



# EFFICACITES ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DES MODES DE TRANSPORT

Synthèse publique

Janvier 2008

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par DELOITTE

Coordination technique : Éric VIDALENC - Département Transports et Mobilité - Direction Air  
Bruit Efficacité Énergétique - ADEME Valbonne

**Deloitte.**

## Remerciements

L'ADEME remercie le Comité de Pilotage qui a participé à la mise à disposition des données sources et a validé les données exploitées, les méthodes et hypothèses retenues ainsi que les livrables réalisés dans le cadre de cette étude. Des spécialistes des différents modes de transport étudiés ont été conviés afin de valider les hypothèses et méthodes de calcul sur les modes les concernant. Il regroupait les organismes suivants, représentés généralement par les personnes mentionnées :

- MEDAD
  - DGMT (M.Calvino)
  - DRAST (P.Bain)
  - DGAC (D.Romat et A.Grelet)
- INRETS (M.André)
- CCFA (P.L.Debar)
- RATP (B.Dolidze et C.Bouhot)
- SNCF (A.Garde et J.Cosson)
- Air France (M.Delourme)
- FNTR (F.Babe)
- TLF (S.Levesque)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### **L'ADEME en bref**

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## Sommaire

<b>Résumé .....</b>	<b>4</b>
<b>PRESENTATION .....</b>	<b>5</b>
Contexte .....	5
Objectifs de l'étude .....	5
Limites .....	7
Limites d'utilisation des données de l'étude .....	7
Qualité des données .....	7
<b>EFFICACITE ENERGETIQUE ET EMISSIONS SPECIFIQUES DES MODES DE TRANSPORT .....</b>	<b>8</b>
Approche méthodologique .....	8
Calcul de l'efficacité énergétique et des émissions spécifiques associées .....	8
Analyse de l'impact des conditions d'utilisation .....	9
Présentation des résultats .....	9
Efficacité énergétique et émissions de la phase amont .....	9
Efficacité énergétique et émissions spécifiques globales .....	9
<u>Transport de voyageurs</u> .....	10
<i>Echelle urbaine et périurbaine</i> .....	10
<i>Echelle régionale</i> .....	12
<i>Echelle interrégionale</i> .....	14
<u>Transport de marchandises</u> .....	17
Etude de scénarii .....	19
Trajet 1- 3 km en région parisienne .....	19
Trajet 2 – 15 km en Ile-de-France .....	21
Trajet 3 : déplacement province, Paris (120 km) .....	22
Trajet 4 : Transport de voyageurs longue-distance .....	24
<u>Trajet 4a : Créteil- Nice</u> .....	24
<u>Trajet 4b : Nantes-Lyon</u> .....	25
Trajet 5 : Transport de marchandises : Le Havre – Saint Denis .....	27
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>29</b>

## Résumé

La présente étude a permis d'actualiser les données antérieures et d'élargir le périmètre par rapport aux travaux de 2002 puisque les émissions du "puits à la roue" sont considérées, notamment les émissions de CO<sub>2</sub> associées au mode de production d'électricité et à la production de carburant. L'étude a permis de définir les ordres de grandeur qui définissent les efficacités énergétiques (gep) et environnementales (CO<sub>2</sub>) des modes à partir des données de l'année 2005 comme référence. Elle a aussi permis d'identifier des gains potentiels à travers les analyses de sensibilité. Enfin, les scénarii évalués permettent, sur des cas concrets, de comparer des bilans de consommation énergétique en fonction des contraintes des différents modes.

## PRESENTATION

### Contexte

Dans le cadre de l'application du protocole de Kyoto, la France devra stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre (GES) à leur niveau de 1990 à l'horizon 2008-2012. En 2005, le secteur des transports reste le premier poste d'émission des émissions de GES en France avec 25,6%, devant le tertiaire et résidentiel et l'industrie<sup>1</sup>.

Le « plan climat » adopté le 22 juillet 2004, actualisé en 2006, prévoit 8 orientations dont la rationalisation de l'utilisation des modes de transport.

Cette étude, commandée et coordonnée par l'ADEME et menée par Deloitte a été encadrée et revue par un comité de pilotage composé des principaux représentants du secteur des transports en France:

- Ministère en charge des transports (DRAST et DGMT),
- Modes routiers : CCFA (Syndicat professionnel des constructeurs automobiles), FNTR (Fédération Nationale des Transports Routiers) et TLF - (Fédération des entreprises de transport et logistique de France),
- Transports en commun : RATP, SCNF et RFF (Réseau Ferré de France)),
- Transport aérien : DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) et Air France,
- Transport maritime : Armateurs de France et SNCM (Société Nationale Maritime Corse Méditerranée),
- Instituts : IFP (Institut Français du Pétrole) et INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité).

### Objectifs de l'étude

L'étude a pour objectif d'évaluer les efficacités énergétiques et émissions spécifiques<sup>2</sup> de différents modes de transport à partir des données de l'année 2005 en France, de mesurer l'impact des conditions d'utilisation sur ces efficacités et de comparer les efficacités de combinaisons modales de transport en conditions réelles d'utilisation pour des déplacements définis.

Elle actualise et complète les études réalisées antérieurement par les cabinets ENERDATA<sup>3</sup> et EXPLICIT<sup>4</sup>, respectivement pour les années 2001 et 2000.

Elle a porté sur les modes de transport de voyageurs et de marchandises présentés dans le tableau ci-dessous.

Une étude spécifique pour le transport ferroviaire de marchandises est en cours. Elle sera disponible dans le courant de l'année 2008.

---

<sup>1</sup> Source : Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, L'énergie en France, repères édition 2006

<sup>2</sup> En termes d'émissions atmosphériques, lorsque les données sont disponibles

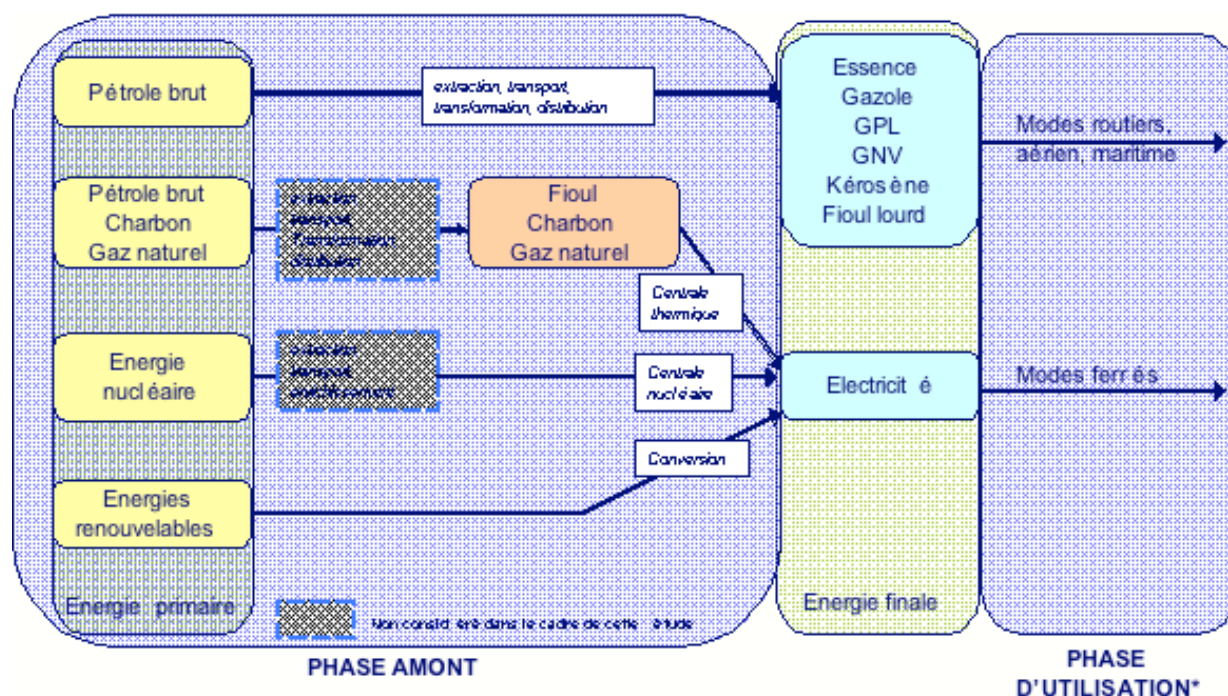
<sup>3</sup> Etude ENERDATA, janv 2004

<sup>4</sup> Etude EXPLICIT, déc 2002

Modes de transport			
Voyageurs		Marchandises	
Routier	VP, VUL	Routier	VUL
	2R		Poids lourds
	Car, bus		
Ferroviaire	Tram (Paris)	Ferroviaire	Non disponible
	Méto (Paris)		Etude TL&A, 2007
	RER		
	TER		
	Corail		
	TGV		
Fluvial	NA	Fluvial	Péniches et pousseurs (D'après étude TL&A, 2006)
Maritime	Non Disponible	Maritime*	Vraquiers liquides, autres ND
Aérien	Régional Navettes/Vols nationaux	Aérien	Europe, DOM TOM, longs courriers

Tableau 1 : modes de transport étudiés dans le cadre de la présente étude

L'étude a intégré autant que possible la phase amont de production de l'énergie en fonction des données disponibles selon les modalités présentées dans le tableau suivant.



\* Ne concerne que les émissions de CO2 associées

5

Le système étudié exclut les phases de construction, de destruction des véhicules de transport, de construction et entretien des infrastructures et de traitement des déchets générés par les centrales de production d'électricité. Sont également exclues les phases de manutention, dans le cas du transport de marchandises.

L'étude considère uniquement les impacts directs des émissions de gaz à effet de serre ; le forçage radiatif imputable aux autres émissions du transport aérien n'est pas pris en compte dans le cadre des travaux réalisés<sup>5</sup>.

## Limites

### Limites d'utilisation des données de l'étude

**Cette étude permet d'appréhender des efficacités énergétiques et émissions de CO<sub>2</sub> des différents modes de transport dans un contexte d'utilisation donné (origine de l'électricité, taux d'occupation...) pour l'année 2005 en France. Par conséquent, les résultats ne peuvent être transposables dans un autre contexte et ne peuvent être utilisés à des fins prospectives et de comparaison avec d'autres systèmes de transport non présentés dans cette étude.**

### Qualité des données

Les données d'utilisation fournies par les entreprises de transport pour la réalisation de cette étude n'ont pas fait l'objet de travaux de revue ni d'audit pour apprécier leur véracité<sup>6</sup>. Elles relèvent de la responsabilité des entreprises qui les ont fournies.

Les résultats obtenus permettent de définir des ordres de grandeur pour les différents modes de transport, ils ne peuvent dans la majorité des cas être considérés comme la valeur référence pour un mode de transport du fait des incertitudes provenant :

- du manque de données disponibles, nécessitant l'utilisation de données antérieures ou l'utilisation d'hypothèses (validées par l'ADEME et le comité de pilotage),
- d'une incohérence constatée entre certaines données et ainsi du niveau d'incertitude associé à certaines données sources,
- d'une faible représentativité pour certains modes de transport en particulier le transport maritime et l'absence de données concernant les transports en commun ferrés présents en province (Tram, val, métro).

Lorsque des incertitudes sont à considérer, cela est précisé dans les parties de la synthèse et du rapport concerné.

Le Comité de Pilotage a participé à la mise à disposition des données sources et a validé les données exploitées, les méthodes et hypothèses retenues ainsi que les livrables réalisés dans le cadre de cette étude. Des spécialistes des différents modes de transport étudiés ont été conviés à participer au Comité de Pilotage qui s'est réuni trois fois en 2007 afin de valider les hypothèses et méthodes de calcul sur les modes les concernant. Il regroupait les organismes suivants, représentées généralement par les personnes mentionnées :

- |                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| - ADEME (E. Vidalenc)          |                                  |
| - MEDAD                        | - RATP (B. Dolidze et C. Bouhot) |
| o DGMT (M. Calvino)            | - SNCF (A. Garde et J. Cosson)   |
| o DRAST (P. Bain)              | - Air France (M. Delourme)       |
| o DGAC (D. Romat et A. Grelet) | - FNTR (F. Babe)                 |
| - INRETS (M. André)            | - TLF(S. Levesque)               |
| - CCFA (PL. Debar)             |                                  |

<sup>5</sup> L'impact de ces émissions sur le changement climatique pourrait doubler voire quadrupler l'impact du CO<sub>2</sub> émis selon l'ADEME et l'IEC.  
<sup>6</sup> Les données fournies par la RATP proviennent de l'étude PREDIT validée par l'ADEME,

# EFFICACITE ENERGETIQUE ET EMISSIONS SPECIFIQUES DES MODES DE TRANSPORT

## Approche méthodologique

### Calcul de l'efficacité énergétique et des émissions spécifiques associées

Dans un premier temps, l'efficacité énergétique et les émissions spécifiques ont été estimées pour la production de l'énergie (phase amont) à partir d'informations provenant d'Analyse de Cycles de Vie des carburants et des niveaux de rendement des différents modes de production d'électricité. Seules les émissions imputables à la production d'électricité et au transport de l'électricité sont considérées.

