

Transport aérien de passagers et effet de serre



ifen

L'aviation commerciale émet 2,5% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) dues aux activités humaines. Du fait de l'altitude, les émissions de vapeur d'eau produites par les avions entraînent la formation de traînées de condensation et de cirrus qui produisent de l'effet de serre supplémentaire. L'augmentation de la mobilité des personnes et l'essor du tourisme international laissent présager une prolongation des tendances historiques de croissance du transport aérien de passagers. Les gains d'efficacité énergétique ne semblent pas suffisants pour empêcher une hausse significative de l'impact climatique du transport aérien.

Michel Hubert, Ifen

2,5% des émissions mondiales de CO₂

Chaque kilogramme de kérosène brûlé libère 3,15 kg de CO₂. En 2000, les ventes mondiales de ce carburant à l'aviation commerciale ont ainsi donné lieu à l'émission de près de 550 millions de tonnes de CO₂, soit 2,5% des émissions mondiales de CO₂ induites par l'utilisation d'énergie fossile. Seul le transport domestique (40% de ces émissions, flux avec l'Outre-mer inclus) est concerné par le protocole de Kyoto. Si l'on déduit la part du kérosène utilisé pour le transport de marchandises, environ 10%, il apparaît que le transport aérien mondial de passagers émet un peu plus que l'ensemble des activités en France, y compris celles des ménages.

Sur cette base, un passager en avion émet dans le monde 140 grammes de CO₂ au kilomètre alors qu'en voiture et en France, il émet en moyenne 100 g au kilomètre, en considérant 1,8 passager par véhicule en moyenne. En ajoutant à ces émissions directes les émissions indirectes liées à la construction des véhicules, au raffinage et au transport de pétrole, plus importantes pour la voiture, l'excédent d'émissions au passager-km de l'avion par rapport à l'automobile diminue de 40% à 16%.

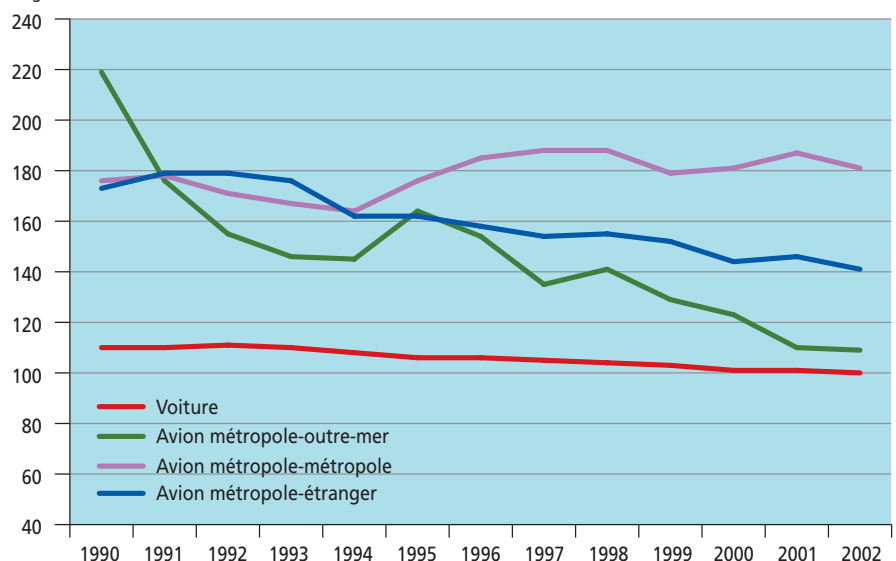
Moins d'émissions pour les vols longs et bien remplis

La meilleure des configurations - un vol long courrier, dans un avion récent et sobre, avec de nombreux sièges occupés - peut donner lieu à une émission directe de moins de 60 g de CO₂ par passager-km. Dans le Concorde, les émissions par voya-

geur-km étaient près de dix fois supérieures. Les vols court courrier, les seuls substituables par des voyages en automobile ou en TGV, nécessitent une plus forte consommation de carburant au passager-km du fait de l'importance relative du décollage et d'une plus faible altitude de croisière. Lors d'un vol métropolitain, les émissions au passager-km sont supérieures de 66% en moyenne à un vol à destination de la France d'outre-mer.

