CTF3 Tech.-Note 2000-03/Injector
3 avril 2000

Photocathodes pour le drive beam du CTF3 et du CLIC
Préparation du test « mC » dans le canon DC

G. Suberlucq, H. Trautner

1. Objectif :

Le but de ce test est de vérifier si une photocathode en tellure de césium est capable de délivrer la charge requise pour l'injecteur du drive beam du CTF3 et du CLIC dans ses diverses versions. La table 1 résume les principaux paramètres en supposant qu'il y ait deux photo-injecteurs pour les deux « drive linac » du CLIC, dans le cas contraire, la durée de la macro-impulsion, la charge totale et le courant moyen sont à doubler. La durée minimale d'utilisation ne peut-être inférieure à 100 h de fonctionnement pour CTF-3 (fonctionnement type CTF-2) et, au moins, à 1 jour d'utilisation continu, soit 24 heures pour CLIC (« usine » à cathode type SLAC). Durant cette période, l'efficacité quantique doit rester supérieure ou égale à 1.5 %.

Paramètres	Unité	CTF3	0.5 TeV	1 TeV	3 TeV
Charge par micro-impulsion	nC	2.4	11.7	11.7	17.5
Nombre de micro-impulsions	-	2145	10720	21440	42880
Durée de la macro-impulsion	μs	1.4	23	46	92
Charge dans la macro-impulsion	μC	5.2	125	250	750
Fréquence de répétition	Hz	5	200	150	100
Courant moyen	mA	0.026	25	37.6	75
Durée de vie minimale à QE=1.5%	h	100	24	24	24
Nombre total de μ-impulsions	$x10^9$	3.9	185.2	277.9	277.9
Charge totale extraite de la cathode	kC	0.01	2.17	3.25	4.86

2. Meilleures performances :

Les meilleures performances de ces photocathodes ont été obtenues dans le CTF avec un train de 48 impulsions produisant une charge totale de 750 nC, avec un taux de répétition de 10 Hz soit un courant moyen de 7.5 μA. En une seule impulsion, la charge a atteint 100 nC ce qui correspond à un courant crête de près de 10 kA.
La charge totale extraite, par photocathode, est d'environ 1.5 C (200h de fonctionnement, 5 Hz, 48 impulsions de 10 nC chacune).
Le fonctionnement dans le CTF a permis de vérifier le bon comportement de ces photocathodes en régime impulsionnel picosecondes, mais ne donne pas d'information sur leur comportement lors d'extraction de courant moyen élevé. Dans le cas de CLIC 3 TeV ce courant est environ 7500 fois plus élevé. Le test qui est proposé tente de réduire par plus de 2 ordres de grandeur cet écart et vérifiera complètement le comportement des cathodes pour CTF-3.

3. Limitations du canon DC :

3.1. Limitation en courant crête :

La pervéance du canon DC est d'environ 6 µperv (voir figure 1). Il est prudent de rester à une tension inférieure ou égale à 70 kV pour éviter des claquages trop destructifs et pour réduire jusqu'à un niveau acceptable les radiations ionisantes produites. Pour la suite, on considère une haute tension de 60 kV.

