

LE POINT DES CONNAISSANCES SUR...

ED 5009

Le laser (Lumière Amplifiée par Stimulation d'Émission de Rayonnements) peut être défini comme étant une source de rayonnements optiques cohérents, fréquemment incorporée dans un appareil ou une machine, émettant souvent un faisceau de rayonnements monochromatiques (ultraviolets, visibles, infrarouges) et dont les ondes sont en général en accord de phase entre elles. Les lasers sont utilisés dans des secteurs d'activité aussi variés que l'industrie, les arts et spectacles, le domaine médical et hospitalier, l'enseignement ou la défense nationale et ne sont pas sans risques.

Découpe d'acier inox au laser.

Les lasers

LA TECHNOLOGIE MISE EN ŒUVRE

Pour générer l'émission, il faut exciter correctement un milieu actif contenant des atomes, des ions ou des molécules dans des conditions telles qu'ils puissent libérer de l'énergie par émission stimulée. Cette stimulation provient de l'interaction

entre flux laser à l'intérieur de la cavité et milieu actif excité, nécessitant en général plusieurs passages de la lumière dans la cavité avant la sortie du rayonnement. L'excitation, appelée « pompage », peut se faire sous des formes différentes : pompage électrique (décharge électrique dans un gaz avec excitation électronique, par exemple), pompage optique (tube à éclairs, par exemple), pompage chimique (réaction chimique entre deux substances). Ce milieu actif est placé dans une cavité de résonance limitée par au moins deux surfaces dont l'une est la plus réfléchissante possible. L'autre face, très légèrement moins réfléchissante, permet le passage d'une partie du faisceau à l'extérieur de la cavité.

Pour les applications courantes, les **longueurs d'onde λ** du rayonnement émis par chaque type de laser sont généralement comprises entre 0,19 μm et 10,6 μm , dans une région du spectre des ondes électromagnétiques incluant la lumière visible (0,4 à 0,78 μm), l'ultraviolet (inférieure à 0,4 μm) et l'infrarouge (supérieure à 0,78 μm).

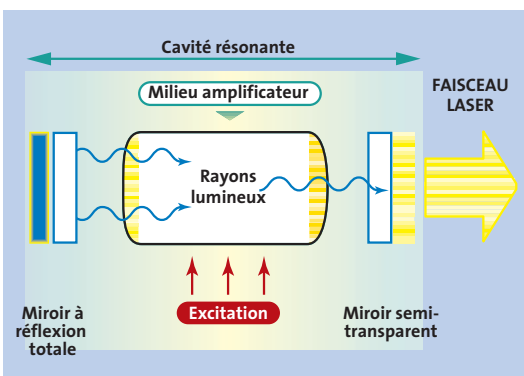
PRINCIPALES UTILISATIONS

Les utilisations professionnelles des lasers dépendent étroitement de leurs caractéristiques (lasers à émission continue ou lasers impulsions, puissance ou énergie transportée...) et peuvent être classées selon la nature du milieu actif (voir tableaux 1 et 2 pages suivantes).

RISQUES POUR L'HOMME

Effets sur la peau

Le danger du rayonnement laser pour la peau résulte essentiellement de ses effets thermiques qui sont fonction, tant de la surface stimulée que de la région du corps exposée, de sa vascularisation et de la pigmentation. Outre la longueur d'onde du rayonnement, d'autres facteurs de nature physique interviennent : essentiellement l'énergie (dans le cas d'impulsions) et la puissance (dans le cas des lasers continus). Encore faut-il noter que l'énergie



absorbée peut être en partie évacuée par rayonnement calorifique ou par l'intermédiaire de la circulation sanguine.

En cas d'exposition accidentelle, les effets induits varient d'un érythème bénin (faible rougeur de la peau) à la phlyctène (ampoule ou cloque) pour toutes les longueurs d'onde du spectre. Les rayonnements ultraviolets $UV_{B,C}$ ainsi que les infrarouges $IR_{B,C}$ sont les plus agressifs car ils sont fortement absorbés à la surface de la peau, voire plus profondément dans le cas du laser YAG. Une exposition à ces rayonnements sous forme d'impulsions courtes et de grande puissance de crête peut engendrer une carbonisation superficielle de couleur grise de la couche cornée de l'épiderme. Toutefois, l'exposition à des éclairages énergétiques particulièrement intenses, comme ceux émis dans l' IR_C par certains lasers CO_2 , peut induire une lésion profonde susceptible, dans certains cas, d'atteindre l'os.

