

CLUB CAST3M 2025

CALCUL DU SEUIL DE DOMMAGE OCULAIRE THERMIQUE INDUIT PAR LASER

Garcia José

jose.garcia@aorsafety.com

06 11 80 55 12

PLAN DE LA PRESENTATION

- Contexte et objectifs
- Mise en œuvre de Cast3M
- Développements spécifiques
- Résultats
- Conclusion

Mon CV en bref

jose.garcia@aorsafety.com

Ingénieur Opticien ESO 1984

Par le passé

Directeur de LASOPTIC pendant 25 ans

PME ayant compté jusqu'à 9 ingénieurs, spécialisée dans le développement de systèmes optroniques notamment pour la Défense, le CNRS, le CEA...

Puis salarié de ALPhANOV pendant 11 ans...

Actuellement

Directeur de AOR Safety

Expert IEC TC 76, représentant de Photonics France et membre de la section des RNI de la SFRP/ICNIRP

Coordinateur de la commission technique du CoNSOL (Comité National de Sécurité Optique et Laser)

Paru le 20/06/2024



Contexte et objectifs

Depuis 1984, des **normes de sécurité d'emploi** des lasers (EN IEC 60825) définissent des VLE (Valeurs Limites d'Exposition) pour les **utilisateurs** et des LEA (limites d'émission accessible) pour **les fabricants** de systèmes.

L'objectif de ce développement est de :

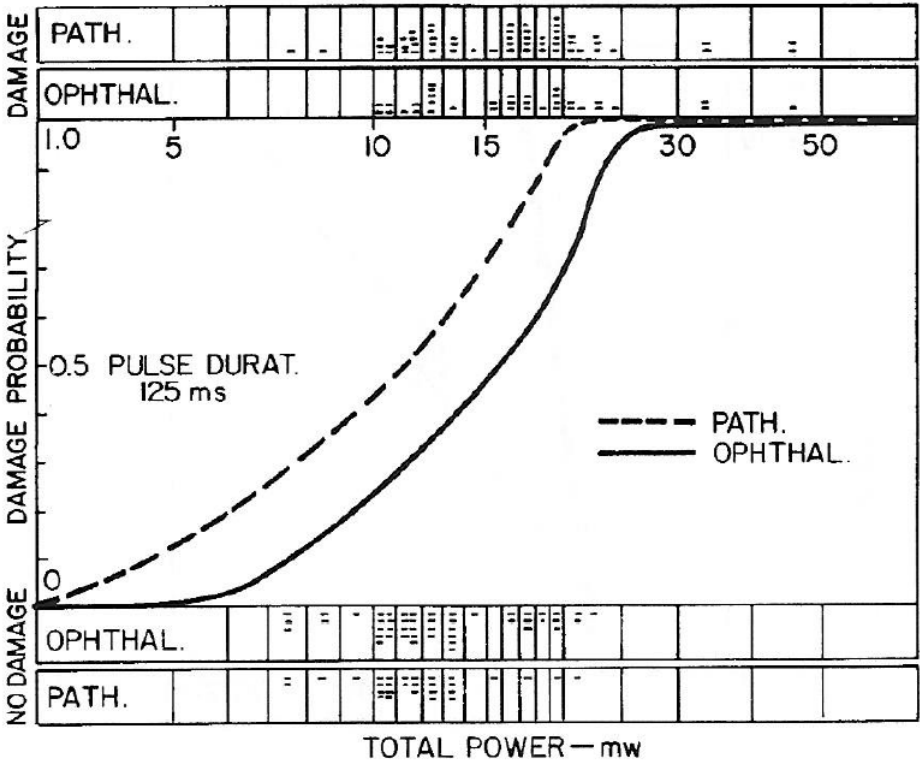
- Vérifier **les seuils de dommage** sur lesquels s'appuient les VLE (ou les LEA)
- Conforter les **facteurs de sécurité** utilisés (souvent 10)
- Définir des **modèles de description des VLE** lorsque de nombreux paramètres d'émission varient simultanément.
En effet l'avènement de nombreux **systèmes grands publics** (systèmes de détection d'endormissement ou de reconnaissance d'identité, d'éclairage, d'affichage...) avec des diodes laser peuvent être très variables (durée, fréquence, puissance crête,...)
- Finalement, au niveau international, être des **interlocuteurs valables** dans les comités de normalisation (IEC) ou les instances d'établissement des VLE (ICNIRP).