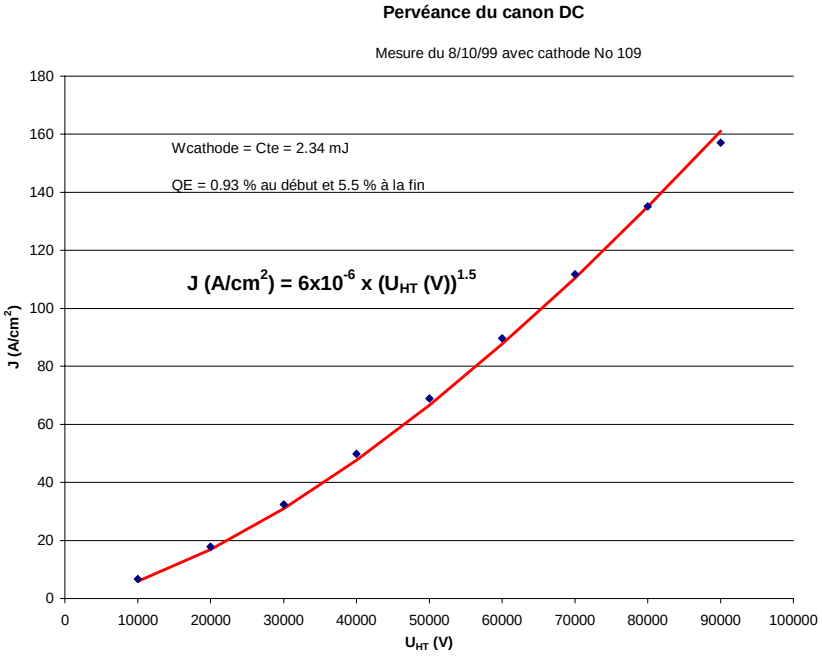

Figure : 1

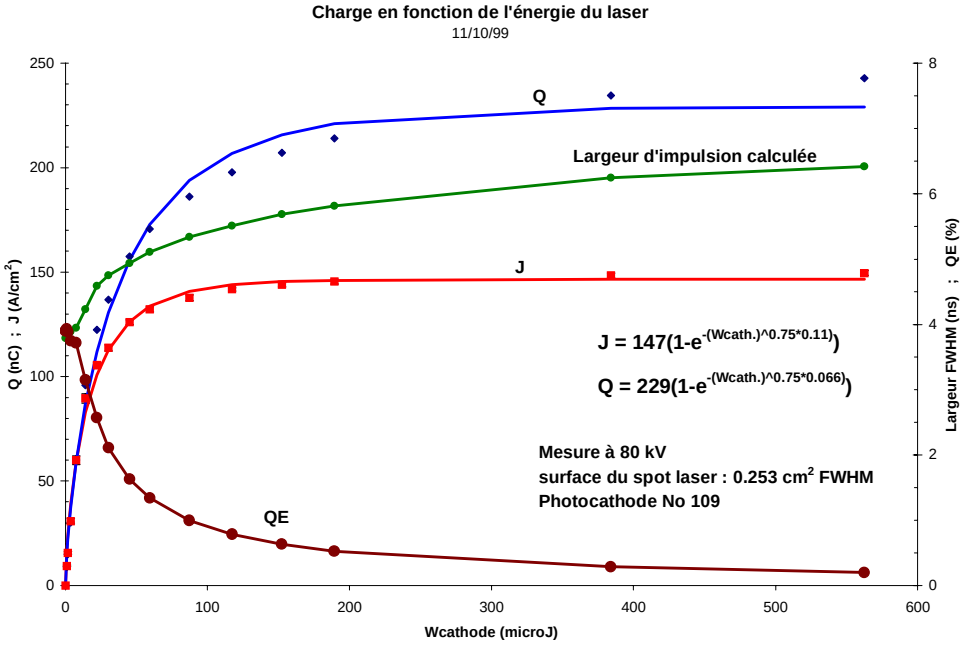

Figure : 2

$J(A/cm^2) = 6\times10^{-6}\times\langle U(V)\rangle^{1.5}$, soit 88 A/cm^2 pour 60 kV.

La mesure d'homogénéité de la distribution de l'efficacité quantique montre un rayon ou QE est supérieur ou égal à $0.8 \times QE_{max}$ d'environ 6 mm. Pour une distribution gaussienne de l'énergie, on a 95 % de celle-ci dans 4 σ, soit, pour un faisceau parfaitement aligné : $\sigma_r = 12/4 = 3$ mm. Le diamètre équivalent à mi-hauteur est de :
$\Phi = 2.35\sigma = 7$ mm, soit une surface équivalente à mi-hauteur de 38 mm^2.
$I_{saturation} = 88 \times 0.38 = 33$ A. Pour rester dans la partie linéaire de la caractéristique, on prend $I_{saturation} / 5$, soit $I_{max} = 6.6$ A (voir figure 2).
Si l'on suppose aussi une distribution temporelle gaussienne, la charge maximale extractible devient :

$$\mathbf{Q = I_{max} \times \sigma_t \sqrt{2\pi}} \approx I_{max}.\tau_{FWHH}$$

3.2. Limitation en courant moyen :

L'alimentation dont nous disposons permet de délivrer 1 mA pour une tension comprise entre 0 et 100 kV. Donc avec cette alimentation, le courant moyen extrait de la cathode ne pourra excéder cette valeur. C'est la principale limitation. Aussi nous recherchons une alimentation susceptible de fournir un courant moyen plus élevé.