Effets sur l'œil

Ces effets constituent les risques essentiels et sont fonction principalement des caractéristiques physiques du laser et de facteurs dépendant des propriétés optiques des différents milieux oculaires :

Transmission des rayonnements par les milieux oculaires

Ces milieux transparents transmettent bien les rayonnements visibles, moins bien ceux du proche infrarouge et absorbent considérablement les rayonnements ultraviolets (surtout $UV_{B,C}$) ainsi que les rayonnements infrarouges moyens et lointains $IR_{B,C}$. L'épithélium pigmentaire de la rétine ainsi que la choroïde, qui tapissent le fond de l'œil, absorbent fortement les rayonnements incidents de lumière visible, plus particulièrement ceux dont les longueurs d'onde sont courtes et, à un degré moindre, les infrarouges proches IR_A . La remarque précédente concerne surtout les lasers YAG-Néodyme.

Les rayonnements ultraviolets moyens et lointains $UV_{B,C}$, absorbés par les parties antérieures de l'œil, peuvent provoquer une kératoconjunctivite (inflammation de la cornée et de la conjonctive). Ce risque n'est guère encouru que pour les lasers UV, dont les excimères. Les UV_B sont susceptibles de provoquer une lésion du cristallin à la suite d'une seule exposition, contrairement aux UV_A dont l'action cataractogène n'apparaît qu'après des expositions chroniques.

Les rayonnements infrarouges moyens et lointains $IR_{B,C}$ sont susceptibles d'occasionner des brûlures de la cornée. Pour des longueurs d'onde comprises entre 0,8 et 2,0 μm , ils peuvent également entraîner l'apparition d'une cataracte dans le cas d'exposition prolongée avec des éclairages énergétiques importants.

Influence du diamètre pupillaire (pour : $0,4 \mu m \leq \lambda \leq 1,4 \mu m$)

Le diamètre de la pupille varie de 2 à 7 mm de la lumière du jour à l'obscurité et modifie le flux lumineux reçu par la rétine dans un rapport de 1 à 12. Cependant, dans le cas des lasers, la contraction de la pupille peut être trop lente pour participer à la protection de la rétine. C'est pourquoi les densités maximales d'énergie admissibles pour la rétine sont calculées en supposant la pupille complètement dilatée.

Focalisation des rayonnements transmis à la rétine

Les rayonnements transmis à la rétine par les milieux optiques de l'œil sont focalisés par le cristallin. La densité de puissance ou d'énergie reçue peut être 5.10^6 fois plus élevée au niveau de la rétine qu'à celui de la cornée. On tient compte de ce facteur pour définir les densités de puissance ou d'énergie maximales admises pour la cornée. La rétine est particulièrement vulnérable aux rayonnements du spectre visible et du proche infrarouge (400 à 1400 nm). Si la densité d'énergie reçue par

la rétine est excessive, elle provoque un échauffement des tissus, une brûlure et une lésion des photorécepteurs, cônes et bâtonnets. Cette lésion, souvent de dimension limitée, varie de la dépigmentation peu perceptible à l'hémorragie voire à la déchirure sous l'effet mécanique de l'onde de choc. Parmi ces atteintes irréversibles, celles de la fovéa sont les plus graves car elles atteignent la vision centrale avec perte importante de l'acuité visuelle. Mais d'autres altérations fonctionnelles de degrés divers peuvent aussi s'observer, telles qu'amputation de la vision périphérique, sensibilité accrue à l'éblouissement...

Il convient également de ne pas négliger :

Les risques électriques et électromagnétiques

Les lasers présentent les risques classiques liés à la présence de courant électrique à haute tension (quelques centaines à quelques milliers de volts pour certains) pour le fonctionnement des lampes à éclairs ou, plus généralement, pour l'alimentation des dispositifs de pompage optique ou électrique.

Les risques de pollutions chimiques et biologiques

L'utilisation des lasers sur des matériaux à transformer peut entraîner une pollution chimique, voire biologique (interventions chirurgicales, par exemple). Celle-ci se présente sous forme d'aérosols ou de gaz toxiques résultant de la dégradation thermique de ces matériaux et/ou celle de substances adhérent éventuellement à leur surface (revêtements anticorrosion, traces de solvant de dégraissage...).