Contexte et objectifs : Lien entre seuils de dommage et VLE

Expérimentations pour déterminer l'ED50

Table 3 – Accessible emission limits for Class 1 and Class 1M laser products and $C_6 = 1^{a, b}$

Wavelength λ nm	Emission duration t s											
	10^{-13} to 10^{-11}	10^{-11} to 10^{-9}	10^{-9} to 10^{-7}	10^{-7} to 5×10^{-6}	5×10^{-6} to $1,3 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$ to 1×10^{-3}	1×10^{-3} to 0,35	0,35 to 10	10 to 10^2	10^2 to 10^3	10^3 to 3×10^4	
180 to 302,5	$3 \times 10^{10} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$		$30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$									
302,5 to 315	$2,4 \times 10^4 \text{ W}$		Thermal hazard ($t \leq T_1$) $7,9 \times 10^{-7} C_1 \text{ J}$ Photochemical hazard $7,9 \times 10^{-7} C_2 \text{ J}$ ($t > T_1$)						$7,9 \times 10^{-7} C_2 \text{ J}$			
315 to 400												$7,9 \times 10^{-7} C_1 \text{ J}$
400 to 450	$3,8 \times 10^{-8} \text{ J}$	$7,7 \times 10^{-8} \text{ J}$				$7 \times 10^{-4} t^{0,75} \text{ J}$				$3,9 \times 10^{-3} \text{ J}$	$3,9 \times 10^{-5} C_3 \text{ W}$	
450 to 500										$3,9 \times 10^{-3} C_3 \text{ J}$ and ^c $3,9 \times 10^{-4} \text{ W}$		
500 to 700										$3,9 \times 10^{-4} \text{ W}$		
700 to 1 050	$3,8 \times 10^{-8} \text{ J}$	$7,7 \times 10^{-8} C_4 \text{ J}$				$7 \times 10^{-4} t^{0,75} C_4 \text{ J}$				$3,9 \times 10^{-4} C_4 C_7 \text{ W}$		
1 050 to 1 400 ^d	$3,8 \times 10^{-8} C_7 \text{ J}$	$7,7 \times 10^{-7} C_7 \text{ J}$				$3,5 \times 10^{-3} t^{0,75} C_7 \text{ J}$						
1 400 to 1 500	$8 \times 10^5 \text{ W}$		$8 \times 10^{-4} \text{ J}$				$4,4 \times 10^{-3} t^{0,25} \text{ J}$	$10^{-2} t \text{ J}$	$1,0 \times 10^{-2} \text{ W}$			
1 500 to 1 800	$8 \times 10^6 \text{ W}$		$8 \times 10^{-3} \text{ J}$				$1,8 \times 10^{-2} t^{0,75} \text{ J}$					
1 800 to 2 600	$8 \times 10^5 \text{ W}$		$8 \times 10^{-4} \text{ J}$				$4,4 \times 10^{-3} t^{0,25} \text{ J}$	$10^{-2} t \text{ J}$				
2 600 to 4 000	$8 \times 10^4 \text{ W}$		$8 \times 10^{-5} \text{ J}$	$4,4 \times 10^{-3} t^{0,25} \text{ J}$								
4 000 to 10^5	$10^{11} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$		$100 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$5 600 t^{0,25} \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$								$1 000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
NOTE Laser products that meet the requirements for classification as Class 1 by satisfying measurement Condition 1 may be hazardous when used with viewing optics having greater than $\times 7$ magnification or objective diameters greater than those specified in Table 10.												
^a For correction factors and units, see Table 9.												
^b The AELs for emission durations less than 10^{-13} s are set to be equal to the equivalent power or irradiance values of the AEL at 10^{-13} s.												
^c In the wavelength range between 450 nm and 500 nm, dual limits apply and a product's emission shall not exceed either limit applicable to the class assigned.												
^d In the wavelength range between 1 250 nm and 1 400 nm, the upper value of the AEL is limited to the AEL value for Class 3B.												



Par le passé, les seuils de dommage ont été déterminés à partir d'expérimentations animales suivant les structures à risque considérées.

Plusieurs problèmes se sont posés :

Transposition à l'homme de ces données

Métrie des faisceaux laser

Critère de dommage (exemple ci-contre pour la rétine) :

Observation du fond d'œil (ophthal.)

Histologie (path.) ou OCT (plus tard)

Angiographie

Contexte et objectifs : Lien entre seuils de dommage et VLE

Effets pris en compte dans les modèles

Depuis les années 2000 (et même avant), on cherche à établir des VLE **sans expérimentations animales**.

Les modèles sont essentiellement des modèles **thermiques**.

