

# Tests d'homologation des appareils de photopolymérisation II: Situation en 1998

Jürg Thormann et Felix Lutz

Cliniques de médecine dentaire, de parodontologie et de cariologie, Centre de médecine dentaire et de stomatologie, Université de Zurich

Mots clé: appareils de photopolymérisation, guides de lumière à fibres optiques

Adresse pour la correspondance:

Prof. Dr méd., Dr méd.-dent. Felix Lutz  
Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Zürich, Plattenstr. 11, CH-8028 Zürich  
tél. 01 634 32 71, fax 01 634 43 08  
e-mail: lutz@zzmk.unizh.ch

Adaptation française de Thomas Vauthier

(Bibliographie et illustrations voir texte allemand, page 1299)

tantes pour la polymérisation. Les valeurs absolues mesurées avec un guide lumineux standard et sous une tension de 230 V se situaient entre 143,4 mW et 389,7 mW pour une longueur d'onde comprise entre 400 et 520 nm, et entre 17,7 mW et 41,8 mW pour une longueur d'onde entre 462 nm et 472 nm. Les performances spécifiques résultant de ces mesures étaient comprises entre 268,3 mW/cm<sup>2</sup> et 862,6 mW/cm<sup>2</sup> pour une longueur d'onde entre 400 et 520 nm, et entre 33,5 mW/cm<sup>2</sup> et 95,4 mW/cm<sup>2</sup> pour une longueur d'onde entre 400 et 520 nm. Les embouts qui possédaient la plus grande «fenêtre d'entrée» ont montré la plus importante puissance spécifique. Les embouts «turbo» possèdent à la fois une grande «fenêtre d'entrée» et une petite «fenêtre de sortie», de sorte qu'ils cumulent les deux avantages mentionnés plus haut. La répartition de l'énergie à la sortie des guides lumineux n'était pas homogène, prenant la forme d'un cône. L'intensité

Dans le présent travail, 16 lampes à polymériser différentes, commercialisées sur le marché suisse, ont été testées pour les paramètres techniques suivants: équipement, puissance lumineuse, répartition du flux lumineux à la fenêtre de sortie du guide lumineux, ainsi que pour les composantes intégrées, telles que radiomètre, minuterie et ventilateur de refroidissement. Le procès-verbal d'essai présenté dans la première partie de cette publication a servi de base théorique et pratique pour ces tests (11/1999).

L'équipement des appareils a considérablement varié d'un type de lampe à l'autre. Ainsi, l'appareil Optilux 500 proposait tous les accessoires possibles et imaginables, si bien qu'il peut être considéré comme faisant référence en la matière. Le soin est laissé à l'utilisateur de savoir si toutes ces options sont nécessaires. Toutefois, un timer, un radiomètre et un stabilisateur de tension peuvent être considérés comme des composantes essentielles, étant donné qu'ils peuvent influencer tant la durée que l'intensité du rayonnement lumineux. Le flux et la densité du rayonnement ont été mesurés respectivement en milliwatt et en milliwatt par cm<sup>2</sup> dans deux plages différentes de longueurs d'ondes impor-

était maximale au centre et diminuait au fur et à mesure que le point analysé s'éloignait du centre. Comme on pouvait s'y attendre, d'après les tests de la puissance spécifique, cette répartition était plus homogène pour les guides de lumière à diamètre réduit. Seuls les embouts «turbo» ont présenté des diagrammes de répartition d'énergie moins favorables.

En faisant varier la tension du courant primaire de 230 V à 207 V, respectivement à 244 V, et en comparant les performances à celles obtenues à 230 V, il s'est avéré que tous les appareils n'étaient pas équipés d'un stabilisateur de la tension secondaire.

Seuls 9 des 19 appareils testés étaient munis d'un radiomètre intégré. La comparaison des valeurs de mesure spécifiques enregistrées par le radiomètre de laboratoire, d'une part, et les valeurs indiquées par le radiomètre intégré, d'autre part, n'ont montré des puissances identiques que

dans deux cas. Les valeurs limites programmées par les fabricants ont fait apparaître des variations entre 70 mW/cm<sup>2</sup> et 300 mW/cm<sup>2</sup> et se situaient, par conséquent, nettement en dessous des puissances recommandées.

## Introduction

Dans les différentes études publiées, la qualité des lampes a été évaluée par des mesures de la profondeur de pénétration du processus de polymérisation. Cette puissance peut être évaluée par deux méthodes de mesure. D'une part, l'énergie de la lumière émise par l'appareil de photopolymérisation peut être mesurée directement (BARGHI et coll. 1994, FAN et coll. 1987, KULLMANN 1987, LEE et coll. 1993, MANGA et coll. 1995, MCCABE 1989, MOSELEY et coll. 1986, NOMOTO et coll. 1994, PEUTZFELD 1994, PIRES et coll. 1993, RUEGGERBERG et coll. 1994, RUEGGERBERG et coll. 1993), d'autre part, la performance de pénétration de polymérisation peut être déterminée par l'analyse de la dureté finale atteinte sur des échantillons de composite (ERNST et coll. 1996, FOWLER et coll. 1994, HOTZ et coll. 1989, KULLMANN 1987, MANGA et coll. 1995, MCCABE 1989, NOMOTO et coll. 1994, PEUTZFELD 1994, PIRES et coll. 1993, RUEGGERBERG et coll. 1994, RUEGGERBERG et coll. 1993, UNTERBRINK & MUESSNER 1995, WOJTEK et coll. 1993).

En principe, le seul paramètre décisif influençant le processus de la photopolymérisation est l'énergie du rayonnement transmise sur le composite. Celle-ci est le résultat d'une part du flux du rayonnement sur l'objet et d'autre part de la durée d'exposition au rayonnement. Le flux lumineux sur l'objet dépend d'une part du flux lumineux à la sortie du guide de lumière en fibres optiques et d'autre part de différents facteurs susceptibles de l'influencer sur son trajet vers l'objet. Ces facteurs sont la distance entre le guide lumineux et l'objet, le diamètre de celui-ci, ainsi que le médium physique entre le guide lumineux et l'objet. Pour ces raisons, le flux lumineux sur l'objet peut varier selon le type de technique de polymérisation (directe, à travers la dent ou à travers une pièce façonnée), de même que selon le type de la préparation dentaire (classes de cavités I à V, facettes, préparations pour inlay ou couronne).

Ces considérations mettent en évidence le fait que les paramètres du flux lumineux à la sortie du guide lumineux et/ou de la durée d'irradiation doivent être adaptés en fonction des différentes préparations ou des techniques de polymérisation, de sorte à atteindre une énergie de rayonnement suffisante au niveau de l'objet. Un choix approprié de programmes d'irradiation, comprenant des sélections adaptées aux différentes formes de préparations, pour une technique de polymérisation donnée – régissant par conséquent le réglage des paramètres du flux lumineux à la sortie du guide lumineux et de la durée d'irradiation – faciliterait non seulement considérablement le processus de la photopolymérisation pour l'utilisateur, mais assurerait également une qualité constante de la polymérisation obtenue.

Actuellement, aucun appareil de photopolymérisation proposant différents modes d'exposition n'est disponible, mis à part les programmes «soft start». Or, ces derniers ont permis d'obtenir, dans certains essais, une meilleure adaptation marginale initiale après la polymérisation, par rapport aux irradiations avec la technique conventionnelle (MEHL et coll. 1997). Il s'est toutefois avéré que cet avantage initial se perd progressivement dans les essais à long terme sous des contraintes physiologiques (TSCHUPP 1996), de sorte que l'inconvénient de la durée de polymérisation plus longue l'emporte en fin de compte. Des essais actuellement en cours tentent de déterminer la meilleure ma-

nière de faire varier les paramètres du flux lumineux à la sortie du guide lumineux et/ou de la durée d'irradiation pour les différentes techniques de préparations et de photopolymérisation, afin de garantir une pénétration optimale. Les paramètres de puissance évalués dans la présente étude servent dès lors de base de départ.

Les présents essais en laboratoire sont destinés à mettre en pratique le procès-verbal (THORMANN et al. 1999) décrit dans la première partie de cette publication (11/1999), dans le but d'établir des tests d'homologation des appareils de photopolymérisation. Outre les valeurs physiques de la puissance du champ de rayonnement, qui servent en premier lieu à l'évaluation de la qualité de la photopolymérisation, certaines composantes importantes des appareils ont également été testées.