Les risques indirects « machines »

Ils peuvent être liés aux lasers : dangers d'incendie, de projection de particules incandescentes, d'appauvrissement en oxygène de l'air (dégagement

Tableau 1 - Caractéristiques générales essentielles de lasers industriels et de laboratoires (avec valeurs indicatives)					
Matériau actif	Longueur d'onde (en nanomètres)	Régime : continu ou pulsé(**)	Cadence des impulsions	Énergie ou puissance	Utilisation
Azote	337	≤ 100 ns	1 à 100 Hz	1 mJ à 100 mJ	photochimie, recherche, impression graphique
Excimères (*) (KrF, ArF, XeCl)	190 à 350	10 à 60 ns	1 Hz à 10 kHz	1 mJ à 300 mJ (Pmoy < 1,2 kW)	impression, marquage, photochimie, spectroscopie, microusinage, nettoyage
Hélium - Néon	632	continu		0,1 à 100 mW	télémétrie, topographie, métrologie, holographie, impression
Gaz ionisé (Kr,Ar)	350 à 800	continu		0,1 W à 40 W	télémétrie, spectroscopie, recherche, spectacles, prototypage rapide
Dioxyde de carbone CO ₂	10 600	10 à 100 ns continu	10 kHz	1 W à 50 kW	découpage, marquage, perçage, soudage, traitement thermique
Vapeurs métalliques Cuivre...	500 à 15 000	20 ns	quelques Hz	quelques mJ	recherche, séparation isotopique de l'uranium
Rubis	694	30 ns 500 μs	0,03 à 10 Hz faibles cadences : 0,03 Hz à 5Hz	0,1 à 10 J 0,05 à 5 J	holographie dynamique, télémétrie, perçage, micro-usinage, soudage
Yag - Néodyme	1 064 532 (doublé en fr.) 355 (triplé en fr.) 266 (quadruplé en fr.)	30 ps à 30 ns et continu	1 à 80 kHz	0,1 mJ à 50 J jusqu'à quelques kW	vaporisation métal, recuits, perçage, soudage, nettoyage, gravure
Verre dopé au néodyme	1 060	de 0,5 à 5 ns	10 à 20 Hz	1 à 400 J	soudage par points, gravure, perçage, spectrographie
Titane saphir	accordable de 370 à 3 000	< 8.10 ⁻⁶ ns	1 à 50 kHz	0 à 0,2 J	spectroscopie, recherche
Diodes lasers	selon matériaux utilisés : accordable de 447 à 30 000	continu (superposition de signaux impulsionnels)		1 à 65 mW	télémétrie, lecture de codes-barres, bureautique, audio-vidéo-hifi
Colorants	variable 350 à 1 000	continu ou pulsé		quelques mW à quelques W	spectroscopie, étude des matériaux

(*) Excimères = contraction de « Excited dimers » : molécules dimères excitées (ou exiplexes). Cette définition repose sur le fait que ces dimères n'existent que dans un état excité électronique mais pas naturellement.
(**) Dans certaines configurations spécifiques, il est possible d'obtenir des impulsions géantes de très courte durée (< 10 ps).

d'azote) mais aussi nuisances sonores intenses, éventualité d'émanations de solvants ou colorants et risques mécaniques dans la mise en œuvre d'une robotique.

Les risques liés au facteur organisationnel et au comportement individuel

Ils sont le fait de la présence de personnes indirectement concernées, parfois non formées, des habitudes réflexes susceptibles d'exposer malencontreusement les yeux de l'opérateur et de l'accoutumance au danger.

COMMENT PROTÉGER LES HOMMES ? QUELLES MESURES DE PRÉVENTION METTRE EN PLACE ?

Évaluation de l'ordre de grandeur du risque

Cette estimation est généralement à effectuer par le constructeur en référence aux normes précitées en fonction de la nature de la source, de la puissance de sortie de l'appareil et de la longueur d'onde d'émission.

