



# **Energie et Transport aérien**



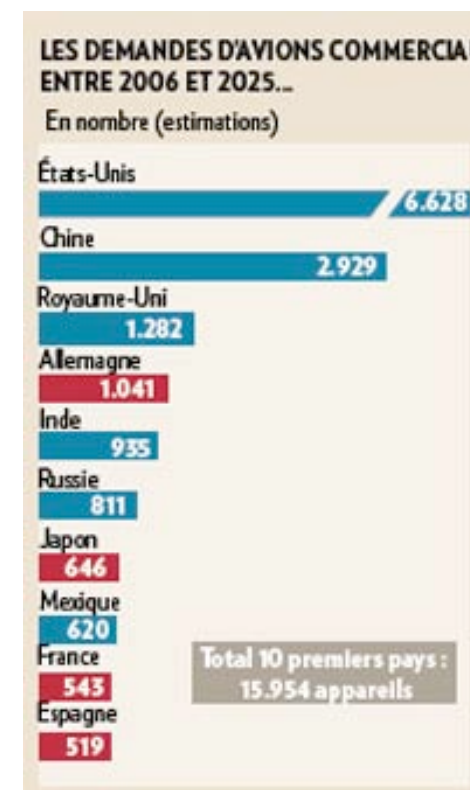
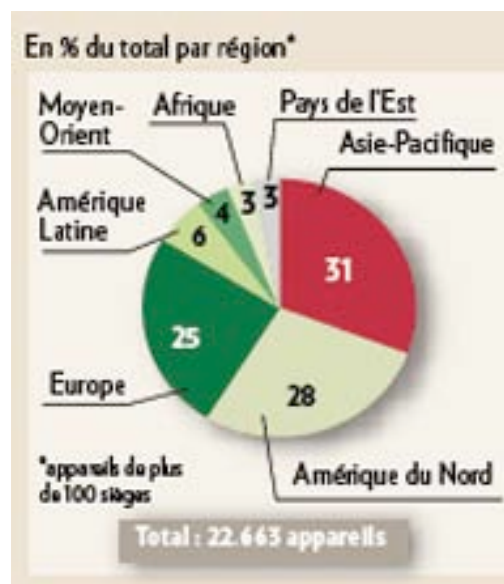
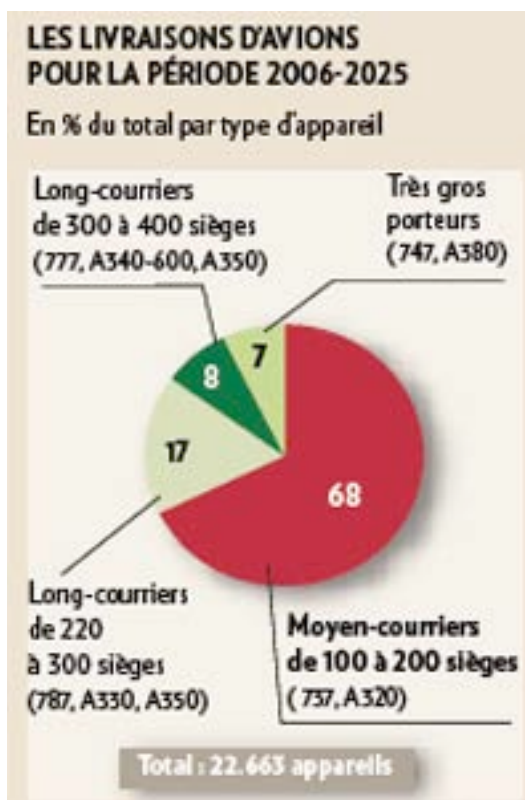
# **Place du transport aérien dans le transport mondial et perspectives d'évolution**

# La flotte aérienne mondiale

- **La flotte d'avions commerciaux de 17 000 avions à ce jour devrait doubler d'ici 2025** (par comparaison il y avait 100 millions de véhicules en 1956, le nombre de voitures en circulation sur la Terre devrait atteindre 1 milliard en 2010)
- **Les perspectives de marché pour les constructeurs d'avions sont excellentes.**
- **Airbus et Boeing ont engrangé la commande de pres de 4.000 avions au cours des deux dernières années, la demande ne parait pas fléchir.**
- Selon Airbus, la flotte mondiale va doubler d'ici 2025 pour atteindre 33.500 appareils. Boeing table sur 36.000 avions.
- Ce boom s'explique par
  - les prévisions de hausse du trafic : 5 % par an pour le trafic passagers et 6 % pour le trafic cargo.
  - Un dynamisme lié à la croissance économique.
  - la libéralisation accrue du secteur qui permet l'apparition de nouvelles compagnies aériennes,
  - le renouvellement des flottes des compagnies. Un mouvement poussé par l'envolée du prix du baril, qui transforme des avions, encore rentables il y a deux ans, en appareils obsolètes. L'achat d'avions très économiques, comme le Boeing 787 ou l'Airbus A350, permet de conjuguer les impératifs économiques aux intérêts écologiques.
  - les effets de la croissance (17.630 avions) et ceux du renouvellement (9.580) se traduiraient par la livraison de 27.210 avions neufs d'ici à 2025.

