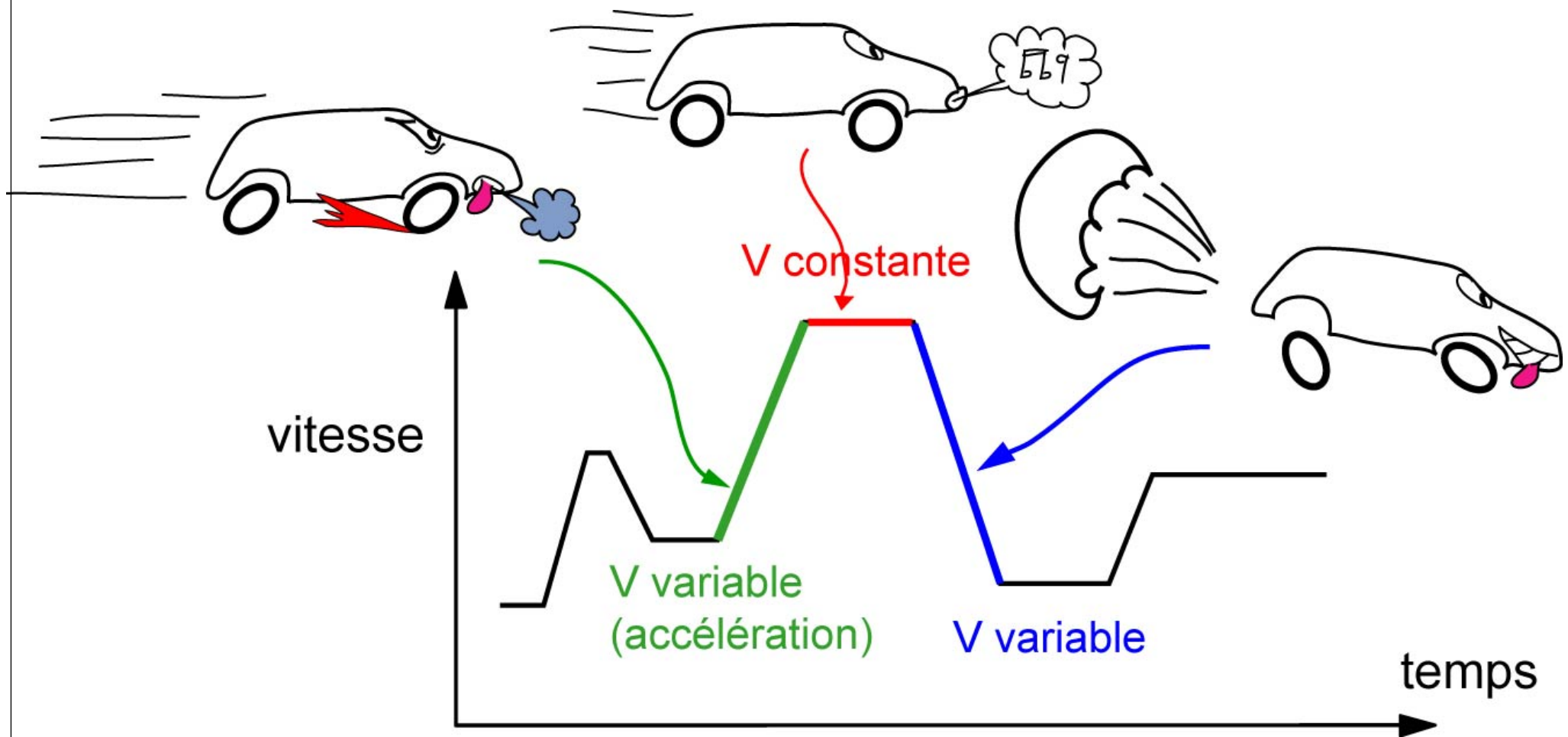
Voitures et "spirale divergente"



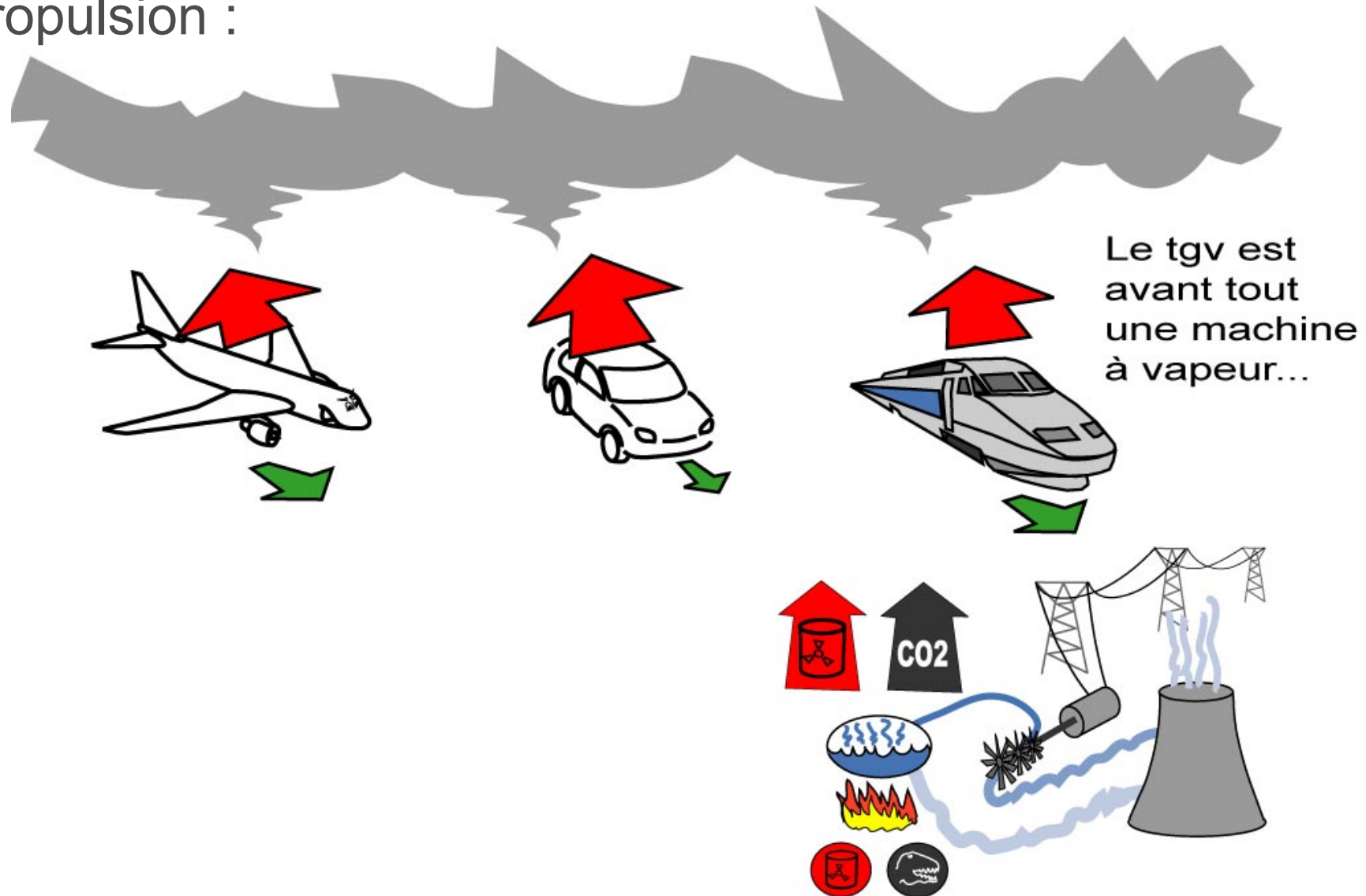
Voitures et "spirale convergente"



Influence de l'utilisation : contrairement aux TGV et aux avions, nos voitures sont soumises à des variations permanentes de la vitesse et de la charge du moteur :



Reste aussi le rendement des machines et de la chaîne de propulsion :

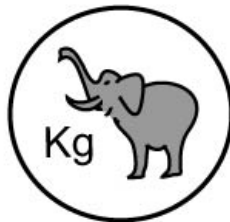


Résumons, nos moyens de transports quels qu'ils soient se caractérisent par 3 critères de qualité...

Domaine du possible



Qualité
aérodynamique



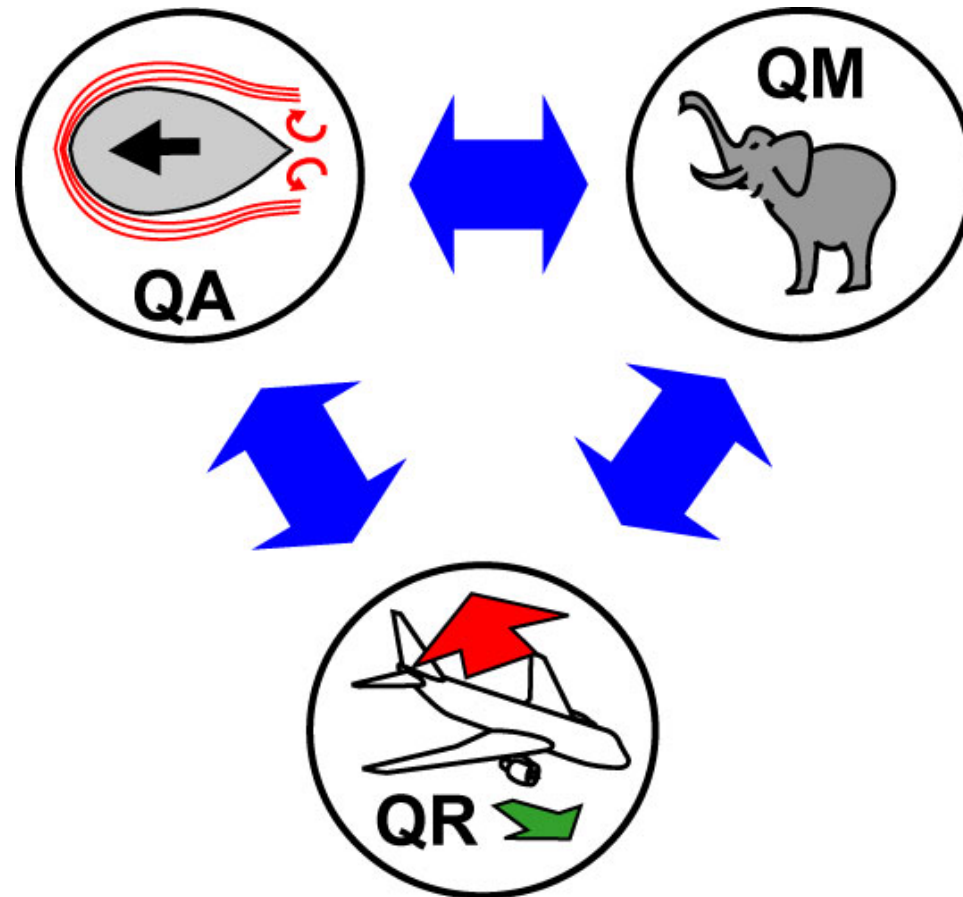
Qualité
massique



Qualité
rendement

Domaine inaccessible

Rajoutons que ces trois critères de qualité sont liés :