## Les appareils de photopolymérisation testés

Dans les essais présentés, les auteurs ont testé 3 unités de chaque type de 16 lampes à polymériser commercialisées sur le marché suisse (Tab. I). Par souci de ne pas inclure seulement les guides de lumière standard livrés avec les appareils, les mesures ont été élargies pour évaluer également les autres embouts disponibles en option (Tab. II). Les résultats publiés représentent des valeurs moyennes pour les trois unités testées de chaque type, sauf mention contraire.

## Données techniques et caractéristiques d'équipement

Les données techniques importantes et les caractéristiques d'équipement ont été résumées dans un tableau récapitulatif, en se fondant sur le procès-verbal des données pour chaque type d'appareil individuel.

Il s'est clairement avéré que les appareils testés présentent des différences quant à un certain nombre de caractéristiques. En matière de concept de construction, il convient de différencier d'abord les lampes directes et celles possédant un câble en fibres optiques séparé, transportant la lumière à distance (LUTZ et coll. 1992), ensuite le type d'alimentation électrique, à savoir lampes à accumulateur ou à alimentation directe par le réseau, et finalement le lieu de montage, soit les lampes externes et celles qui sont montées sur l'unité. Il est impossible, dans le cadre du présent travail, de traiter en détail l'ensemble des caractéristiques techniques (THORMANN 1998). Toutefois, il est important de connaître un certain nombre de données techniques et de caractéristiques d'équipement afin d'être en mesure d'interpréter correctement les résultats des essais réalisés.

Selon le type d'appareil, la puissance nominale des lampes (-tungstène) halogènes à réflecteur variait entre 35 Watt et 150 Watt (Tab. I). Différents groupes de puissance pouvaient être attribués selon les catégories d'appareils spécifiques. De par leur puissance de 150 Watt, les trois lampes équipées d'un câble de conduite lumineuse externe (Translux EC/ECS, Sirona C1 et C4) se distinguent nettement des lampes dites directes, dont les puissances nominales se situaient en dessous de 100 Watt. En outre, l'appareil ProLite, inclus dans les essais, a montré la plus faible puissance nominale, à savoir 35 Watt seulement.

La plupart des fabricants proposent un grand choix de conduits lumineux (Tab. II). Même les appareils livrés avec un seul embout peuvent être équipés de conduits lumineux en option, selon leurs listes d'accessoires. La plupart des guides lumineux, dont tous les modèles standards, avaient le même diamètre que les fenêtres d'entrée et de sortie de la lumière. Le diamètre des

Tab. I Caractéristiques d'équipement

Type d'appareil	Adresse du fabricant	Ampoule halogène à réflecteur	Avertisseur minuterie		Mode minuterie		Radio- mètre
			sonore	visuel	fonc. en continu	fonc. par intervalles	
<b>Heliolux DLX (A)</b>	Vivadent Ets. FL - 9494 Schaan	<b>12V, 75W</b>	X		X		analogique
<b>Coitolux 4 (B)</b>	Coitène AG CH-9450 Altstätten	<b>12V, 75W</b>				X	numérique
<b>Optilux 500 (C)</b>	Kerr GmbH D - 76185 Karlsruhe	<b>12V, 80W</b>	X	X	X	X	numérique
<b>Elipar Highlight (D)</b>	Espe Dental-Medizin D - 82229 Seefeld	<b>12.5V, 75W</b>	X			X	analogique
<b>XL 3000 (E)</b>	3M Schweiz AG CH - 8803 Rüschlikon	<b>12V, 75W</b>	X		X	X	analogique
<b>Acta (F)</b>	Satelec GmbH D - 40822 Mettmann	<b>15.7V, 44W</b>	X	X		X	numérique
<b>Polofil Lux (G)</b>	Voco GmbH D - 27457 Cuxhaven	<b>12V, 75W</b>	X		X	X	-
<b>Spectrum Plus (H)</b>	Dentsply DeTrey GmbH CH - 6300 Zug	<b>9.8V, 49W</b>				X	analogique
<b>ProLite (I)</b>		<b>14V, 35W</b>		X	X	X	analogique
<b>Translux EC/ECS (K)</b>	Heræus AG CH - 8045 Zürich	<b>15V, 150W</b>	X		X		-
<b>Translux CL (L)</b>		<b>12V, 100W</b>	X		X		-
<b>Degulux (M)</b>	ADS Dentaltechnologie AG CH - 6331 Hünenberg	<b>12V, 75W</b>	X		X	X	-
<b>CU - 100 RLC (Q)</b>	Jovident International BV NL-5628 TC Eindhoven	<b>12V, 75W</b>	X	X	X	X	analogique
<b>PolyLUX 2 (R)</b>	KaVo Dental AG CH - 5200 Brugg	<b>12V, 75W</b>		X		X	-
<b>Polylux C1 (S)</b>	Sirona AG D - 64625 Bensheim	<b>15V, 150W</b>	X	X		X	-
<b>Polylux C4 (T)</b>		<b>15V, 150W</b>	X		X		-

différents guides lumineux se situait entre 6,5 et 10 mm, ce qui représente une différence d'un facteur 2, calculé sur la surface, entre l'embout standard le plus petit et le plus grand. Point à relever, seul un nombre restreint de lampes peuvent être équipées d'un conduit de lumière dit «turbo». L'avantage de ce type spécifique de guide lumineux est de permettre d'obtenir des densités d'énergie plus élevées à la fenêtre de sortie, du fait d'un rétrécissement du diamètre. Pour cette raison, les diamètres de la fenêtre d'entrée et de sortie ne sont pas identiques, la fenêtre d'entrée étant alors plus grande que la fenêtre de sortie. Seuls les appareils Heliolux DLX, Optilux 500, Elipar Highlight et Polyflux 2 peuvent être équipés de guides lumineux à effet turbo. Or, les guides lumineux turbo des deux dernières lampes présentaient des fenêtres de sortie de la lumière de diamètre très faible ( $\leq 6$  mm), donc inférieur à la plage des embouts standard. Outre les guides lumineux standards, tous les appareils proposaient toutefois des embouts de diamètre plus grand ou plus petit, sans effet turbo.

Les différents éléments d'équipement des appareils de photopolymérisation servent à faciliter le processus de polymérisation. Bien qu'en cas d'absence de certains équipements, la polymérisation ne soit pas réellement entravée, il s'avère en pratique que l'utilisation de routine s'en trouve néanmoins limitée (FAN et coll. 1987, MARTIN & JEDYNAKIEWICZ 1995, TAKAMIZU et coll. 1988, WELTE 1992). Il est dès lors indispensable de préciser ces éléments d'équipement essentiels. En examinant les différents types d'appareils testés en fonction de ces critères, il s'est avéré que la lampe Optilux 500 (Kerr/Demetron) propose tous les équipements possibles et imaginables; de ce fait, cet appareil peut servir de référence en matière de caractéristiques d'équipe-

ment. On pourrait toutefois discuter de l'utilité des différentes possibilités d'équipement proposées; en fin de compte, il incombera à chaque praticien individuel de décider des bénéfices potentiels en la matière.

Il convient cependant d'exiger que seules les caractéristiques d'équipement susceptibles d'influencer la qualité de la polymérisation soient intégrées d'office à tous les appareils. Or, la durée d'irradiation et sa puissance sont les facteurs décisifs pour la photopolymérisation. Pour cette raison, la minuterie (timer), le stabilisateur de tension et le radiomètre doivent être considérés comme étant les composantes les plus importantes des lampes de photopolymérisation. Le timer détermine la durée de chaque intervalle d'irradiation et contrôle de ce fait le temps d'exposition lors de la polymérisation, alors que le stabilisateur de tension et le radiomètre servent à maintenir, respectivement à surveiller, la puissance de la lumière émise, contrôlant de la sorte la puissance de rayonnement de l'appareil.

Alors que tous les appareils évalués dans ces essais étaient équipés d'un timer, les conceptions de ces derniers n'étaient pas tous identiques (Tab I). D'après les indications des fabricants, deux lampes seulement, à savoir Heliolux DLX et Translux EC/ECS, n'étaient pas équipées d'un stabilisateur de tension. En revanche, seuls un peu plus de la moitié des appareils étaient munis d'un radiomètre intégré (Tab. I).