Ensuite l'efficacité énergétique et les émissions spécifiques de la phase utilisation ont été calculées puis multipliées par les résultats de la phase amont pour obtenir les efficacités énergétiques et les émissions globales en gep/voy.km ou gep/t.km et en voy.km/kep ou t.km/kep.

Excepté pour l'ensemble des modes de transports routiers, les efficacités énergétiques ont été calculées à partir des consommations énergétiques et des données de trafic fournies par les entreprises.

Pour les modes de transport routier, la méthodologie mise en place par l'ADEME a été reprise. Cette méthode repose sur la ventilation du trafic présenté par la Commission des Comptes des Transports de la Nation des différents modes de transport et des consommations énergétiques associées.

Les déplacements de voyageurs sont segmentés, comme dans l'étude ENERDATA<sup>7</sup>, en trois échelles géographiques distinctes - zone urbaine/périurbaine, régionale et interrégionale - afin de rendre compte des différentes contraintes d'utilisation et de trafic. Les consommations unitaires des véhicules sont simulées à partir des modèles issus du programme de recherche européen ARTEMIS, version 2007.

Dans le cadre de l'étude, les émissions spécifiques considérées sont l'ensemble des gaz à effet de serre (GES) lors de la phase amont et les émissions de CO<sub>2</sub> lors de la phase d'utilisation pour l'ensemble des modes de transport ainsi que les émissions de particules, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et d'hydrocarbures de la phase de production des carburants et de leur utilisation uniquement pour les modes de transport routier. Ces dernières émissions sont calculées à l'aide du modèle ARTEMIS, à partir des caractéristiques du véhicule (par exemple, cylindrée, classe anti pollution), des vitesses moyennes et des teneurs en soufre des carburants utilisés.

Mode de transport	Emissions considérées			
	Gaz à effet de serre		Autres émissions	
	Amont	Utilisation	Amont	Utilisation
Véhicules particuliers	tous GES	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub>
Deux-roues	tous GES	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , HC, SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , HC, SO <sub>2</sub>
Véhicules utilitaires légers	tous GES	CO <sub>2</sub>	ND*	
Autobus	tous GES	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub> (sauf minibus)	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub> (sauf minibus)
Autocars	tous GES	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub>
Poids lourds	tous GES	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , particules, HC, SO <sub>2</sub>
Ferroviaire (trains, métros, trams)	tous GES pour le gazole, CO <sub>2</sub> pour l'électricité	CO <sub>2</sub>	ND*	
Aérien	tous GES	CO <sub>2</sub>	ND*	
Maritime	tous GES	CO <sub>2</sub>	ND*	
Fluvial	tous GES	CO <sub>2</sub>	ND*	

\* modèle ARTEMIS non disponible

<sup>7</sup> Etude ENERDATA, 2004



Tableau 2 : émissions spécifiques considérées pour les différents modes de transport

## Analyse de l'impact des conditions d'utilisation

Les conditions d'utilisation des modes de transport impactent les efficacités énergétiques et les émissions associées. Un certain nombre de paramètres de sensibilité (vitesse et consommation, taux d'occupation, nature du carburant, origine de l'électricité...) ont été étudiés pour chaque mode de transport dans le but d'identifier les paramètres les plus influents, lorsque les données sources le permettent.

Il ressort que l'origine de l'électricité utilisée par les modes de transports et le taux d'occupation ou de chargement sont les deux paramètres ayant la plus forte incidence sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Par conséquent, seuls les résultats sur ces deux paramètres seront présentés.

Les taux d'occupation (ou de chargement) considérés sont les taux limites observés de manière occasionnelle en conditions d'usage. Par ailleurs, le taux d'occupation effectif des véhicules 2005 est l'information qui présente généralement le plus haut niveau d'incertitude dans le calcul de l'efficacité énergétique des modes de transport ; il convient donc de considérer les variations induites comme représentatives de la réalité des performances possibles des modes de transport étudiés en fonction de leurs conditions d'utilisation.

En fonction du type de centrale électrique, l'électricité peut être affectée d'une « intensité carbone » très variable. L'analyse de sensibilité a retenu deux scénarii : une électricité ayant engendré peu d'émissions de CO<sub>2</sub>, produite uniquement par EDF (48 gCO<sub>2</sub>/kWh en 2005), et une électricité ayant généré une émission moyenne de CO<sub>2</sub>, correspondant à la moyenne du marché européen de l'électricité (344 gCO<sub>2</sub>/kWh en 2005, selon l'Agence Internationale de l'Energie, pour l'UE-15).

## Présentation des résultats

### Efficacité énergétique et émissions de la phase amont

Le tableau suivant reprend le bilan des rendements et émissions considérées dans la suite de l'étude.

	Rendement de conversion	Emissions de GES associées en CO <sub>2</sub> éq
Essence 2005	0,87	0,53 tCO <sub>2</sub> /tep
Gazole 2005	0,86	0,61 tCO <sub>2</sub> /tep
Electricité EDF	0,36	0,56 tCO <sub>2</sub> /tep <sup>8</sup>
Electricité achetée par SNCF	0,36 <sup>9</sup>	1,18 tCO <sub>2</sub> /tep

Tableau 3 : bilan du rendement de conversion des énergies et émissions de GES associées.

### Efficacité énergétique et émissions spécifiques globales

Les graphes suivants présentent l'efficacité énergétique et les émissions de gaz à effet de serre globales, aux différentes échelles géographiques. En fonction des données disponibles, certaines catégories de véhicules ont été distinguées au sein d'un même mode de transport (par exemple,

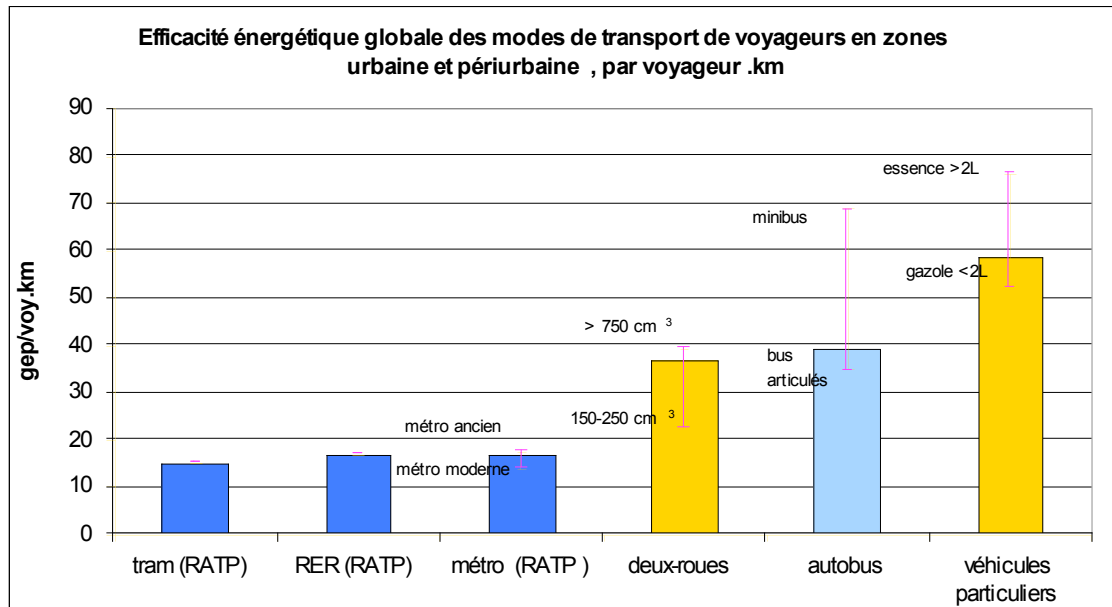
<sup>8</sup> Facteur d'émission moyen associé à la production d'électricité, RADD EDF 2005

<sup>9</sup> Par défaut, le rendement de conversion est celui d'EDF.

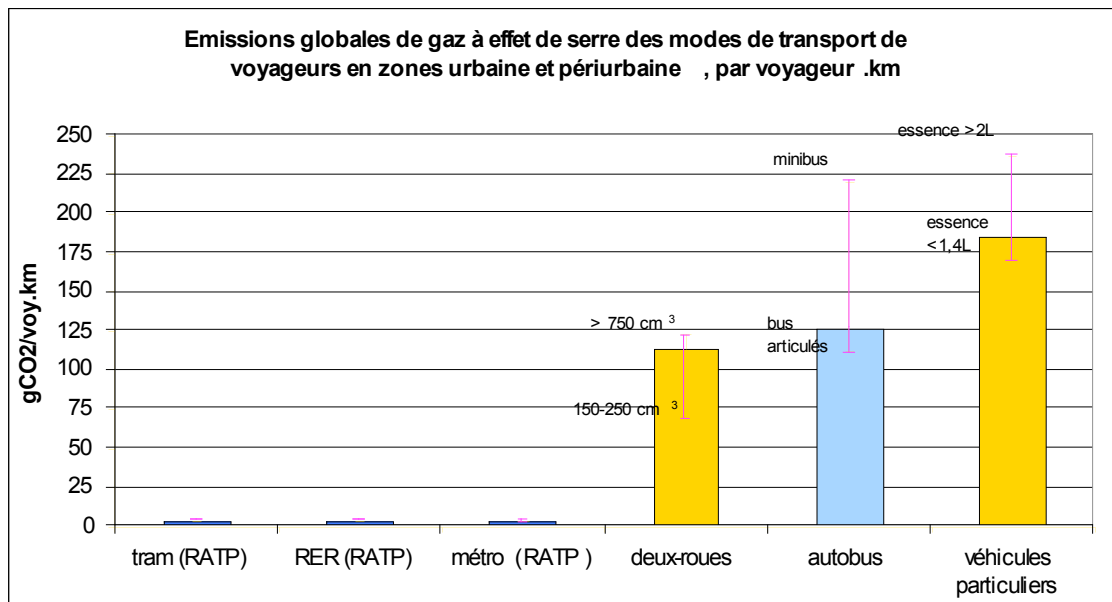
minibus et bus articulés, classes de cylindrées des deux-roues et véhicules particuliers,...) à l'aide de barres représentant les valeurs extrêmes observées pour les catégories définies.

Transport de voyageurs

*Echelle urbaine et périurbaine*



Graph 1 : efficacité énergétique globale des modes de transport aux échelles urbaines et périurbaines



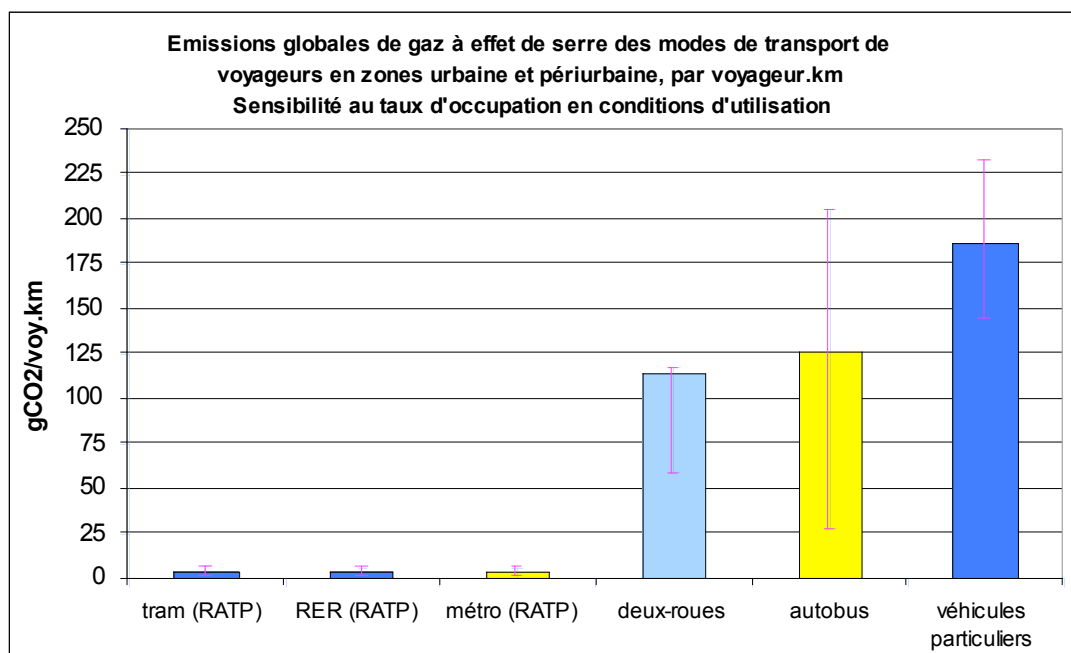
Graph 2 : émissions de GES globales des modes de transports aux échelles urbaines et périurbaines

Les émissions de CO<sub>2</sub> globales des transports en commun ferrés sont très faibles, elles ne correspondent qu'à la phase de production de l'électricité. Or, la RATP consomme uniquement de l'électricité produite par EDF qui présente un facteur d'émission faible par kWh produit.

L'efficacité énergétique globale (du puits à la roue) des modes de transport en zones urbaines et périurbaine est comparable pour l'ensemble des modes de transport en commun ferrés. Elle est en revanche inférieure pour les autobus qui ont une efficacité comparable à celle des deux roues motorisés. L'efficacité énergétique des minibus est comparable à celle des grosses cylindrées des véhicules particuliers.