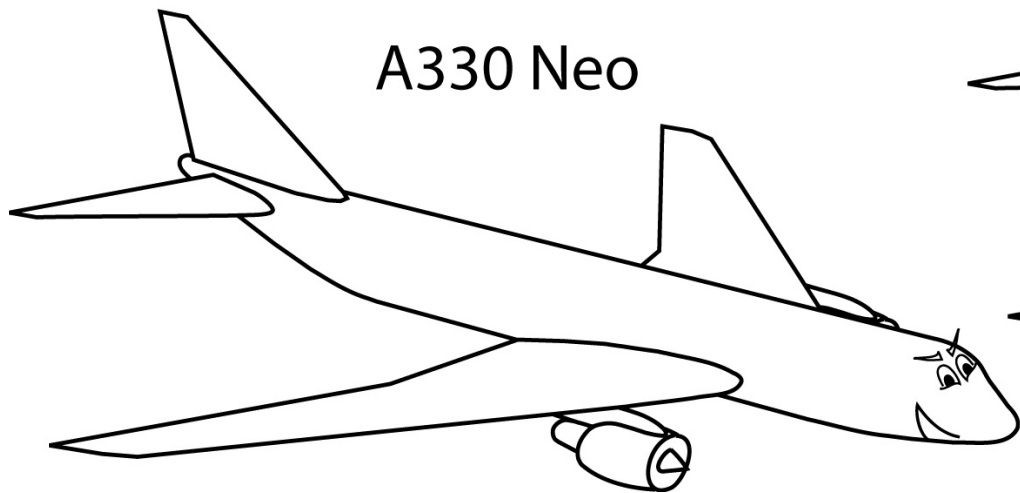


7 Zoom sur les matériaux performants et problématique du recyclage

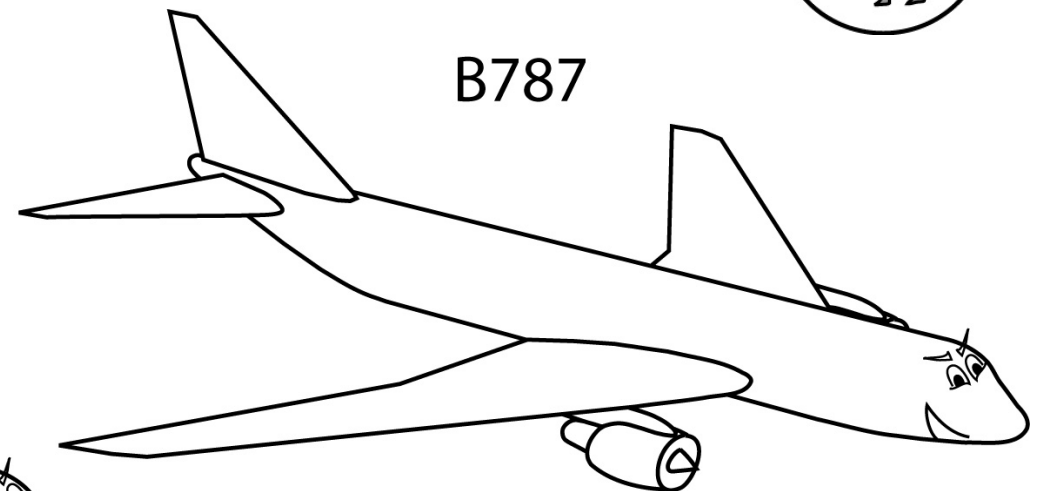
L'allègement est déterminant pour réduire le besoin en énergie de nos moyens de transport.

Les matériaux composites méritent quelques commentaires quant au potentiel d'allègement.

Prenons pour exemple un avion à dominante aluminium, le récent A330 neo, comparé à un B787 à dominante carbone. Quel est selon vous le bénéfice d'un avion tout carbone ?



A330 Neo



B787

Qualité massique "QM = masse à vide / masse au décollage".
Nous avons intérêt à avoir une QM la plus faible possible.
Tel que développé, la QM conditionne le besoin en puissance de l'aéronef, donc sa consommation.

QM B787 (avion à dominante carbone) = 0,51 à 0,53 selon versions* ;

QM A350 (avion à dominante carbone) = 0,50 à 0,51 selon versions* ;

QM B777 (avion à dominante alu) = 0,51* ;

QM A330 NEO (avion à dominante alu) = 0,47 à 0,53 selon versions*.

Qu'en pensez-vous ? Et qu'en est-il du coût de développement de l'A330 neo / développement d'un avion carbone ?

* sources : Wikipédia avions.

Quant aux avions légers, les avions composites s'avèrent en moyenne sensiblement plus lourds que les avions en aluminium.

Reste d'autres problèmes, liés aux composites, sans réponses satisfaisantes aujourd'hui, notamment :

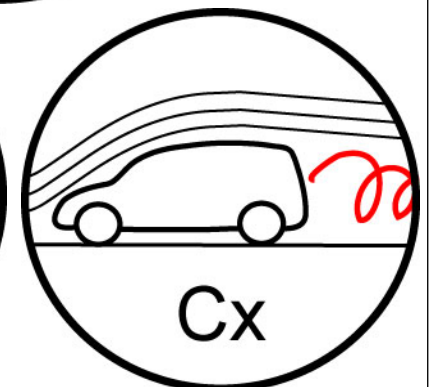
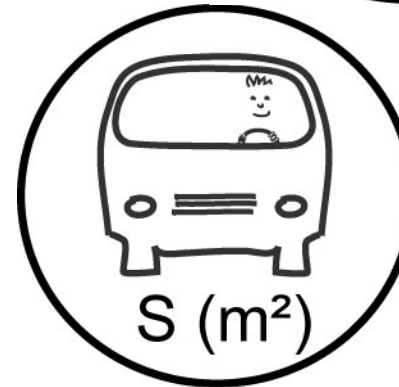
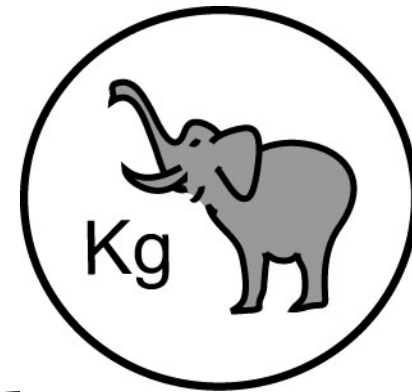
- l'obligation de recyclabilité d'au moins 95 % de la masse d'une voiture ;
- tenue dans le temps des structures composites ;
- coûts de production élevés des pièces composites.

8 Le cas particulier des voitures

La consommation de nos voitures a pour origine deux causes dominantes :

- la masse du véhicule ;
- son aérodynamique.

En usage ville route (cycle NEDC ou WLTC), la masse mobilise environ 70% de l'énergie, l'aérodynamique 30%.

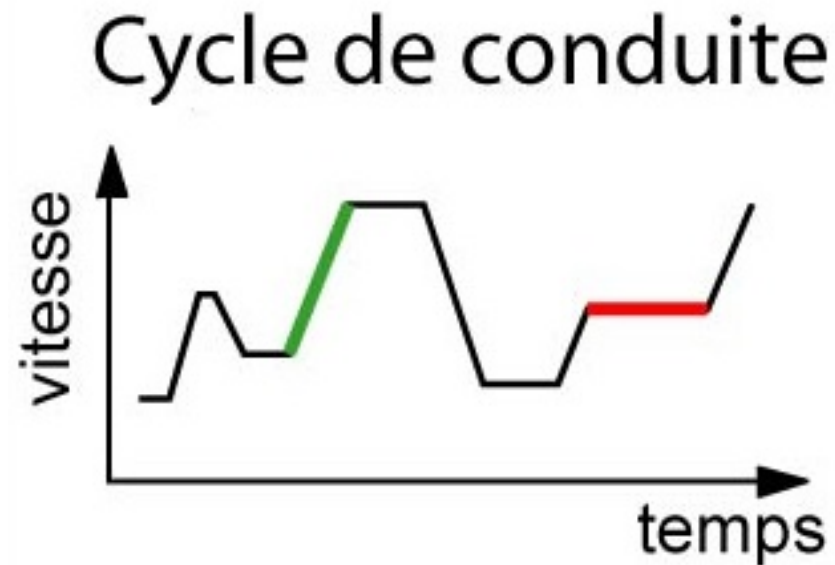


Énergie utile au déplacement d'une voiture

La détermination du rendement d'un véhicule (rv) nécessite de connaître son énergie consommée (E_c) et l'énergie utile (E_u) pour déplacer le véhicule.



E_c et E_u dépendent du type d'utilisation du véhicule. Nous devons donc faire référence à un cycle normalisé. Pour nos calculs, nous utilisons les cycles mixtes ville route NEDC ou WLTC.



A partir de l'équation de la puissance...

P_{ua} (puissance utile aérodynamique)

P_{ur} (puissance utile roulement), le cycle Européen page précédente ne comprend pas de montées, donc $\cos\alpha = 1$

$$P_u = \frac{1}{2}\rho \cdot v^3 \cdot S \cdot C_x + C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \cdot v + m \cdot \gamma \cdot v + m \cdot g \cdot \sin\alpha \cdot v$$

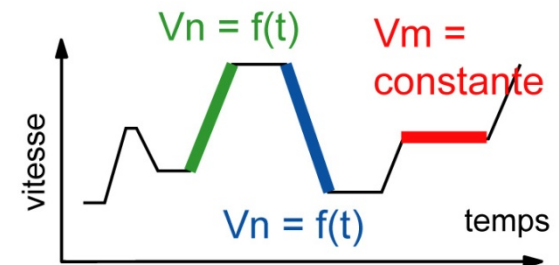
P_{ug} (puissance utile accélérations)

P_{um} (puissance utile montées), le cycle Européen page précédente ne comprend pas de montées, donc ce terme = 0

...nous obtenons l'énergie utile au déplacement :

Détermination de l'énergie utile au déplacement (Eu) :

L'intégration de la fonction puissance utile (Pu) en fonction de la variable temps nous donne la fonction énergie utile (Eu) :



vitesse constantes
 $\gamma = 0$

$$Eu = \sum_1^m \left[\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot Cx \cdot v_{cst}^3 \int_{tm1}^{tm2} dt + Cr \cdot m \cdot g \cdot v_{cst} \int_{tm1}^{tm2} dt \right]$$

Accélérations :
vitesses variables
 $\gamma = \text{constante}$

$$+ \sum_1^n \left[\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot Cx \int_{tn1}^{tn2} v_{v=f(t)}^3 dt + Cr \cdot m \cdot g \int_{tn1}^{tn2} v_{v=f(t)} dt + m \cdot \gamma_n \int_{tn1}^{tn2} v_{v=f(t)} dt \right]$$

Décélérations :
vitesses variables
 $\gamma = \text{constante}$

$$+ \sum_1^n \left[\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot Cx \int_{tn1}^{tn2} v_{v=f(t)}^3 dt + Cr \cdot m \cdot g \int_{tn1}^{tn2} v_{v=f(t)} dt + m \cdot \gamma_n \int_{tn1}^{tn2} v_{v=f(t)} dt \right]$$

**Eug = 0
lors des
décélérations**

Energie
pour vaincre
la traînée
aérodynamique
(Eua)

Energie
nécessaire
pour vaincre
la traînée de
roulement
(Eur)

Energie
nécessaire
pour
accélérer
(Eug)

Avec une digression intéressante sur la récupération d'Ec :

Récupération d'énergie cinétique (Ec)

Hypothèse : l'énergie cinétique est récupérée pour vaincre la traînée aérodynamique et la traînée de roulement lors des décélérations.