Les vols charters, sans classe affaire et avec un fort taux de remplissage, sont caractérisés par une meilleure efficacité énergétique mesurée par le nombre de passager-km par tonne équivalent pétrole. Un aller-retour Paris-New York dans ces conditions correspond néanmoins, pour chaque passager, à une émission de près d'une tonne de CO₂. Cela équivaut à un mois et demi des émissions totales, directes et indirectes, liées à la consommation d'un Français (ou quatre mois de ses émissions directes de chauffage, de cuisine ou de déplacements automobiles).

Évolution des émissions directes de CO₂ par mode de transport et par passager-kilomètre en grammes



Note : La consommation de kérosène pour le transport de fret dans les soutes (significative au cours des vols long courrier) est ici affectée aux voyageurs.

Source : d'après les données de la direction générale de l'Aviation civile (DGAC) et du Citepa.

D'autres contributions à l'effet de serre que le CO₂

Les oxydes d'azote (NO_x) émis par les avions supersoniques volant à plus de 15 km d'altitude induisent une réduction de la couche d'ozone stratosphérique protégeant les êtres vivants des rayons ultra-violet. À l'altitude de croisière (9 à 13 km) et à la latitude des États-Unis, les avions subsoniques en vol long courrier émettent des NO_x aux limites de la troposphère et de la stratosphère : ceux-ci réagissent rapidement et ont un impact sur l'effet de serre à la fois réchauffant par la formation d'ozone (O₃) troposphérique et refroidissant par la dégradation du méthane (CH₄).

La vapeur d'eau (H₂O) émise à cette altitude contribue directement à l'effet de serre. En air froid, plus fréquemment saturé d'eau, elle peut en outre se transformer en cristaux de glace et prendre la forme de traînées de condensation (*contrails*). Celles-ci ont un effet localisé et de court terme, néanmoins la hausse induite de la température s'avère importante du fait de la concentration du trafic aérien dans des régions propices à la condensation.

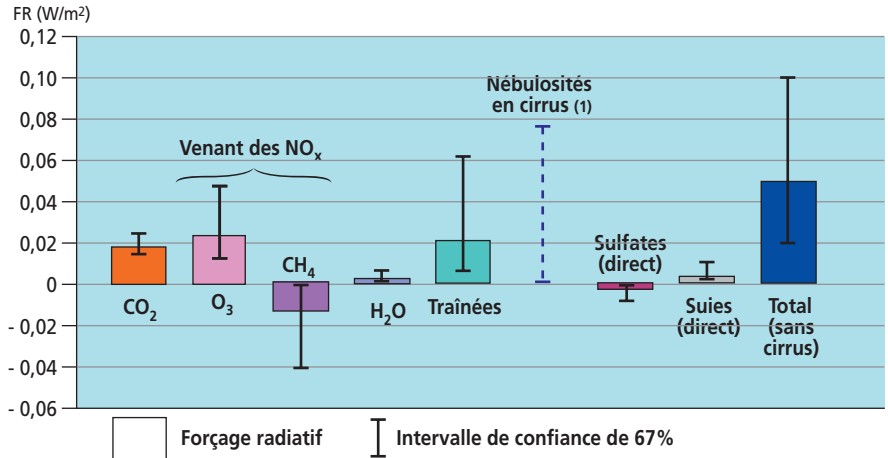
Le ciel "vide d'avion" de l'après 11 septembre confirme les hypothèses du GIEC*

À la suite des attentats du 11 septembre 2001, il est apparu que pendant les trois jours sans avion dans le ciel américain, l'écart de température entre le jour et la nuit a augmenté de 1 à 2 °C sur l'ensemble des États-Unis. Le résultat de cette observation, sur une aussi courte durée, n'apporte pas une preuve scientifique mais tend à confirmer la contribution de l'aviation au forçage radiatif : les traînées et les cirrus réduisent la perte de chaleur la nuit et, en filtrant le rayonnement solaire, atténuent la hausse des températures diurnes.

*Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

L'impact des gaz à effet de serre susceptible de conduire à un changement climatique est estimé par le "forçage radiatif" (*voir définition en p. 4*). D'après l'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 1999, l'aviation commerciale génère, au total, un forçage radiatif de 2 à 4 fois supérieur à celui causé par les seules émissions de CO₂, contre un facteur 1,5 pour les autres activités humaines. Sur cette base approximative, l'aviation commerciale équivaldrait à 5% du réchauffement climatique dû à l'ensemble des activités humaines ; l'aller-retour Paris-New York d'une personne correspondrait au quart des émissions totales liées à la consommation annuelle d'un Français.

Estimation du forçage radiatif de l'aviation (passagers, fret et militaire) en 1992



Note : (1) Les dernières recherches laissent supposer que le FR des traînées pourrait avoir été surestimé dans le rapport, mais que l'impact des cirrus - que le GIEC n'avait pas quantifié - pourrait être significatif. Appréciation de l'état de la connaissance : bon : CO₂ ; passable : O₃, traînées, sulfate, suie ; mauvais : CH₄, H₂O ; très mauvais : cirrus. Source : GIEC, 1999 - Öko-Institut, 2004 pour (1).

Une croissance continue du transport aérien pendant 40 ans

Le temps passé à se déplacer quotidiennement évolue peu : depuis 1960, les valeurs de ce budget temps oscille entre 0,8 et 1,2 heure quel que soit le pays. Partout où l'on a bénéficié d'une hausse importante des revenus, l'accroissement des vitesses a été compensé par une augmentation de la distance moyenne par habitant et par jour. Un Français, par exemple, parcourt 43 km en 2000 contre 10 km en 1960. Cependant, la vitesse moyenne en voiture ne s'accroît plus et l'augmentation de la mobilité devrait donc à l'avenir s'opérer par le développement des modes plus rapides comme le TGV et l'avion. Au niveau mondial, l'avion représente déjà 12% des passagers-km (*Source : Schaffer, 2000*) et un individu parcourt en moyenne dans l'année 500 km en avion. Cette distance moyenne par habitant est dans de nombreux pays inférieure à 10 km mais elle s'élève en Europe à 1 200 km et à 3 400 km aux États-Unis (*Source : Agence danoise de protection de l'environnement*).

En France, le voyage aérien se banalise : la proportion des personnes de plus de 15 ans qui ont pris l'avion au moins une fois dans l'année, appelée taux de pénétration, est pas-

sée de 9% en 1980 à 26% en 2001 (*Source : direction générale de l'Aviation civile*). La proportion de celles qui n'ont jamais pris l'avion évolue peu, environ 30%. Des tendances sociétales, comme l'urbanisation, la proportion croissante de ménages sans enfant, l'arrivée à la retraite d'une population en bonne santé, relativement aisée et déjà tournée vers le voyage lointain, laissent présager que le taux de pénétration a encore une forte marge de progression.

Au niveau mondial, l'accès aux modes de consommation occidentaux pour les habitants des pays en voie de développement, Chine et Inde en particulier, assurerait un potentiel de croissance important pour le transport aérien.

Sur la base d'une croissance économique annuelle de 2,5%, les prévisions en 2000 de la croissance du transport aérien s'établissaient ainsi à près de 5% par an pour les vingt prochaines années.

Le tourisme international, moteur de la demande de transport aérien

Tant que l'avion est accessible aux habitants des pays riches, pour qui les loisirs occupent une place croissante dans la mobilité, le tourisme international constitue un moteur

Croissance mondiale du trafic régulier aérien (passagers et marchandises)

	Taux de croissance annuel moyen (%)			
	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000
PIB	4,8	3,6	3	2,9
Passagers-kilomètres	13,4	9	5,7	4,4
Tonnes-kilomètres de fret	17,8	9,3	7,2	7

Note : Le trafic non régulier représente, à la fin des années quatre-vingt-dix, 15% du trafic international de passagers. Source : Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

essentiel du développement du transport aérien de passagers. On compte dans les aéroports métropolitains autant de voyageurs français pour motifs professionnels que de voyageurs pour motifs personnels, mais ces derniers sont en moyenne orientés vers des destinations deux fois plus éloignées (3 000 km contre 1 500 km en 2003 selon l'enquête *Sofres - direction du Tourisme*, Suivi des déplacements touristiques des Français).