Les émissions de gaz à effet de serre des modes de transport ferrés en zones urbaines et périurbaine sont significativement inférieures à celles des autres modes de transport. Les écarts observés pour l'efficacité énergétique sont conservés au niveau des émissions de GES pour les autres modes.

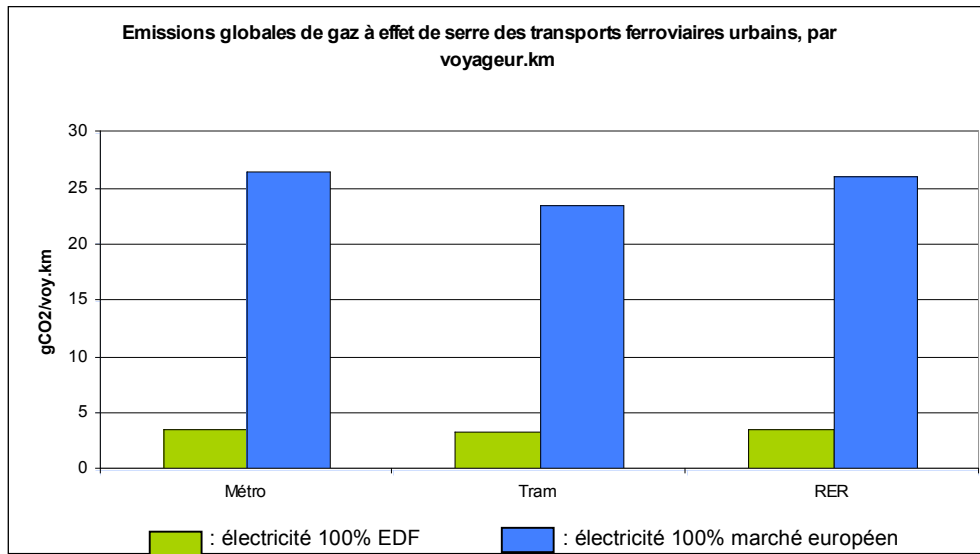
L'impact des variations des taux d'occupation sur les émissions de GES des modes de transport utilisés aux échelles urbaines et périurbaine en 2005 est présenté dans le graphe suivant :



Graphe 3 : comparaison des émissions globales de GES des différents modes de transport de voyageurs en fonction du taux d'occupation

Les émissions associées au transport en métro, RER et tram calculées en considérant un taux d'occupation de 15% sont encore très inférieures à celles des deux-roues avec deux occupants, des autobus dont 75% des places sont occupés (tous types de bus confondus) et des véhicules particuliers. En zone urbaine et périurbaine, parmi l'ensemble des modes routiers, l'autobus est le mode de transport qui engendre les émissions les plus basses à taux d'occupation élevé. Dans les conditions d'usage, et toutes choses égales par ailleurs, les véhicules particuliers sont plus émetteurs que les deux-roues.

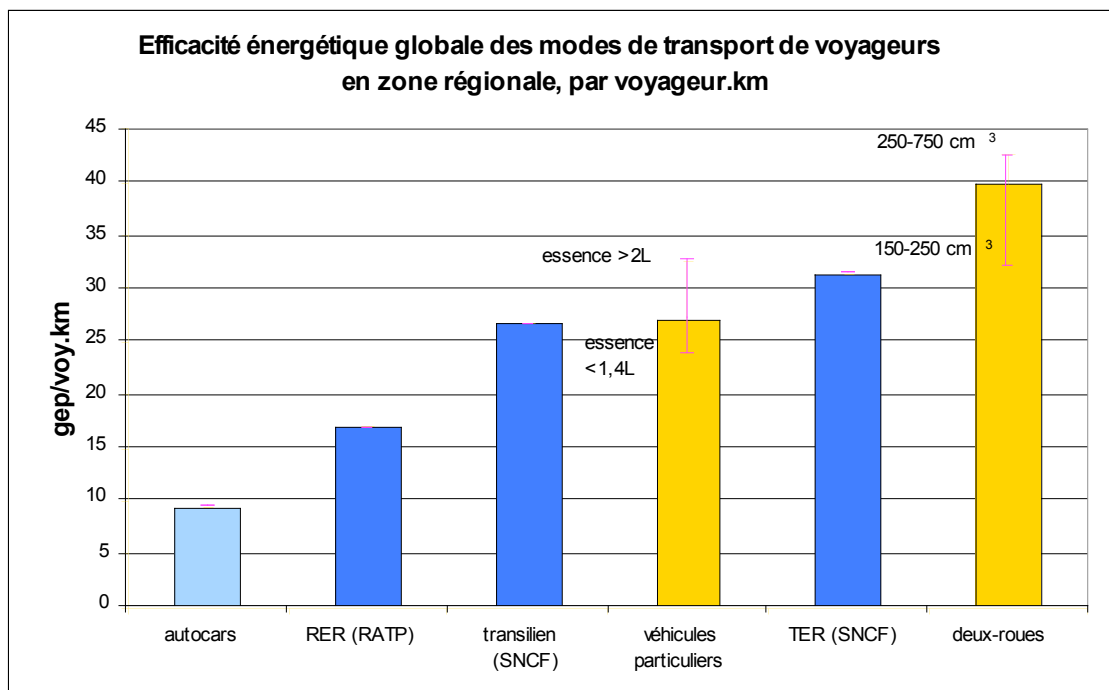
L'origine de l'électricité utilisée étant le facteur le plus déterminant pour les modes ferrés, le graphe suivant présente l'impact de l'utilisation d'électricité moyenne européenne sur les émissions de CO<sub>2</sub> des modes ferrés urbains. Ces calculs sont effectués sur la base des performances des transports opérés à Paris.



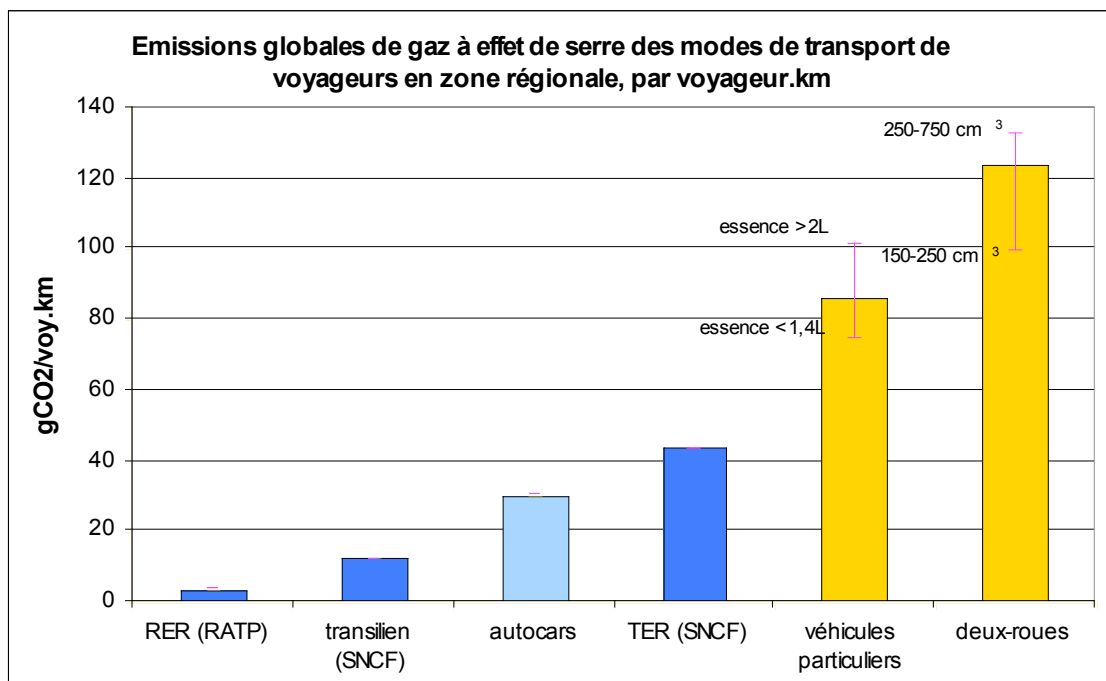
Graph 4 : comparaison des émissions globales de GES des transports ferroviaires urbains en fonction de l'origine de l'électricité

Dans le cas d'une substitution de l'électricité provenant d'EDF par de l'électricité correspondant à la moyenne européenne, les émissions de CO<sub>2</sub> associées au transport d'une personne par les modes ferrés deviennent comparables à celles des autobus utilisés dans des conditions optimales en termes de taux d'occupation (75%).

#### Echelle régionale



Graph 5 : efficacité énergétique globale des modes de transport à l'échelle régionale

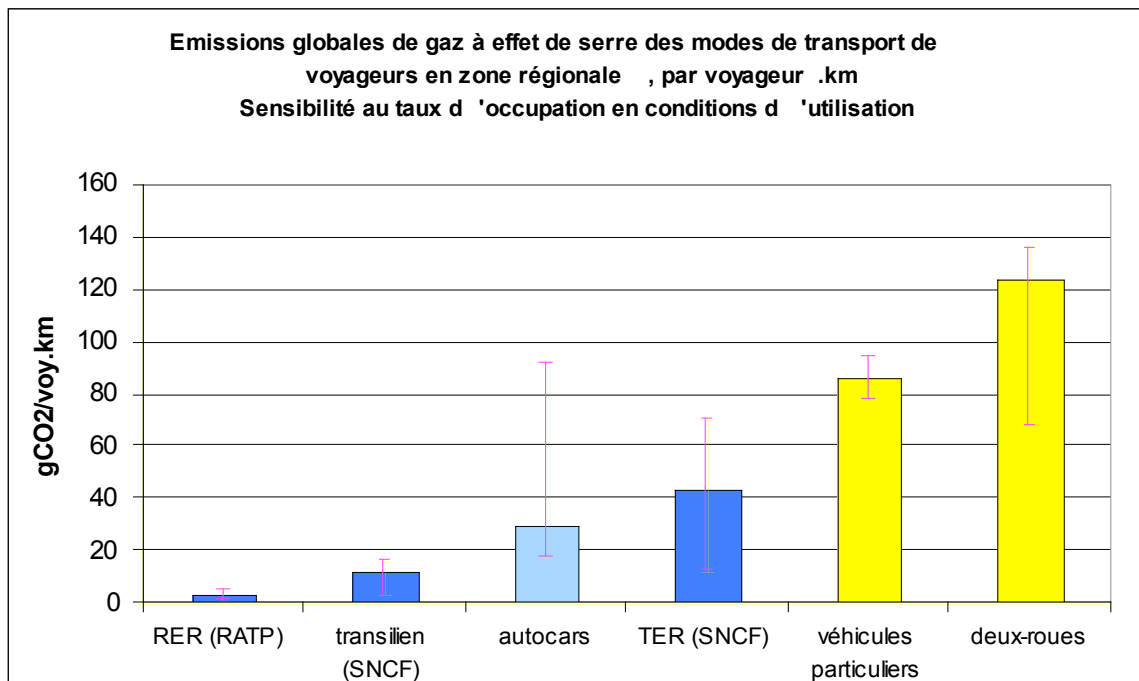


Graph 6 : émissions de GES globales des modes de transports à l'échelle régionale

L'efficacité énergétique moyenne par voyageur transporté des autocars, en zone régionale, est meilleure que celle des autres modes, le taux d'occupation moyen observé en France en 2005 étant très élevé (environ 66%). En effet, le transport par autocars au niveau régional correspond à une offre de service différente de celle offerte par les transports publics. Les deux roues motorisés, qui présentaient une bonne performance au niveau urbain, ont une performance énergétique dégradée au niveau régional. Les véhicules particuliers sont ainsi plus efficaces que les deux roues motorisés à cette échelle géographique.

Les émissions de gaz à effet de serre des modes de transport ferrés en zone régionale sont inférieures aux émissions associées aux transports routiers individuels, toutefois le TER et l'autocar présentent des émissions comparables à cette échelle géographique.

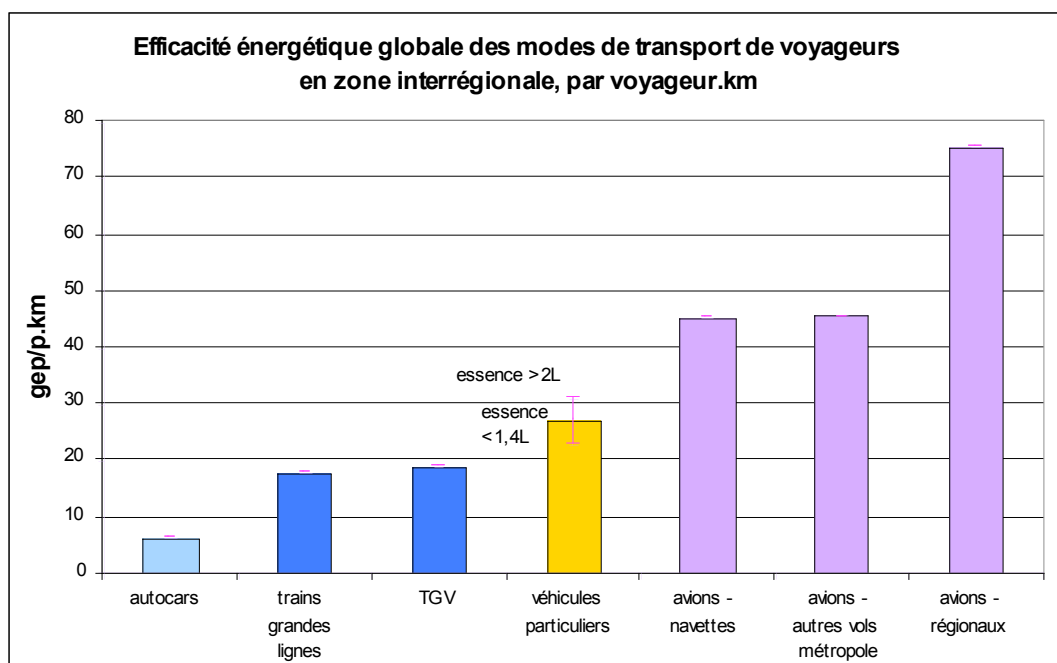
Le graphe suivant présente la sensibilité des émissions de CO<sub>2</sub> par voyageur en fonction du taux d'occupation des différents modes de transport.