On considère a priori que certains lasers, sans être inoffensifs, ne peuvent occasionner des lésions très graves aux personnes et n'appellent pas de mesures de protection trop importantes. Ce sont en principe les lasers de classes 1, 2 et, à la limite 3R. Il convient toutefois de rester prudent et d'éviter que l'œil soit atteint par un rayonnement laser, quelle que soit la classe en cause, notamment du fait d'une focalisation toujours possible sur la rétine. A fortiori, pour les lasers de classes 3B et 4, le calcul ou la mesure des densités d'énergie apportées et, en conséquence, des mesures de protection spécifiques sont indispensables.

LA RÉGLEMENTATION



La mise au point des premiers lasers est récente (1953)

et la technologie évolue très rapidement pour des applications de plus en plus diversifiées. Cela explique en partie la faiblesse réglementaire tant en Europe qu'en France. Pour l'instant, le principal texte de référence est la norme **NF EN 60825-1** « Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : Classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur » qui

range les lasers en cinq classes de risques (1,1 M - 2,2 M - 3 R - 3 B - 4) et dans laquelle on trouve aussi des définitions de termes techniques. D'autres normes spécifiques traitent de questions particulières. Les principaux textes sont la **NF EN 12626** « Sécurité des machines. Machines à laser. Prescriptions de sécurité » (E 60-611) et la **NF EN 60601-2-22** « Appareils électromédicaux. Partie 2 : règles particulières de sécurité pour les appareils thérapeutiques et de diagnostic à laser ».

Dispositions constructives des appareils

Les dispositions des normes doivent être appliquées par le constructeur, notamment à la classification des appareils, la mise en place de dispositifs de sécurité adaptés et l'étiquetage. La fourniture d'une notice d'utilisation et de consignes de sécurité est obligatoire.

Mesures de protection collective

Dans un local fermé tel qu'atelier, laboratoire, salle d'opération..., le risque laser dépend du cheminement du faisceau à l'intérieur de la pièce et de ses possibilités de réflexion et de diffusion. Une zone dite contrôlée doit être déterminée et balisée par des pictogrammes normalisés (**NF EN 60825-1** et **NF X 08-003**). Dans cette zone, les risques dus à la réflexion du faisceau peuvent être atténués par un bon éclairage intérieur qui contracte la pupille, un revêtement mural non réfléchissant, l'élimination de tout objet ou surface réfléchissante, tels que pièces ou instruments métalliques, vitres, miroirs, surface liquide... Le trajet du faisceau doit, dans la mesure du possible, être protégé par une enceinte. Si cela n'est pas le cas,

il doit être situé au dessus ou très en dessous du niveau des yeux. Le trajet du faisceau doit être limité par des écrans absorbants placés après la cible. Pendant l'émission, la source et les systèmes réfléchissants doivent être immobilisés de façon à interdire un balayage inopiné de la pièce par le faisceau laser. L'émission effective du rayonnement laser doit être immédiatement identifiable dans le local, soit par un signal sonore, soit par un voyant lumineux. L'accès de la zone n'est autorisé qu'aux seules personnes dont la présence est nécessaire, pour lesquelles le port de lunettes protectrices spécifiques au laser utilisé est indispensable.

Mesures de protection individuelle

Protection de la peau

S'il y a possibilité d'approcher les mains de zones non protégées du parcours d'un faisceau laser puissant, il est nécessaire de porter des gants de protection ininflammables. Les gants tricotés ne conviennent pas, dans la mesure où ils peuvent laisser pénétrer le faisceau. Cette protection convient pour des faisceaux de quelques watts à quelques dizaines de watts. Au-delà, il faut atténuer le faisceau avant d'intervenir. Les gants réfléchissant la lumière sont prohibés.