### Puissance lumineuse

La répartition spectrale de la lumière émise est fonction, d'une part, de la source de lumière elle-même et, d'autre part, des caractéristiques de transmission du filtre bleu. Dans toutes les

Tab. II Puissance lumineuse des différents guides lumineux dans les plages de longueurs d'ondes 400 à 520 nm et 462 à 472 nm

Type d'appareil	Guide lumineux	Fenêtres actives (FE/FS = fenêtre d'entrée/fenêtre de sortie)			Plaque spectrale 400-520 nm			Plaque spectrale 462-472 nm		
		FE	FS	en cm²	flux lumineux (mW)	densité de flux lumineux (mW/cm²)	par rapport à l'embout standard (%)	flux lumineux (mW)	densité de flux lumineux (mW/cm²)	par rapport à l'embout standard (%)
Vivadent	Harcolex DLA	3	12	0,38	318,75	26,57	100,0	36,75	15,36	100,0
	Harcolex DLA	3	12	0,38	423,59	35,29	133,3	43,68	18,13	133,3
	Large	3	12	0,38	471,14	39,26	147,7	54,43	22,82	147,7
	Pink-Peak	4	5,5	1,75	120,74	21,95	60,73	13,13	5,65	60,73
Coltene	geloglas 3mm	3	7,5	0,44	190,82	41,18	100,0	27,32	61,70	100,0
	geloglas 3mm	4	12	0,45	293,83	244,22	146,6	42,45	27,54	132,5
	geloglas 3mm	7	10	0,78	208,17	208,17	100,0	30,95	47,03	135,4
	geloglas 3mm	8	9	0,67	27,34	301,40	14,3	3,94	65,80	14,4
Dentron/Met	11mm curved 310mm	9	10	0,79	389,76	489,13	100,0	41,86	18,32	100,0
	2mm curved 207mm	12	11,5	0,43	372,53	322,36	117,9	29,29	64,94	117,9
	3mm curved 207mm	11	1,75	1,75	13,20	532,72	111,4	1,47	60,98	3,5
	13mm curved 100mm	12	12	1,33	430,28	379,80	100,0	45,58	40,12	104,8
Eggen	11mm curved 1100mm	13	2,25	0,33	372,28	178,33	100,0	23,05	183,23	100,0
	Standard	14	10	0,79	394,15	493,13	100,0	41,43	52,75	100,0
	Mini	15	0,75	0,40	333,45	537,71	100,0	39,55	65,03	100,0
	Mini	16	1,75	1,25	393,38	397,26	100,0	43,88	28,37	100,0
3M	13mm	13	7,5	0,33	141,41	1311,42	100,0	13,72	143,29	100,0
	15mm	18	11,5	1,04	295,25	284,26	100,0	39,60	26,32	100,0
	17mm	26	7	0,38	192,75	609,72	100,0	30,60	12,93	100,0
	19mm	21	7	0,38	228,70	693,55	100,0	38,70	74,59	100,0
Spectrum Plus	13mm/90° Winkel	23	19	1,33	310,85	234,18	100,0	37,01	27,88	100,0
	15mm/90° Winkel	24	0,25	0,25	419,20	162,8	102,8	60,21	102,4	102,4
	17mm/90° Winkel	25	2,75	0,06	58,51	905,65	228,0	6,30	109,51	228,4
	13mm/90° Winkel	26	19	1,33	273,81	236,14	100,0	32,97	24,97	100,0
Profile	13mm/90° Winkel	27	6,25	0,25	343,45	298,26	100,0	37,90	38,43	100,0
	13mm/90° Winkel	28	13	1,33	224,56	182,20	100,0	27,74	20,90	100,0
	15mm/90° Winkel	29	0,25	0,25	140,00	273,77	103,8	15,46	34,54	103,8
	15mm/90° Winkel	30	2,75	0,06	36,38	534,91	244,0	4,78	60,47	244,0
Kulzer	13mm/90° Winkel	31	13	1,33	187,69	148,88	137,8	24,65	18,57	137,7
	Translux EC	32	8,5	0,25	133,60	481,87	100,0	17,70	53,34	100,0
	Translux EGS	33	7,5	0,44	193,50	438,11	112,8	19,96	45,35	113,0
	Kulzer Translux CL	34	7,35	0,41	295,60	719,19	100,0	33,00	77,51	100,0
Dentaur	13mm/90° Winkel	35	7	0,38	191,60	482,67	100,0	28,60	69,17	100,0
	13mm/90° Winkel	36	1,75	1,75	263,60	558,79	100,0	28,40	55,98	100,0
	13mm/90° Winkel	37	11,75	1,08	374,63	345,67	100,0	37,50	34,58	100,0
	13mm/90° Winkel	38	0,75	0,60	271,60	451,87	100,0	31,20	51,58	100,0
Poly-Lux	13mm/90° Winkel	39	0,75	0,25	281,52	110,58	100,0	30,32	12,73	100,0
	13mm/90° Winkel	40	7	0,18	185,71	107,68	100,0	21,49	125,13	100,0
	13mm/90° Winkel	41	4,5	0,28	114,25	102,85	100,0	13,04	27,38	100,0
	13mm/90° Winkel	42	0,75	0,75	270,41	448,70	100,0	32,07	83,34	100,0
Bismars G3	13mm/90° Winkel	43	7	0,38	183,40	434,59	100,0	17,90	46,57	100,0
	13mm/90° Winkel	44	7	0,38	144,20	374,70	100,0	15,70	40,50	100,0

Types de guides lumineux:

- = embout standard
- = embout turbo
- = embout diffuseur de lumière
- = embouts normaux

gebogen = incurvé  
 90° Winkel = angle de 90°  
 gerade = droit  
 Faserstab = tige en fibres optiques  
 kurze Abwinkelung = angulation courte  
 Handstück = pièce à main

lampes à polymériser testées, une ampoule halogène à basse tension servait de source de lumière. Le filament à incandescence de ces ampoules émet un spectre continu de rayonnement qui s'étend de la plage des UV à celle des infrarouges. Or, en comparaison avec la lumière du jour, la lampe à incandescence émet toujours une proportion plus élevée de rayons dans le spectre rouge. L'intensité globale du rayonnement et par conséquent la puissance s'accroît à la quatrième puissance de la température du filament incandescent; ce faisant, le rayonnement maximal du spectre émis se déplace de la plage des infrarouges vers celle de la lumière visible, en fonction de l'augmentation de la température du filament (OSRAM 1994). A défaut d'intégrer un filtre bleu, l'analyse spectrale de la lumière émise dans la plage de 400 à 520 nm ferait apparaître une courbe s'accroissant en fonction de la longueur d'ondes. Lors de l'analyse des spectres obtenus avec les différents types d'appareils dans la plage des longueurs d'ondes entre 400 et 520 nm, cette particularité des lampes à halogène s'est manifestée dans les plages de longueurs d'ondes dans lesquelles l'absorption, par le filtre bleu, de la lumière émise par l'ampoule halogène à réflecteur a été la plus faible. Dès lors, les spectres des différentes lampes testées montrent une courbe ascendante dans ces plages de longueurs d'ondes. En raison des

propriétés différentes de la transmission, respectivement de l'absorption, des filtres bleus intégrés, cette plage de longueurs d'ondes variait d'un type de lampe à l'autre.

Les résultats des analyses de la lumière émise par les appareils de photopolymérisation ont fait apparaître une courbe caractéristique pour tous les appareils testés (Fig. 1), qui peut être ventilée en trois phases. Dans la première phase, le flux de rayonnement spectral s'accroît, d'abord lentement, puis plus rapidement, avant de passer à une seconde phase d'élévation faible. Dans la troisième phase, la courbe s'aplatit d'abord, pour atteindre son maximum, et diminue ensuite fortement, avant de disparaître progressivement. Ces trois phases de la répartition spectrale sont avant tout tributaires des caractéristiques de transmission ou d'absorption du filtre bleu spécifique. En l'absence de mesures comparatives des spectres lumineux avec et sans filtre bleu, il est dès lors impossible de préciser les caractéristiques du filtre bleu. On pourrait tout au plus démontrer que la transmission du filtre bleu augmente durant la première phase, qu'elle atteint son maximum dans la seconde phase et qu'elle diminue ensuite lors de la troisième phase.