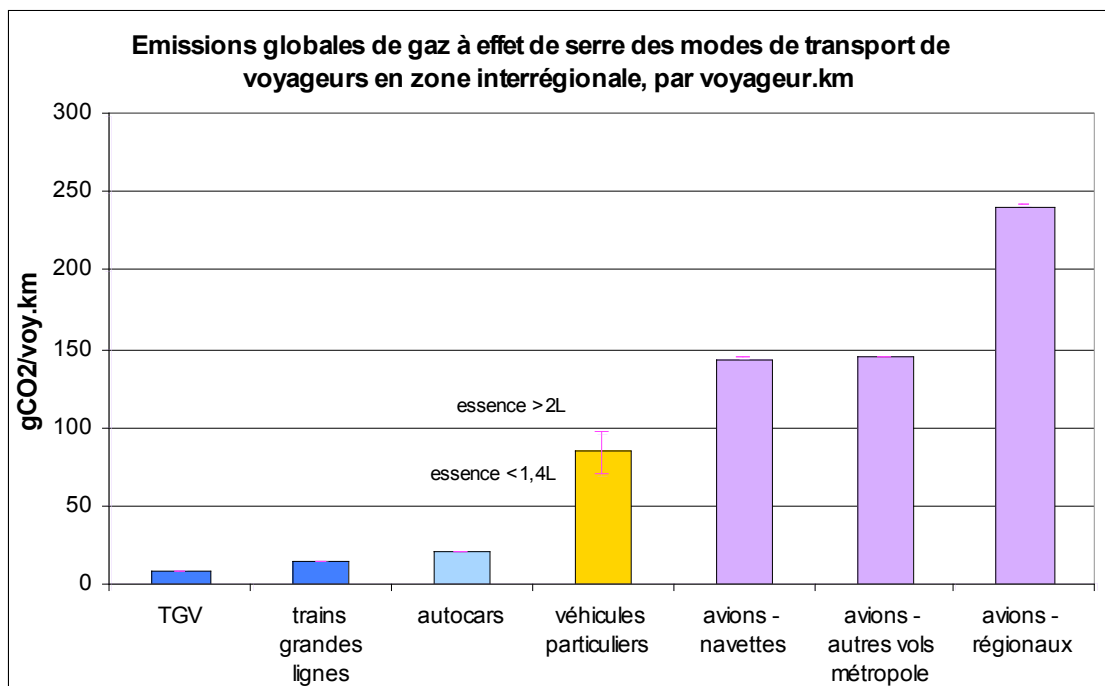
Graph 7 : émissions globales de GES des différents modes de transport de voyageurs en fonction du taux d'occupation

Les émissions de CO<sub>2</sub> associées au transport par autocars sont extrêmement corrélées au taux d'occupation. En cas de taux d'occupation réduit, l'autocar devient moins performant que le TER moyen, les émissions pouvant même être comparables à celles des véhicules particuliers. Les deux roues motorisés présentent également une très importante sensibilité au taux d'occupation, les émissions des deux roues motorisés étant comparables voire inférieures aux véhicules particuliers pour des taux d'occupation supérieurs.

### Echelle interrégionale



Graph 8 : efficacité énergétique globale des modes de transport en zone interrégionale



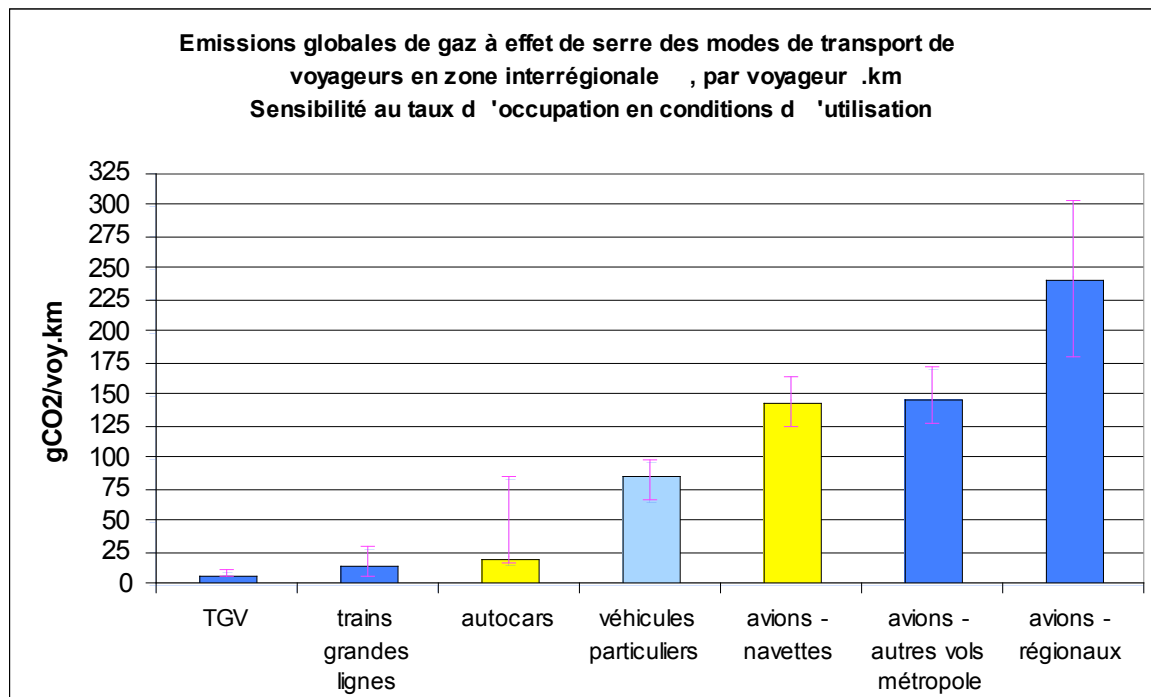
Graph 9 : comparaison des émissions de GES globales des modes de transports à l'échelle interrégionale

L'efficacité énergétique des autocars en zone interrégionale est supérieure à celle des autres modes de transport, toutefois les cars dédiés au trajet interrégional correspondent à des services dédiés qui ne sont pas comparables à ceux assurés par les autres modes.

Les trains Corail (trains grandes lignes) et les TGV ont des efficacités énergétiques comparables, supérieures à celle des véhicules particuliers et avions. Les vols régionaux présentent une efficacité énergétique dégradée comparée aux autres vols réalisés à l'échelle métropolitaine.

Les émissions de gaz à effet de serre des TGV et trains Corails sont significativement inférieures à celles des autres modes, excepté les autocars. Le TGV, fonctionnant à l'électricité à contenu en CO<sub>2</sub> modéré, les émissions associées sont inférieures à celles des trains grandes lignes qui utilisent du gazole, à facteur d'émission en CO<sub>2</sub> élevé et de l'électricité.

Le graphe suivant présente la sensibilité des émissions de CO<sub>2</sub> par voyageur en fonction du taux d'occupation des différents modes de transport.



Graphie 10 : comparaison des émissions globales de GES des différents modes de transport de voyageurs en fonction du taux d'occupation

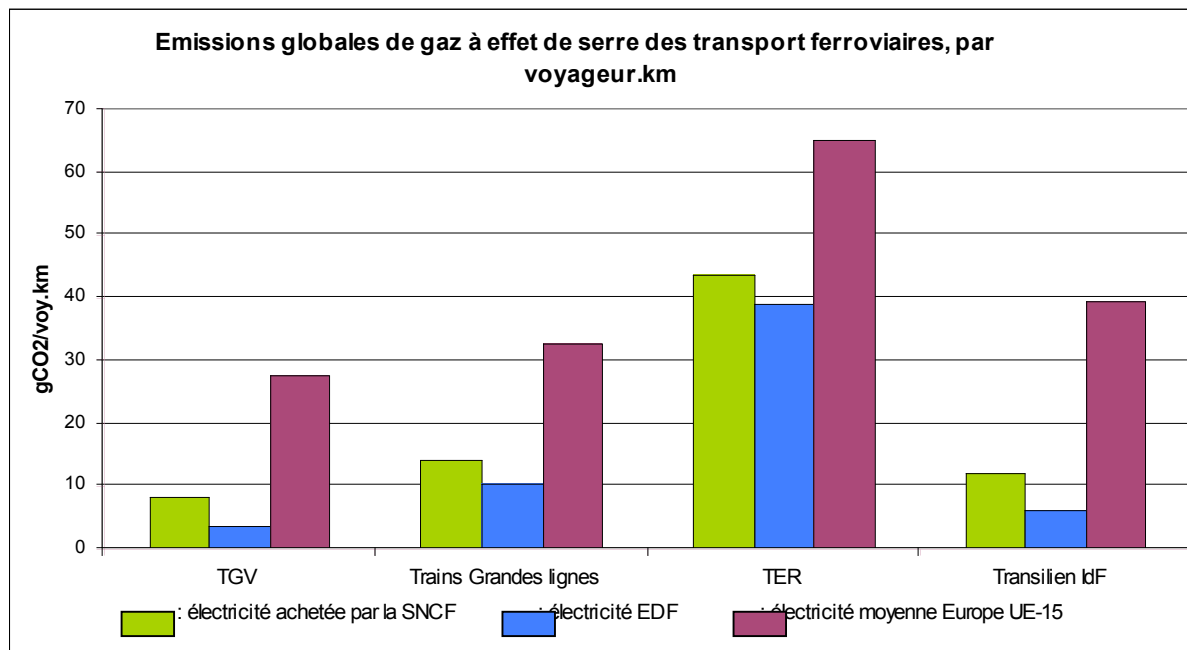
En zone interrégionale, l'avion est le mode de transport engendrant les émissions de gaz à effet de serre supérieures aux autres modes. Les trains, en particulier le TGV, constituent les modes les moins émetteurs, toujours plus compétitifs que les véhicules particuliers avec un taux d'occupation moyen de 2,17 (minimum de 1,9 et maximal de 2,8 passagers/ véhicules en zone interrégionale). Toutefois, des recouvrements de performances peuvent exister en trains grandes lignes et les autocars. Ainsi, les émissions des trains grandes lignes chargés à 15% sont supérieures à celles des autocars chargés à 80%, toutes choses égales par ailleurs<sup>10</sup>. Au contraire, les émissions des autocars chargés à 15% engendrent des émissions supérieures aux véhicules particuliers comportant 2,8 occupants.

Les émissions d'un véhicule particulier occupé uniquement par le conducteur sont supérieures aux émissions générées par un voyageur utilisant les navettes et autres vols métropole (aux taux d'occupation moyens et même avec le taux d'occupation minimal en usage). En revanche, la voiture avec un seul occupant est plus performante que les vols régionaux, sauf si ceux-ci ont un taux d'occupation élevé.

De la même manière qu'à l'échelle urbaine et périurbaine, l'origine de l'électricité est un facteur déterminant pour les émissions de CO<sub>2</sub> des modes ferrés, comme le montre le graphe ci-dessous. Ces calculs sont effectués sur la base des performances des transports réalisés par les trains de la SNCF.

<sup>10</sup> On ne tient pas compte de l'impact du taux d'occupation sur la consommation du véhicule.