Nota : $E_c = E_{ug}$ (énergie nécessaire pour accélérer)

vitesses constantes
 $\gamma = 0$

Accélérations :
vitesses variables
 $\gamma = \text{constante}$

Décélérations :
vitesses variables
 $\gamma = \text{constante}$

$$E_u = \sum_1^m \left[\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v_{cst}^3 \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} dt + C_r \cdot m \cdot g \cdot v_{cst} \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} dt \right]$$

$$+ \sum_1^n \left[\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} v_{v=f(t)}^3 dt + C_r \cdot m \cdot g \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} v_{v=f(t)} dt + m \cdot \gamma_n \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} v_{v=f(t)} dt \right]$$

$$+ \sum_1^n \left[\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_x \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} v_{v=f(t)}^3 dt + C_r \cdot m \cdot g \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} v_{v=f(t)} dt + m \cdot \gamma_n \int_{t_{n1}}^{t_{n2}} v_{v=f(t)} dt \right]$$

Eua **Eur** **Eug**

Eug totale
Eug = 0 lors décélérations

Nous pouvons ainsi formuler E_u très simplement* :

Nous obtenons sur cycle NEDC :

S = surface frontale (m²)
 C_x = coef efficacité aérodynamique

$$E_u \text{ (MJ au cent)} = S.C_x.19,2 + m.(C_r.0,82 + 0,011)$$

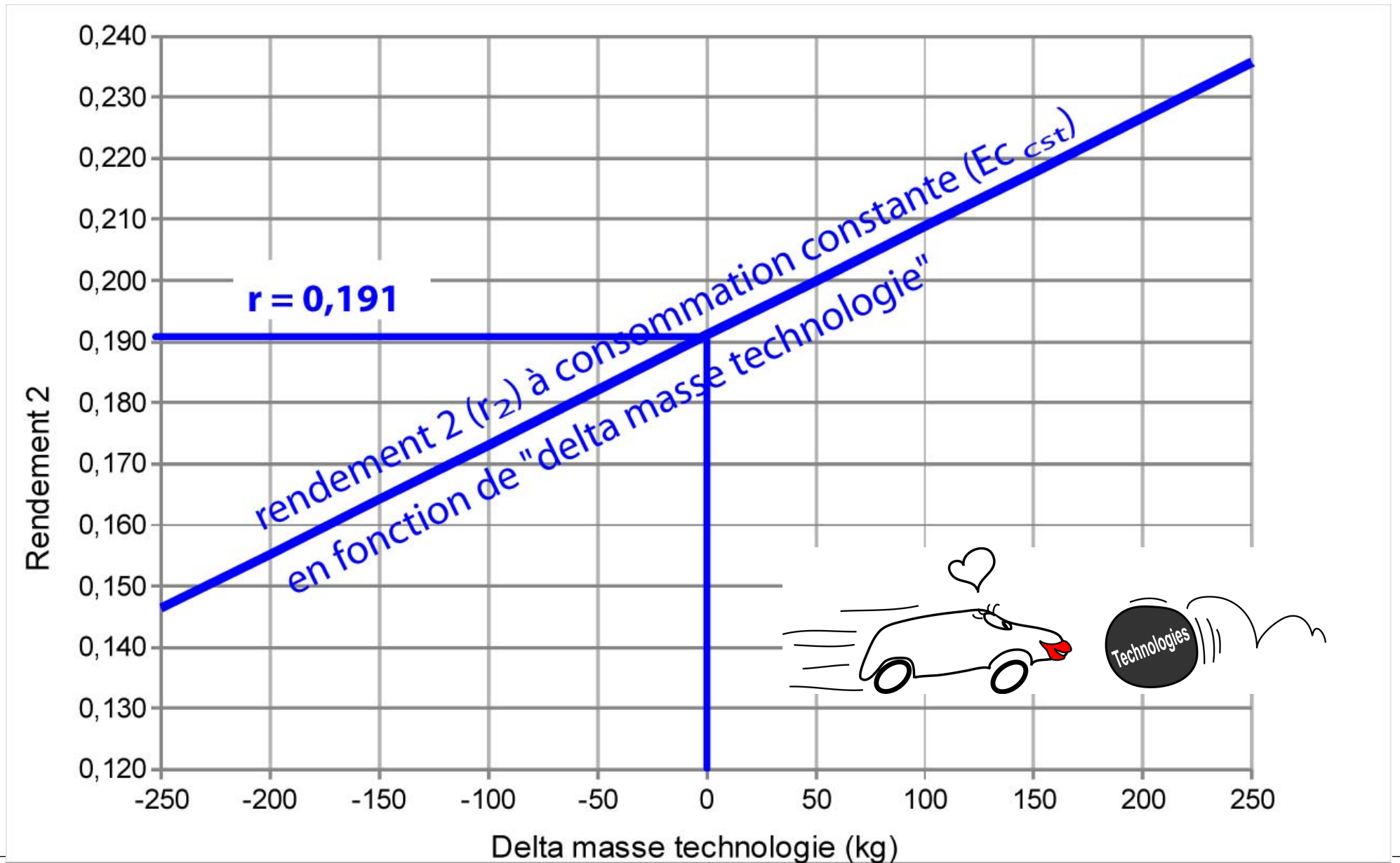
C_r = coef résistance au roulement
 m = masse (kg)

© Michel Kieffer 2007-2017

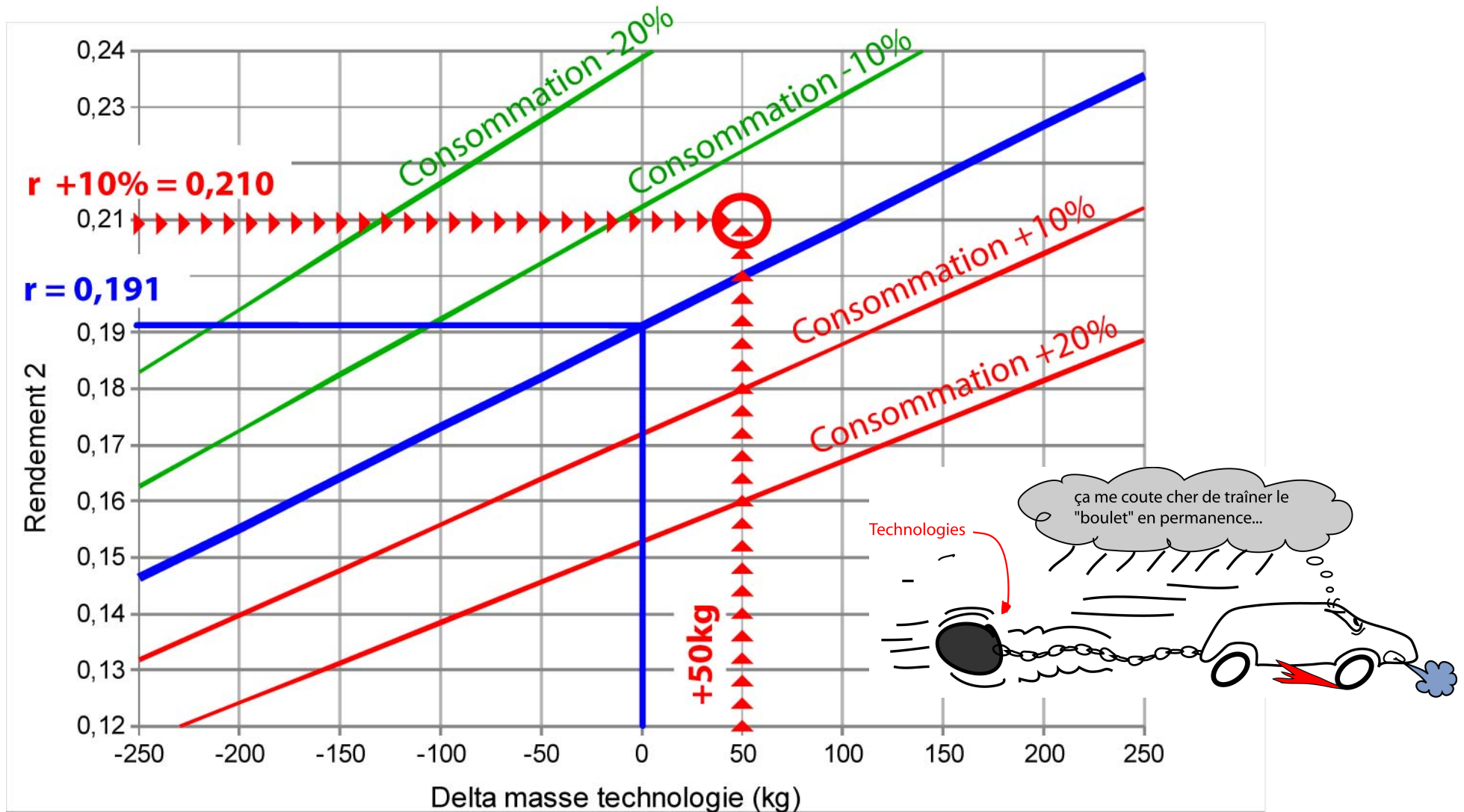
Retenons que, sans aucune technologie particulière, tout véhicule récupère une part notable d'énergie cinétique lors des ralentissements.

* Le résultat final reste proche avec le cycle WLTC.

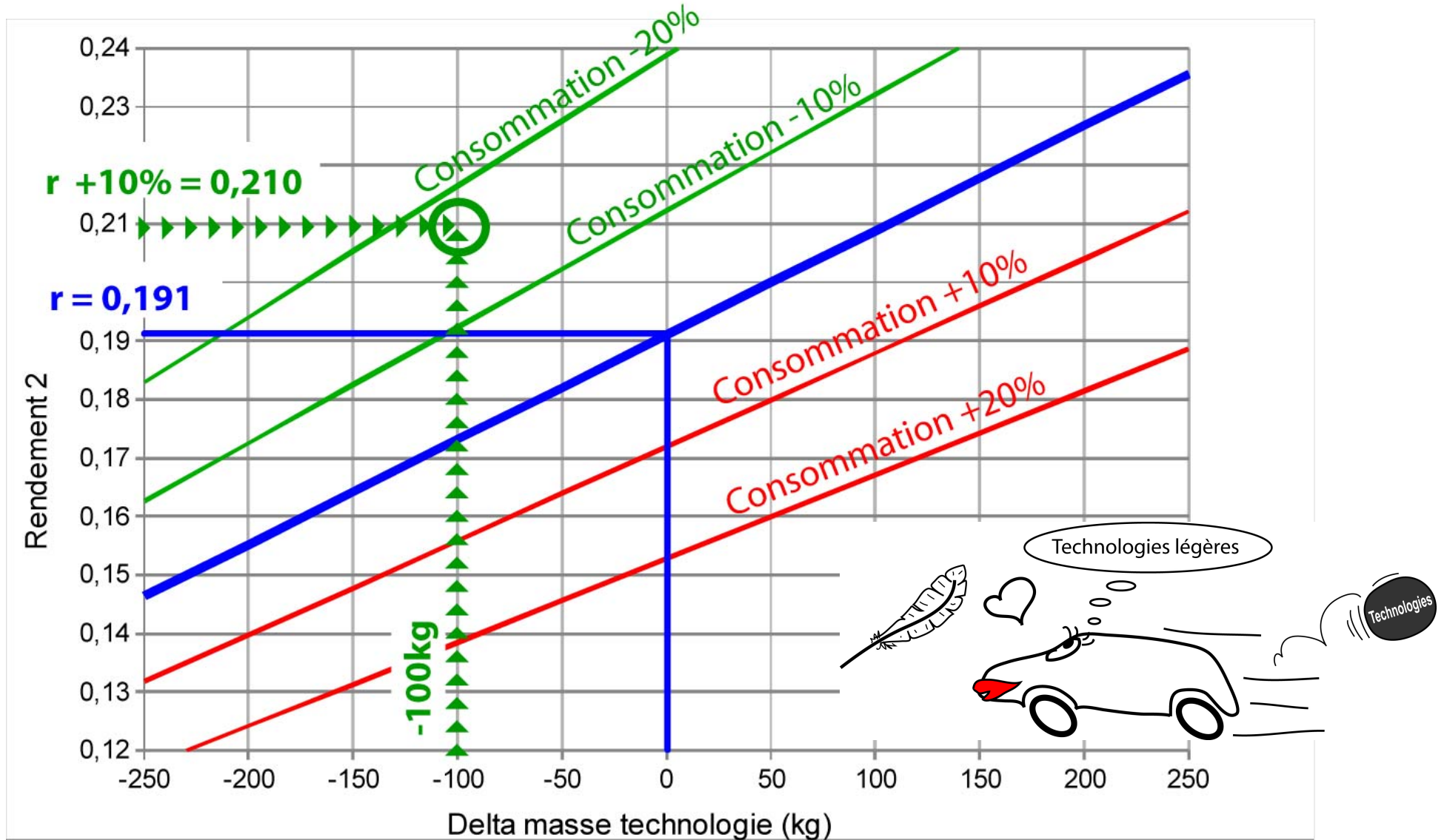
Le « poids » de la technologie



+10% sur le rendement combiné à $\Delta m_{\text{techno}} = +50\text{kg} \Leftrightarrow -4\%$ sur la conso...