Tableau 2 - Caractéristiques générales essentielles de lasers médicaux

Matériau actif	Longueur d'onde (en nanomètres)	Régime : continu ou pulsé	Cadence des impulsions	Énergie ou puissance	Utilisation
Excimères (*)	190 à 350, 248, 308	pulsé	1 à 400 Hz	100 mJ à qqes joules	angioplastie, ophtalmologie
Vapeurs métalliques (or), plasma	511 et 578 Or : 628	pulsé	10 kHz	5 à 20 W	dermatologie, chirurgie plastique, photothérapie
Hélium - Néon	632	continu		0,1 à 50 mW	acupuncture, médecine sportive et esthétique, rhumatologie, auriculothérapie, dermatologie, traumatologie
Argon krypton (plasma)	488 - 515 - 647 - 976	continu		0,1 à 20 W	dermatologie, pompage de laser à colorant, ophtalmologie, photocoagulation, chirurgie plastique
Monoxyde de carbone CO	5 300	continu		1 à 20 W	ORL, gynécologie, dermatologie, odontologie
Dioxyde de carbone CO ₂	10 600	pulsé - continu	10 kHz	100 J à 100 W	cardio-vasculaire, ORL, dermatologie, gynécologie, chirurgie plastique, gastrologie, odontologie
Yag - Erbium	2 930	pulsé	quelques Hz	10 J.cm ⁻²	dermatologie, effets combinés des lasers CO ₂ et excimères, ophtalmologie
Yag doublé avec cristal de Kr	532	pulsé - continu	1 à 50 Hz	1 à 120 W	dermatologie
Rubis	694	pulsé	quelques Hz	10 ou 50 mJ	photolithotritie, dermatologie, destruction des calculs rénaux
Diodes lasers	850	pulsé - continu		quelques W	ophtalmologie, angioplastie
Yag - Néodyme doublé avec cristal KDP, KTP	1 064 532 (doublé en fréquence)	pulsé - continu	1 à 50 Hz	1 à 60 W	ORL, gynécologie, urologie, neurologie, chirurgie générale, odontologie, ophtalmologie, dermatologie
Titane saphir	700 à 1 070 - Doublé : 350 à 535	pulsé - continu	1 à 50 kHz	quelques mJ - 1 W	photothérapie
Yag - Holmium	2 100	pulsé	1 à 5 Hz	0,5 à 100 J.cm ⁻²	lithotritie
Colorants	320 à 1 200 surtout : 504 et 630	pulsé - continu		quelques W	photolithotritie, photothérapie, dermatologie, photochimiothérapie, photocoagulation

(*) Excimères = contraction de « Excited dimers » : molécules dimères excitées (ou exiplexes). Cette définition repose sur le fait que ces dimères n'existent que dans un état excité électronique mais pas naturellement.

Protection de l'œil

Outre la protection collective, le port de lunettes protectrices est l'élément primordial de la sécurité des personnes travaillant à l'aide de lasers. Les lunettes vendues en Europe doivent porter le marquage CE, attestant qu'elles sont conformes aux exigences essentielles de sécurité de la Directive européenne n° 89/686/CEE relative aux équipements de protection individuelle. Les normes **NF EN 207** (sur les lunettes de protection laser) et **NF EN 208** (sur les lunettes de protection pour travaux de réglage sur les lasers) permettent de vérifier cette conformité en définissant les spécifications, les méthodes d'essai et le mar-

quage de ces équipements. Elles imposent un marquage d'identification sur les lunettes comprenant, en particulier, le domaine spectral d'utilisation et le numéro d'échelon. Ces normes constituent des guides pour le choix et l'utilisation (adaptation aux longueurs d'onde d'émission, présence de protections latérales, garantie de vision correcte, critères de solidité et contrôles périodiques pour la surveillance d'éventuelles dégradations). Il convient toutefois d'examiner si les matériaux d'absorption de ces lunettes ne sont pas susceptibles de se comporter en colorants saturables. Dans ces cas, pour des flux très élevés, la lunette de protection peut devenir trans-

parente au faisceau et occasionner des risques accrus. Il y a donc nécessité de vérifier la qualité de l'équipement de protection individuelle.

Autres mesures de protection

Protection contre les risques électriques

Il convient de respecter les dispositions du **décret n°88-1056** du 14 novembre 1988 concernant la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.

Protection contre la pollution chimique

En cas d'émission de fumées insalubres, irritantes ou toxiques, il y a lieu de capter ces fumées à la source, au fur et à mesure de leur production ou de les piéger dans des filtres adaptés (en particulier pour les lasers médicaux). Les systèmes de captage employés à de telles fins sont analogues aux matériels utilisés pour le soudage à l'arc.