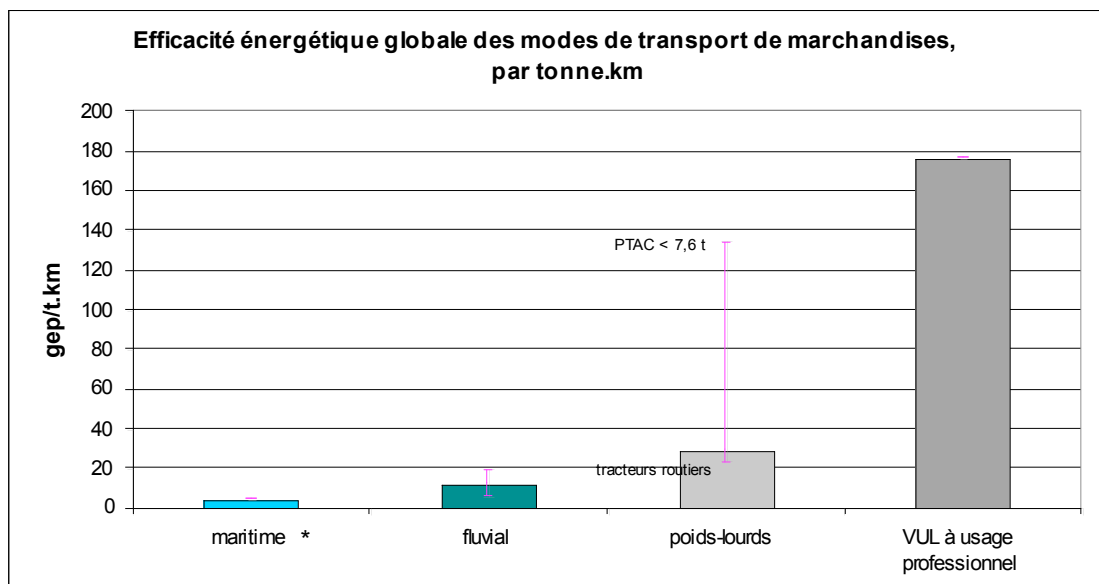




Graph 11 : comparaison des émissions globales de GES transports ferroviaires en fonction de l'origine de l'électricité

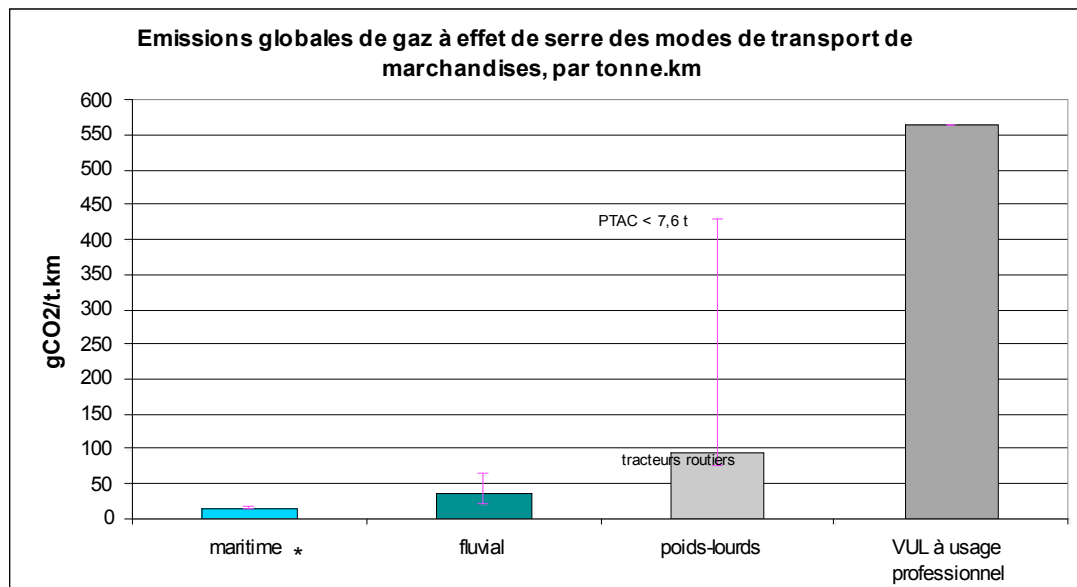
La variation d'approvisionnement en électricité simulée ci-dessus permet de voir dans quelle proportion, l'efficacité énergétique des transports ferroviaires varierait selon deux hypothèses différentes de la situation actuelle (contenu CO<sub>2</sub> / kWh pour EDF et moyenne européenne).

### Transport de marchandises



Graph 12 : efficacité énergétique globale des modes de transport de marchandises

\* : les données du transport maritime ne reposent que sur l'analyse des efficacités d'une catégorie de navire, les chimiquiers, auprès d'un armateur. Elles ne peuvent donc être considérées comme représentative du mode maritime. Une étude est en cours et permettra d'avoir des éléments de quantification au cours de l'année 2008.



Graphe 13 : comparaison des émissions de GES globales des modes de transports de marchandises

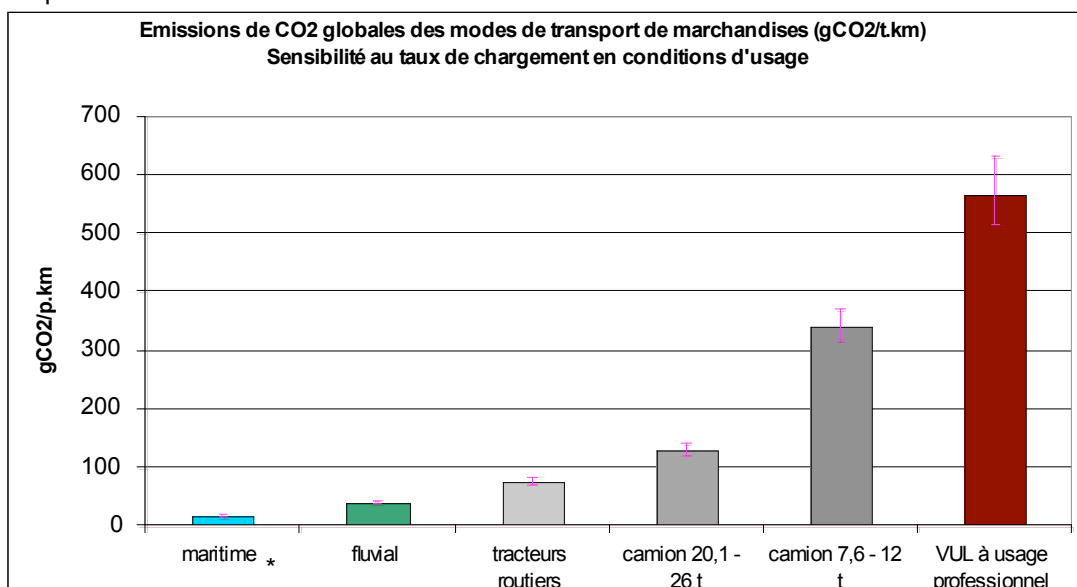
\* : les données du transport maritime ne reposent que sur l'analyse des efficacités d'une catégorie de navire d'un armateur

L'ensemble des modes de transports de marchandises considérés dans le cadre de l'étude utilisent des énergies fossiles, les résultats des efficacités énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre sont donc corrélés et les conclusions sont donc identiques.

Les poids lourds présentent en fonction des catégories considérées des performances très significativement différentes. La moyenne observée est proche des meilleures performances observées, le flux de marchandises étant essentiellement transporté par les poids lourds de PTAC maximum et par les tracteurs routiers. Les VUL professionnels interviennent le plus souvent pour le transport de marchandises de proximité et l'efficacité énergétique à la tonne transportée est nettement inférieure à celle des poids lourds.

Le transport fluvial apparaît plus performant que le transport routier.

Une même variation du taux de chargement de plus ou moins 10% a été considérée pour ces modes de transport.



Graphe 14 : émissions globales de GES des poids-lourds en fonction du taux chargement

\* : les données du transport maritime ne reposent que sur l'analyse des efficacités d'une catégorie de navire d'un armateur

Une variation du taux de chargement de +/- 10% n'impacte pas la hiérarchie des performances des différentes catégories de poids lourds définies. Les transports par voie d'eau présentent des émissions de CO<sub>2</sub> par tonne transportée inférieures à celles des autres modes considérés. Les VUL à usage professionnel ont toujours un impact significativement supérieur à celui des autres classes de véhicules considérées, ils correspondent à un type d'activité où le transport de marchandises n'est pas la seule finalité, ce qui impacte fortement l'efficacité énergétique calculée.

## Etude de scénarii

L'objectif est de comparer les efficacités énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> de différents modes de transport ou combinaisons modales, sur un déplacement défini. Des trajets représentatifs sont ainsi étudiés en conditions réelles d'utilisation (distances réelles parcourues) pour un déplacement identique. Les résultats sont donnés en kep (kilo équivalent pétrole) afin de pouvoir comparer les consommations énergétiques des différents modes de transports utilisés.

Dans le cas du transport de voyageurs, cinq trajets sont étudiés. Ils correspondent à des déplacements fréquents effectués et peuvent être réalisés à partir de combinaisons alternatives de modes de transport :

- le déplacement de proximité (distance inférieure à 3km),
- le déplacement domicile-travail moyen en milieu urbain-périurbain (15km en distance à vol d'oiseau),
- le déplacement domicile travail en cas de desserte de région parisienne (80-100km),
- le trajet grande-distance radial Paris-Nice (800km) et transversal Nantes-Lyon (600km).

Dans le cas du transport de marchandises, le trajet Le Havre-Gennevilliers (représentatif du transport fluvial) est étudié.

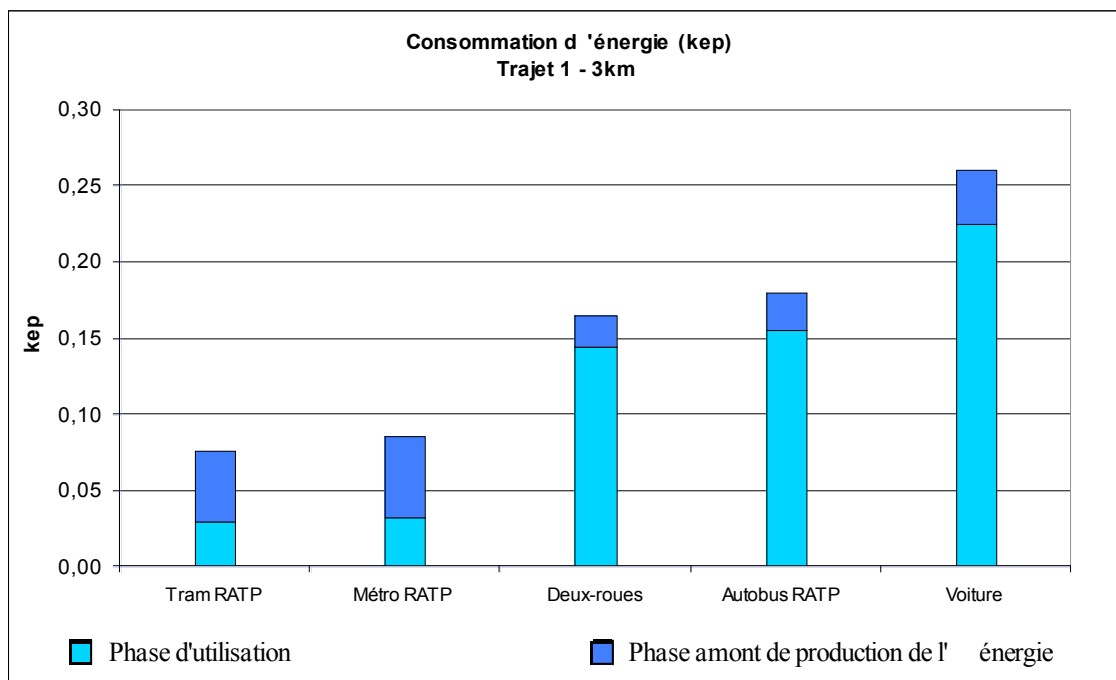
**La comparaison réalisée dans le cadre de cette étude entre les différentes combinaisons intermodales sur un trajet défini est une comparaison monocritère : l'énergie utilisée et les émissions de CO<sub>2</sub> associées. Les résultats ne peuvent être extrapolés pour conclure à la hiérarchie des modes de transport en termes d'impacts environnementaux.**

**Les conditions de service offertes par les différents scénarii ne sont pas considérées dans le cadre de cette étude.**

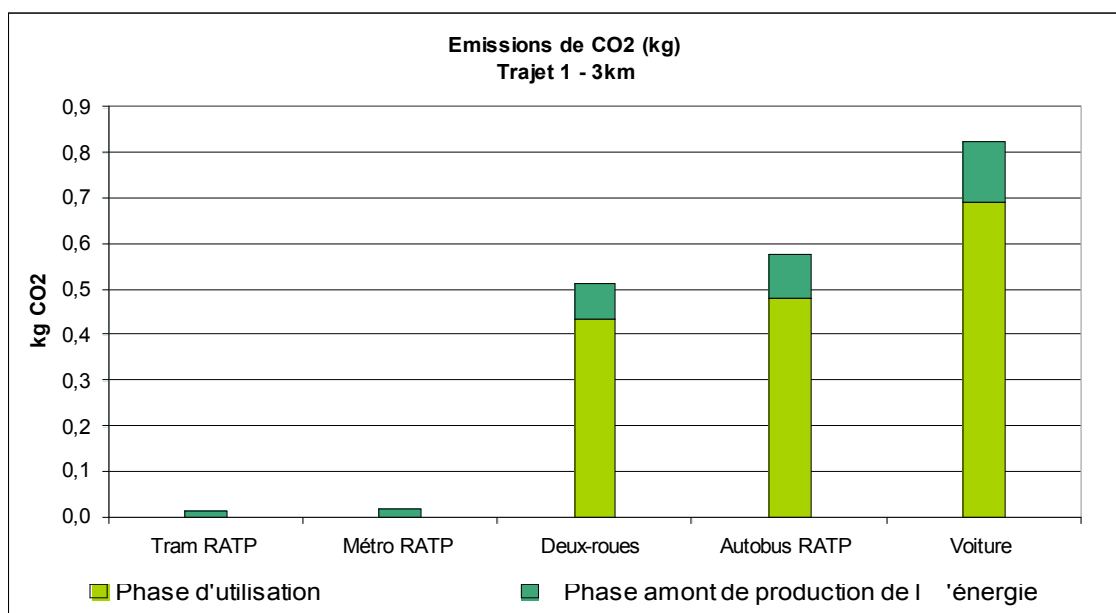
### Trajet 1- 3 km en région parisienne

Le trajet correspond aux déplacements les plus fréquemment réalisés, les déplacements de proximité effectués pour des distances inférieures à 3km à vol d'oiseau qui peuvent être réalisés à la fois par des modes doux (marche, vélo), en transports motorisés individuels (4km) ou en transports collectifs (5km).