+10% sur le rendement combiné à $\Delta m_{\text{techno}} = -100\text{kg} \Leftrightarrow \approx -17\%$
sur la consommation :



Analyse des déplacements journaliers domicile travail

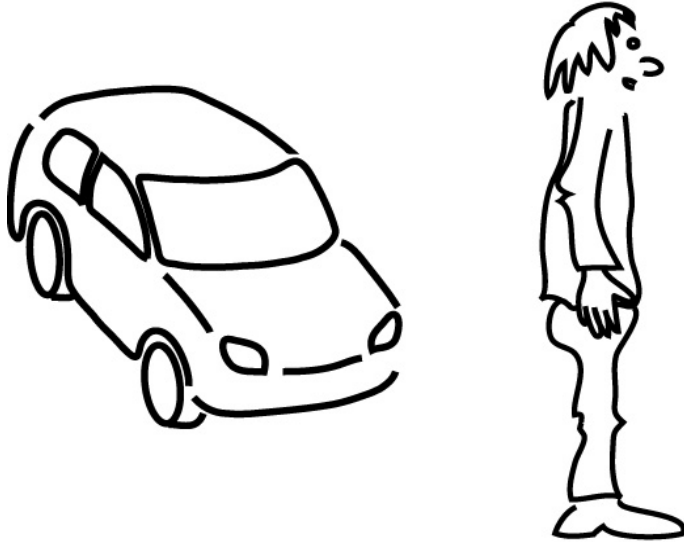
Distances entre les lieux d'habitation et de travail :

60 % : moins de 10 km

83 % : moins de 20 km

96 % : moins de 40 km

Taux d'occupation moyen des véhicules :



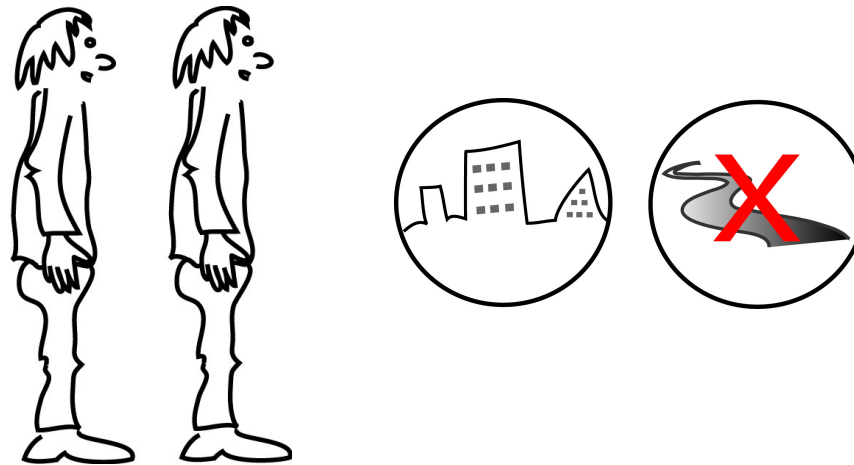
X 1,4 tous usages confondus en 2008
(1,5 en 1995)

X 1,1 pour les déplacements vers le
lieu de travail


Source : Service de l'observation et des statistiques
Etude sur "La mobilité des Français,
Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008
www.developpement-durable.gouv.fr

Quelle est la pertinence d'une voiture coûteuse et d'une masse de 1000 à 2000 kg pour déplacer 1,1 occupant sur une distance réduite ?

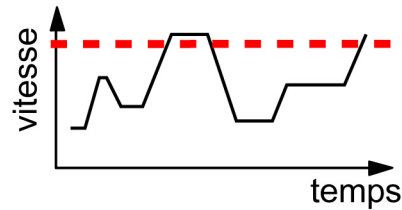
Quelques réponses à cette problématique, les voitures électrique biplaces à usage ville et à autonomies et vitesses réduites, la [Renault Twizy](#) et la [Citroën Ami One](#) (45 km/h).



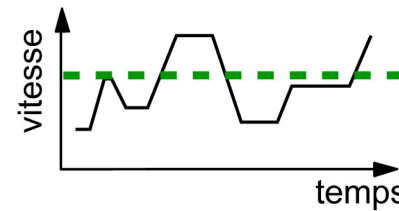
Et une réponse originale (légèreté + simplicité) associée à des cellules photovoltaïques :

Masse batteries LiFePo 

Cycle NEDC limité à 70 km/h

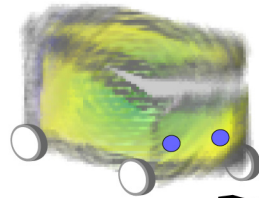


Cycle NEDC limité à 45 km/h

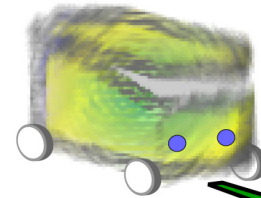


Durée recharge batteries avec cellules 

28 kg



50 km

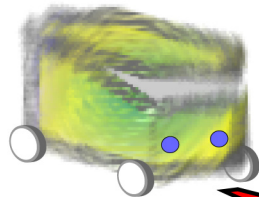


89 km

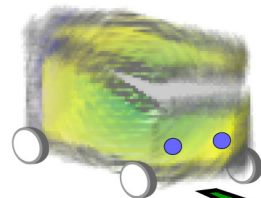


7,5 h

20 kg



35 km



62 km



5,3 h

9 Un modèle de dimensionnement des voitures

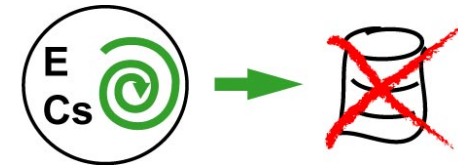
Le modèle de dimensionnement des voitures nous permet de déterminer la masse de batteries, la masse totale du véhicule, la puissance installée d'un véhicule quel qu'il soit.

Nous étudierons pages suivantes différents véhicules électriques à destination d'un usage plutôt route.

Ce modèle nous permet de déterminer le « coefficient spirale (Cs) » d'une voiture et les fonctions Mv, Mb, Mt en fonction de la distance franchissable d'un véhicule électrique type.

Coefficient spirale (Cs) :

Energie
économisée
liée au
coefficient spirale

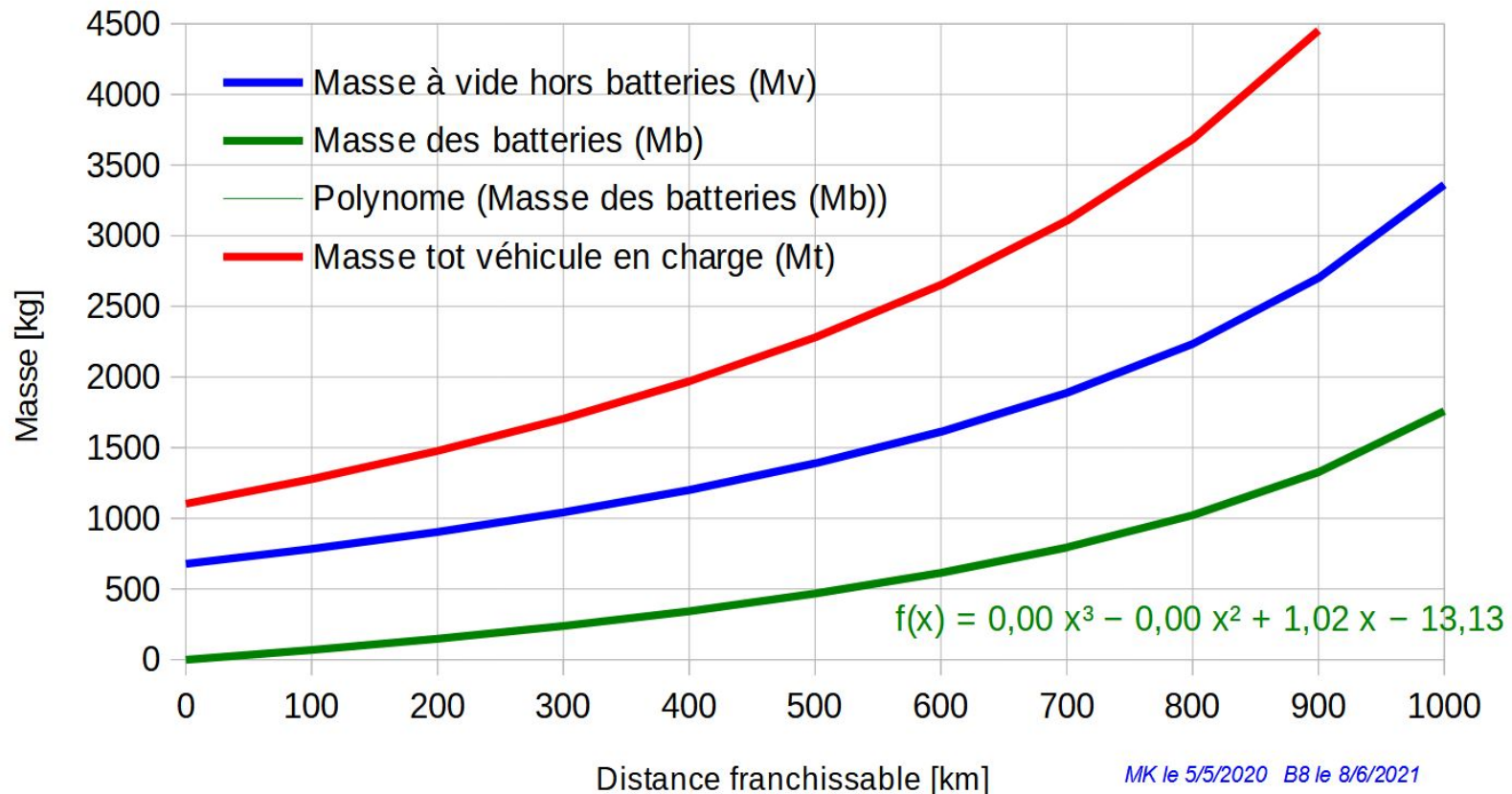


	Delta Mu	Masse totale Mt	Coef spirale Cs
Mu - 100 kg	-100	382,6	3,10
Mu - 50 kg	-50	537,7	3,10
Mu initiale 200 kg	0	692,7	/
Mu + 50 kg	50	847,8	3,10
Mu + 100 kg	100	1002,9	3,10

MK le 5/5/2020 B8 le 8/6/2021

Fonctions M_v , M_b , $M_t = f(\text{distance franchissable})$ pour une voiture électrique compacte type :

Voiture électrique type : M_v , M_b , M_t en fonction de la distance franchissable



Les fonctions ci-dessus sont établies à une vitesse constante de 70 km/h. Toutefois, les autonomies sont peu impactées par un cycle d'usage de type NEDC ou WLTC dans la mesure où les véhicules électriques récupèrent l'essentiel de l'énergie cinétique lors des ralentissements et l'essentiel de l'énergie potentielle lors des descentes.

Les fonctions précédentes soulignent que la masse totale en charge d'une voiture électrique compacte type passe de 1500 kg pour 200 km d'autonomie à 2600 kg pour 600 km.

Serait-ce donc une « erreur de casting » de vouloir donner à nos véhicules électriques des autonomies de voitures thermiques ? Le coût massique nécessaire pour transporter de l'énergie pour aller loin (à l'identique des avions long courriers) est conséquent en se rappelant que la masse est la principale cause du besoin en énergie d'un véhicule.

Et que donneraient de petits véhicules routiers optimisés ?