La résolution de **l'équation différentielle de la chaleur** est relativement aisée pour les cas simples (peau ou cornée, faisceau à symétrie de révolution) mais peut s'avérer complexe pour des faisceaux qui ne sont pas à symétrie de révolution en mode impulsionnel (jusqu'à 1 ns) et lorsque plusieurs structures sont concernées (3D - rétine). On utilise alors des **méthodes FEM** (éléments finis), les autres méthodes FFT (transformation de Fourier) ou FD (différences finies) n'étaient pas adaptées.

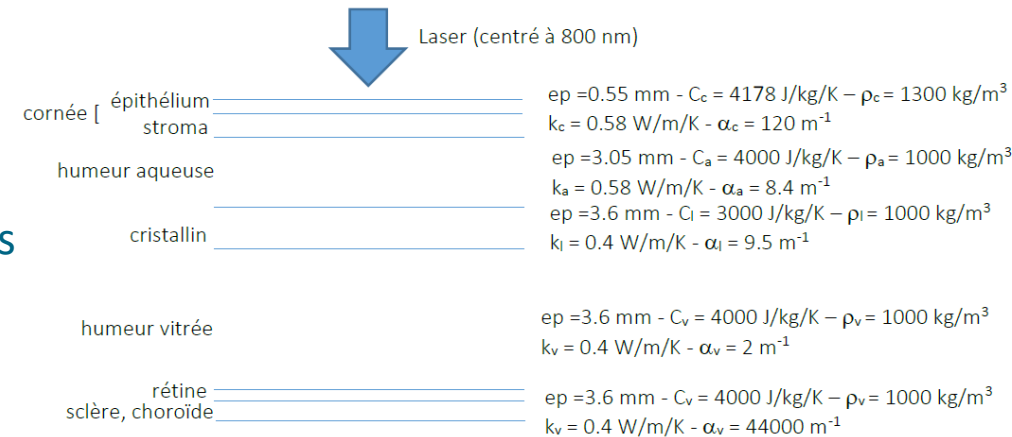
Mais quel **critère de dommage** prendre en compte ?

On s'appuie alors sur **l'équation d'Arrhenius**, on peut évaluer ainsi le taux d'endommagement du tissu à partir de :

$$d\Omega/dt = C_1 \exp(-C_2/T)$$

où $d\Omega$ est la mesure quantitative du dommage de brûlure, C_1 est le facteur de fréquence en $[s^{-1}]$ et C_2 est une température d'activation égale à l'énergie d'activation divisée par R la constante universelle des gaz.

Cela revient à dire que la **température absolue atteinte** n'est pas le seul critère d'endommagement mais dépend également du **temps pendant lequel celle-ci a été maintenue**. La relation entre seuil de dommage et puissance laser devient fortement non linéaire.



Mise en oeuvre de Cast3M

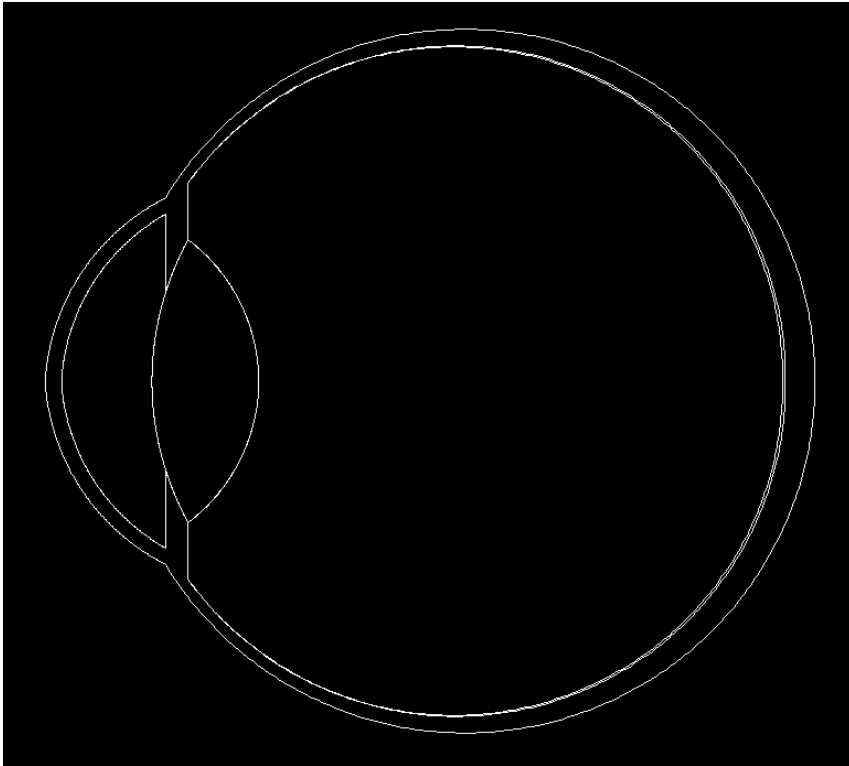
Pour une émission dans le **spectre visible et infrarouge** (400 -1400 nm) et pour des **durées d'impulsion comprises entre 10 s et 100 ns** (environ), l'effet **thermique** est **prédominant**.