L'allongement régulier des longueurs moyennes d'étape (+1,6 % par an entre 1989 et 1999 pour l'ensemble des vols réguliers mondiaux) est une tendance générale qui devrait ainsi se prolonger avec le développement du tourisme international. Dans les aéroports métropolitains, les voyages intercontinentaux représentent les trois quarts des passagers-km pour 30% des vols en 2003. Par ailleurs, le recul du transport intérieur aérien, dominé par les voyages professionnels, est accentué par la concurrence du TGV.

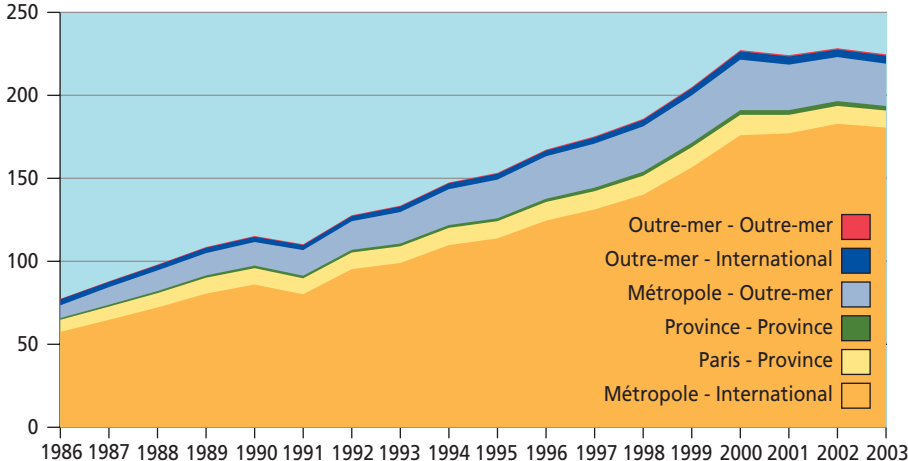
Stagnation du transport aérien de 2001 à 2003 : parenthèse ou tournant ?

La croissance soutenue du transport aérien a été interrompue à deux reprises. La guerre du Golfe a pour la première fois provoqué une baisse du trafic mondial annuel en 1991. Les attentats du 11 septembre 2001 ont de nouveau stoppé la croissance.

Le trafic mondial de passagers n'avait pas retrouvé en 2003 le niveau de l'année 2000. En revanche, le trafic de marchandises s'est bien redressé depuis 2001. Les événements du 11 septembre semblent avoir provoqué un changement de perception du risque et de comportement des voyageurs internationaux. En 2004, la croissance du trafic aérien de pas-

Évolution du transport aérien selon les flux

en milliards de passagers-km



Source : DGAC.

L'attrait touristique français et le trafic aérien national

Après affectation de la moitié des passagers-km de transport international au départ ou à l'arrivée des aéroports français (métropole et outre-mer) et l'autre moitié aux pays source et destinataire, il apparaît que la France (4,5% du PIB mondial) contribue pour 3,8% au trafic aérien mondial. Le premier pays recevant des visiteurs étrangers (75 millions en 2003) n'est donc pas caractérisé par un trafic aérien plus intense que les autres pays de richesse comparable. Si l'attrait du territoire français et du climat méridional explique les arrivées d'étrangers (deux tiers d'entre eux viennent de l'Europe du Nord, majoritairement par la route), il semble freiner les départs des Français.

Le résident français reste en effet moins enclin que ses voisins allemands, hollandais ou anglais à quitter son pays : en 1989 comme en 1999, seulement 18% de l'ensemble des séjours de vacances des Français (Source : Insee) ont eu lieu à l'étranger. Par contre, quand le vacancier français quitte l'hexagone, il cherche la découverte et l'exotisme plus loin et, en 2000, 5 millions de séjours de vacances ont eu lieu à l'extérieur de l'Europe, dont environ un million en France d'outre-mer (Source : d'après l'enquête *Suivi des déplacements touristiques*). La hausse du nombre de séjours de vacances à l'étranger, 13,6 millions en 1999, s'explique par la tendance générale à partir plus souvent mais moins longtemps. Depuis 2002, on assiste à une forte croissance de + 5% par an des déplacements de courte durée à l'étranger des Français. Les offres des compagnies à bas tarifs (*low-cost*) et l'usage d'internet facilitent l'émergence d'un nouveau comportement d'achat plus guidé par l'opportunité que par une destination préétablie.

sagers semble être répartie sur les bases de la dernière décennie, le nombre de passagers des aéroports français augmentant probablement d'environ 5% en 2004 par rapport à 2003 (Source : DGAC).