Lorsque, par calcul intégral, on détermine le flux du rayonnement spectral, à savoir la surface sous la courbe, on obtient le

Tab. III Répartition spectrale de la lumière

Type d'appareil	pic (in nm) du spectre émis	flux lumineux (en MW) et proportion, en pour cent, du rayonnement total			
		dans la plage entre 300 et 800 nm (rayonnement total)	dans la plage des UV entre 300 et 400 nm	dans la plage de la lumière utile entre 400 et 520 nm	dans la plage entre 520 et 800 nm
Vivadent: <b>Heliolux DLX</b>	486	328.3 (100%)	6.1 (1.85%)	318.1 (96.9%)	4.1 (1.25%)
Coltène: <b>Coltolux 4</b>	465	222.7 (100%)	29.1 (13.05%)	190.8 (85.7%)	2.8 (1.25%)
Kerr/ Demetron: <b>Optilux 500</b>	490	405.6 (100%)	12.9 (3.2%)	389.7 (96.05%)	3 (0.75%)
Espe: <b>Elipar Highlight</b>	482	371.5 (100%)	11.7 (3.15%)	353.4 (95.15%)	6.4 (1.7%)
3M: <b>XL 3000</b>	480	196.1 (100%)	0.7 (0.35%)	194.5 (99.2%)	0.9 (0.45%)
Satelec: <b>Acta</b>	488	207 (100%)	10.2 (4.9%)	192.7 (93.1%)	4.1 (2.0%)
Voco: <b>Polofil Lux</b>	481	250.8 (100%)	20.7 (8.25%)	228.3 (91.05%)	1.8 (0.7%)
Dentsply/ DeTrey: <b>Spectrum Plus</b>	482	235.8 (100%)	18.2 (7.7%)	215.9 (91.6%)	1.7 (0.7%)
Dentsply/ DeTrey: <b>Pro Lite</b>	482	152.7 (100%)	7.7 (5.0%)	143.4 (93.95%)	1.6 (1.05%)
Kulzer: <b>Translux EC</b>	490	188.7 (100%)	15.2 (8.05%)	159.9 (84.75%)	13.6 (7.2%)
Kulzer: <b>Translux CL</b>	494	309.1 (100%)	8.1 (2.6%)	296.9 (96.05%)	4.1 (1.35%)
Degussa: <b>Degulux</b>	476	202 (100%)	10.8 (5.35%)	189.6 (93.85%)	1.6 (0.8%)
Omnident: <b>CU-100RLC</b>	500	276.9 (100%)	8.7 (3.15%)	263.6 (95.2%)	4.6 (1.65%)
Kavo: <b>Polylux 2</b>	488	276.2 (100%)	3.2 (1.15%)	271.6 (98.35%)	1.4 (0.5%)
Sirona: <b>Polylux C1</b>	493	182.5 (100%)	11.2 (6.15%)	163.4 (89.5%)	7.9 (4.35%)
Sirona: <b>Polylux C4</b>	492	170.3 (100%)	9.9 (5.85%)	144.2 (84.65%)	16.2 (9.5%)

flux lumineux pour les fenêtres spectrales respectives. Les valeurs des flux de rayonnement dans la plage des UV et les longueurs d'ondes supérieures à 520 nm ont fait apparaître des différences entre les appareils testés, à l'instar de celles observées dans la plage entre 400 et 520 nm (Tab. III). En raison de valeurs trop élevées de transmission des filtres bleus dans les plages de longueurs d'ondes non désirées, certains appareils ont atteint des valeurs de flux de rayonnement très élevées. Force est de constater qu'il est impossible de fabriquer des filtres bleus possédant des caractéristiques de transmission idéales, c'est-à-dire, d'une part, une transmission de 100% sur l'ensemble des longueurs d'ondes de la lumière visible et, d'autre part, une absorption de 100% en dehors du spectre de la lumière utile. Lors de la mesure des flux lumineux, il s'est toutefois avéré, que certains appareils, moyennant un choix de filtre approprié, émettent une proportion dépassant 95% du rayonnement total dans la plage de la lumière utile définie, tout en émettant des puissances très élevées.

### Lumière utile pour la photopolymérisation

Pour tous les montages de test, les valeurs absolues du flux lumineux ont été mesurées dans deux plages de longueurs d'ondes différentes, soit entre 400 et 520 nm et entre 462 et 472 nm (Tab. II). Comme on pouvait s'y attendre, en raison des caractéristiques non identiques des filtres bleus, les appareils se sont classés dans un ordre différent dans les deux plages de longueurs d'ondes examinées. Outre le type de filtre (Lutz et coll. 1992) et le vieillissement de celui-ci (LEE et coll. 1993), la puissance du rayonnement émis est fonction de la puissance nominale (WILLER 1982) et du vieillissement de la source lumineuse à halogène utilisée (LEE et coll. 1993). Dans les présents essais, seuls des appareils neufs sortant d'usine ont été testés, ce qui exclut d'emblée le facteur des pertes en raison du vieillissement des composantes. Il restait dès lors le paramètre de la puissance nominale des ampoules à halogène intégrées. En comparant les valeurs de flux de rayonnement des différents types d'appareils, et la puissance nominale des ampoules à halogène dont ils étaient munis, les appareils à conduit lumineux à distance et avec puissance nominale de 150 Watt ont fait apparaître les résultats les plus faibles. La raison de cette observation est la perte de transmission plus importante dans les conduits lumineux en fibres optiques souples, en comparaison avec les guides lumineux rigides dans les lampes dites directes (WILLER 1982).

Pour les appareils directs, l'analyse des valeurs des flux lumineux n'a pas fait apparaître de relation directe entre la puissance nominale de l'ampoule à halogène incorporée, d'une part, et la puissance de la lumière émise, de l'autre. Une corrélation a été mise en évidence seulement dans les cas de différences importantes de la puissance nominale. Ainsi, l'appareil ProLite, par exemple, se caractérise par la puissance lumineuse la plus faible – 35 Watt seulement – parmi les lampes directes.

Les fenêtres d'entrée et de sortie de la lumière des guides lumineux testés présentaient des diamètres identiques pour chaque lampe individuelle, alors que ces diamètres variaient entre 6,5 et 10 mm selon le type d'appareil. CURTIS (CURTIS et coll. 1995) a démontré que l'énergie de rayonnement de toute ampoule halogène à réflecteur se focalise dans un cercle dont le diamètre est de 15 mm. L'énergie lumineuse est ensuite transmise dans le guide en fibres optiques, à travers la surface de la fenêtre d'entrée. Du fait que les diamètres de la fenêtre d'entrée sont inférieurs à 15 mm, une partie de l'énergie est alors perdue. Par

conséquent, l'augmentation du diamètre de la fenêtre d'entrée de la lumière se solde par une augmentation de l'énergie transmise et émise à la sortie. En dépit du fait que cette hypothèse n'a pas été confirmée dans tous les cas lors de la comparaison des mesures pour les lampes équipées d'ampoules halogènes comparables, il s'est toutefois avéré que les différents guides lumineux d'un type d'appareil donné montrent des propriétés identiques à celles stipulées en théorie.

Pour les appareils à puissance nominale identique et à guides lumineux standards de diamètre identique, des différences considérables ont été observées quant à leurs valeurs de puissance. Les lampes Heliolux DLX, Polofil Lux et Degulux peuvent être citées comme exemples. Pour cette raison, on peut supposer qu'il existe, outre le type de filtre, l'ampoule halogène à réflecteur et le guide lumineux d'autres facteurs susceptibles de limiter le paramètre de la lumière émise. Il faut certainement les rechercher dans le système optique composé de la lampe halogène à réflecteur/filtre fenêtre d'entrée de la lumière. Font partie de ces facteurs en particulier les caractéristiques du réflecteur (OSRAM 1994) ainsi que la distance et la direction du guide de lumière (MOSELEY et coll. 1986).

En divisant la valeur des flux lumineux par la surface des fenêtres de sortie de la lumière, on obtient la densité (ou intensité) du flux lumineux. Lorsque ces résultats ont été comparés aux valeurs pour les flux lumineux, les appareils se sont classés selon un ordre différent. Cela s'explique par la différence de surfaces des fenêtres des conduits lumineux. Entre le guide lumineux standard le plus grand et le plus petit, avec des diamètres de 10, respectivement 6 mm, la différence de la surface effective correspondait à un facteur 2,37. Alors que le flux lumineux augmente sur un côté en fonction du diamètre de la fenêtre d'entrée du guide lumineux (CURTIS et coll. 1995), la densité du flux lumineux diminue de l'autre côté en fonction du diamètre, porté au carré, de la fenêtre de sortie du guide lumineux (MOSELEY et coll. 1986, WILLER 1982). Ce qui signifie qu'il faut toujours mettre en relation, lors de l'évaluation de la puissance lumineuse des appareils de photopolymérisation, le diamètre de la fenêtre de sortie du guide lumineux et les deux paramètres du rayonnement, à savoir le flux lumineux et la densité du flux lumineux.