De plus le **temps de propagation** (100 ps) du faisceau laser dans l'oeil est nettement **inférieur à ces durées** donc son **amplitude** peut être considérée comme **figée** sur son axe de propagation.

L'emploi de **Cast3M** est donc **justifié**.

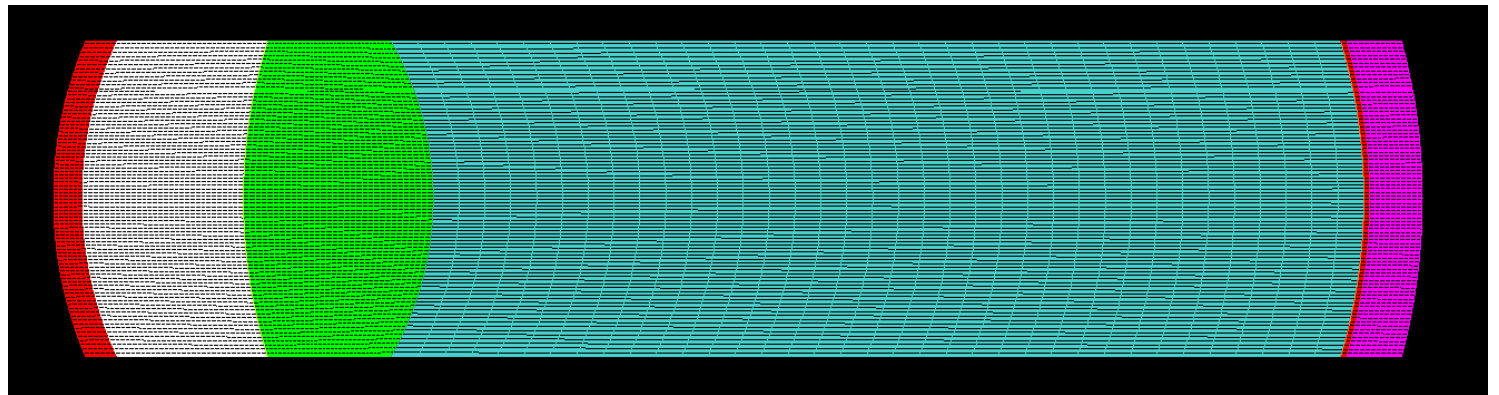
Mise en oeuvre de Cast3M : Maillage

Maillage de l'oeil avec **7 structures** : Cornée, HA, Cristallin, Vitré, Rétine, Choroïde, Sclère
Réduction de la zone de calcul sur une pupille de 6 mm pour un faisceau de 2 mm car l'influence du faisceau est locale.



Description et maillage réalisés avec Cast3M et sauvegardé dans Oeil_1.sauv

Maillages différents suivant les structures car au niveau de la rétine le faisceau laser est focalisé sur $10\text{ }\mu\text{m}$



Mise en oeuvre de Cast3M

Modélisation des échanges thermiques et conditions aux limites

Calcul **en 2D** car **symétrie de révolution** (en cours d'évolution pour des faisceaux qui ne sont pas à symétrie de révolution)

Pour toutes les structures, **cornée, HA, cristallin, vitré, rétine, choroïde et sclère** : blocages de température (37°) sur les parties périphériques avec le milieu interne

Cornée : convection avec l'air ambiant et refroidissement par les larmes – pas d'émission de CN à 37° (pas de terme NL car intervient peu dans le calcul au niveau de la rétine)

Choroïde (proche rétine) : convection avec le sang circulant dans les veines et artères

Sclère : blocage de température (37°) partie arrière.

Développements spécifiques

Propagation du faisceau laser

Modélisation de la propagation linéaire par matrices 2 x 2

(matrices dioptre, espace, espace avec CH POINT, ..)