3.3. Efficacité quantique

$$QE = \frac{\text{Nombre d'électrons émis}}{\text{Nombre de photons incidents}}.$$

$Nb_{électrons} = Q/e = Q/(1.6022 \times 10^{-19})$
$Nb_{photons} = W/E$
$E = hc/\lambda = 1.9865 \times 10^{-25} / \lambda$, soit $Nb_{photons} = W.\lambda/(1.9865 \times 10^{-25})$

$$QE = 1.24 \times 10^{-6} \frac{Q(C)}{\lambda(m) W(J)}$$

$Q = \int_0^t i dt \equiv I_m \times \tau$ $\quad$ $W = \int_0^t P_m dt \equiv P_m \times \tau'$: τ et τ' largeur à mi-hauteur de l'impulsion de courant et de fluence du laser, respectivement.

$$QE = 1.24 \times 10^{-6} \frac{I_m(A)}{\lambda(m) \times P_m(W)} \times \frac{\tau}{\tau'}$$ en régime linéaire du canon DC : $\tau = \tau$'

$$Q(C) = \frac{QE \times \lambda(m) \times W(J)}{1.24 \times 10^{-6}} \qquad I_m(A) = \frac{QE \times \lambda(m) \times P_m(W)}{1.24 \times 10^{-6}} \times \frac{\tau'}{\tau}$$

$$W(J) = \frac{1.24 \times 10^{-6} \times Q(C)}{QE \times \lambda(m)} \qquad P_m(W) = \frac{1.24 \times 10^{-6} \times I_m(A)}{QE \times \lambda(m)} \times \frac{\tau}{\tau'}$$

Gamme de courant : $I_{max} \leq 6.6$ A ; $I_{moy} \leq 10^{-3}$ A
Gamme de fluence : $P_{max} \leq 2051$ W ; $P_{moy} \leq 0.31$ W
Pour QE = 1.5 % et λ = 266 nm

3.4. Limitation en taux de répétition

Le canon DC est alimenté en haute tension à travers une résistance de protection de 100 kΩ. Après cette résistance, la capacité du câble + la traversée est d'environ 120 pF, ce qui donne une constante de temps RC = 12 μs. Pour garantir une recharge complète du câble entre les impulsions on prendra 10xRC = 120 μs, soit une fréquence de répétition :

$F_{rep.} \leq$ 8.3 kHz.

3.5. Limitation en largeur d'impulsion :

$\tau = \frac{I_{moy.}}{I_{max} \times F_{rep}}$ = 18.3 ns pour I_{moy} = 1 mA ; I_{max} = 6.6 A et F_{rep} = 8.3 kHz, soit un rapport cyclique de 1.51×10^{-4}.

La charge stockée dans le câble est de $6 \times 10^{4} \times 120 \times 10^{-12}$ = 7.2 μC = $I_{max}.\tau$

$\tau_{max}(s) \leq \frac{7.2 \times 10^{-6}(C)}{I_{max}(A)}$; soit 1.09 μs pour I_{max} = 6.6 A, mais $F_{rep.}$ = 138 Hz pour conserver I_{moy} = 1 mA.

$$\tau \geq 18.3 \text{ ns et } \tau \times F_{rep} = \frac{I_{moy}}{I_{max}}$$

4. Charge produite :

- Quel que soit le rapport cyclique retenu, on ne peut espérer obtenir plus de 1 mC par seconde, soit 1 mA.
- En 24 heures, il est possible de produire 86.4 C, ce qui simule largement le fonctionnement dans CTF-3, mais ne représente que 4 % de la charge requise pour le CLIC 0.5 TeV. Il faudrait laisser fonctionner l'installation pendant 25 jours sans arrêt pour extraire la même charge.