Des précisions quant aux relations entre les paramètres des guides lumineux et le flux lumineux, respectivement la densité du flux lumineux, ont été obtenues à partir de la comparaison des résultats des mesures de puissance pour les différents guides lumineux du même type d'appareil. Etant donné que toutes les mesures ont été effectuées sur le même type d'appareil, dans certains cas même sur un seul appareil, les résultats ont été indépendants de tous les autres paramètres de l'appareil, à l'exception des paramètres spécifiques aux guides lumineux. Les paramètres essentiels du conduit lumineux sont le diamètre des fenêtres d'entrée et de sortie du guide lumineux. Tant la longueur que l'angle d'incurvation du conduit lumineux sont des paramètres négligeables. La perte de transmission – de l'ordre de 8% – est due en grande partie à la réflexion des deux fenêtres (WILLER 1982).

Considérons d'abord les guides lumineux d'un type d'appareil dont les diamètres des fenêtres d'entrée et de sortie sont identiques. Peuvent notamment servir à titre d'exemple les quatre embouts proposés pour la lampe Coltolux 4. Comme il fallait s'y attendre, le flux lumineux a augmenté en fonction de l'augmentation du diamètre des fenêtres d'entrée. Si la répartition du rayonnement émis par la lampe halogène était homogène sur toute la surface circulaire du foyer, les valeurs des densités du

flux lumineux de tous les guides lumineux devraient être identiques pour un appareil sans effet turbo, puisque le gain d'énergie et l'accroissement de la surface sont des facteurs proportionnels l'un à l'autre. Ce comportement escompté n'a pas été confirmé dans ces essais. Il s'est avéré au contraire que la densité du flux lumineux diminuait en fonction de l'augmentation du diamètre. Par conséquent, on peut supposer que l'énergie de la lampe halogène focalisée sur le cercle n'est pas répartie de façon homogène, diminuant plutôt à la périphérie de ce dernier. Bien qu'un diamètre plus important de la fenêtre d'entrée de la lumière permette théoriquement de faire transiter davantage d'énergie, la densité du flux lumineux diminue, étant donné que ce gain de transfert d'énergie ne se fait pas de manière proportionnelle à l'augmentation du diamètre de la fenêtre de sortie.

Les guides lumineux dits turbo ont été conçus pour compenser ce phénomène. Leur fenêtre d'entrée de la lumière, de grand diamètre, permet de transmettre le maximum de l'énergie émise par la lampe halogène. Le diamètre du conduit lumineux se rétrécit au fur et à mesure de son trajet. Par conséquent, l'émission du rayonnement se fait à travers une fenêtre de sortie de diamètre plus faible, ce qui permet d'obtenir une densité de flux lumineux plus importante. Cette hypothèse a été confirmée par les résultats des tests de tous les embouts turbo.

Les considérations qui précèdent illustrent le fait que les valeurs de puissance mesurées dépendent dans une large mesure du type de guide lumineux utilisé, respectivement des paramètres de celui-ci. Il est dès lors impossible de procéder à une comparaison de la puissance lumineuse ou à l'évaluation des différents types d'appareils qui en résulte, sans tenir compte du diamètre du conduit de lumière.

Lorsque la comparaison des différents types d'appareils était fondée sur les paramètres de la densité du flux lumineux dans la plage des longueurs d'ondes entre 400 et 520 nm, donc dans celle de la lumière utile, d'une part, et que l'on ne considérait que les guides lumineux d'un diamètre de la fenêtre de sortie de la lumière égal ou supérieur à 6 mm, les observations suivantes sont apparues: les lampes Heliolux DLX et Optilux 500, équipées d'embouts turbo, ont atteint les meilleures performances. Leurs résultats étaient supérieurs, respectivement légèrement inférieurs, à 1000 mW/cm<sup>2</sup>. Les meilleurs résultats mesurés pour les autres types d'appareils ont tous été atteints avec des guides lumineux standard. La catégorie moyenne a été divisée en deux groupes. Une seule lampe, Translux CL, a été classée dans le premier groupe, du fait de sa puissance spécifique de 719,2 mW/cm<sup>2</sup>. Dans le deuxième groupe, plus faible, suivaient les lampes Elipar Highlight, XL 3000, Acta, Polofil Lux et CU-100 RLC, avec des performances entre 500 et 600 mW/cm<sup>2</sup>. La catégorie du bas du classement a été à son tour divisée en deux groupes. Avec des puissances spécifiques entre 400 et 500 mW/cm<sup>2</sup>, les lampes directes Coltolux 4, PolyLux 2 et Spectrum Plus, ainsi que les appareils avec câble optique externe Translux EC/ECS et Sirona C1 se sont classés dans le premier sous-groupe. Avec une densité de flux lumineux de 268,3 mW/cm<sup>2</sup>, la lampe à accus ProLite n'a pas pu convaincre, alors que l'appareil à câble optique externe Sirona C4 (374,7 mW/cm<sup>2</sup>) était à peine plus performant. Ces deux lampes ont été classées dans le deuxième sous-groupe de la catégorie la plus faible.

### Flux lumineux en fonction du temps

Avant la mise en service de l'appareil de photopolymérisation (départ à froid), la résistance électrique des filaments est jusqu'à 20 fois inférieure à celle à la température de travail. Lorsque la

température du filament augmente, la résistance ohmique s'accroît, ce qui fait chuter le courant. Toutefois, l'état stationnaire n'est pas atteint immédiatement, puisque la résistance des câbles d'alimentation influence également la résistance globale. En matière de flux de rayonnement, ces caractéristiques signifient par conséquent que dans un premier temps après l'enclenchement de la lampe, donc à partir de la valeur zéro, ce dernier s'élève au-delà de la valeur stationnaire, avant de s'y rapprocher ensuite selon une courbe asymptotique. Durant la phase de mise en service, la lampe est dès lors soumise à un fort courant. Cette observation contribue à expliquer la corrélation proportionnellement inverse entre la fréquence des cycles de mises en service et la durée de vie. Cette influence nuisible du courant d'enclenchement sur la durée de vie peut être réduite par l'intégration d'un limiteur de courant. Par le mode dit «soft start» le courant auquel est soumis la lampe se rapproche relativement lentement de la valeur nominale de travail, sans exercer de surcharge électrique sur l'appareil. En outre, le mode dit de «mise en veille» (*simmer modus*) a fait ses preuves: durant les phases sans émission de lumière, la lampe continue à être soumise à un courant d'environ 10 à 20% du courant nominal. Ce faisant, l'équilibre thermique demeure relativement constant et l'enclenchement sera moins nuisible pour l'ampoule halogène (OSRAM 1994).

L'analyse des diagrammes de puissance faite en laboratoire a montré que seuls deux appareils possèdent un mode «soft start» qui permet de ménager l'ampoule. La courbe des lampes Heliolux DLX et Coltolux 4 se caractérise par une montée relativement lente pour n'atteindre sa valeur maximale qu'à la fin d'un cycle de 60 secondes. Tous les autres appareils ont suivi la courbe caractéristique composée d'un maximum initial de la puissance de rayonnement, suivi d'une convergence asymptotique vers la valeur nominale stationnaire (MOSELEY et coll. 1986). La lampe Translux EC/ECS était dotée du mode de mise en veille décrit plus haut. Toutefois, aucune différence ni d'autre avantage pour l'ampoule lors de la mise sous tension n'a pu être mise en évidence, en comparaison avec les autres appareils.

En portant l'intérêt sur l'ensemble de la série des intervalles d'exposition pour les appareils sans limiteur de courant, il s'est avéré que le maximum initial lors du départ à froid diminue au cours des intervalles suivants de fonctionnement. Un certain nombre de lampes ont en outre présenté une légère chute de la puissance lumineuse en fonction de la durée de fonctionnement (MOSELEY et coll. 1986). Comme il a été évoqué plus haut, on peut supposer que la raison de cette observation serait l'augmentation des résistances globales lors de la fonction, causée par le réchauffement des ampoules à halogène.