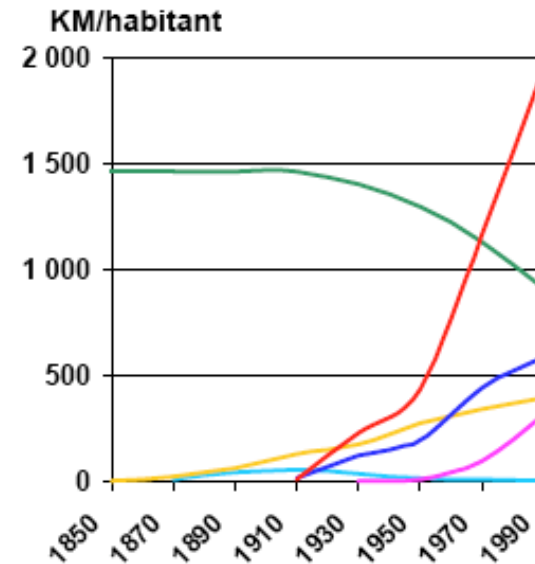
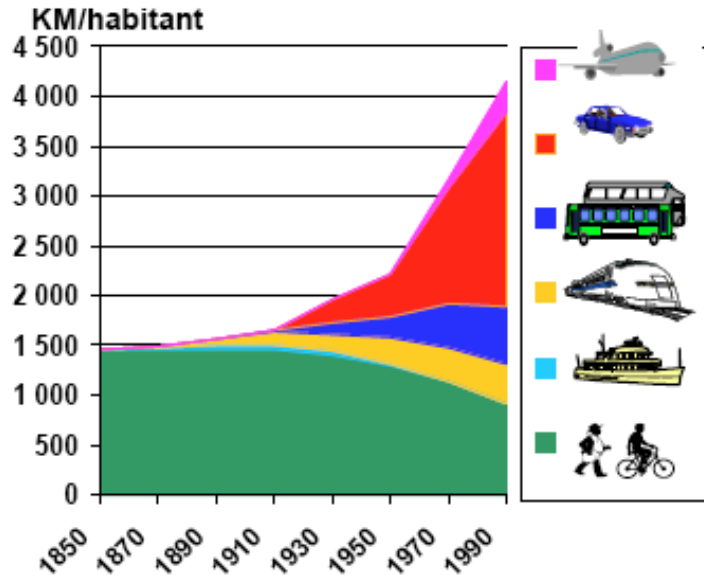
# Perspectives de marché des avions

- 22 600 appareils vendus entre 2006 et 2025



# Croissance du transport mondial

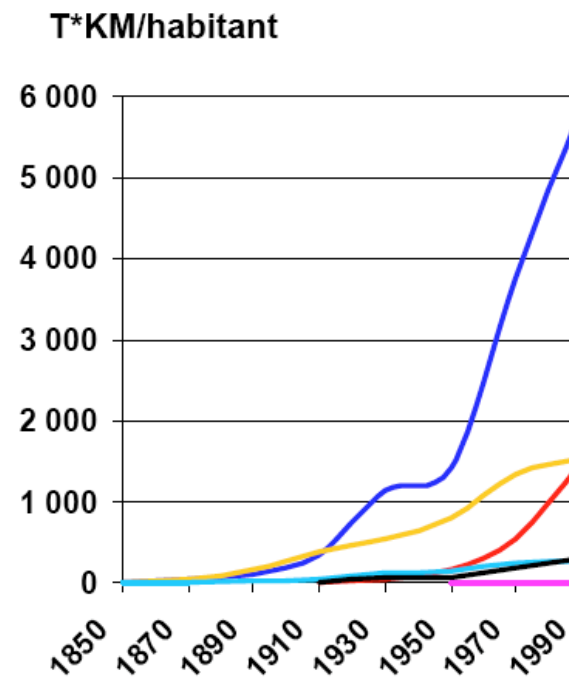
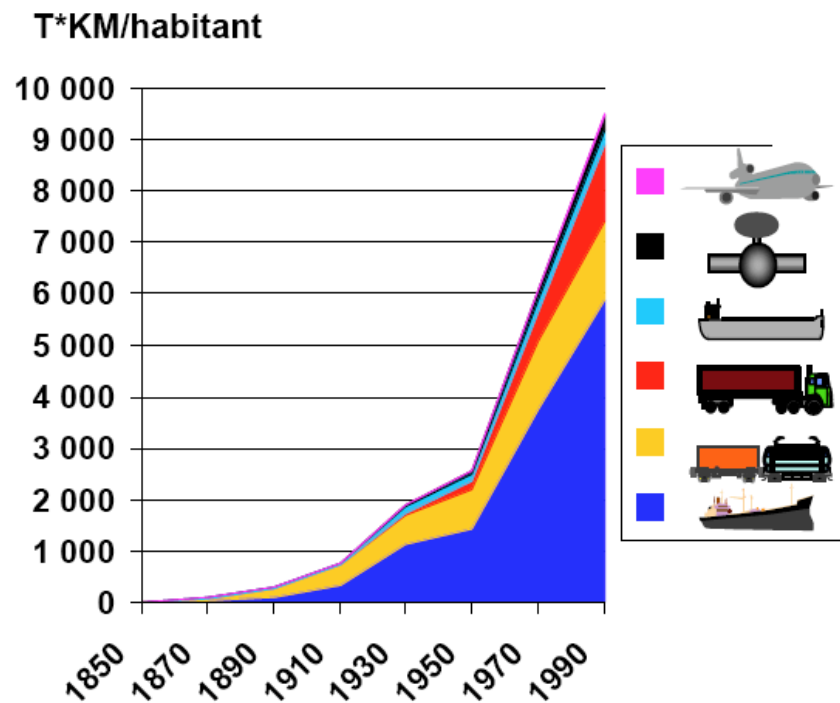
- Le trafic mondial de voyageurs a été multiplié par 3 en un siècle et demi : 1 500 km/an à 4 500 km/an par habitant
- Dans le même temps la population mondiale a été multiplié par plus de 4 (1,35 milliards d'habitants en 1850, 6,08 milliards en 2000)
- La part de l'automobile est dominante en volume et en rythme de croissance
- Le transport aérien représente moins de 10% du total des déplacements



Source: Centre for Sustainable Transportation (Canada).