Comparaison véhicules							
	Dfr = distance franchissable véhicule			Mt = masse totale max véhicule			
	v	Mu = masse utile			v	Mb 100 km = masse batteries	
	v	v	Mb = masse batteries		v	pour réaliser cent km	
	v	v	v		v	v	
Type véhicule	Dfr	Mu	Mb	Delta Mb	Mt	Mb 100 km	Delta Mb au cent
	km	kg	kg	%	kg	kg	%
Véhicule Electrique Type (VET) offre 2020, 384 km	384	425	325	/	1925	84,7	/
CMI-ATE monoplace 120 km	120	100	11	-97	282	9,1	-89
CMI-ATE monoplace 384 km	384	100	40	-88	356	10,5	-88
CMI-ATE biplace 384 km	384	200	74	-77	693	19,2	-77
CMI-ATE biplace 600 km	600	200	133	-59	841	22,1	-74
CMI-ATE biplace 80 km + groupe électrogène▶	80	240	15	-96	645	18,3	-78
Avec une autonomie de 120km , un véhicule monoplace optimisé et réaliste (cf. conception à moindre coûts), consommerait au cent 9,3 fois moins qu'un VET (-89%) avec une batterie 30 fois plus légère au prix d'une autonomie réduite.							
A autonomie constante, 384 km cf. VER, un véhicule monoplace optimisé et réaliste (cf. conception à moindre coûts), consommerait au cent 8,1 fois moins qu'un VET (-88%) avec une batterie 8,1 fois plus légère à autonomie constante.							
A autonomie constante, 384 km cf. VER, un véhicule biplace optimisé et réaliste (cf. conception à moindre coûts), consommerait au cent 4,4 fois moins qu'un VET (-77%) avec une batterie 4,4 fois plus légère à autonomie constante.							
Avec une autonomie de 600 km , un véhicule biplace optimisé et réaliste (cf. conception à moindre coûts), consommerait au cent 3,8 fois moins qu'un VET (-74%) avec une batterie 2,4 fois plus légère malgré l'augmentation de l'autonomie (+56%).							
Les caractéristiques ci-dessus sont établies à une vitesse constante de 70 km/h. Toutefois, les autonomies sont peu impactées par un cycle d'usage de type <u>NEDC</u> ou <u>WLTC</u> dans la mesure où les véhicules électriques récupèrent l'essentiel de l'énergie cinétique lors des ralentissements et l'essentiel de l'énergie potentielle lors des descentes.							
						MK le 5/5/2020 B8 le 8/6/2021	

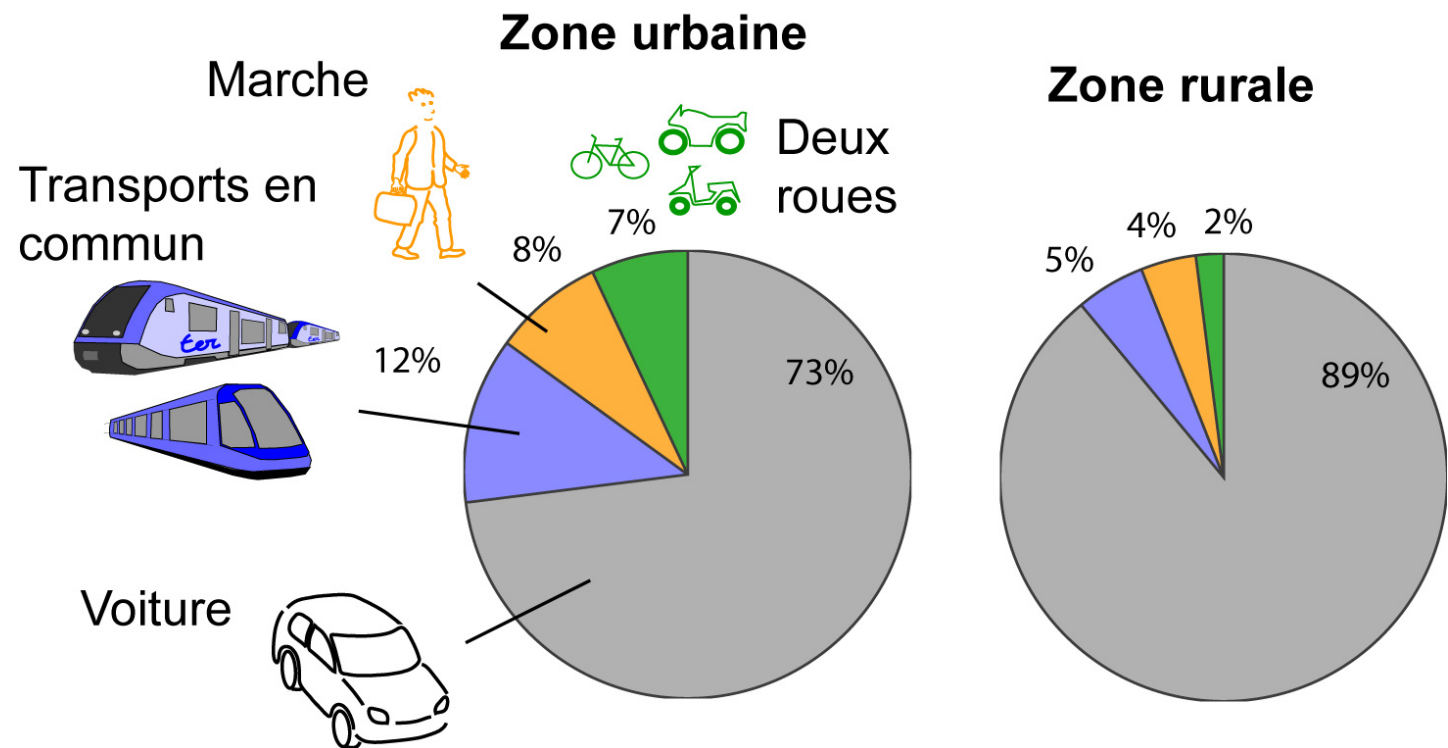
Les diminutions des besoins en énergies sont spectaculaires.

Quant à l'aspect monoplace ou biplace, clé importante de la réduction des dimensions et de la masse donc de la réduction du besoin en énergie, nous avons vu que le taux d'occupation des véhicules lors des déplacements journaliers est aujourd'hui de 1,1 occupants par voiture.

Mais qu'en est il des contre-arguments "*Il faut une voiture 4 places pour emmener mes enfants à l'école*" ou "*est-il intéressant de disposer de deux véhicules, l'un très économique et l'autre classique plutôt qu'un unique véhicule ?*"

Aussi, les véhicules individuels ont-ils toujours leur place dans nos sociétés ? Les besoins de souplesse et d'accès aux transports en commun ne sont pas les mêmes selon les zones d'habitation :

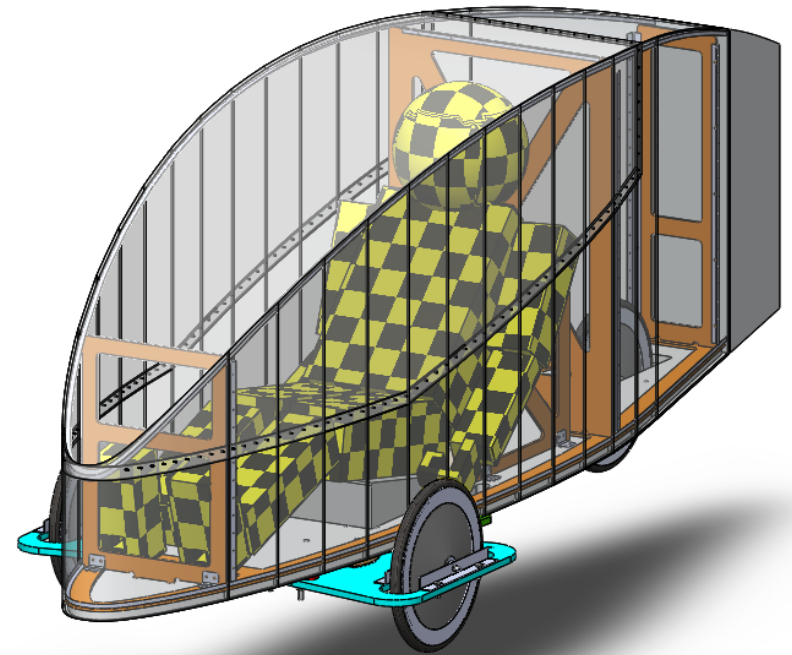
Modes de déplacements domicile-travail en Alsace :



Source : INSEE, les déplacements domicile-travail en 2009 - Région Alsace

Dans le cadre des projets du CMI-ATE, de tels concepts de véhicules routiers ultra économiques sont dérivés du véhicule ci-contre destiné aux compétitions Shell Eco Marathon et EducEco :

Les dérivés sont plus véloce et prennent en compte la protection des occupants en cas d'accident et les contraintes de design pour une question d'attractivité.

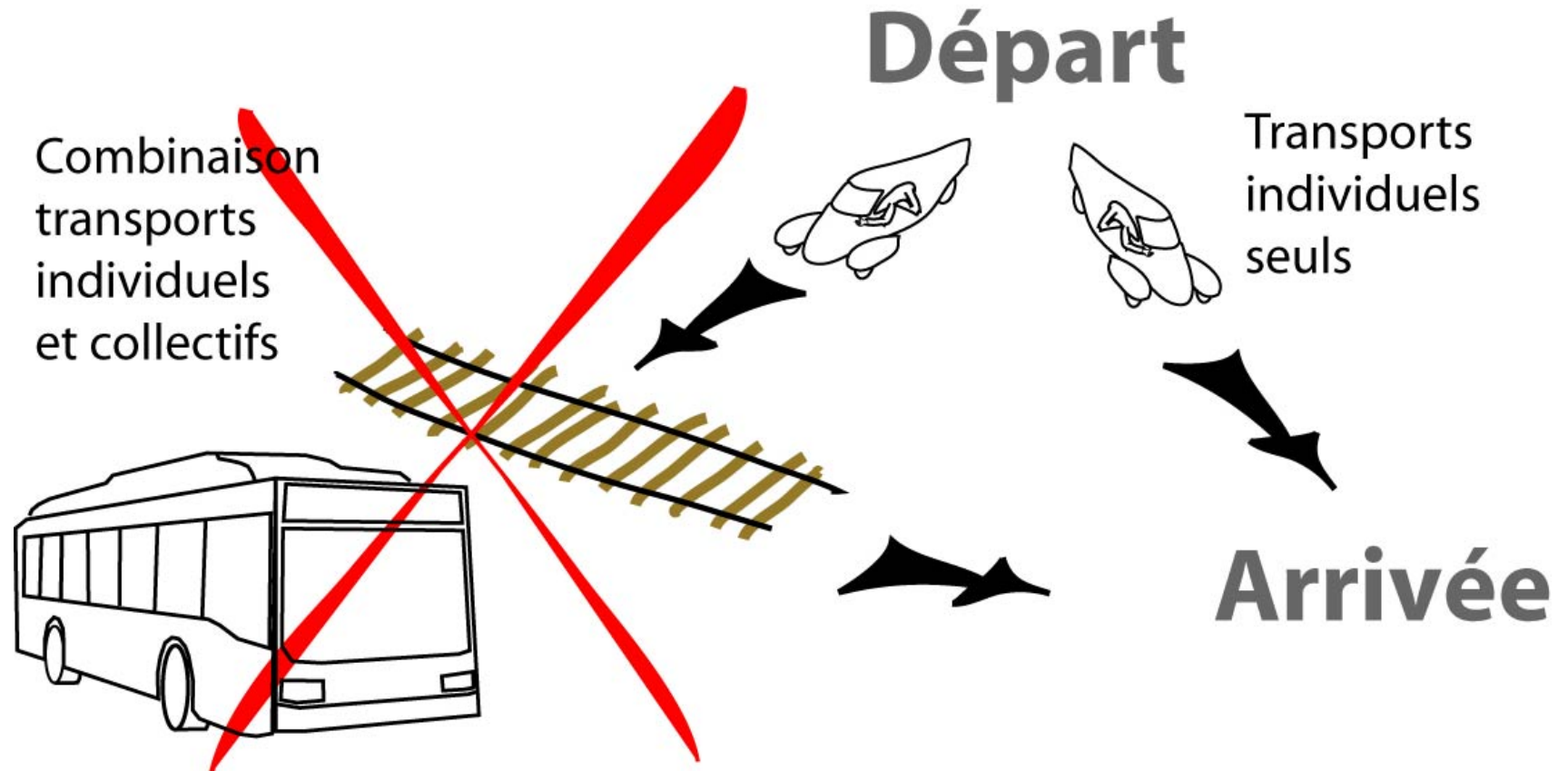


Tout en étant beaucoup plus économiques à produire y compris en petite série, les projets de l'UFR-SITEC de véhicules ultra économiques sont proches d'autres "avions sans ailes" tels la récente [**Aptera**](#) ou de l'ancienne [**Mathis VEL 333**](#).