### Répartition du flux lumineux à la fenêtre de sortie du guide de lumière

La lumière transmise par la fenêtre d'entrée de la lumière n'est pas modifiée lors de son passage à travers le guide lumineux (SCHROEDER 1990). Il en résulte que les répartitions d'énergie à la fenêtre d'entrée et à la fenêtre de sortie de la lumière sont identiques. Pour le cas particulier des embouts turbo, il faut cependant prendre en considération une modification des angles de sortie des rayons. Contrairement aux guides lumineux normaux, pour lesquels les angles à la fenêtre d'entrée des rayons correspondent aux angles à la fenêtre de sortie, ces angles ne sont pas identiques pour les guides lumineux turbo (SCHROEDER 1990). Or, pour les essais présentés, ce paramètre ne jouait au-

cun rôle, du fait que la répartition de la puissance était mesurée directement à la fenêtre de sortie.

En tenant compte de ces considérations théoriques et des schémas de répartition de la lumière relevés (Fig. 2), il est possible de retenir les observations générales suivantes: la lumière émise par l'ampoule halogène à réflecteur, puis réduite à un spectre spécifique par le filtre bleu, se caractérise par une répartition non homogène, tant à la fenêtre d'entrée qu'à la fenêtre de sortie de la lumière. Cette répartition présente un maximum d'intensité au centre et la densité de la lumière diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Certaines autres études, réalisées par McCABE (McCABE 1989) et par MOSELEY (MOSELEY et coll. 1986) confirment cette observation. Lorsque le diamètre de la fenêtre d'entrée de la lumière augmente, le schéma de répartition devient moins favorable, indépendamment des proportions respectives de la fenêtre d'entrée et de sortie. Cette répartition hétérogène avait déjà été mise en évidence lors de l'analyse des valeurs du flux lumineux et de la densité du flux lumineux pour les différents guides lumineux d'un appareil donné. La comparaison des guides lumineux sans effet turbo n'a pas permis de démontrer de relation directe entre l'accroissement d'énergie et l'augmentation de la surface. La densité du flux de rayonnement a montré une relation inversement proportionnelle au diamètre du conduit lumineux. Bien que l'utilisation de l'effet turbo soit d'un certain avantage pour les deux paramètres du flux lumineux et de la densité du flux lumineux, il apparaît dès lors l'inconvénient principal: en raison du diamètre élevé de la fenêtre d'entrée de la lumière, la répartition à la fenêtre de sortie est mauvaise. Cette hypothèse a été confirmée lors de l'analyse comparative des répartitions d'énergie pour les guides lumineux avec et sans effet turbo d'un appareil donné dont les diamètres des fenêtres d'entrée et de sortie étaient par ailleurs identiques.

L'intérêt a en outre porté sur les schémas de diffusion de la lumière des différentes lampes testées. L'analyse comparative des diagrammes de répartition pour les différents types d'appareils a fait apparaître des différences considérables. En tenant comp-

te du diamètre du guide lumineux, en d'autres termes en comparant seulement les embouts de diamètre similaire, certains appareils ont présenté, même à une faible distance du centre, une chute importante de l'intensité et par conséquent une diffusion défavorable. Font partie de ce groupe les lampes Acta, Spectrum Plus, ProLite et CU-100RLC. En revanche, les schémas de répartition des autres types d'appareils n'ont montré des chutes de puissance que dans les régions périphériques. Les présents essais n'ont pas été en mesure de fournir d'explication sur ces différences entre les appareils et sur la répartition de l'énergie lumineuse. On peut toutefois déduire des mesures favorables pour certaines lampes qu'une bonne syntonisation entre les différentes composantes du système optique permet d'obtenir des schémas de distribution relativement homogènes.

### Stabilisateur de tension

Plusieurs auteurs (FAN et coll. 1987, MARTIN et coll. 1995, TAKAMIZU et coll. 1988, WELTE 1992) ont étudié les relations entre la puissance lumineuse et la tension du réseau. Les fluctuations de la tension de réseau entraînent des modifications de la puissance lumineuse pour les appareils non équipés d'un stabilisateur de tension intégré. En cas de sous-tension les valeurs diminuent, alors qu'elles augmentent en cas de surtension. En Suisse, les tolérances en matière de tension de réseau sont relativement étroites, la variation admise se situant entre 207 et 244V, la tension nominale étant fixée à 230V. Dès lors, les mesures comparatives du flux lumineux sous 207 et 244V par rapport à celles sous 230V (Tab. IV) permettaient aisément de déterminer, de façon indirecte, la présence ou non d'un stabilisateur de tension intégré. En l'absence d'un tel dispositif, la puissance à 207V chutait de 30 à 35% par rapport à la puissance souhaitée. D'un autre côté, celle-ci s'accroissait de 20 à 25% sous une tension de 240V. De telles déviations, importantes, peuvent être considérablement réduites par l'incorporation d'un stabilisateur de tension. Les appareils équipés de stabilisateurs de tension intégrés ont présenté des variations de +/-5% au maximum. Parmi les

Tab. IV Puissances en fonction de la tension du réseau

Type d'appareil	Flux lumineux dans l'intégrale 400 à 520 nm, sous tension réseau de:			Déviation du flux lumineux, par rapport au flux lumineux à 230 V (en %), sous une tension nominale de:	
	230V	207V	244V	207V	244V
Vivadent: Heliolux DLX	318.1	212.1	400.3	66.7	125.8
Collène: Collolux 4	190.8	179.2	198.6	93.9	104.1
Demetron/Kerr: Optilux 500	389.7	376.2	379.8	96.5	97.5
Espe: Elipar Highlight	353.4	239.6	310.5	67.8	87.9
3M: XL 3000	194.5	184.5	186.9	94.9	96.1
Satelec: Acta	192.7	195.7	192.7	101.5	100.0
Voco: Polofil Lux	228.3	234.2	223.4	102.6	97.9
Dentsply DeTrey: Spectrum Plus	215.9	222.1	220.1	102.9	101.9
Dentsply DeTrey: ProLite	appareil fonctionnant sur accus				
Kulzer: Translux EC	159.9	111.9	196.4	70.0	122.8
Kulzer: Translux CL	296.9	286.4	293.8	96.5	99.0
Degussa: Degulux	189.6	189.8	187.3	100.1	98.8
Omnident: CU-100 RLC	263.6	168.8	308.7	64.0	117.1
Kavo: PolyLUX2	271.6	272.0	264.8	100.2	97.5
Siemens: Sirona C1	163.4	164.0	165.6	100.4	101.4
Siemens: Sirona C4	144.2	94.8	149.8	65.7	103.9

exceptions, il convient de citer les lampes Elipar Highlight, CU-100RLC et Polylux Sirona C4. Bien que leurs prospectus fassent mention de la présence d'un stabilisateur de tension, les résultats mesurés n'ont pas pu confirmer cette prétention; ces lampes ont présenté des déviations importantes de puissance sous 207, respectivement sous 244 V, ces valeurs rappelant celles des appareils non équipés de stabilisateurs de tension. Faisaient partie des appareils exempts de stabilisateur de tension les lampes Heliolux DLX et Translux EC/ECS.

## Radiomètre

Les appareils de photopolymérisation équipés d'un radiomètre intégré servant au contrôle de la puissance lumineuse ne sont apparus sur le marché que depuis quelques années. Force est de constater que pour l'instant ces dispositifs ne font malheureusement pas encore partie de l'équipement standard.

Les valeurs absolues mesurées avec les deux radiomètres numériques dont sont équipées les lampes Coltolux 4 et Optilux n'ont pas été confirmées par celles obtenues avec un spectroradiomètre étaloné externe. Il s'est toutefois avéré au cours des séries de mesures à puissance réduite que la corrélation par rapport au spectroradiomètre est assez fidèle pour les deux lampes mentionnées (HANSEN & ASMUSSEN 1993). Il s'ensuit que les résultats, bien que n'ayant pas valeur absolue, représentent cependant un coefficient de confiance relatif. En revanche, les indications du radiomètre de la lampe Acta (Tab.V) ne fournissent aucune information.