Ce test permet d'extraire un courant moyen environ 130 fois plus élevé que ce qui a été obtenu au CTF, 38 fois plus important que ce qui est requis pour CTF-3, mais encore 25 à 56 fois plus petit que ce qui est espéré pour les diverses versions de CLIC.

5. Possibles lasers :

Nous ne disposons pas, dans nos installations, de laser susceptible de générer les charges requises. Deux types de lasers sont envisagés :

5.1. Lasers continus

Avec une transmission optique d'environ 50 % entre la sortie du laser et la photocathode, ces lasers cw doivent délivrer une puissance d'au moins 0.6 W à une longueur d'onde inférieure à 270 nm.

1. **Lasers à ions d'argon :** La raie principale d'émission est à 514 nm pour une puissance de l'ordre de 10 à 30 W. La puissance instantanée étant très faible (idem à la puissance moyenne) l'efficacité de doublage pour obtenir 257 nm est très faible, inférieure à 10^{-3}. Le seul moyen envisageable est le doublage intra-cavité. Quelques modèles sont disponibles sur le marché et sont capables de délivrer environ 350 mW dans l'UV, ce qui est insuffisant pour obtenir les 310 mW sur la cathode. De même, l'utilisation d'une raie dans l'UV (entre 275 et 305 nm), ne convient ni en longueur d'onde ni en puissance (environ 300 mW). Enfin, ces lasers demandent une alimentation électrique très importante (≈ 40 kW).
2. **Laser à solide :** Il existe des lasers à Nd :YAG ou Nd :YLF cw jusqu'à une puissance de 700 mW dans la 4ème harmonique (LAS, Deltatrain). Le prix de location est d'environ 27 kFS/mois. Ces lasers permettent de produire la charge requise, mais ne permettent pas de varier continûment de la situation actuelle au test mC. Enfin, il serait nécessaire de développer une instrumentation pour mesurer la charge à la sortie du canon DC.

5.2. Lasers pulsés :

Plusieurs lasers pulsés sont susceptibles de fournir la puissance moyenne requise dans l'UV. Il est possible de les louer pour une période de 1 à 2 mois.

1. **Photonics modèle DS10-266 :** Il s'agit d'un Nd :YAG pompé par diode qui est donné pour une puissance de 1.5 W dans l'ultraviolet à 266 nm. Il tire des impulsions de 30 ns de large avec une fréquence de répétition maximale de 50 kHz. La durée de location est d'au moins trois mois et son coût est très élevé (50 % du prix du laser)
2. **Photonics modèle GS20-263 :** C'est un modèle Nd :YLF pompé par lampes flashs, capable de délivrer une puissance moyenne de 4 W à 263 nm. Il tire des impulsions d'environ 180 ns de large avec une fréquence de répétition maximale de 10 kHz. Pour l'instant pas d'offre de location de ce laser.
3. **Alphalas, modèle Pulslase :** C'est un laser Nd :YAG pompé par diodes laser capable de délivrer 3 W dans le fondamental (1064 nm). Le fabriquant espère une efficacité de quadruplage d'environ 10 %. La largeur des impulsions est variable entre 1 et 50 ns, la fréquence de répétition entre 5 et 25 kHz. Pour l'instant pas d'offre pour ce laser.
4. **ELS, modèle LDP20MQ :** C'est un laser Nd : YAG avec doublage intra-cavité, capable de délivrer 7 W à 532 nm. La firme se charge du quadruplage et garantit une puissance moyenne supérieure ou égale à 0.3 W à 266 nm. La largeur des impulsions est de 250 ns pour un taux de répétition maximal de 10 kHz. La durée minimale de location est de 6 mois et le prix serait d'environ 82 kFS (55 k•).
5. **Quantronix (Excel) modèle 263 :** C'est un laser Nd :YLF capable de délivrer une puissance moyenne de 1W à 263 nm dans des impulsions de 180 ns pour une fréquence de répétition de 1 kHz. A 3 kHz la puissance moyenne est encore de 0.6 W. Avec 24 kFS pour deux mois, c'est l'offre la plus avantageuse.

Tableau récapitulatif des lasers pulsés utilisables pour le test mC.