LES TRAVAUX DE L'INRS ET SES PARTENAIRES

Perception et connaissance des risques

■ Une étude effectuée auprès de deux catégories d'utilisateurs (ateliers de production industrielle et laboratoires de recherche) a révélé de grandes différences dans leur connaissance et leur représentation des risques, leur niveau d'information et la sécurité d'emploi du matériel. En conséquence, un programme de prévention devrait intégrer des actions sur les plans technique, ergonomique, organisationnel, informatif et formatif, tenant compte notamment des interactions possibles entre différents utilisateurs d'une même installation.

■ Pour répondre aux problèmes posés par les risques engendrés par les nouvelles techniques de soudage et de découpe utilisées en association avec des robots industriels, l'INRS, en collaboration avec l'**APAVE Nord-Ouest**, a réalisé une étude recensant les dangers relatifs à ces procédés et les moyens de protection appropriés.

■ Une intervention auprès des Pouvoirs Publics a débouché sur l'arrêté ministériel du 13 mars 1998 portant suspension de la fabrication, de l'importation, la vente et l'utilisation de pointeurs laser de classe égale ou supérieure à 3.

Prévention technique

L'INRS participe au projet de norme européenne concernant la classification des machines mettant en œuvre des rayonnements.

De plus, les équipements de protection individuelle (EPI) sont pris en compte dans le cadre de la mission de l'INRS d'organisme notifié par les Pouvoirs Publics.

Suite à une étude menée avec l'**Institut d'optique théorique et appliquée du CNRS**, l'**Université de Paris-XI** et l'**École Supérieure d'optique**, l'INRS a attiré l'attention des concepteurs et des utilisateurs de lunettes de protection contre les lasers sur des limites possibles de certains équipements dans le cas de flux lumineux élevés.

Lors du Colloque organisé par la Société Française d'Optique – 17, 18 et 19 novembre 1999 – J.-C. André et S. Salsi de l'INRS ont présenté les effets photo thermiques des lasers continus et leur normalisation.

À l'avenir, une publication est prévue, fruit d'une collaboration entre l'INRS et l'Université de Bourgogne : *Évaluation des risques optiques induits par le nettoyage laser des bâtiments. Mesure de dangerosité et confrontation aux normes EN 60825-1*. Une concertation a été conduite entre autres avec le **CEA** (lasers de laboratoire...), l'**IREPA Laser** et l'**APAVE** (lasers industriels) visant à la préconisation pour les machines dangereuses de zones contrôlées, à l'instar des prescriptions réglementaires concernant les rayonnements ionisants.

Surveillance médicale

En médecine du travail, la surveillance ophtalmologique des personnels susceptibles d'être exposés au risque laser a pour objectif de prévenir, voire de mettre en évidence d'éventuelles manifestations pathologiques et de fournir les éléments médico-administratifs permettant leur imputation en tant qu'accidents du travail. Un examen d'aptitude, une surveillance périodique et un bilan ophtalmologique sur demande expresse du médecin du travail doivent être réalisés.

En cas d'incident ou d'accident d'exposition, un contrôle ophtalmologique s'impose dans les plus brefs délais.

Le médecin du travail s'assure en plus que tout changement de conditions de travail lui soit signalé de manière à adapter son protocole de surveillance. Il doit également vérifier que l'employeur a bien rempli ses obligations d'information, de formation des salariés et de mise à disposition des équipements de protection régulièrement contrôlés.

LES PUBLICATIONS INRS

Articles parus dans la revue *Cahiers de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail*

■ ND 1801 – « Représentation des risques du laser. Étude auprès de deux catégories d'utilisateurs ».

■ ND 1886 – « Valeurs limites d'exposition aux agents physiques en ambiance de travail ».

■ ND 1980 – « Robots de soudage et de découpe. Évaluation et prévention des risques engendrés par les nouvelles technologies d'usinage ».

■ ND 2075 – « Équipement de protection contre les lasers. Comportement non linéaire induit par des flux lumineux élevés ».

■ ND 2093 – « Les lasers. Risques et prévention ».

Autres documents

■ ED 61 et ED 62 – tirés à part de *Travail et Sécurité* de novembre et décembre 1996

« Les lasers de chantiers du BTP. Appareils d'alignement et rotatifs ».

■ Dossier de la revue *Travail et Sécurité* de novembre 2000 « L'utilisation en sécurité du laser ».

Note : pour des définitions de termes techniques, on peut, par exemple, se reporter au Manuel d'optique de Germain Chartier, éditions Hermès, 1997.