Lorsque la valeur limite définie par les fabricants, à savoir 300 W/cm<sup>2</sup>, respectivement 80 unités, a été convertie en fonction de nos propres mesures, les valeurs limites effectives pour les lampes Coltolux 4 et Optilux étaient de 70, resp. 220 W/cm<sup>2</sup>, alors que la valeur limite convertie pour la lampe Acta était de 75 W/cm<sup>2</sup>. Pour l'interprétation de ces résultats, il convient toutefois de tenir compte du fait que la plage de longueurs d'ondes lors des essais avait été choisie en fonction des indications des

fabricants, cette plage variant dès lors d'un type d'appareil à l'autre. En portant l'intérêt sur les radiomètres signalant le seuil de la valeur limite par un avertisseur visuel, il est apparu que les valeurs limites fixées par les fabricants sont de 300 W/cm<sup>2</sup> pour ces lampes également. Les lampes Elipar Highlight et XL en constituaient les seules exceptions, puisqu'elles n'attribuaient pas de chiffres absolus aux valeurs limites programmées. L'analyse comparative des résultats mesurés par le spectroradiomètre a fait apparaître (Tab.VI) que les lampes Heliolux DLX et CU-100RLC indiquaient correctement la valeur limite de 300 W/cm<sup>2</sup>, alors que les appareils Spectrum Plus et ProLite, avec des valeurs de 200 et de 160 W/cm<sup>2</sup>, se situaient considérablement en dessous de ce seuil. En outre, les lampes Elipar Highlight et XL 3000 se caractérisent par des valeurs limites programmées à 115, respectivement à 250 W/cm<sup>2</sup>. Hormis une seule exception, les trois radiomètres pour un type de lampe donné avec affichage du seuil limite ont tous indiqué les mêmes valeurs d'intensité. Les appareils équipés de radiomètres numériques n'ont pas été à même de produire la même fidélité de corrélation. Du fait de leurs différences – entre 10 et 15% –, les trois lampes en question ont toutes présenté des fluctuations importantes au sein de la même série d'appareils.

Le radiomètre intégré sert au contrôle de la puissance lumineuse de l'appareil (DELLA VOLPE 1986) en avertissant l'utilisateur lorsque la puissance est inférieure à un certain seuil limite. A partir de ce moment, l'utilisateur doit alors rechercher des traces d'usure sur les différentes composantes de l'appareil et, le cas échéant, les échanger, voire l'adresser à un service technique compétent. Par conséquent, la valeur limite programmée de façon fixe par le fabricant (indicateur du seuil limite) ou affiché sur l'appareil (indicateur numérique) sont les facteurs décisifs pour de telles mesures. Force est toutefois de constater que pour bien des lampes ces valeurs limites se situent à un niveau trop faible (MANGA et coll. 1995).

Il faut dès lors se demander pourquoi les valeurs mesurées par le radiomètre intégré sont à ce point différentes de celles obte-

Tab. V Radiomètres numériques

Type d'appareil	Filtre Kodak Wratten		Plage spectrale mesurée	Unité de mesure du radiomètre intégré	Valeurs relevées sur le radiomètre, lors du test avec la lampe de l'appareil 1			
	Type	Réduction de la puissance émise			de l'appareil 1	de l'appareil 2	de l'appareil 3	de la société Macam en (mW/cm <sup>2</sup> )
Coltène: Coltolux 4	néant	100%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	580	640	670	188.0
	0.1	80%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	560	610	620	150.5
	0.2	63%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	470	520	480	110.7
	0.3	50%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	360	400	370	85.3
	0.4	40%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	290	330	300	69.9
	0.5	32%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	210	240	210	48.0
	0.6	25%	450 - 500nm	mW/cm <sup>2</sup>	170	200	180	41.0
Demetron/Kerr: Optilux 500	néant	100%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	700	750	750	532.3
	0.1	80%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	550	580	580	404.4
	0.2	63%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	400	420	420	296.5
	0.3	50%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	290	300	300	221.3
	0.4	40%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	230	240	240	185.4
	0.5	32%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	160	160	160	125.2
	0.6	25%	400 - 520nm	mW/cm <sup>2</sup>	140	140	140	107.3
Satelec: Acta	néant	100%	450 - 515nm	affichage 100-0	100	100	100	345.3
	0.1	80%	450 - 515nm	affichage 100-0	100	100	100	271.0
	0.2	63%	450 - 515nm	affichage 100-0	100	100	100	203.5
	0.3	50%	450 - 515nm	affichage 100-0	100	100	100	156.7
	0.4	40%	450 - 515nm	affichage 100-0	100	100	100	104.2
	0.5	32%	450 - 515nm	affichage 100-0	86	94	100	89.7
	0.6	25%	450 - 515nm	affichage 100-0	76	86	93	74.8

Tab. VI Radiomètres analogiques

Type d'appareil	Couleurs d'avertissement	Plage de puissance correspondance	Filtre Kodak Wratten		Plage spectrale mesurée	Couleur d'avertissement affichée sur le radiomètre, lors du test avec la lampe de l'appareil 1			Valeurs mesurées par le spectroradiomètre, en mW/cm <sup>2</sup>
			Type	Réduction de la puissance émise		de l'appareil 1	de l'appareil 2	de l'appareil 3	
Vivadent: Heliolux DLX	vert	>300mW/cm <sup>2</sup> <300mW/cm <sup>2</sup>	0.3	50%	400 - 700nm	vert	vert	vert	359.11
	rouge		0.4	40%	400 - 700nm	vert	vert	vert	295.96
			0.5	32%	400 - 700nm	vert	vert	vert	197.22
Espe: Elipar Highlight	vert blanc	polymérisation sûre polymérisation pas sûre	0.6	25%	400 - 510nm	vert-blanc	vert-blanc	vert-blanc	114.58
3M: XL 3000	vert	intensité lumineuse suffisante intensité lumineuse pas suffisante	0.2	63%	400 - 500nm	vert	vert	vert	266.08
	pas de signal		0.3	50%	400 - 500nm	pas de signal	pas de signal	pas de signal	200.8
Dentsply DeTrey Spectrum Plus	vert	>300mW/cm <sup>2</sup> 150-300mW/cm <sup>2</sup> <150mW/cm <sup>2</sup>	0.3	50%	400 - 520nm	vert	vert	vert	185.57
	orange		0.4	40%	400 - 520nm	orange	orange	orange	151.53
	rouge		0.5	32%	400 - 520nm	orange	orange	orange	104.76
			0.6	25%	400 - 520nm	rouge	rouge	rouge	88.48
Dentsply DeTrey ProLite	vert	>300mW/cm <sup>2</sup> 150-300mW/cm <sup>2</sup> <150mW/cm <sup>2</sup>	0.1	80%	400 - 520nm	vert	vert	vert	219.25
	orange		0.2	63%	400 - 520nm	orange	orange	orange	166.87
	rouge		0.3	50%	400 - 520nm	orange	orange	orange	101.02
			0.4	40%	400 - 520nm	orange	orange	orange	101.02
			0.5	32%	400 - 520nm	rouge	rouge	rouge	69.22
Ornidant: CU-100 RLC	vert	>300mW/cm <sup>2</sup> 200-300mW/cm <sup>2</sup> <200mW/cm <sup>2</sup>	0.1	80%	400 - 500nm	vert	vert	vert	337.89
	vert/orange		0.2	63%	400 - 500nm	vert/orange	vert/orange	vert/orange	244.42
	orange		0.3	50%	400 - 500nm	vert/orange	vert/orange	vert/orange	181.57
			0.4	40%	400 - 500nm	orange	orange	orange	152.21

nues au moyen du spectroradiomètre de laboratoire. La réponse à ce problème se trouve dans les différences de méthodes de mesure. Le spectroradiomètre permet de recueillir la totalité de l'énergie émise à la fenêtre de sortie de la lumière et de la mesurer en tant que flux de rayonnement. De ce fait, la densité du flux lumineux, évaluée par un simple calcul, représente la moyenne des valeurs de la surface totale de la fenêtre de sortie de la lumière. En revanche, la plupart des radiomètres intégrés ne mesurent pas le flux lumineux pour l'ensemble de la surface de la fenêtre de sortie. En réalité, le facteur décisif est la relation entre la surface du capteur de mesure et la surface de la fenêtre de sortie de la lumière du guide lumineux standard (SHORTALL et coll. 1995). Lorsque l'ouverture de la fenêtre de mesure est relativement petite par rapport à la fenêtre de sortie, la mesure ne tient compte que du pic d'intensité au centre de la fenêtre de sortie, indiquant par conséquent une densité de flux lumineux trop élevée. Lorsque la surface de la fenêtre de mesure et celle de la fenêtre de sortie sont à peu près identiques, le radiomètre mesure la densité du flux lumineux pour l'ensemble de la fenêtre de sortie, indiquant de ce fait des valeurs proches de celles obtenues par le spectroradiomètre.