Les graphes suivants présentent les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées nécessaires à la réalisation des différents scénarii considérés.



Graph 15 : consommation d'énergie pour les scénarii réalisant le trajet 1- 3km à Paris



Graph 16 : émissions de CO<sub>2</sub> pour les scénarii réalisant le trajet 1- 3km à Paris

Dans le cas d'un déplacement de proximité à Paris, les modes de transport les plus efficaces (faibles consommations par personne transportée), après les modes, doux sont le tramway et le métro. Les consommations associées au transport par autobus sont supérieures aux consommations imputables aux deux roues motorisés dans les conditions d'utilisation moyennes considérées. Les transports en commun restent meilleurs que les véhicules particuliers. Pour les modes de transport à traction électrique, la phase amont présente un impact supérieur à la phase d'utilisation en termes d'efficacité énergétique et présente la source unique d'émission de CO<sub>2</sub> de ces modes.

Le tramway et le métro utilisant une traction électrique, et la RATP consommant de l'électricité fournie par EDF, les émissions associées sont très faibles et ne concernent que la phase amont de production de l'électricité. Les trois autres modes utilisant des énergies fossiles, la hiérarchie observée en termes de consommation énergétique est conservée.

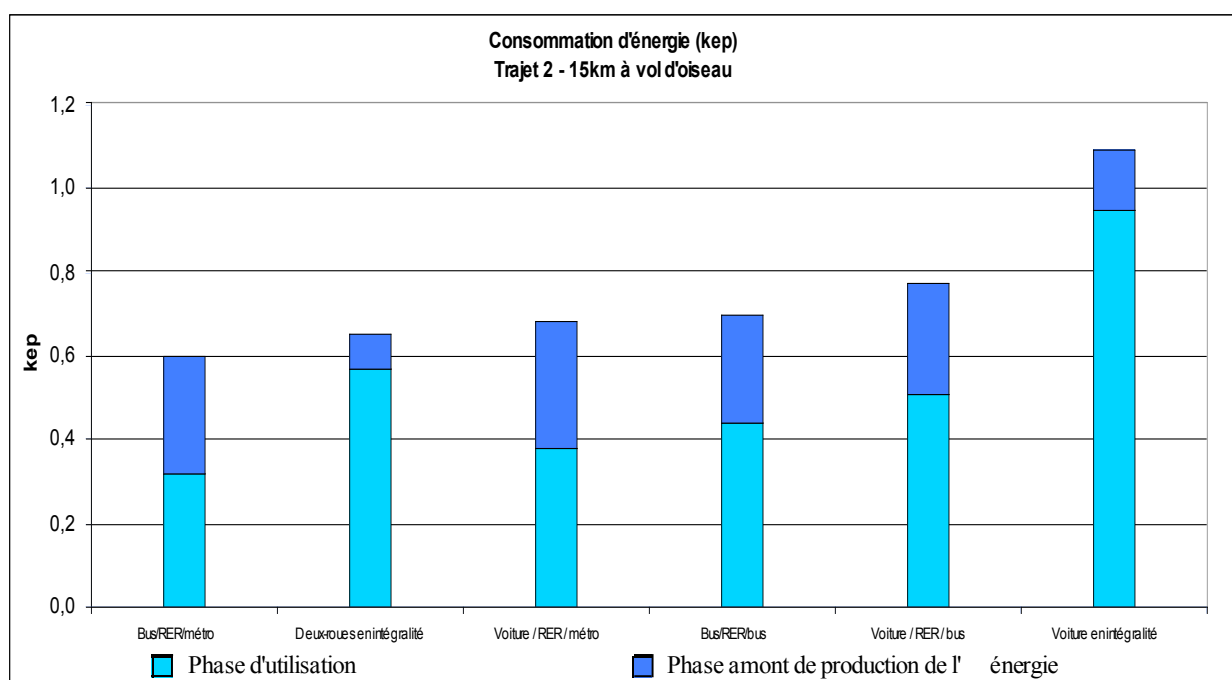
## Trajet 2 – 15 km en Ile-de-France

Ce trajet est représentatif des déplacements domicile-travail pour lesquels la distance moyenne considérée est de 15km à vol d'oiseau.

Les scénarii retenus, présentant des distances réelles pouvant varier selon les trajets effectivement réalisés, pour ce trajet 2 (15km en Ile-de-France) sont les suivants :

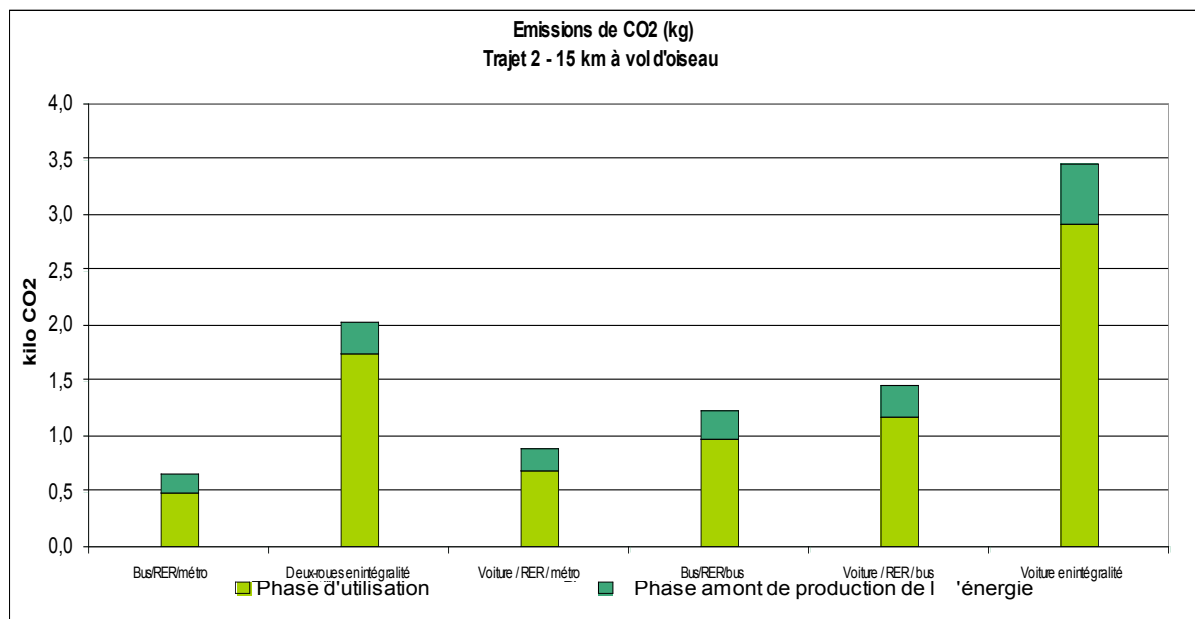
- Voiture+ transports en commun (5 km + 25km)
- Tout transport en commun avec interconnexions (30km)
- 2 roues motorisés (20 km)
- Voiture (20 km)

Les graphes suivants présentent les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées nécessaires à la réalisation des différents scénarii considérés.



Graph 17 : consommation d'énergie pour les scénarii réalisant le trajet 15km en IDF

*Les différents scénarii multimodaux considérés et le trajet réalisé en 2 roues motorisés présentent des efficacités énergétiques relativement comparables, avec les hypothèses de distances réelles précisées ci-dessus. Pour des trajets en transports en commun plus directs, la différence serait plus importante. Le trajet considéré met en évidence une dégradation relative de l'efficacité énergétique par l'utilisation de transports, autres que ferrés, sur le parcours défini.*



Graphique 18 : émissions de CO<sub>2</sub> pour les scénarii réalisant le trajet 15km en IDF

Si pour ce trajet les efficacités énergétiques des combinaisons intermodales étaient proches des performances des deux roues motorisés, les facteurs d'émissions, associés aux modes à traction électrique ou thermique significativement différents, conduisent à la dégradation de la performance des deux roues motorisés (environ deux fois plus émetteurs que les combinaisons multimodales considérées).

### Trajet 3 : déplacement province, Paris (120 km)

Ce trajet est se veut représentatif des déplacements domicile-travail dans le cas de personnes qui habitent en province et viennent travailler à Paris.

Le trajet étudié est un trajet domicile-travail réel, l'exemple considère un domicile situé à Fleury les Aubrais (5km de la gare d'Orléans) et le lieu de travail à la Défense (92). Les conditions réelles de déplacement ont été considérées pour l'ensemble des modes étudiés.

Trois scénarii ont été étudiés :

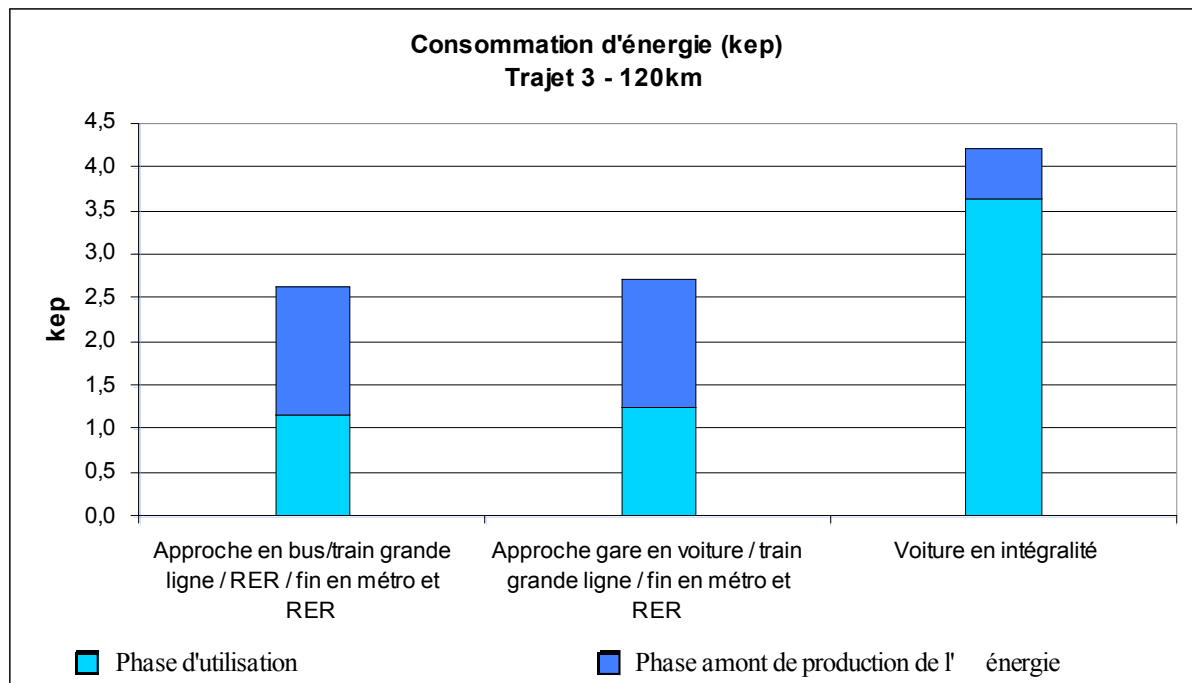
- L'intégralité du trajet en véhicule particulier (135km) (trajet préconisé par le site viamichelin<sup>11</sup>),
- Le scénario multimodal composé du déplacement domicile-gare en voiture (5km), du trajet Orléans gare Montparnasse (Paris) en train corail<sup>12</sup> (113km) et de l'utilisation des transports en commun parisiens pour se rendre de la gare Montparnasse à la Défense (métro Ligne 6 puis RER A à partir de Charles de Gaulle Etoile<sup>13</sup>) (11km),
- Le scénario tout transport en commun considérant la desserte de la gare d'Orléans par autobus, puis le même trajet que précédemment.

Les graphes suivants présentent les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées nécessaires à la réalisation des différents scénarii considérés.