Ces deux derniers véhicules sont par contre plus coûteux à produire : formes non développables pour la Mathis VEL 333 et composite pour l'Aptera.

A noter qu'une unique roue à l'arrière n'engage en rien la stabilité en virage sous réserve d'étudier ce sujet lors de la conception.

Comparé au mix transports en commun + véhicules individuels...



De tels projets, avec leurs dimensions industrielles et accessibles à tous, positionnent l'université en tant que précurseuse de concepts ultra économiques autant à l'achat qu'à l'usage.

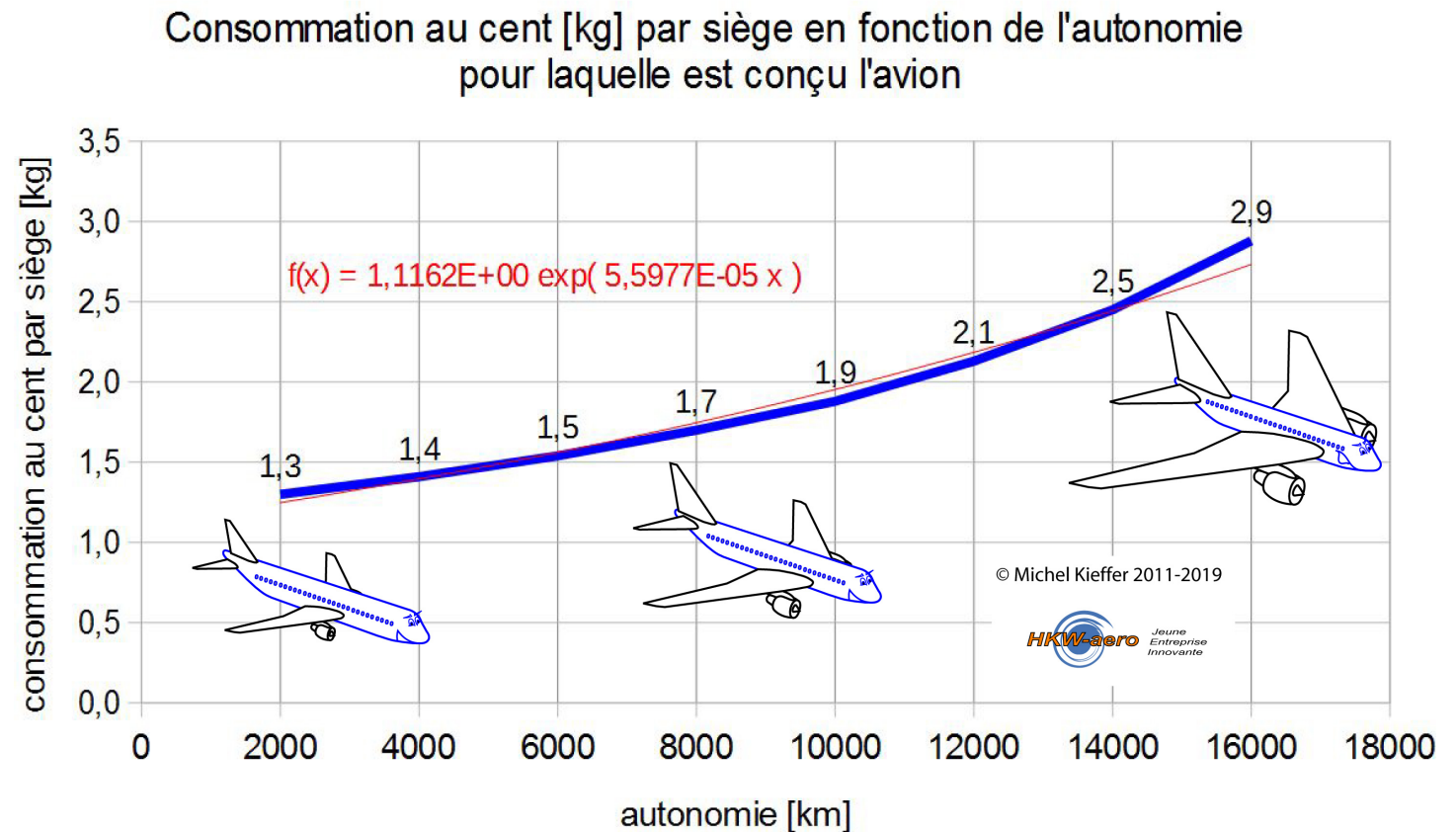
Ceci n'a pas beaucoup d'écoute aujourd'hui, mais qu'en sera-t-il demain lors des prochaines crises énergétiques et climatiques à venir (à l'identique de la crise COVID actuelle) ?

D'où l'intérêt que nous réfléchissions à ces concepts de véhicules dans le cadre de nos projets.

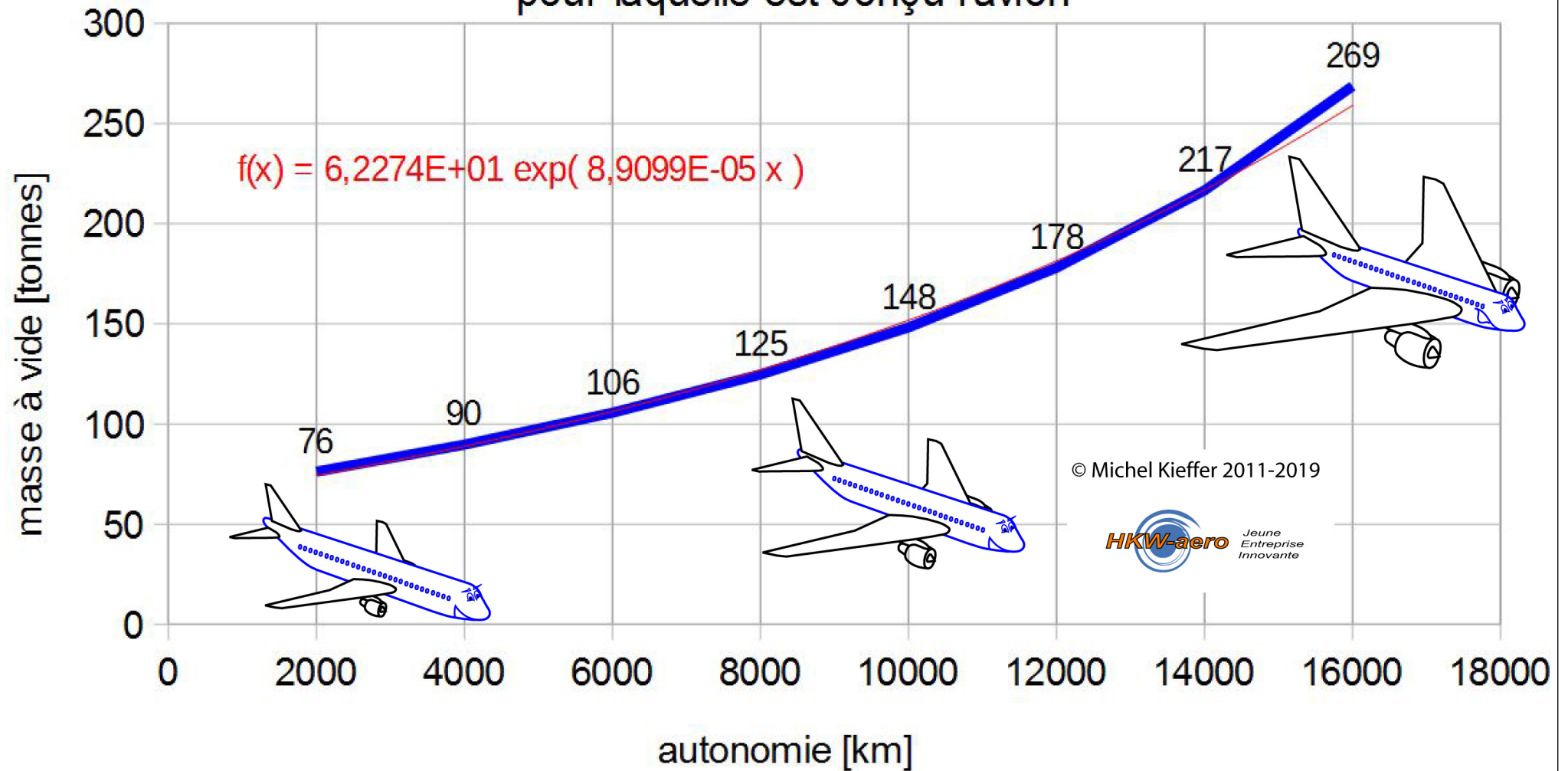
10 Digressions dans le domaine des avions et des bateaux

Impact de l'autonomie et de la vitesse...

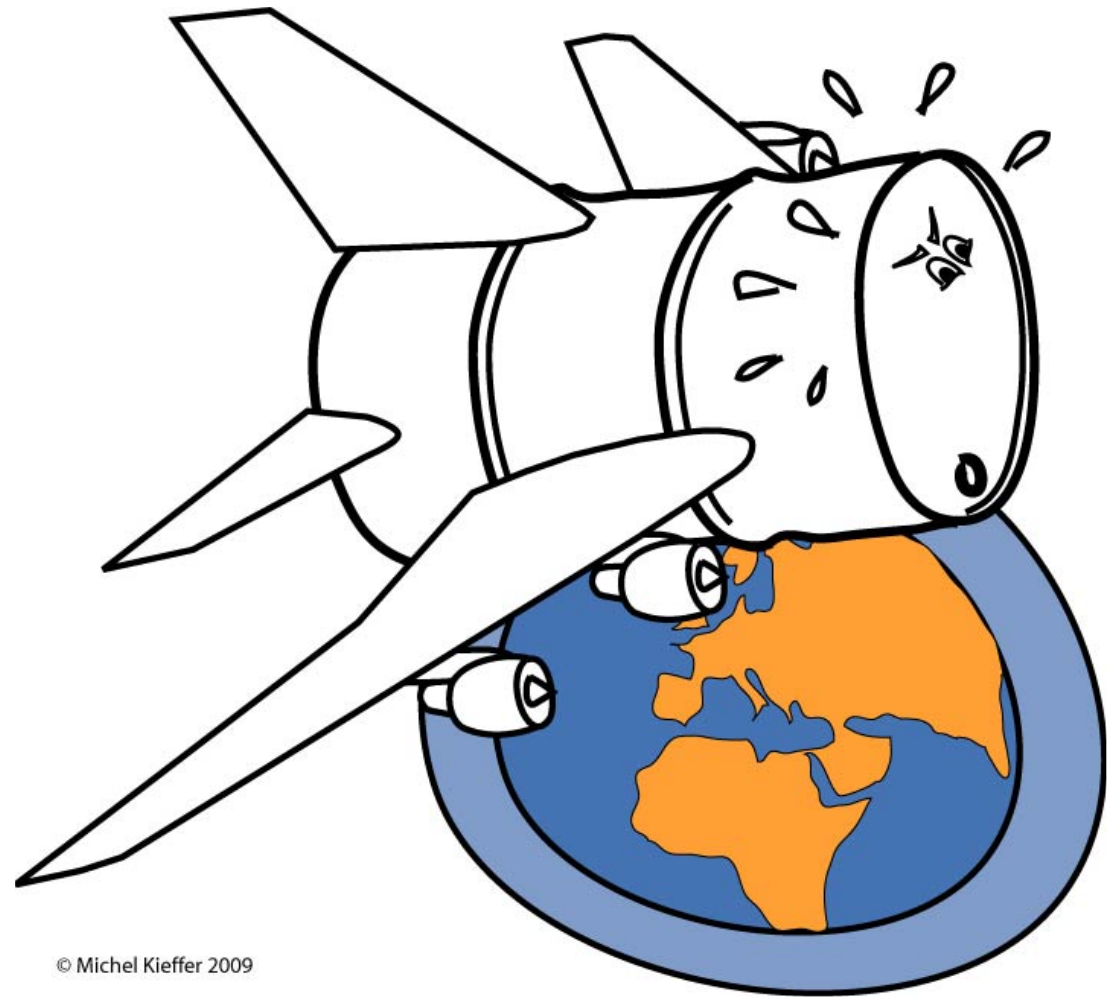
Avion type
A330 ou
B777
dimensionné
selon son
autonomie
maximale :