# Croissance du transport mondial

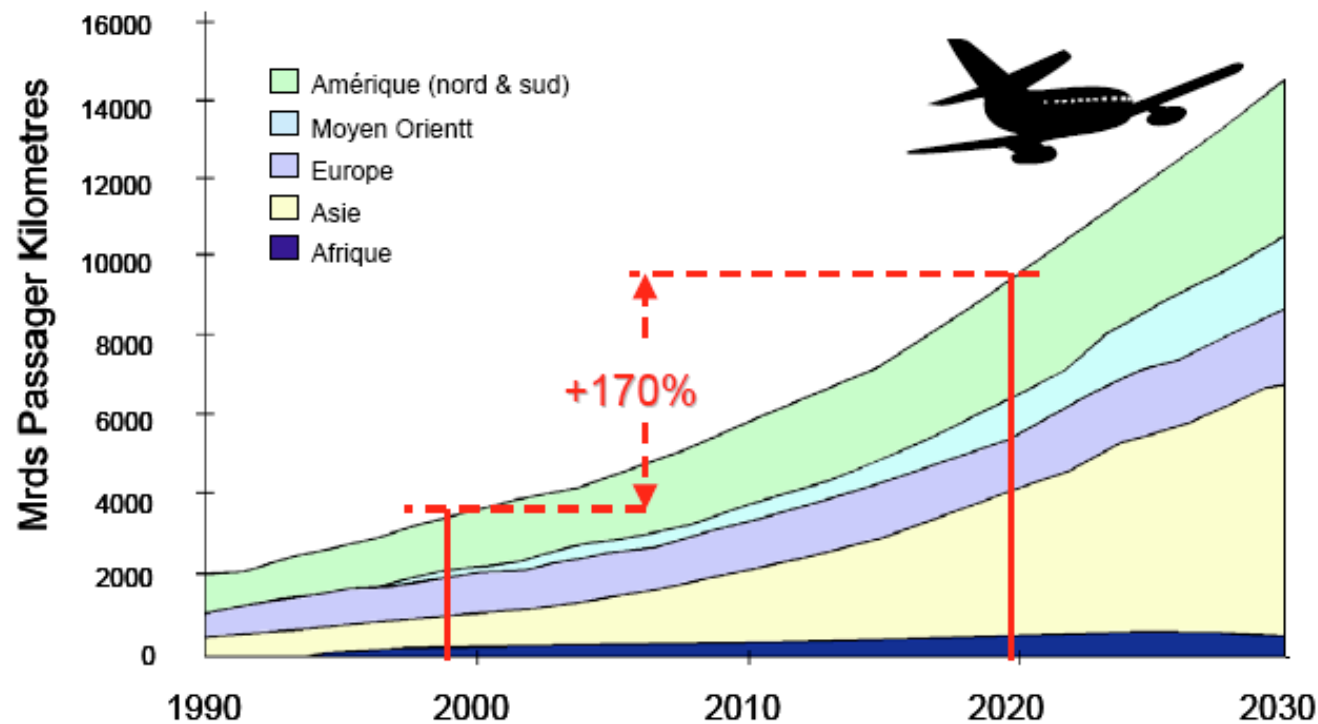
- Le trafic de marchandises a été multiplié par 1000
- De 10 t\*km/an à 10 000 t\*km/an par habitant en un siècle et demi
- La part du fret maritime est dominante en volume et en rythme de croissance



Source: Centre for Sustainable Transportation(Canada).

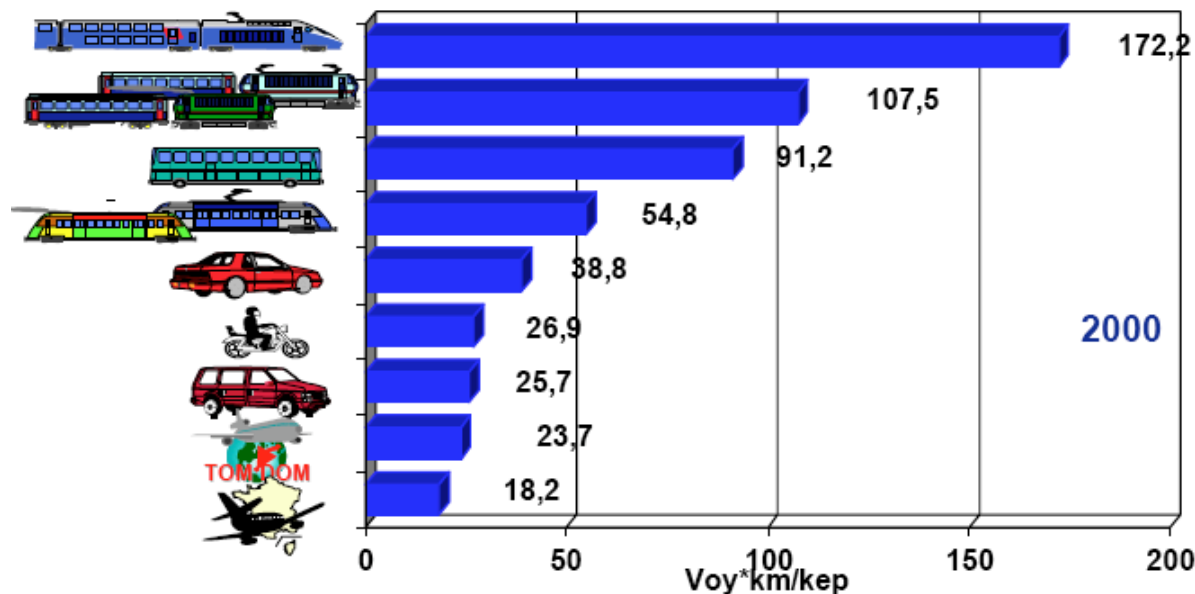
# La croissance du transport aérien

- Le transport aérien de personnes multiplié par 7 en 40 ans ?
  - Impact de la croissance économique de l'Asie
  - Manque de solutions alternatives