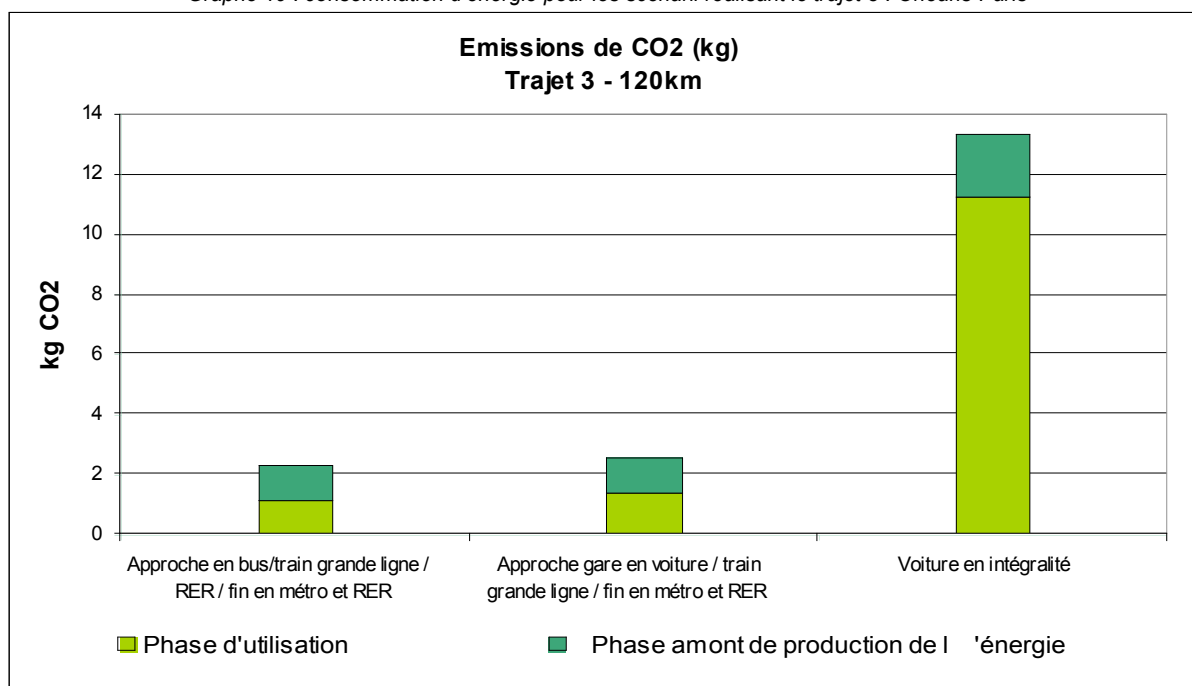
<sup>11</sup> Source : [www.viamichelin.fr](http://www.viamichelin.fr)

<sup>12</sup> Source : SNCF, système de réservation

<sup>13</sup> Source : [www.ratp.fr](http://www.ratp.fr)



Graphe 19 : consommation d'énergie pour les scénarii réalisant le trajet 3 : Orléans-Paris



Graphe 20 : émissions de CO<sub>2</sub> pour les scénarii réalisant le trajet 3 : Orléans-Paris

L'emploi d'un véhicule particulier pour rejoindre la gare n'engendre qu'une augmentation mineure de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à l'approche de la gare en autobus. L'utilisation de la voiture en intégralité augmente sensiblement la consommation énergétique même en intégrant la phase amont et engendre significativement plus d'émissions de CO<sub>2</sub>.

## Trajet 4 : Transport de voyageurs longue-distance

Deux trajets sont considérés :

- Le trajet Paris-Nice, première radiale de France<sup>14</sup> avec 3172 milliers de passagers en 2005, soit 18 % du trafic en provenance ou à destination de Paris.
- Le trajet Nantes-Lyon qui présente la possibilité d'une diversité de desserte et qui est la 5eme<sup>15</sup> plus grande transversale en termes de voyageurs (tous modes confondus) (234 000 voyageurs en 2005, CCTN).

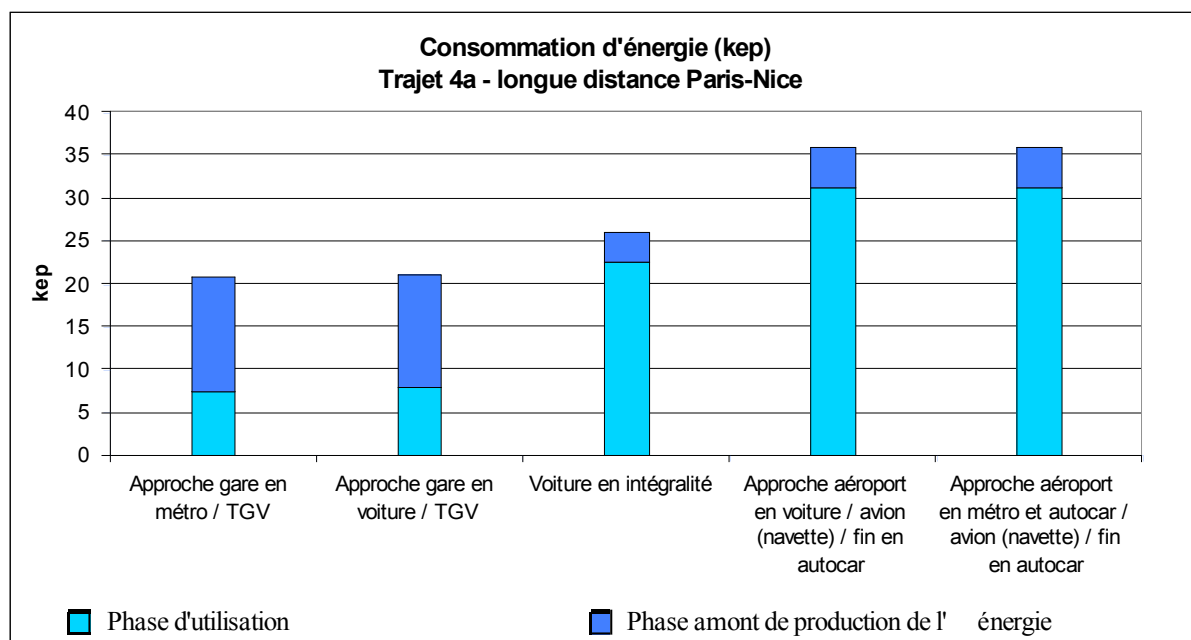
### Trajet 4a : Créteil- Nice

Le trajet étudié est un trajet de porte à porte au départ de Créteil(94) et arrivée à Nice Centre, place Massena. Plusieurs solutions de transport sont alors possibles.

Les cinq scénarii suivants sont étudiés :

- L'intégralité du trajet en voiture selon le trajet préconisé par le site viamichelin<sup>16</sup> (928km), avec un taux d'occupation correspondant aux déplacements interrégionaux de 2,17 personnes par véhicule,
- Créteil-Orly en voiture(13km), avion navette Orly-Nice (783km), desserte Nice Aéroport-Nice centre ville en autocar navette (6km),
- Créteil-Orly en transports en commun (Métro Ligne 8 jusqu'à la station Daumesnil puis ligne 6 jusqu'à la station Denfert-Rochereau, puis Orlybus (car)), avion navette Orly-Nice, desserte Nice Aéroport-Nice centre ville en autocar navette,
- Créteil - Gare de Lyon (Paris) en voiture puis TGV Paris-Nice (1088km),
- Créteil- Gare de Lyon en métro (ligne 8 jusqu'à la station Daumesnil puis ligne 6 jusqu'à la station Bercy, puis Ligne 14 jusqu'à la station Gare de Lyon) puis TGV Paris-Nice.

Les graphes suivants présentent les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées nécessaires à la réalisation des différents scénarii considérés.



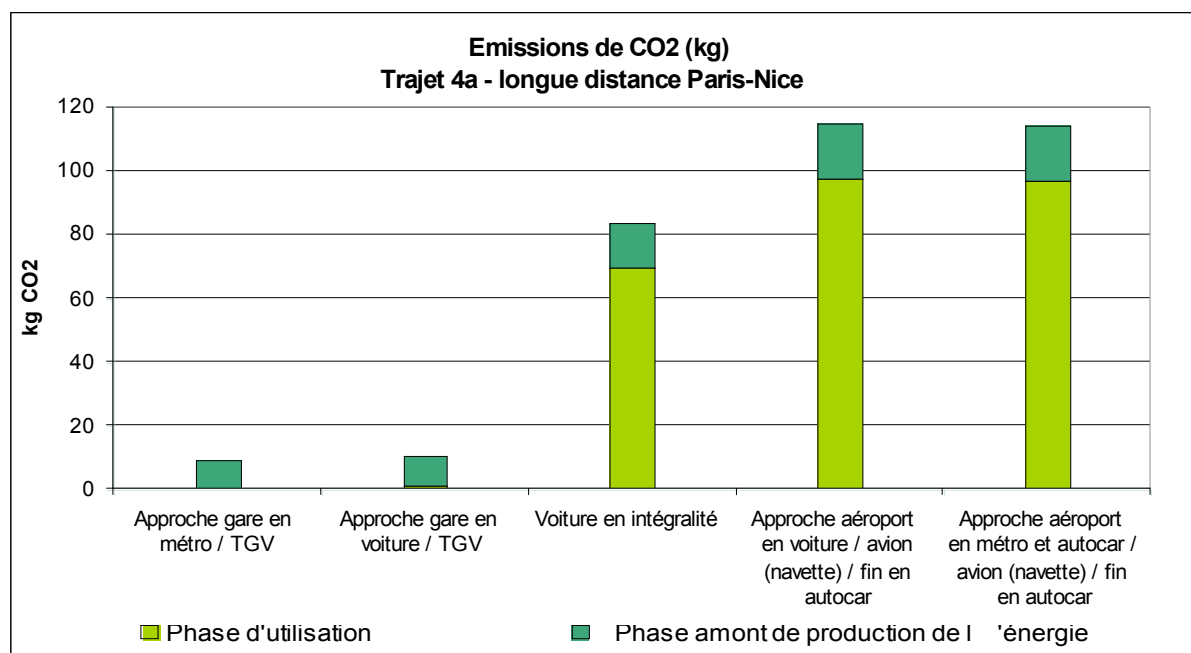
Graphes 21 : consommation d'énergie pour les scénarii réalisant le trajet 4a- desserte longue distance Paris Nice

<sup>14</sup> Source : CCTN, 2005

<sup>15</sup> Source CCTN, 2005, derrière les déplacements Marseille Corse, Lyon Bordeaux et équivalent à Toulouse Lyon.

<sup>16</sup> Source : [www.viamichelin.fr](http://www.viamichelin.fr)





Graph 22 : émissions de CO<sub>2</sub> pour les scénarii réalisant le trajet 4a :Créteil-Nice

De la même manière que le trajet 3, les conditions d'approche n'ont qu'un très faible impact sur les consommations énergétiques. Le mode de transport principal considéré impose le niveau de consommation. Ainsi, malgré les conditions fortement défavorables au TGV sur ce trajet puisqu'il effectue un détour significatif, le mode ferré reste moins énergivore que la voiture, qui est elle même plus efficace que l'avion.

Les émissions de CO<sub>2</sub> associées au trajet par train sont très largement inférieures aux émissions induites par les transports routier et aérien. Les modes de transport utilisés pour l'approche de l'aéroport ont une faible influence sur les niveaux de consommations du fait de la faible distance parcourue au regard du trajet global. Le trajet effectué en totalité en voiture reste également plus performant qu'en avion en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

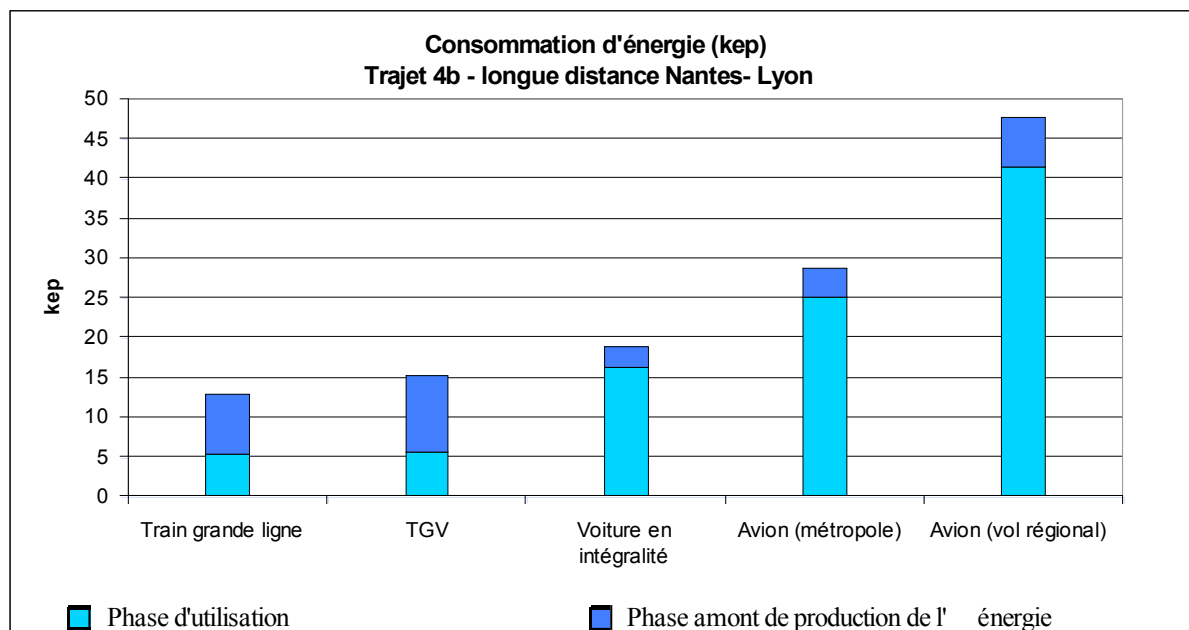
#### Trajet 4b : Nantes-Lyon

Les cinq scénarii suivants sont étudiés :