En effet on exprime le rayon de courbure complexe du faisceau laser $q(z)$ où R est le rayon de courbure réel reliée à la phase et $M^2\lambda/(\pi\omega^2)$ la courbure complexe reliée à l'amplitude par :

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{M^2 \lambda}{\pi \omega^2(z)}$$

Puis on relie q_1 initial est relié au rayon q_2 final au cours de sa propagation au travers d'une matrice ABCD telle que :

$$q_2 = \frac{A q_1 + B}{C q_1 + D}$$

La matrice espace de longueur d et d'indice n $\begin{bmatrix} 1 & \frac{d}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ et la matrice dioptre de rayon de courbure R et entre deux milieux d'indices n_1 et n_2

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{(n_2 - n_1)R}{n_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$$

Construction du terme source appelé par la procédure RESO ou PASAPAS en calculant l'éclairement gaussien en tout point et prenant en compte l'optique (absorptions par les milieux, réflexions de Fresnel aux interfaces,...)

Développements spécifiques

Calcul du seuil de dommage

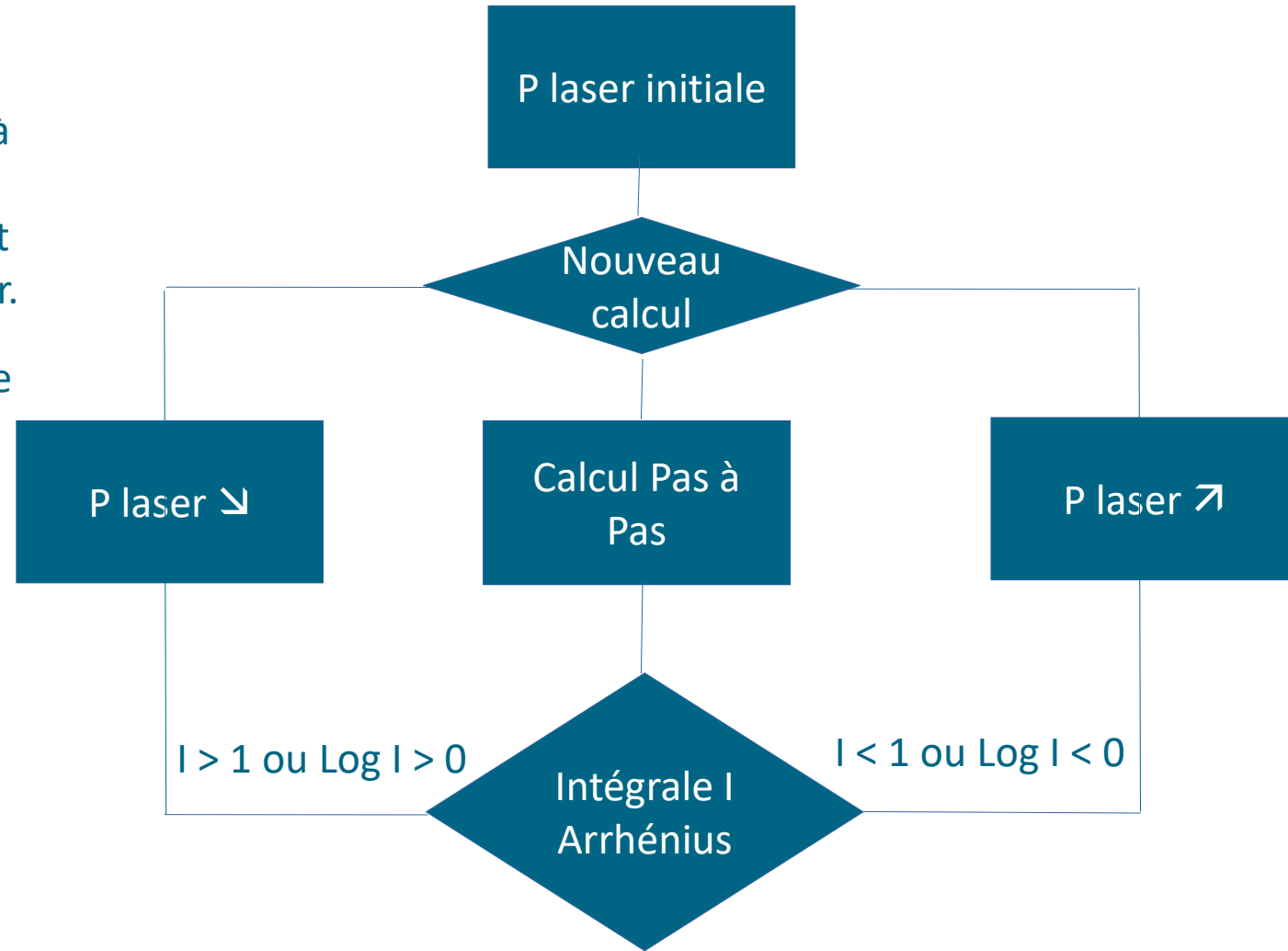
Comme évoqué précédemment, pour une **puissance laser incidente donnée** à chaque **fin de calcul** (et non à chaque pas de temps) il faut calculer de **l'intégrale d'Arrhénius** (somme à chaque pas de temps), si elle est supérieure à 1 diminuer la puissance sinon l'augmenter.