### Vérification de la minuterie (timer)

Pour ses propres mesures de contrôle des timers intégrés, MOSELEY (MOSELEY et coll. 1986) a rapporté des déviations pouvant atteindre 20%. Or, les mesures des auteurs du présent travail n'ont pas confirmé ces résultats. Nos résultats font apparaître, pour trois appareils seulement, des déviations de 2 secondes au maximum sur des durées de cycles de 60 secondes. De ce fait, on peut supposer que l'on peut faire confiance, pour tous les types d'appareils, au bon fonctionnement des minuteries servant au contrôle des intervalles d'exposition.

### Ventilateur de refroidissement

Dans quatre cas, le dispositif de protection contre la surchauffe ne s'est pas enclenché automatiquement, malgré un fonctionnement en continu pendant une heure. Faisaient partie de ce groupe les lampes Heliolux DLX, Optilux 500, XL 3000 ainsi que Spectrum Plus. L'appareil ProLite, qui fonctionne sur accus, s'est arrêté automatiquement après une durée de fonctionnement en continu de 18 minutes; or, cette interruption n'était pas

due à une surchauffe mais à l'épuisement des accumulateurs. Toutes les autres lampes se sont automatiquement arrêtées après une durée de fonctionnement en continu variant entre 4 minutes au minimum et de 32,5 minutes au maximum. En fixant arbitrairement la limite du fonctionnement minimal en continu à 6 minutes, en d'autres termes à une durée correspondant au scellement d'une pièce par la méthode adhésive, il convient de remarquer que 3 appareils, du fait de leur temps de fonctionnement avant arrêt automatique inférieur à 6 minutes, ne satisfont pas à cette exigence. Se trouvaient dans ce cas les lampes Coltolux 4, Acta et Degulux. Alors que les durées de fonctionnement avant l'arrêt automatique montraient de grandes différences, les intervalles de repos avant une nouvelle mise en service ont également révélé des variations importantes. Les temps de régénération se situaient entre 1 et 28,5 minutes. Dans la plupart des cas il s'est avéré que la durée avant une nouvelle utilisation et la durée de la période de régénération sont corrélées; en d'autres termes, lorsque le dispositif de protection s'enclenchait après une durée de fonctionnement relativement brève, l'appareil était prêt à fonctionner à nouveau après une période de repos brève également.

Les résultats des mesures évaluant le niveau des émissions sonores ont fait apparaître des classements différents, selon les deux plages de fréquences des essais. De ce fait, on peut supposer qu'il y a, pour les appareils testés, des différences de pression acoustique sur les plages de fréquences évaluées. En raison de l'évaluation du niveau sonore dans les deux plages de fréquence définies, des valeurs nettement plus élevées dans la plage de fréquences C, par rapport à la plage de fréquences A, indiquent un son plutôt grave qui est agréable à l'oreille humaine. Lorsque ces valeurs sont à peu près équivalentes, le son aigu est perçu comme un bruit plutôt désagréable. Pour cette raison, c'est en particulier la valeur mesurée dans la plage de fréquences A qui devrait servir de référence. Les valeurs mesurées dans cette plage de fréquences ont dès lors fait apparaître que la plupart des appareils testés présentent un niveau sonore se situant entre 40 et 50 dB. Seules les lampes Coltolux C4, Optilux 500 et Polylux 2, de par leur niveau de pression sonore supérieur à 55 dB, ont dépassé ce seuil, alors que la lampe Translux CL s'est «adjugée la tête du classement», en raison de son niveau sonore supérieur à 60 dB. Le fait remarquable de ces mesures était la corrélation entre la valeur nominale de la lampe halogène de ces appareils de type direct et la valeur du niveau de pression sonore mesu-

rée. Quant à savoir s'il s'agit en l'occurrence d'une conséquence des besoins plus élevés de refroidissement qui caractérisent les lampes à halogène de puissance nominale plus élevée, on ne peut formuler que des suppositions. Il n'a pas été possible, jusqu'à présent, de déterminer avec certitude si les valeurs mesurées se situent en dessus ou en dessous du seuil admissible pour l'oreille humaine, du fait que des normes unifiées pour les appareils de photopolymérisation font toujours défaut.

## Conclusions

Lorsque l'intérêt porte exclusivement sur les sources de lumière à halogène, le type de lampe directe est l'appareil de choix. Par rapport aux appareils à conduit de lumière externe, les lampes dites directes se distinguent par des avantages considérables. La puissance lumineuse de leur ampoule halogène à réflecteur devrait toutefois se situer aux alentours d'un minimum de 75 Watt. Pour cette raison, les appareils fonctionnant sur accus ne sont pas convaincants. Outre la puissance nominale de l'ampoule à halogène, le réflecteur, le filtre ainsi que le guide de lumière jouent des rôles importants, de sorte que la puissance spécifique se compose en fin de compte de nombreux facteurs. Quant à cette puissance, il semble que le montage et la syntonisation des composantes isolées au sein de ce système optique complexe soient les paramètres essentiels. Un trajet optimal des rayons permet d'une part d'obtenir une puissance maximale et d'autre part de rendre homogène la diffusion de la lumière de la fenêtre de sortie.

Quant au diamètre des conduits lumineux, il faut accepter certains compromis. Un diamètre trop important de la fenêtre d'entrée de la lumière a comme résultat une densité du flux lumineux trop restreinte qui, de surcroît, se répartit de façon fort hétérogène à la fenêtre de sortie de la lumière. Les diamètres trop faibles transmettent trop peu d'énergie sur la pièce à polymériser. Pour les guides lumineux standard, il convient par conséquent de donner la préférence à des diamètres entre 6 et 8 mm, afin d'assurer une distribution la plus homogène possible, de même que des valeurs élevées des paramètres du flux lumineux et de la densité du flux lumineux. Les guides lumineux dits turbo sont destinés à associer en un seul embout les avantages

des conduits à faible et à gros diamètres. Ils permettent d'obtenir des valeurs élevées tant pour le flux lumineux que pour la densité du flux lumineux. Leur seul inconvénient est la répartition défavorable de l'énergie à la fenêtre de sortie de la lumière. Parmi les éléments d'équipement à exiger comme essentiels pour toute lampe de photopolymérisation, il faut citer le stabilisateur de tension, la minuterie (timer) et le radiomètre. Or, il s'est avéré que certains appareils testés n'étaient pas équipés de radiomètre intégré du tout – ou seulement d'un dispositif de qualité insuffisante. Il serait dès lors raisonnable d'exiger le montage d'un stabilisateur de tension, voire, le cas échéant, de le remplacer par un élément fiable. En revanche, les timers intégrés sont parfaitement en mesure d'accomplir leur tâche. Les valeurs limites des radiomètres programmées ou indiquées par le fabricant sont en général trop faibles; de ce fait, ils ne permettent de détecter et, le cas échéant de corriger, que des chutes de puissance trop importantes pour la pratique. L'équipement par un dispositif limiteur de courant paraît également recommandable, afin de prolonger la durée de vie des ampoules à halogène. Il incombe à chaque utilisateur individuel d'évaluer et de pondérer tous les autres gadgets possibles et imaginables proposés, tels que différents types de timer, tableaux d'affichage, etc., afin de décider de leur utilité.

Tant les puissances que l'équipement des appareils de photopolymérisation testés ont fait apparaître des différences considérables. Afin d'être en mesure de définir des standards valables à large échelle, il serait utile d'élaborer des directives en la matière et de les résumer sous forme de normes. De plus, il faudrait préciser les exigences concernant la puissance des lampes de photopolymérisation en regard des différents types de restaurations, afin de pouvoir évaluer de façon précise la plage d'utilisation de chaque appareil ou, le cas échéant, de formuler des restrictions en la matière.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la Société Suisse d'Odonto-stomatologie pour sa généreuse contribution au présent travail de recherche (Fonds SSO, requête n° 188).