Masse à vide [tonnes] en fonction de l'autonomie pour laquelle est conçu l'avion

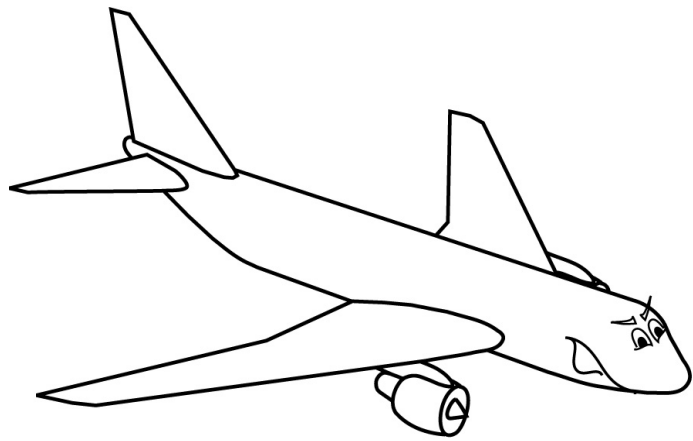


Ceci traduit le coût énergétique considérable pour transporter la masse de carburant nécessaire pour aller loin, et ce, à l'identique des voitures électriques.

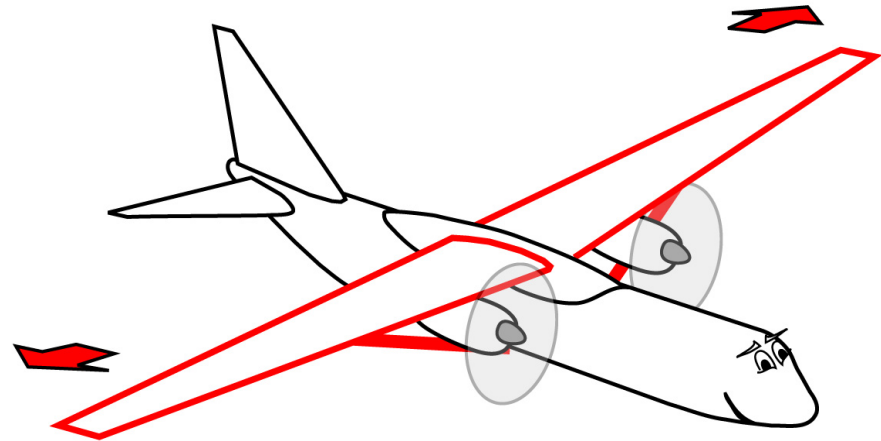
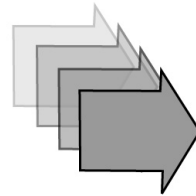


Optimiser notre avion type à autonomie constante (9000 km)
mais avec une vitesse de 600 km/h ...

A capacités et autonomies identiques...



$V = 890 \text{ km/h}$



$V = 600 \text{ km/h} (-33\%)$

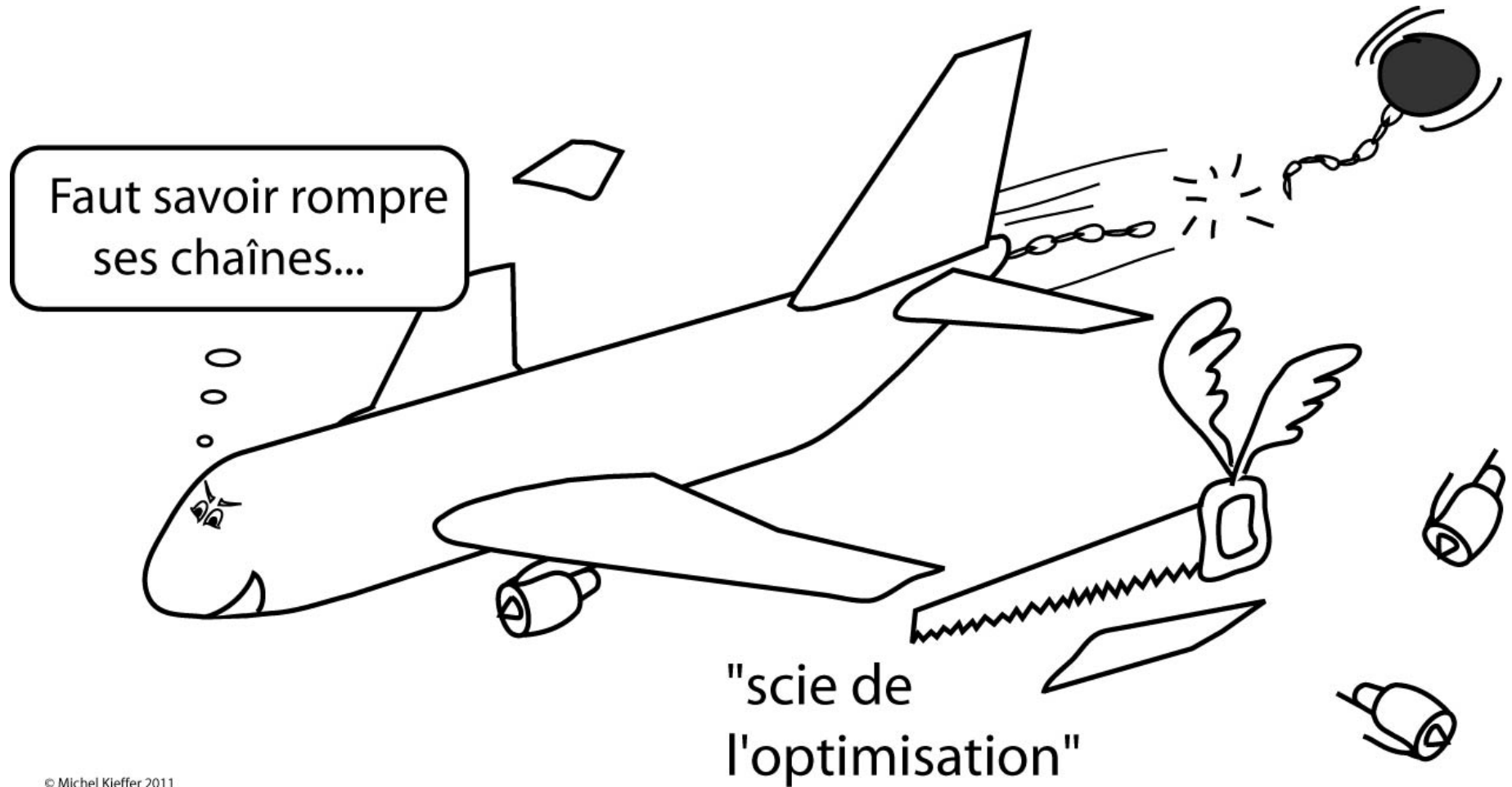
$A = 11 (+37\%)$

$C_z \text{ max} = 2,0 (-32\%)$

... =>

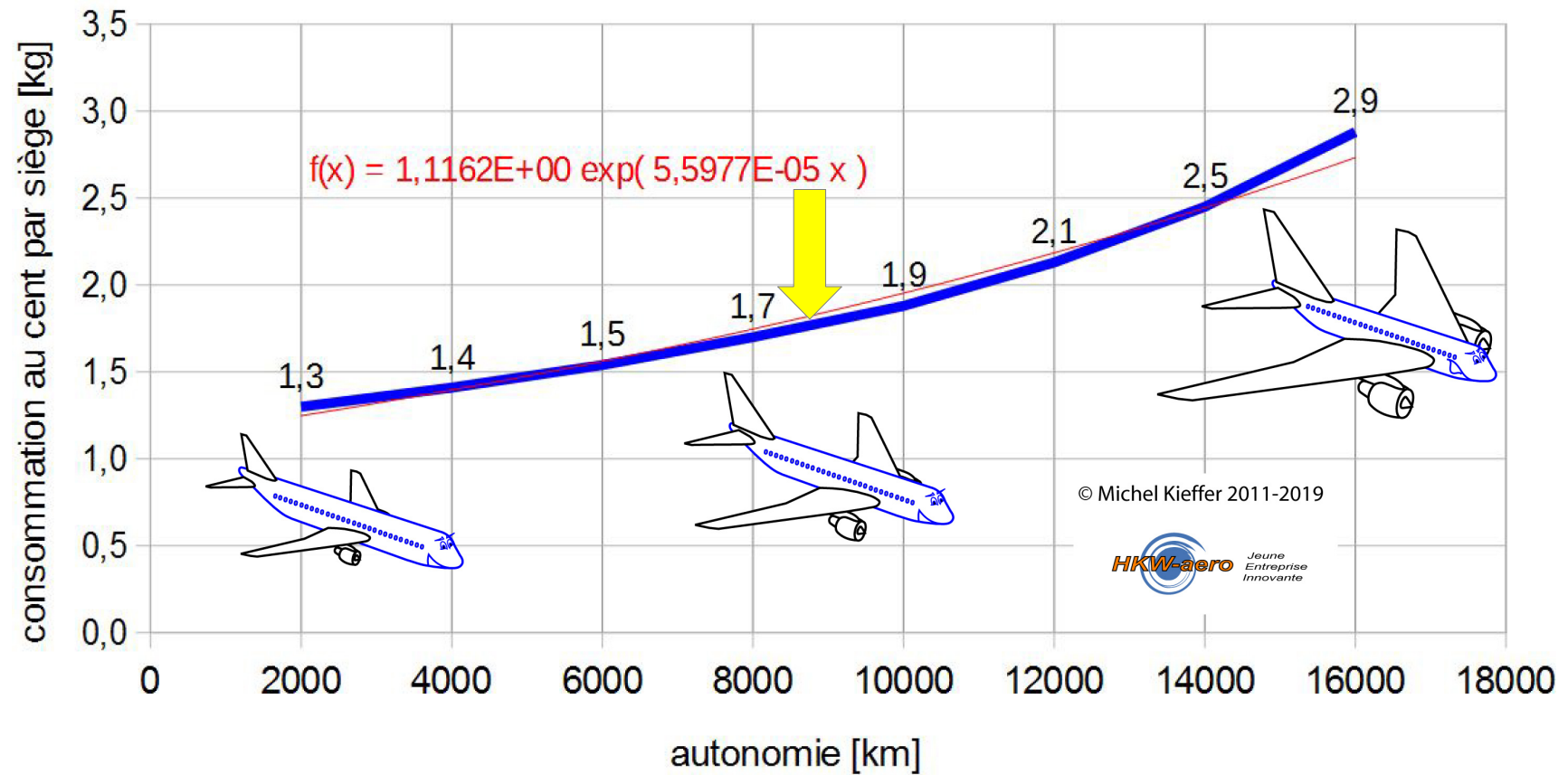
Consommation -50%

Résumons, un avion long courrier ne peut pas être optimal compte tenu de sa variation de masse...