L'**optimisation** a consisté à reboucler sur une puissance calculée en considérant qu'elle varie de **façon linéaire avec le logarithme de l'intégrale I**. En prenant $P(\text{Log } I=0)$ correspondant au seuil de dommage, on obtient :

$$P(\text{Log } I=0) = P_1 + (P_2 - P_1) \frac{(-\text{Log } I_1)}{(\text{Log } I_2 - \text{Log } I_1)}$$

On recalcule **en fin de boucle** la valeur obtenue pour $\text{Log } I$ et on arrête si elle est **inférieure à 10^{-2}** . Ce qui confère **une erreur sur la puissance** de l'ordre de 10^{-3} .

La **convergence** est obtenue au bout de **5 boucles** environ.



Résultats

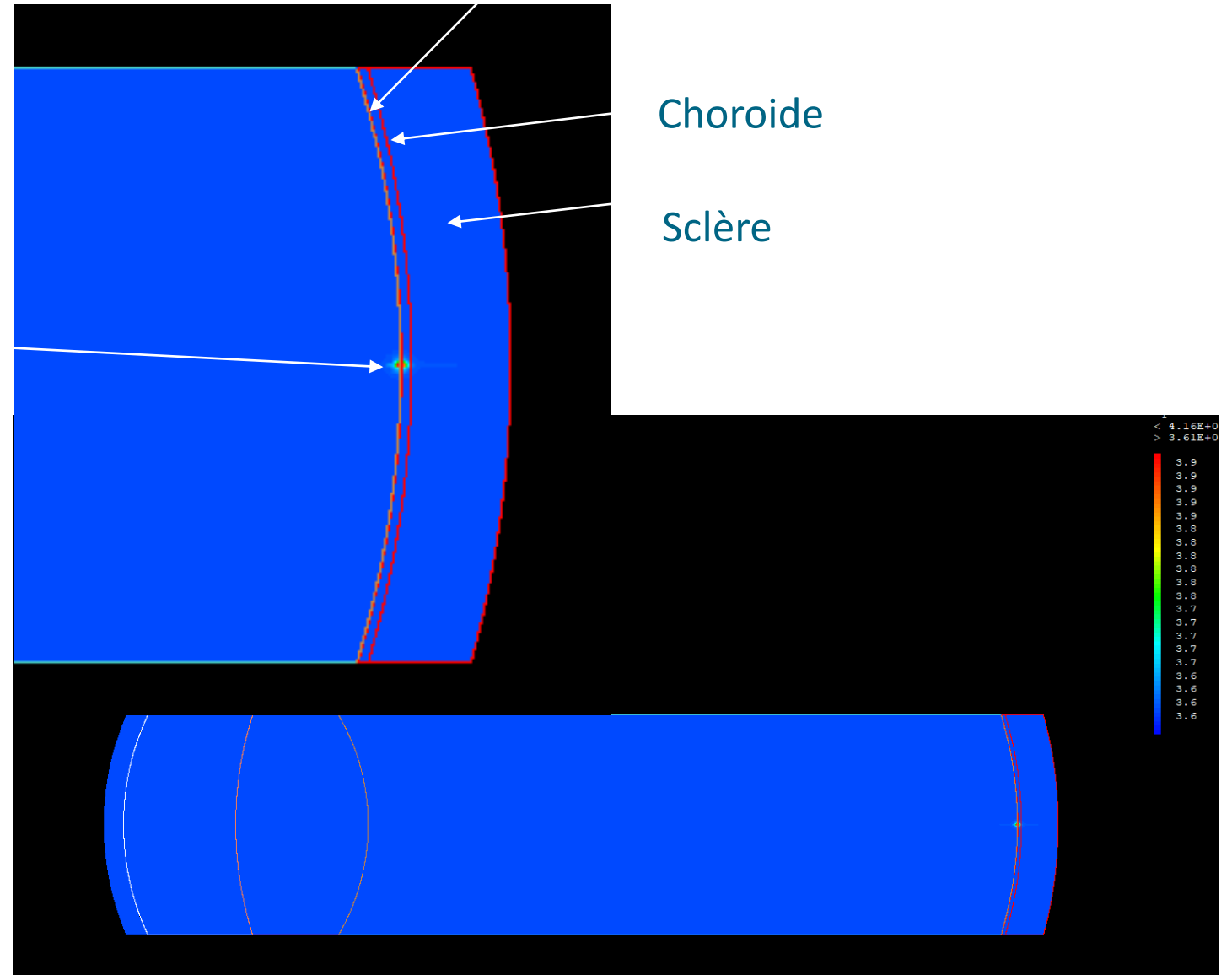
Sorties graphiques spatiales

Le but est de vérifier que le faisceau se focalise bien sur la rétine.

Détail du faisceau focalisé sur la rétine

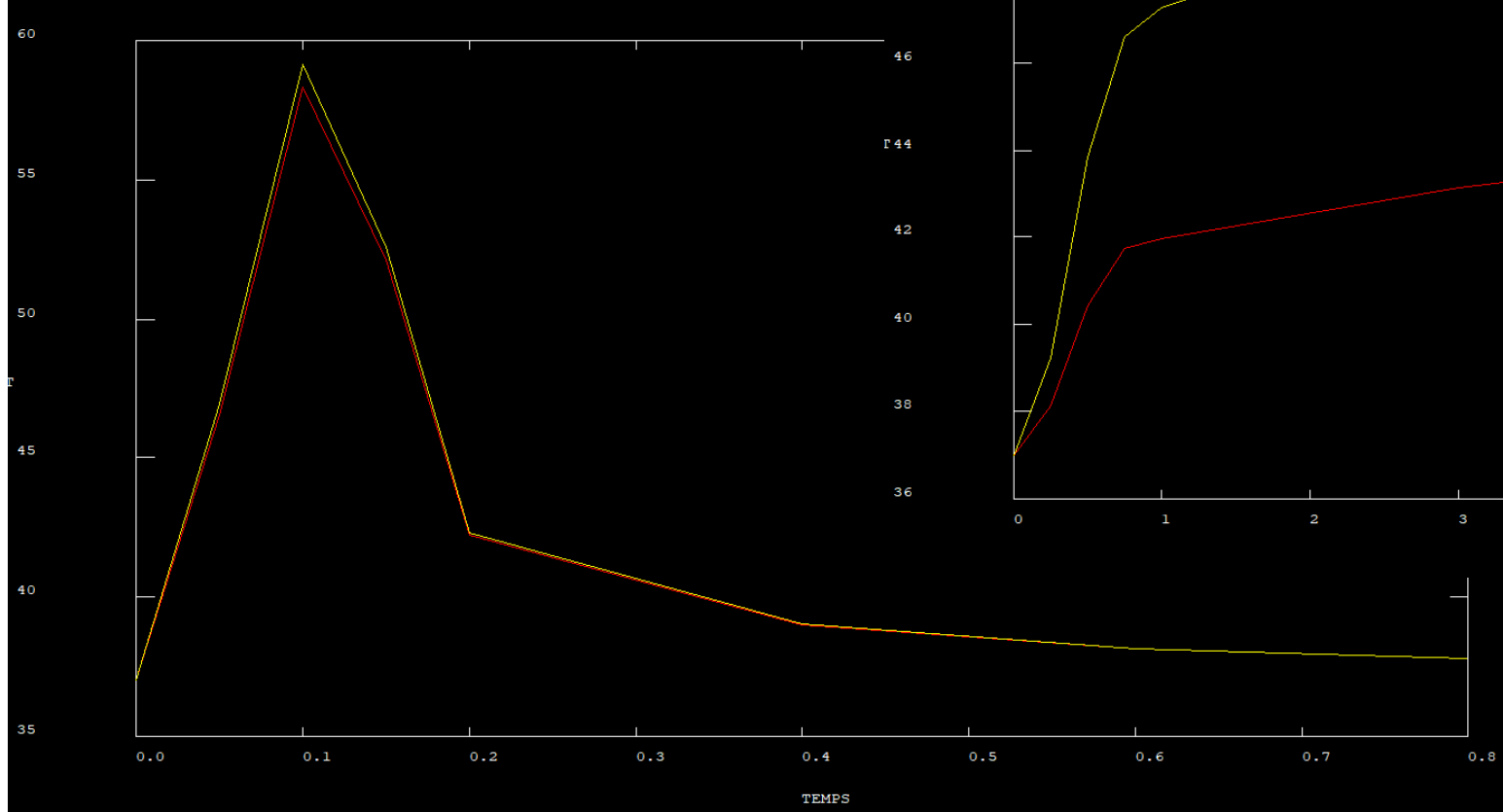
Propagation du faisceau laser sur l'ensemble de l'oeil