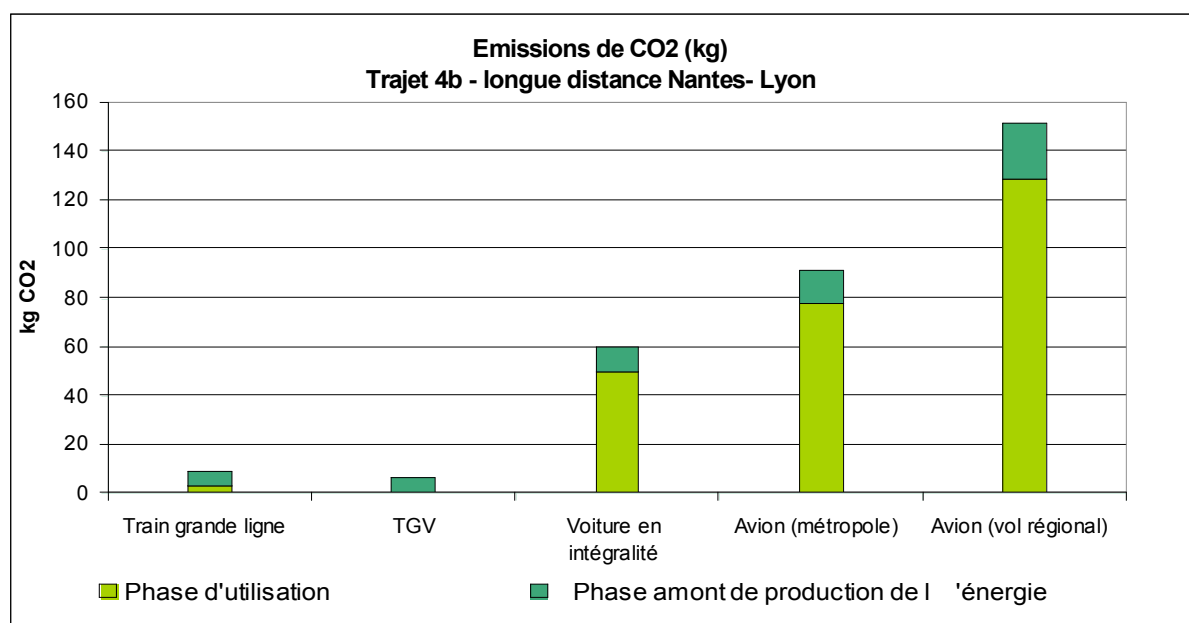
- L'intégralité du trajet en voiture selon le trajet préconisé par le site viamichelin<sup>17</sup> (676°km), le taux d'occupation considéré est le même que pour le trajet Paris-Nice,
- Le déplacement est effectué par avion sur un vol régional (630km)
- Le déplacement est effectué par avion sur un vol classique Air France métropole (630km)
- Le déplacement est réalisé par train corail en passant pas le centre de la France (650km)
- Le déplacement est réalisé par TGV (807km).

Les graphes suivants présentent les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées nécessaires à la réalisation des différents scénarii considérés.

<sup>17</sup> Source : [www.viamichelin.fr](http://www.viamichelin.fr)



Graphe 23 : consommation d'énergie pour les scénarii réalisant le trajet 4b- desserte longue distance Nantes-Lyon



Graphe 24 : émissions de CO<sub>2</sub> pour les scénarii réalisant le trajet 4b :Nantes-Lyon

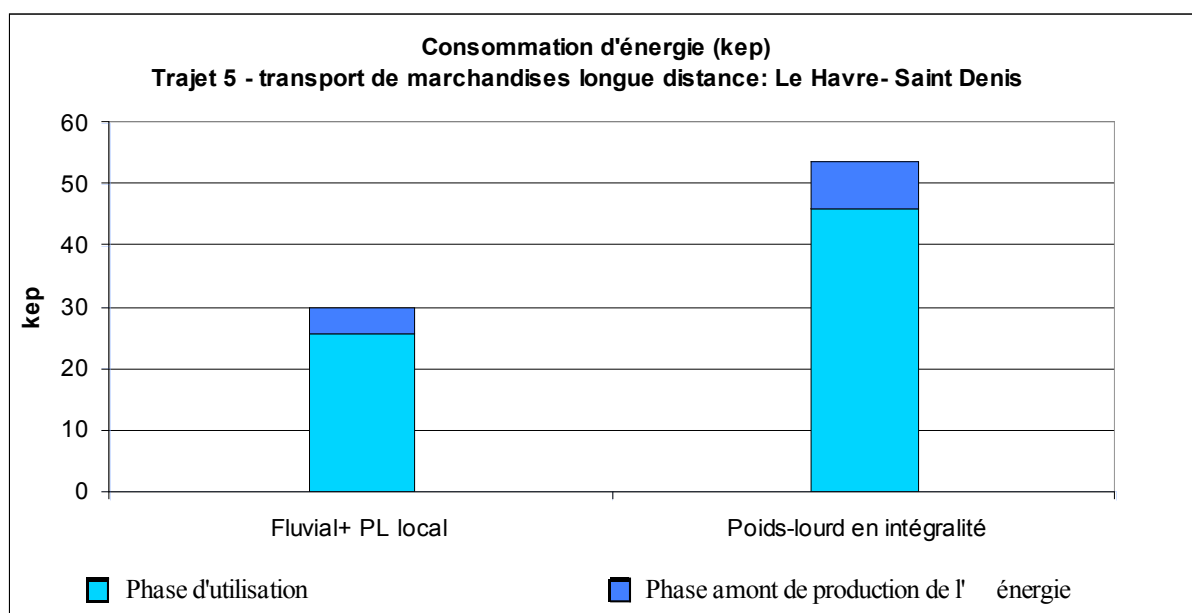
Le mode ferroviaire est le plus performant avec une consommation dédiée à la phase d'usage équivalente pour le train Corail et pour le TGV qui parcourent des trajets très différents pour desservir Nantes-Lyon.

L'utilisation de la voiture, avec un taux d'occupation de 2,17, reste un mode plus performant que l'avion et assez proche du TGV, en termes d'efficacité énergétique. Cela est dû aux distances parcourues par ce dernier qui augmente la consommation associée pour la réalisation du trajet défini. Toutefois, en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, les trains grande ligne et TGV sont, en 2005, très performants.

## Trajet 5 : Transport de marchandises : Le Havre – Saint Denis

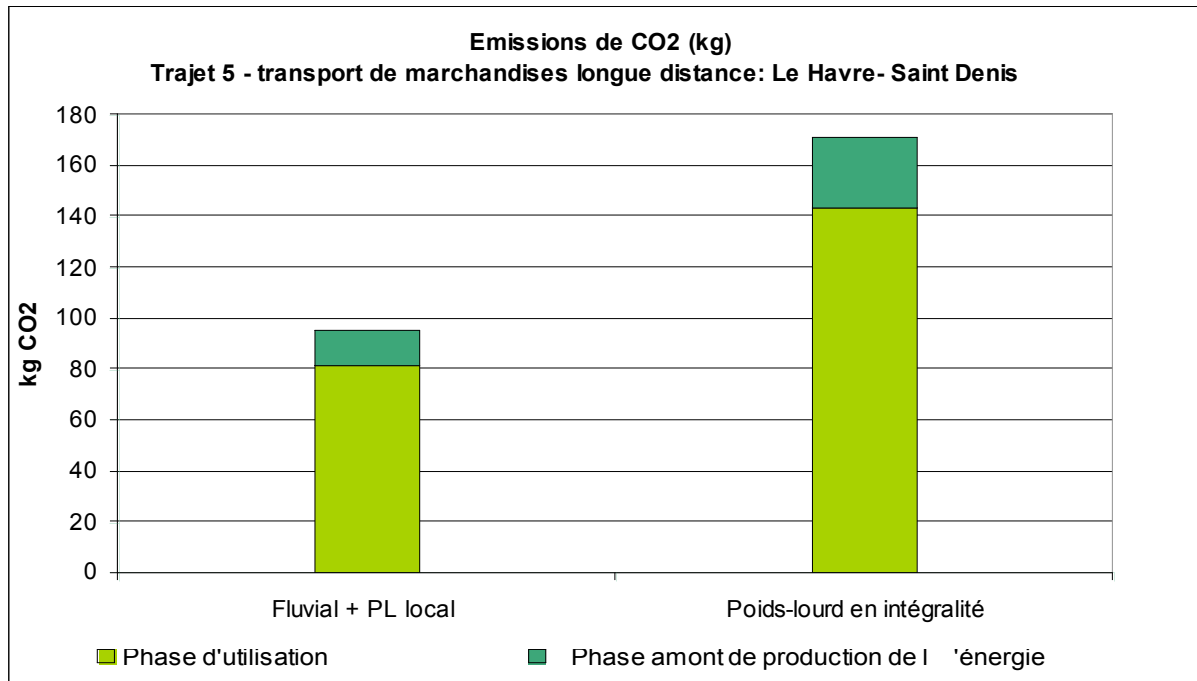
Le trajet étudié est le transport d'un conteneur de 13 tonnes<sup>18</sup> de son arrivée au port du Havre (à partir d'un cargo porte conteneur) à la zone de livraison située en région parisienne à Saint Denis (93). Les transports fluviaux et routiers sont comparés à partir des distances réelles parcourues pour répondre à ce service.

Les graphes suivants présentent la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées nécessaires à la réalisation des scénarii considérés.



Graphe 25 : consommation d'énergie pour les scénarii réalisant le trajet 5- transport de marchandises- Le Havre –St Denis

<sup>18</sup> Poids global comprenant le conteneur et les marchandises.



Graph 26 : émissions de CO<sub>2</sub> pour les scénarii réalisant le trajet 5 :Le Havre – Saint Denis

Malgré les conditions défavorables imposées au transport fluvial<sup>19</sup>, les distances respectives à parcourir sont de 195km par la route contre 335km par le fleuve, le scénario mixte fluvial - routier reste nettement plus performant aussi bien en termes d'efficacité énergétique que d'émissions de CO<sub>2</sub>.

<sup>19</sup> ce trajet majore la distance à parcourir par voies d'eau, les sinuosités du fleuve sur le parcours considéré étant les pires observées en France.

## CONCLUSION

L'étude réalisée élargit le périmètre considéré dans les études antérieures<sup>20</sup> et intègre l'efficacité énergétique générale, et les émissions de CO<sub>2</sub> lors de la production d'énergie. Cette approche permet d'avoir une vue globale et cohérente des impacts imputables aux modes de transport en 2005. Elle considère ainsi les émissions de CO<sub>2</sub> associées au mode de production de l'électricité dans les émissions globales des transports électriques (indépendamment des opérations de compensation que les entreprises auraient pu entreprendre par ailleurs).

L'étude a défini les ordres de grandeur de l'efficacité énergétique et des émissions gazeuses spécifiques des différents modes de transport en 2005 et identifié des gains d'efficacité énergétique possibles dans le cadre de la rationalisation des modes de transport. Elle a permis de mettre en évidence l'influence déterminante de certains paramètres sur les efficacités énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> des différents modes considérés, notamment le taux d'occupation (ou de chargement) et le type de production de l'électricité utilisée (thermique, nucléaire ou renouvelable).

Des contraintes exogènes peuvent également être responsables de la dégradation de l'efficacité énergétique et des émissions de CO<sub>2</sub> de certains modes de transports :

- les contraintes de service public :  
contrairement aux autocars, qui, le plus souvent, proposent une offre de service de transport privé, plusieurs modes voient leur efficacité énergétique dégradée par l'obligation de service public qui les conduit à circuler à une certaine fréquence, même en période de faible affluence, conduisant à des taux d'occupation moyens médiocres.
- les contraintes réglementaires pour le transport de certaines marchandises, telles que les conditions d'hygiène (en particulier pour les véhicules frigorifiques) peuvent imposer des transports à vide pour des poids lourds, dégradant également l'efficacité.
- les contraintes liées à la sécurité, telle que l'organisation de l'espace aérien. Ainsi, les routes utilisées ne sont pas toujours optimales, notamment en raison des zones militaires, du réseau des routes prédéfinies et de la densité de la région de contrôle dans l'espace aérien européen.

La réalisation de cette étude a soulevé le problème de la complexité de collecte d'information auprès des différents opérateurs dans un contexte où les efficacités énergétique et environnementale deviennent des informations stratégiques et concurrentielles. L'obtention d'information auprès des opérateurs de transports des villes de province est particulièrement difficile.

L'amélioration de la précision des résultats d'efficacité énergétique et environnementale des modes de transport requiert de fiabiliser, mettre en cohérence les données macroscopiques ou actualiser certaines données sources. En particulier, le taux d'occupation des différents modes de transport est une donnée difficilement accessible, et connue sur la base d'enquêtes uniquement, pour de nombreux modes de transport sans réservation obligatoire.

---

<sup>20</sup> Etude Explicit et Enerdata, respectivement pour les années de références 2000 et 2001