# Efficacité énergétique du transport aérien de passagers

- Le transport aérien consomme plus d'énergie que les autres moyens de transport, mais l'écart avec l'automobile est modéré :
  - le très-court courrier (moins de 500 km) gaspille beaucoup d'énergie à monter en altitude pour redescendre aussitôt.
  - le très-long courrier (plus de 10 000 km) consomme plus d'énergie pour transporter le carburant que pour sa charge utile.

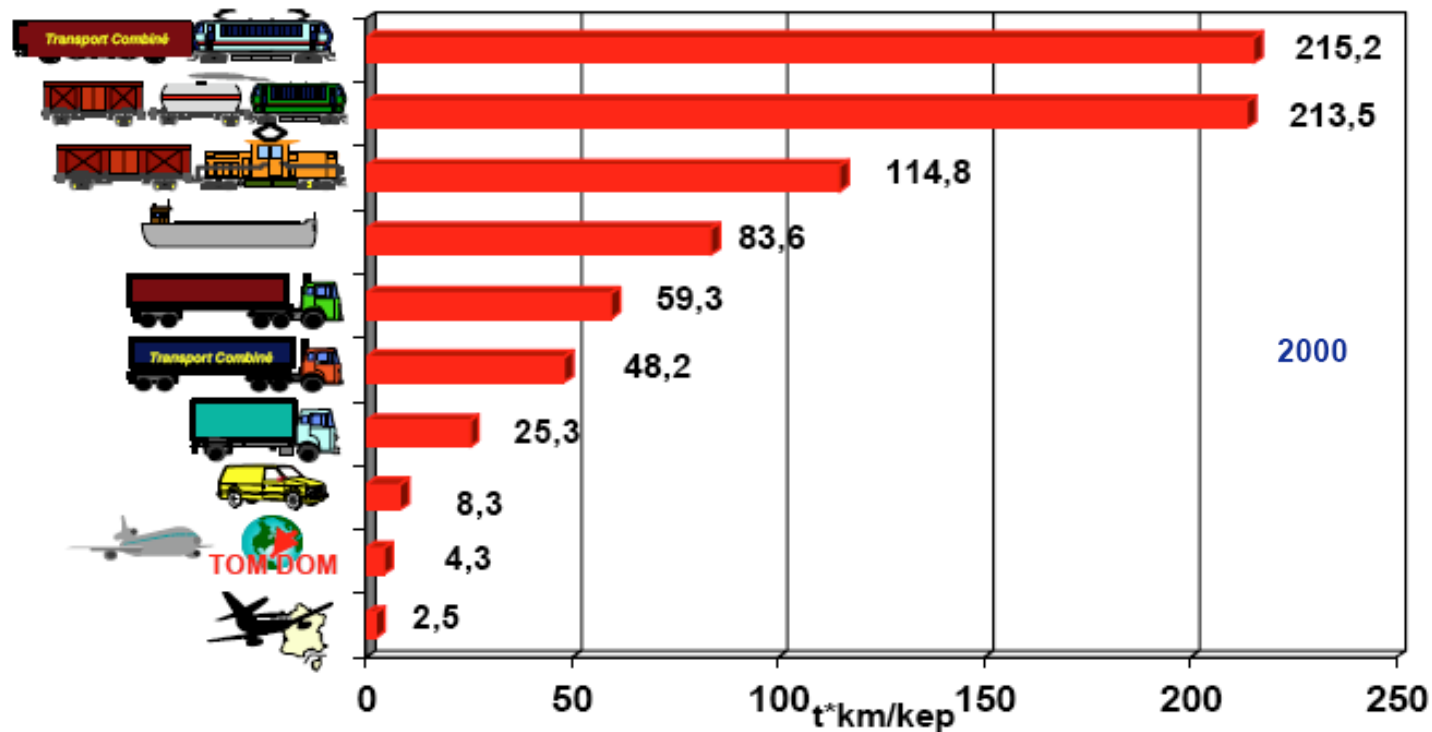


Les chiffres prennent en compte les taux de remplissage effectifs des différents modes équivalence énergétique de l'électricité en énergie finale

Source EXPLICIT / ADEME

# Effacité énergétique du transport aérien de marchandises

- L'efficacité énergétique des transports interurbains de marchandises par avion est médiocre



# Aéronautique civile, Aéronautique militaire

- Les besoins futurs de mobilité des militaires posent des problèmes voisins de ceux posés par le transport aérien civil, bien que la logique stratégique puisse être fortement différente. Le meilleur exemple vient des USA.

## **Military Oil Usage Statistics (Mobility Fuel)**

- The United States Military is the the world's largest fuel-burning entity.
- The U.S. government, as a whole, consumes not quite 2% of all the liquid fuel that the entire U.S. economy uses in a given year (about 160 million barrels of oil per year)
- Of the total U.S. government liquid fuel use, about 97% of that is consumed by the Department of Defense, making that agency the world's single largest fuel-burning entity.
- According to data supplied by the Defense Energy Support Center, the interservice breakdown for fuel use is as follows:
- Department of the Air Force: 53%\_
- Department of the Navy (including Marine Corps): 32%\_
- Department of the Army: 12%
- "Mobility" type fuel, used in aircraft, ships, and vehicles, accounts for almost 75% of total DOD energy consumption. Thus fuel used to heat and power buildings and facilities accounts for about 25% of DOD energy usage. In terms of fuel types, jet fuel accounts for 58% of mobility fuel. (Jet fuel is used in aircraft and nonaircraft platforms, such as tanks, other ground vehicles, and power generators.)