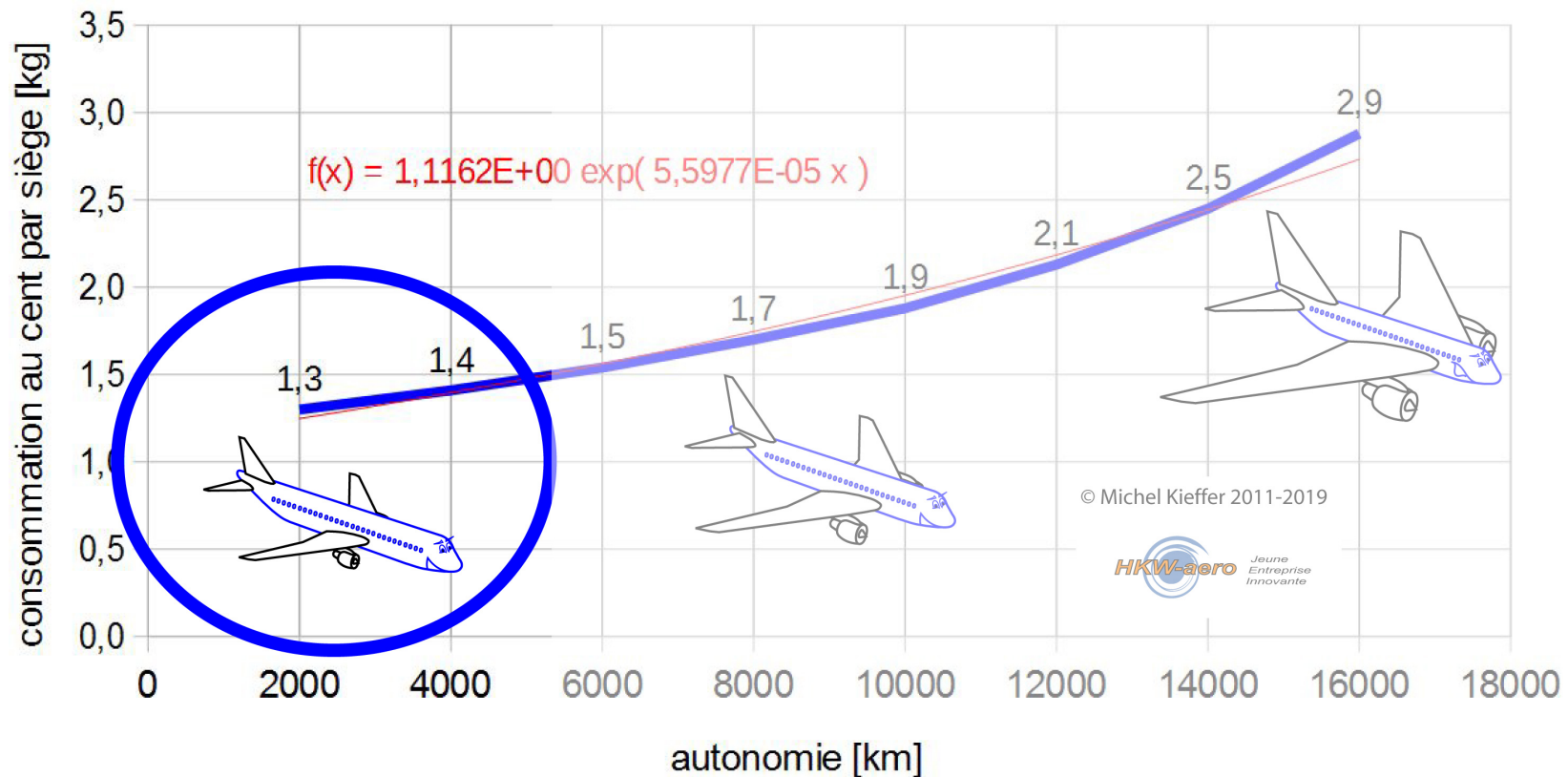
L'A321 Long Range, un « coup de maître » d'Airbus !

Consommation au cent [kg] par siège en fonction de l'autonomie pour laquelle est conçu l'avion



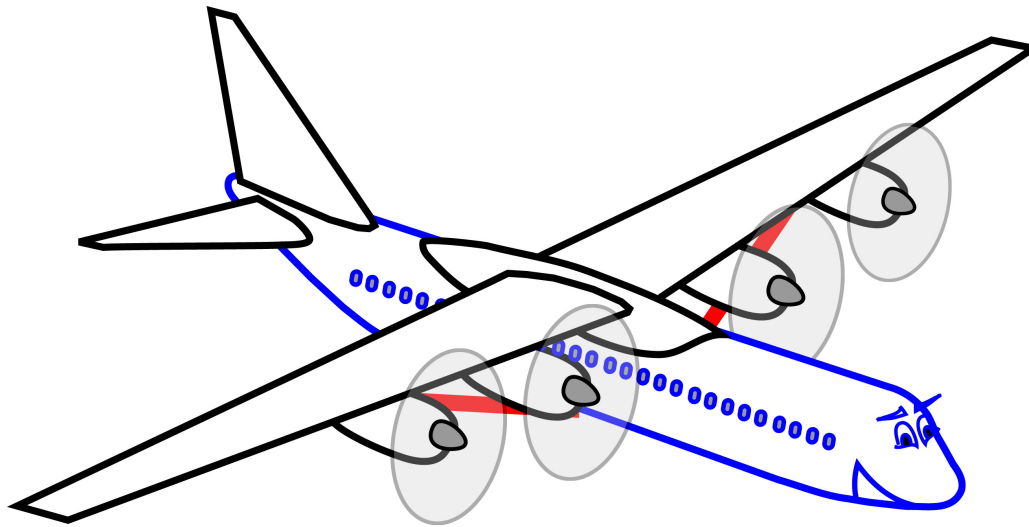
Et peut être des futurs Airbus gros porteurs courts courriers pour concurrencer le TGV ?

Consommation au cent [kg] par siège en fonction de l'autonomie pour laquelle est conçu l'avion



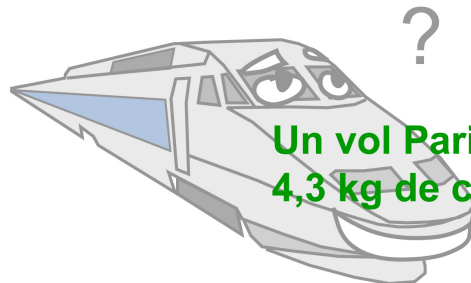
**Gros porteur de 440 places optimisé pour des vols de 2500 km max =>
1,33 kg de carburant au cent par siège. Un vol Paris Strasbourg représenterait
6,6 kg de carburant soit 21 kg de CO2 par siège...**

...encore mieux, combiner la réduction de la vitesse et de l'autonomie tout en améliorant le rendement de propulsion puis optimiser l'avion en conséquence :



Gros porteur de 440 sièges
 Autonomie = 2500 km
 $V = 550 \text{ km/h}$ (-38% pour obtenir la puissance de 4 TP400)
 $A = 11$ (+37%)
 $Cz \text{ max} = 1,9$ (-35%)
 $QM = 0,50$ (-9% > haubanage et aile droite)
 $Rh = 0,84$ (+5% > hélices)
 $Cfe = 0,0035$ (+40% > nacelles moteurs et Re plus faible)
 ... =>

0,85 kg carburant au cent par siège



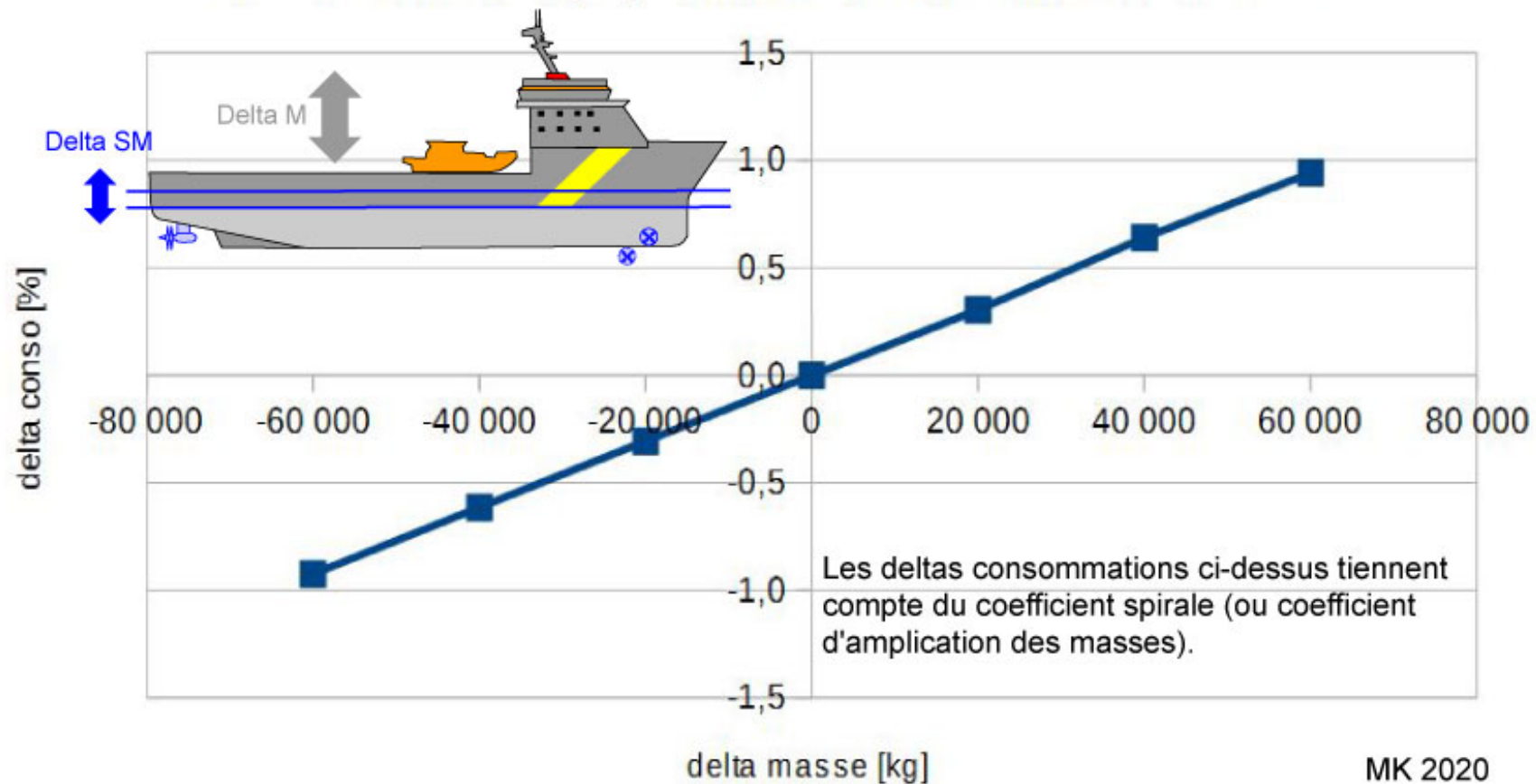
Un vol Paris Strasbourg représenterait par siège 4,3 kg de carburant soit 13,4 kg de CO2...

© Michel Kieffer 2011-2019

Qu'en est-il des bateaux ?

Nous obtenons :

Delta consommation [%] en fonction de la variation de masse



MK 2020

11 Conclusion

La « voiture du futur » permet d'envisager sereinement nos déplacements à venir et, curieusement, sans recourir systématiquement aux transports en commun.

Ce futur passe probablement plus par une spécialisation des véhicules selon leur usage que par des technologies lourdes et coûteuses. Alléger est d'autant plus aisé que le taux d'occupation des véhicules est particulièrement bas.

Ceci ne remet pas en cause l'usage d'un véhicule plus gros pour les déplacements de type vacances par exemple, mais un petit véhicule, en plus de son économie intrinsèque, évite d'utiliser inutilement un coûteux véhicule classique.

Quant aux voitures électriques, l'essentiel est de ne pas tomber dans le piège d'électrifier nos voitures actuelles surdimensionnées pour nos déplacements journaliers, ceci autant en nombre de places qu'en autonomie.

Alors qu'un petit véhicule biplace dont l'autonomie est suffisante pour les besoins journaliers de 90% des usagers se contente de 20 à 30 kg de batteries.

De même, quelques pistes se dégagent pour les avions de transport. A savoir, tout d'abord réduire les besoins en énergie, c'est à dire optimiser les avions pour des vitesses et des autonomies plus réduites, ensuite prendre en compte les nouvelles énergies envisageables (agrocarburants, H₂...).