Les progrès techniques n'ont pas compensé les effets de la hausse du trafic

Depuis 1970, l'efficacité énergétique des avions commerciaux a augmenté de 2 à 3% par an, davantage que celle des autres modes de transport. La concurrence entre compagnies aériennes et la nécessité de réduire la facture de carburant, qui représente environ 10 à 15% de l'ensemble des coûts, expliquent les efforts pour améliorer l'efficacité des moteurs et l'aérodynamisme : ils apportent trois quarts des gains d'efficacité énergétique. Le quart restant vient d'une meilleure gestion de la flotte qui a permis surtout d'augmenter les taux de remplissage des avions. L'organisation du trafic autour de gros aéroports pivot (*hub*) a certes contribué à augmenter le taux de rem-

plissage et la taille des avions, mais elle a aussi imposé de nouveaux déplacements, terrestres ou aériens, vers ou à partir des *hubs*.

La baisse des émissions de CO₂ et d'H₂O au passager-km générée par les gains d'efficacité énergétique ne se traduit pas par une baisse proportionnelle de l'impact climatique global. La réduction de la température des gaz d'échappement induite par une combustion efficace ou le choix de voler en altitude afin de diminuer la consommation de carburant augmentent en effet la probabilité de formations de traînées et de cirrus.

Un impact qui devrait augmenter

Les marges de manœuvre semblent aujourd'hui plus limitées que pour l'automobile : l'Agence internationale de l'énergie prévoit, d'ici 2030, une hausse de l'efficacité énergétique du transport aérien de 1 à 2% par an. Compte tenu de la durée de service d'un avion, entre 20 et 30 ans, il est peu probable qu'un changement technologique empêche la hausse des effets climatiques produite par la croissance prévisible du transport aérien. Quant à l'utilisation éventuelle de l'hydrogène liquide comme carburant, elle soulève, en plus de la question de la production de l'hydrogène, celle du forçage radiatif induit par l'émission importante de vapeur d'eau et celle d'une altitude optimale de vol pour éviter la formation de traînées.

En outre, le volume du transport aérien devrait encore s'accroître. La prolongation d'une tendance de 5% par an conduirait à une multiplication par 3,5 de la mobilité aérienne à l'horizon 2030. Un tel scénario imposerait une augmentation de la capacité aéroportuaire, des pollutions locales et des nuisances sonores. À l'échelle globale, il pourrait induire d'ici 2030 une multiplication par 2,4 des

Air passenger transport and the greenhouse effect

The commercial aviation sector accounts for 2.5% of total worldwide anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions. Water vapour (H₂O) and NO_x emissions, the formation of condensation trails and increased formation of cirrus clouds due to altitude (indirect effects) also accentuate the greenhouse effect.

The Intergovernmental Panel on Climate

Change (IPCC) estimates that the effects apart from CO₂ emissions are relatively higher for aviation than for other human activities. For one tonne of CO₂ emissions, the radiative forcing of aviation is twice as important as other activities. On this basis, a Paris-New York return trip for one passenger on a charter flight corresponds to a quarter of the total climate impact caused by the

annual consumption of a French person.

Increased mobility and a rise in international tourism suggest that past trends in the growth of air passenger transport will continue. The improvements in energy efficiency achieved are seemingly not sufficient to prevent a significant increase in the impact of air transport on climate change. ■

émissions de CO₂ par le transport aérien, compte tenu des gains d'efficacité énergétique prévisibles. La demande de voyages touristiques en avion étant beaucoup plus sensible à une élévation de prix que les voyages aériens d'affaires ou les déplacements automobiles, l'évolution du prix de pétrole ou l'introduction d'une taxe "climatique" pourraient, d'ici là, infléchir la hausse de la mobilité aérienne.