## **A very fundamental concept : "Don't run out of gas."**

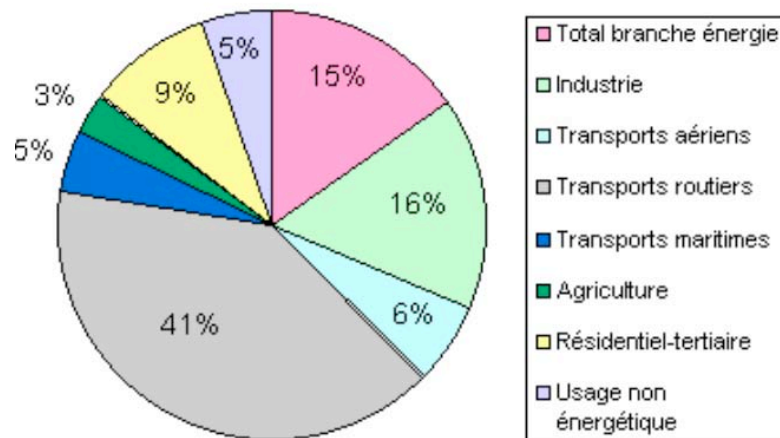
- "Mobility fuel" is usually relegated to the nether world of "logistics."
- Run out of supplies, and you may as well be in Stalingrad or Dien Bien Phu, if not part of an encircled Egyptian army on the Sinai Peninsula.

Source : Whiskey and Gunpowder....\_Byron W. King, October 15th, 2006

# Evolution du transport aérien durant le XXI<sup>e</sup> siècle

- La croissance du transport aérien devrait rester plus faible que celle des transports terrestres
- Sa part relative en termes de consommation énergétique devrait cependant rester de l'ordre de 12% du total de la consommation des transports jusqu'en 2020.

Répartition de la consommation mondiale de pétrole dans le monde en 1999.  
(Source : observatoire de l'énergie)



- » La marge d'amélioration des performances est plus faible que celle des transports routiers (progrès importants accomplis depuis le premier choc pétrolier)
- » La dépendance au pétrole deviendra plus forte que celle des transports terrestres en général
- » En matière d'évolution du tourisme et des loisirs le comportement des pays d'Asie sera déterminant

# A380

Capacité 555 à 853

Longueur 73 m, Envergure 79,8 m, Hauteur 24,1 m

Distance de décollage 2 750 m

Autonomie 15 200 km

Altitude de croisière 13 115 m

Masse à vide (structures, équipements, moteurs)	275 000	49%
Charge au décollage	70 800	13%
Kérosène (310 m <sup>3</sup> max)	215 000	38%
Masse maximale au décollage	560 000	100%

# Le transport aérien: Sensibilité au prix du baril et potentiel d'économies

- Le kérosène est difficilement remplaçable (il doit résister à  $-47^{\circ}\text{C}$ , car en altitude les températures peuvent atteindre  $-60^{\circ}\text{C}$ ).
- Tout hausse du baril se traduit directement par une hausse du coût du kérosène : en 2005, le prix du carburant représentait environ entre un cinquième et un tiers du prix du ticket, selon la destination.
- Il est difficile de définir un prix limite : pour un baril à 200 \$ le surcoût carburant sur un Paris New York (5800 km) en A380 serait de "seulement" 180 Euros (comparé à une référence baril à 65 \$).
- Il existe un potentiel d'économie accessibles tout en conservant le kérosène comme carburant liquide :
  - Structures tout composites et accroissement des rendements moteurs ( Objectifs ACARE: Réduire la consommation de carburant et les émissions de CO2 de 50%, Réduire les émissions de NOx de 80%).
  - l'utilisation de turbopropulseurs entraînant des hélices permet une baisse de la consommation spécifique de 15 à 20%, au prix de quelques inconvénients (nombre de passagers transportables, et rayon d'action réduit, vitesse inférieure d'un tiers, confort du passager dégradé, plus grande sensibilité aux conditions météo, bruit perçu au sol proche de celui d'un A320, des coûts de maintenance plus élevés)
  - Roulage au sol remorqué par des tracteurs.
  - Réduction des attentes (amélioration du contrôle aérien).