	Paramètre	Unité	Photonics DS10-266	Photonics GS20-263	Quantronix 263DP-
Spécif. laser	λ	nm	266	263	263
	P_{moy} [max]	W	1.5 à 6 kHz	4 à 3 kHz	1 à 1 kHz
	F_{rep} [max]	kHz	50	10	3 kHz
	τ_{FWHH}	ns	30	180	180
	W/pulse	mJ	0.25 à 6 kHz	1.33 à 3 kHz	1 à 1 KHz
	Prix d'achat	FS	148000	Pas d'offre pour l'instant	98500
	Location	FS	74500/3mois		24000/2mois
Fonctionnement à 1mA	I_{max}	A	6.6	6.6	6.6
	Q / pulse	nC	198	1188	1188
	F_{rep} à I_{moy}=1mA	kHz	5.05	0.841	0.841
	QE	%	1.5	1.5	1.5
	W / pulse [cath.]	μJ	61	369	369
	P_{moy} [cathode]	W	0.31	0.31	0.31
	Transmission	%	50	50	50
	P_{moy} [Laser]	W	0.62	0.62	0.62
	P_{max} [Laser]	kW	4.1	4.1	4.1

Ces trois lasers conviennent pour le test prévu. Le moins cher est le Quantronix modèle 263. Celui qui permet le courant moyen le plus élevé est le Photonics GS-20-

263 qui est capable de produire un courant moyen supérieur à 6 mA avec des photocathodes ayant une efficacité quantique supérieure à 1.5 %.

6. Conclusion :

Ce test permettra d'apprécier le courant moyen que ces photocathodes en tellure de césium sont capables de délivrer. L'application au CTF-3 pourra être simulée et il sera possible de se rapprocher de l'utilisation de photocathodes dans le drive beam du CLIC.

Si ce premier test est suffisamment concluant, un photo-injecteur pour le drive beam du CTF-3 est envisageable dans la mesure où le laser paraît aujourd'hui faisable pour un coût raisonnable. Dans cette hypothèse, un second test est envisagé pour tester les cathodes à des courants moyens comparables à ceux requis pour le CLIC. Cette application demande des lasers extrêmement puissants, qui ne se trouvent pas, pour l'instant, dans le commerce ($P_{moy} \geq 35$ W dans l'UV pour simuler le fonctionnement de CLIC 3 TeV). Aussi, ce test devrait être envisagé en parallèle avec le développement du laser pour le drive beam du CLIC.

Annexe 1

1. Mesure de l'énergie du laser Quantronix 263 DP :

1.1. Caractéristiques du faisceau laser

P_{moy} = 1 W à 263 nm, soit 1 mJ à 1kHz
τ = 180 ns et $F_{rep.}$ = 844 Hz
P_{max} = 1 W / 180 ns = 5.6 kW
Diamètre du faisceau d = 7 mm ; soit s = 0.38 cm^2
Densité d'énergie : D = 2.6 mJ/cm^2
Densité de puissance : D_P = 14.7 kW/cm^2

1.2. Sondes de mesure

Trois modèles sont susceptibles de mesurer l'énergie du faisceau laser :

- Laser précision modèle RJP 735, (avec moniteur)
- Molectron modèle J4-05 ou J4-09
- Scientech modèle Vector PHF09-S

Paramètres	unités	RJP-735	J4-05 / 09	PHF09-S
Réponse spectrale	µm	0.25-16	0.19-12	
Sensibilité	V/mJ	30 µJ FS	1.8 / 0.8	1
Linéarité	%	1 à 10	0.2@U<2V	
Précision	%	± (5R+0.1FS)	± 5	± 7
Diamètre utile	mm	11	5 / 9	9
Bruit équivalent	nJ	10	15 / 35	35
Largeur maximale d'impulsion	µs	1000	50 / 100	5
Fréq. de répétition maximale	Hz	500	400 / 200	4000
P_{moy} maximale	W	5	2	2
Densité de puissance maximale	kW/cm^2	1000	500	500
Densité d'énergie maximale	mJ/cm^2	-	100@200ns	100@200ns
Constante de temps RC	µs	-	2000	50
Tension de sortie maximale	V	-	4.5	4.5
Impédance de sortie	Ω	-	50	50