Définition, limites

Le forçage radiatif

Dans le bilan radiatif global de l'atmosphère terrestre, le rayonnement piégé par l'atmosphère et correspondant à l'effet de serre naturel (eau, nuages, gaz à effet de serre à leur niveau préindustriel) est de + 155 Watt par mètre carré. Toute perturbation de ce bilan d'énergie par un agent extérieur est appelée "forçage radiatif" (FR).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), créé conjointement par l'Organisation météorologique mondiale et par le programme des Nations unies pour l'environnement, a évalué l'impact climatique probable du transport aérien pour l'année 1992. Comme la température moyenne à la surface de la terre varie à peu près linéairement avec le FR global moyen, la mesure des changements de l'équilibre radiatif de l'atmosphère produits par les différentes émissions donne une indication de l'impact réchauffant de l'aviation, soit, selon le rapport, 3,5% du FR total dû aux activités humaines.

Le concept de forçage radiatif ne permet pas de différencier les effets de long terme et de court terme. Le temps de rémanence dans l'atmosphère est tel que les émissions de CO₂ conservent un effet radiatif sur plus d'un siècle. La formation d'ozone troposphérique a surtout des effets instantanés et locaux qui ne donnent pas lieu au même phénomène d'accumulation. Si les effets directs des particules - suie et sulfate - s'annulent, ces particules ont un effet indirect en favorisant la formation de cirrus et en modifiant leurs propriétés optiques.

Bibliographie

- CE-Delf, 2002. *Economic incentive to mitigate greenhouse gas emissions from air transport in Europe*. Rapport pour la Commission européenne, 200 p. Voir <http://www.ce.nl>
- Commission européenne, 2004. *European Conference on Aviation, Atmosphere and Climate (AAC)-30 juin-3 juillet 2003*. Ensemble des communications, 367 p. Voir <http://www.pa.op.dlr.de/aac/proceedings.html>
- GIEC, 1999. *Aviation and global atmosphere*. Rapport des groupes de travail I et III, Cambridge University Press, 373 p. Voir <http://www.grida.no/climate/ipcc>
- Jancovici J.M., 2003. *Bilan carbone d'une activité manufacturière ou tertiaire*. Étude de Manicore pour l'Ademe et la Mission interministérielle de l'effet de serre, 98 p. Voir <http://www.ademe.fr/bilan-carbone>
- Krüger Nielsen S., 2003. *Greenhouse gas emissions from international aviation and allocation options*. Rapport d'ECOtransport consulting pour l'Agence danoise de protection de l'environnement, 147 p. Voir <http://www.mst.dk>
- Öko-Institut, 2004. *Emissions trading in international civil aviation*. Rapport pour l'Agence fédérale allemande de l'environnement, 152 p. Voir <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-1/2605.pdf>
- Schafer A., 2000. "Regularities in Travel demand : an international perspective", *Journal of transportation and statistics*, pp. 265-290.

VIENT DE PARAÎTRE

Ifen, 2004. *L'état des eaux souterraines en France : Aspects quantitatifs et qualitatifs*. Orléans, Ifen, 36 p., 15 €. (coll. *Etudes et travaux*, 43).

Ifen - Medd, 2004. *Les comptes économiques de l'environnement en 2002 - Données économiques de l'environnement - Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement*. Orléans, Ifen, 180 p., 25 €.

L'ifen élabore et diffuse des informations scientifiques et statistiques sur l'environnement. Il s'appuie sur un important réseau de partenaires : services statistiques de l'Etat, établissements publics scientifiques et organismes spécialistes de l'environnement.

les données de l'environnement

La lettre thématique mensuelle de l'Institut français de l'environnement
Abonnement : 8 numéros, 16 €

61, boulevard Alexandre Martin
45058 Orléans Cedex 1
Tél : 02 38 79 78 78 Fax : 02 38 79 78 70
E-mail : ifen@ifen.fr
Web : <http://www.ifen.fr>

Directeur de la publication

Bruno Tréguët

Rédaction en chef

Françoise Nirascou

Coordination éditoriale

Christelle Larrieu, Sophie Margontier

Auteur

Michel Hubert (Ifen)

Équipe de rédaction

Cécile Dormoy (Ifen), Jean-Pierre Chang (Citepa),
Didier Hauglustaine (CNRS)

Maquette-Réalisation

BL Communication

Dépôt légal

ISSN 1250-8616

N° CPPAP 8-3086