# **Transport aérien et crise énergétique**

# Le pic pétrolier : Quand ?

## Peak Oil Predictions

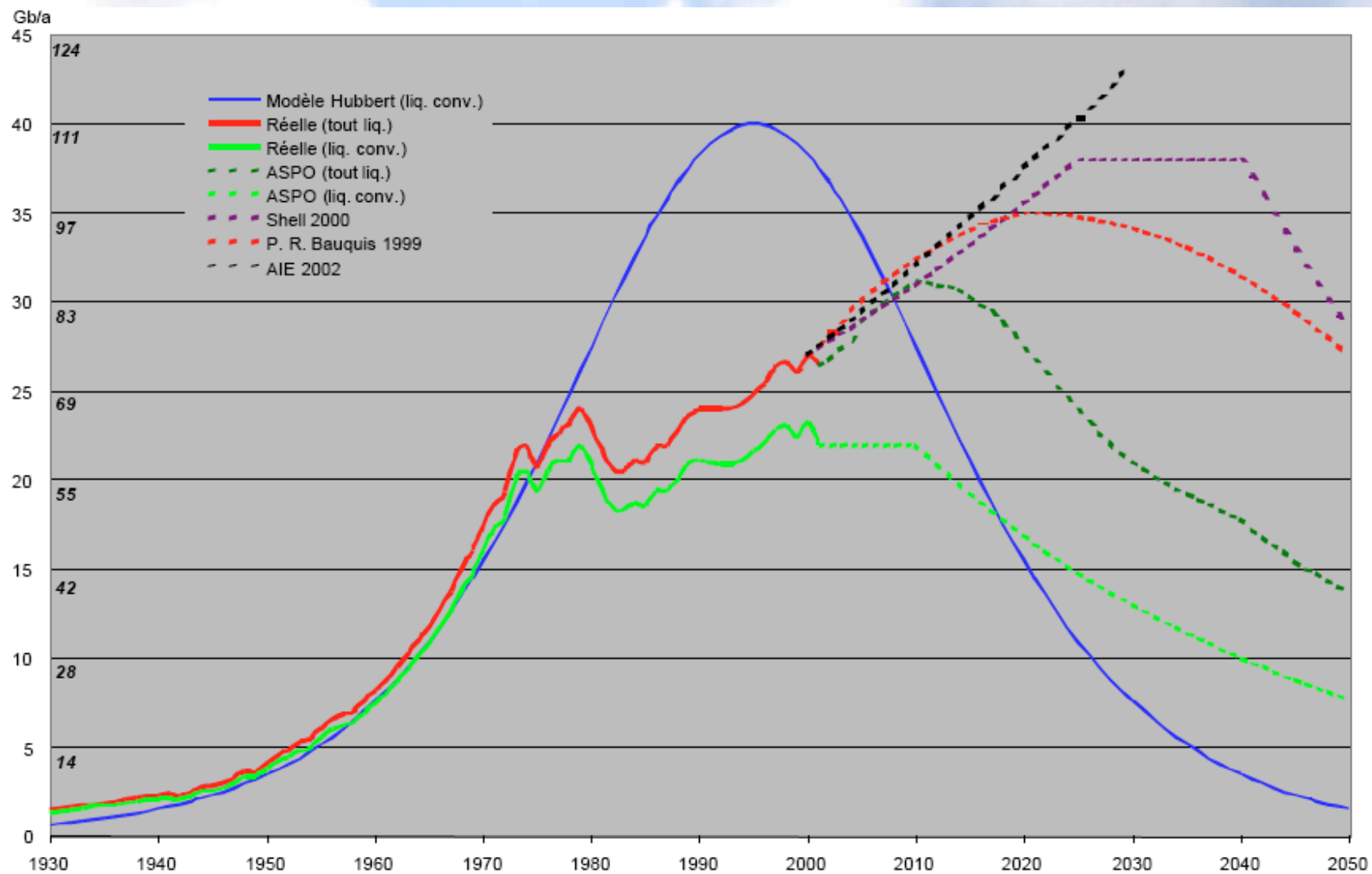
Projected Date	Source of Projection	Background
2006-2007	Bakhtari, A.M.S.	Oil Executive (Iran)
2007-2009	Simmons, M.R.	Investment banker (U.S.)
After 2007	Skrebowski, C.	Petroleum journal editor (U.K.)
Before 2009	Deffeyes, K.S.	Oil company geologist (ret., U.S.)
Before 2010	Goodstein, D.	Vice Provost, Caltech (U.S.)
Around 2010	Campbell, C.J.	Oil geologist (ret., Ireland)
After 2010	World Energy Council	World Non-Government Org
2012	Pang Xiongqi	Petroleum Executive (China)
2010-2020	Laherrere, J.	Oil geologist (ret., France)
2016	EIA nominal case	DOE analysis/ information (U.S.)
After 2020	CERA	Energy consultants (U.S.)
2025 or later	Shell	Major oil company (U.K.)

Table 4 – Peak Oil Predictions<sup>148</sup>

Le scénario « quand et comment » ne fait pas l'unanimité mais l'heure approche. Si on en croit les experts, la conscience du risque climatique ne freinera pas une croissance continue de la consommation mondiale d'énergie.

- Selon l'ASPO (*Association for the Study of Peak Oil and Gas* qui est l'association pour l'étude du pic pétrolier et gazier), les prévisions de production sont surévaluées pour des raisons boursières et politiques. Elle prévoit un pic pétrolier vers 2010 et un pic gazier vers 2020.
- L'ASPO estime à 1 850 milliards de barils les réserves de pétrole conventionnel (réserves existantes ou ayant existées, c'est-à-dire découvertes et/ou exploitées, plus les quantités de pétrole à découvrir). Pour l'USGS, elles sont au moins de 3 000 milliards. Les besoins journaliers étaient en 2003 de 77 millions de baril (soit 28,1 milliards de baril par an), et la consommation totale depuis 1859 est de 900 milliards de barils.
- Le déclin de la production de pétrole sera, jusqu'en 2045, freiné par la poursuite de la croissance de la production du gaz naturel et du charbon, qui remplaceront le pétrole dans bon nombre de ses applications ; le taux de décroissance des hydrocarbures (pétrole et gaz) sera d'environ 0,7% par jusqu'en 2045. Pour maintenir le rythme de croissance de la consommation en énergie tirée des hydrocarbures des dix années précédentes (+2,6%), il sera probablement fait appel aux abondantes réserves de charbon et au développement du nucléaire et des énergies renouvelables.
- **Aux alentours de 2045 que la situation deviendra préoccupante** car la production pétrole + gaz décroîtra brutalement de près de 3% par an, et la situation en terme de CO<sub>2</sub> atmosphérique aura largement empiré.

# Le pic pétrolier : Comment ?



Source : ASPO Uppsala 2002 press release - USGS mean estimates 2000 (Shell) - Auteur

\* Meilleure adéquation d'une courbe de Hubbert basée sur les estimations actuelles des réserves.

PRB/VL

# Vers un second choc pétrolier

- Cause : important changement du niveau des prix de l'ensemble des énergies, lié à la question du pic, puis du déclin de la production pétrolière mondiale.
- Le rythme de la croissance de la demande pétrolière est passée de 6 % par an entre 1950 et 1973 à 1,5 % par an après le premier choc pétrolier.
- Un second choc sera nécessaire, quelque part entre aujourd'hui et 2020, conduisant à s'adapter à l'arrêt de toute croissance de la production d'hydrocarbures liquides naturels.
- Ce choc aura plusieurs conséquences :
  1. Développement à grande échelle les économies de consommation d'énergies sous toutes leurs formes.
  2. Développement au maximum de leur potentiel les énergies renouvelables.
  3. Forte réduction des consommations unitaire des automobiles
  4. Stimulation de la production à grande échelle d'hydrocarbures liquides de synthèse.
  5. Stimulation de la production d'hydrogène à des coûts compétitifs à partir du nucléaire ou des énergies renouvelables,
  6. Stimulation du redémarrage à grande échelle de l'énergie nucléaire au plan mondial, avec de nouvelles filières à partir de 2020 environ.



# **Quelles sources d'énergies pour les transports en 2050 et 2100**

# Evaluation des besoins pour les transports en 2050 et 2100 ?

**D'après Pierre-René Bauquis**, Professeur associé à l'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs (IFP School), Ancien Directeur Stratégie et Planification du Groupe TOTAL un scénario plausible serait le suivant :

- Fin du XXI<sup>e</sup> siècle : la production pétrolière mondiale serait de l'ordre de 1,5 Gtep par an à l'horizon 2100, alors que les seuls transports nécessiteront environ 4 Gtep d'énergie. Il ne peut donc être question d'une simple continuité des sources d'énergies actuelles, avec en particulier l'ensemble du secteur des transports reposant à plus de 95 % sur le pétrole.
- Il n'y a aucun problème à extrapoler jusqu'en 2020 les modes de transports actuels et les consommations d'énergies qui leur sont liées. Mais dès avant 2050 on voit se dessiner un basculement : à cette date, on disposerait d'une production pétrolière mondiale de 3.5 Gtep (du même ordre de grandeur que la production actuelle) alors que les seuls transports en demanderaient presque autant.
- Le secteur des transports ne devrait pouvoir compter au mieux que sur environ 60 % de la production totale à l'horizon 2050, soient quelques 2.5 Gtep et un pourcentage logiquement moindre au delà.
- Les hydrocarbures naturels pourraient encore fournir 1 Gtep d'énergie au secteur des transports à l'horizon 2100. Déjà en 2050, un "déficit" de 1 Gtep pour le secteur des transports serait donc à combler par d'autres sources d'énergies,

# Quelles nouvelles sources d'énergie ?

- Il existe deux grands types de réponses à cette question, qui d'ailleurs pourraient se combiner :
  - Production d'hydrocarbures de synthèse (ou composés chimiques carburants équivalents : alcools, esters, etc..) pour suppléer les déficits.
  - Introduction massive de nouvelles sources ou vecteurs d'énergie dans le secteur des transports, l'hydrogène et l'électricité faisant a priori figure de favoris.

# Les hydrocarbures de synthèse

- trois familles d'hydrocarbures de synthèse, dont deux ont déjà une longue histoire :
  - ceux produits à partir de biomasse (éthanol, méthanol, huiles végétales, EMC, ETBE, etc..) que nous appellerons BTL (Biomass to Liquid).
  - ceux produits à partir d'autres énergies fossiles, filières GTL (gas to liquids) ou CTL (coal to liquids), variantes du procédé Fischer Tropsch ou par l'hydrogénation directe (variantes du procédé Bergius).
  - Une filière « exotique » semble avoir un réel potentiel : celle de la production d'hydrocarbures à partir d'hydrogène produit soit à partir d'énergies renouvelables, soit plus probablement à partir d'énergie nucléaire. C'est ce que l'on pourrait appeler la « carbonisation de l'hydrogène ».

# Limitations des solutions BTL, GTL CTL

- BTL, GTL et CTL sont des familles de procédé bien connues et leur potentiel est régulièrement réévalué. Cependant, toutes connaissent des limitations quant à leur potentiel quantitatif.
  - Pour les biocarburants (BTL), la limitation est liée aux besoins croissants en terres arables et en eau (le rendement net des biocarburants est au mieux de l'ordre de 1 tep/ha/an) et à la concurrence avec les cultures vivrières.
  - Pour les carburants ex-synthèse Fischer Tropsch (GTL, CTL), les limitations sont liées au coût futur des émissions de CO<sub>2</sub>, aux coûts croissants de leurs matières premières (gaz ou charbon).
- Ces procédés sont et resteront "énergivores". Cette contrainte ne sera peut-être pas encore majeure en 2020 mais le deviendra au-delà, bien avant 2050, date approximative à laquelle il faudrait passer du GTL au CTL.
- Le recours massif au GTL ou au CTL pour produire des carburants de synthèse suppose que nous ayons su résoudre à un coût raisonnable la question de la séquestration du CO<sub>2</sub> émis dans les usines de production de ces carburants.
- Compte tenu des ordres de grandeur en cause, ces hydrocarbures synthétiques que nous savons déjà produire nous permettraient au mieux de résoudre la question posée jusque vers 2050

# « L'hydrogène carboné ».

- Une filière d'hydrocarbures de synthèse qu'on pourrait appeler « L'hydrogène carboné » permettrait de produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables ou nucléaires, et de le "carboner" à la source afin d'éviter la coûteuse logistique du transport massif de l'hydrogène, de sa distribution et de son stockage à bord des véhicules.
- Ce concept de la "carbonisation de l'hydrogène" ne semble pas avoir été réellement exploré au cours du dernier demi-siècle, mais il est théoriquement séduisant.
- On peut mettre en oeuvre ce concept par une voie analogue au Fischer Tropsch
- Production de l'oxyde de carbone (par oxydation partielle de charbon ou de biomasses), qu'on combinerait avec de l'hydrogène très probablement d'origine « nucléaire ».
- On peut penser qu'il existera des mises en oeuvre plus efficaces au plan économique, par hydrogénation directe de substances carbonées (successeurs des procédés Bergius développés en Allemagne en parallèle du procédé Fischer Tropsch dans le contexte de préparation à la seconde guerre mondiale).
- L'idéal serait de pouvoir utiliser du CO<sub>2</sub> comme source de carbone, combinant alors séquestration du CO<sub>2</sub> et carbonisation de l'hydrogène.

# Electricité

- Au total si les carburants de synthèse "classiques" ou nouveaux, comme l'hydrogène carboné, venaient à buter sur des limitations technico-économiques, il reste à se tourner vers les grands challengers possibles que sont l'électricité d'une part et l'hydrogène d'autre part.

## L'électricité

- L'aéronautique ne peut y trouver de solution efficace (puissance massique trop faible), cependant son développement pour les transports terrestres soulagera les contraintes pesant sur l'aéronautique en matière de carburant liquide.
- l'obstacle est depuis plus d'un siècle : comment stocker une grande quantité d'électricité dans un véhicule et le temps nécessaire à sa « mise en stock ».
- La mondialisation de solutions hybrides, pour l'essentiel des véhicules automobiles à usage urbain, périurbain ou utilisés pour parcourir de courtes distances, permet d'envisager que le tiers ou le quart du bilan des consommations énergétiques du secteur des transports terrestres soit d'origine électrique, dès 2050. Cette solution devrait se limiter aux voitures particulières (hors longs trajets) et aux véhicules utilitaires spécialisés dans les courts trajets (de 50 à 100 km/jour) à l'exclusion des professionnels grands routiers. Ces véhicules, pour lesquels la solution « hybrides rechargeables » paraît séduisante, représenteraient d'ici 20 ou 30 ans environ 70 à 80 % du parc mondial et de l'ordre des deux tiers des consommations d'énergie.

# Hydrogène

- L'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur énergétique, pour le produire, il faut d'abord utiliser d'autres énergies
- Pour produire massivement de l'hydrogène, il faudra disposer massivement d'électricité ou de calories bon marché non émettrices de CO<sub>2</sub>. Sauf percées inattendues du côté des énergies renouvelables, c'est donc le nucléaire qui devrait fournir l'hydrogène nécessaire à long terme pour assurer les transports de demain.
- Fondamentaux technico-économiques de l'hydrogène,
  - très bonne compacité énergétique par unité de masse,
  - très médiocre compacité énergétique par unité de volume, quelle que soit la forme sous laquelle on le transporte et on le stocke.
- L'hydrogène est et restera un très mauvais vecteur énergétique en matière de transports terrestres.
  - Le transport de l'hydrogène par canalisation coûte environ deux fois plus cher que celui du gaz naturel, qui lui-même coûte environ cinq fois plus cher en termes de logistique que celui des hydrocarbures liquides.
  - l'hydrogène non liquéfié nécessite un contenant dont la masse est de l'ordre de vingt fois celle de l'hydrogène contenu.
  - la mise à bord et le stockage de l'hydrogène dans un véhicule coûtent de l'ordre de cent fois plus cher que ceux d'un carburant classique (essence, gas-oil ou kérosène), quels que soient les modes de stockage retenus (très haute pression, liquide cryogénique, hydrures, nanotubes de carbone).
- L'hydrogène cryogénique pourrait être intéressant en matière de transports aériens (l'atout d'un fort contenu énergétique massique n'est pas très important qu'en aéronautique)

# L'hydrogène cryogénique

- Pour des avions, les principaux problèmes sont :
  - l'encombrement volumique: 20 ou 30 % du volume du fuselage devrait être consacré aux réservoirs d'hydrogène cryogénique,
  - émission d'oxydes d'azote par les turbines à hydrogène,
  - coût du « *boil off* » (évaporation du liquide cryogénique nécessaire pour le maintenir à température constante)
  - coût de l'énergie nécessaire à la liquéfaction
  - Mise en place d'infrastructures d'approvisionnement à l'échelle mondiale

Un problème annexe me paraît être la grande difficulté d'utiliser l'hydrogène cryogénique pour l'aéronautique militaire et comme « mobility fuel » dans les applications de défense

# Conclusions

- Jusqu'en 2020 : Economies de Kérosène classique par amélioration des avions et des systèmes associés (Contrôle aérien, aéroports, multimodalité,...)
- De 2020 2040 : Montée en puissance du BTL, GTL et du CTL (choix identiques à ceux du « Mobility Fuel de la défense)
- 2040 et au delà : filière « hydrogène » associée au nucléaire
  - Soit carbonation de l'hydrogène (conserve la flotte existante et la compatibilité avec le « Mobility fuel »)
  - Soit hydrogène cryogénique