2 couches rétinienne séparées de 10 μm

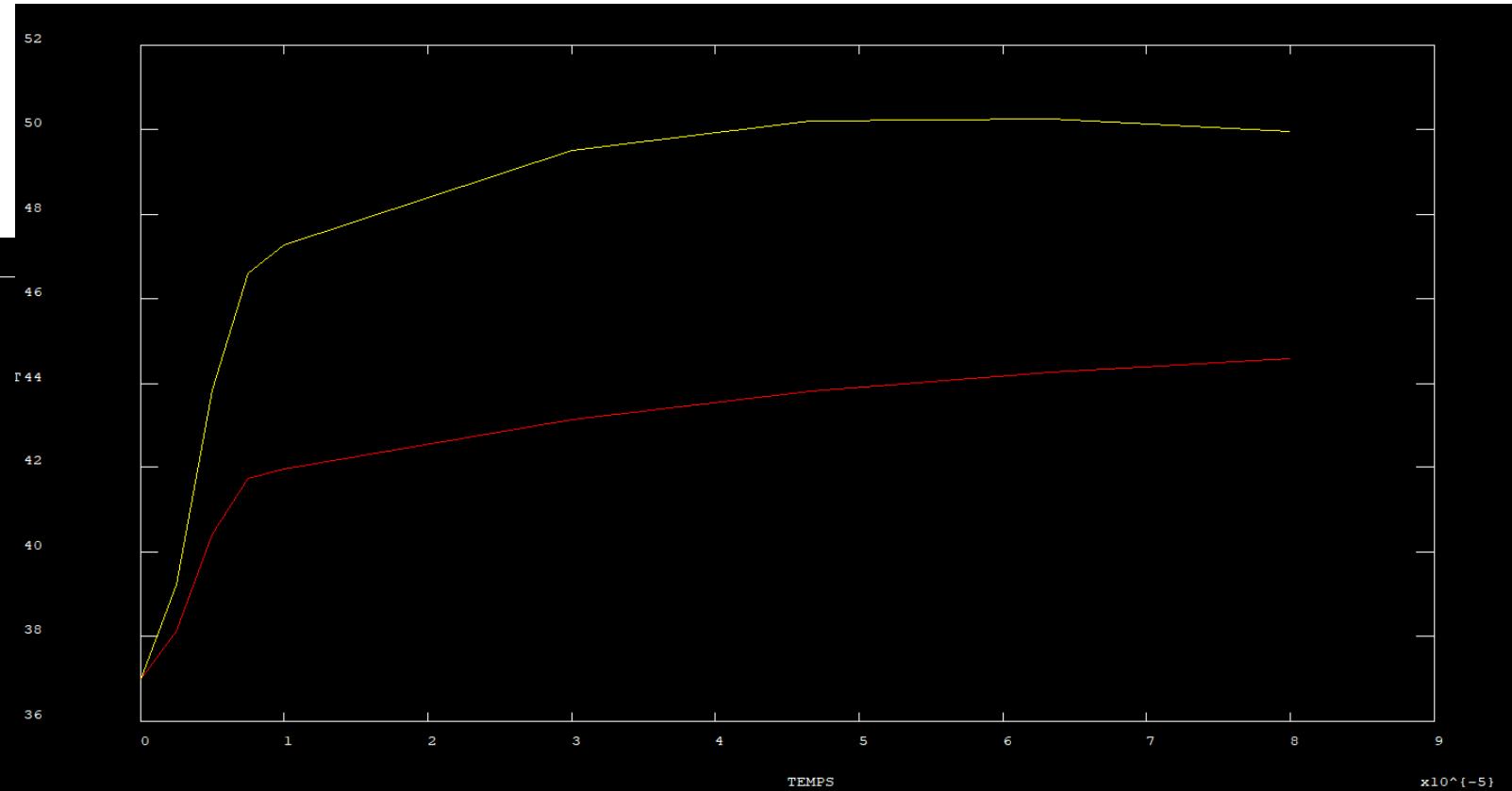


Résultats

Sorties graphiques en fonction du temps pour un laser impulsif



Impulsions longues > 100 μ s
La diffusion thermique est plus
courte que l'impulsion



Impulsions courtes < 10 μ s
La diffusion thermique est plus longue
que l'impulsion.
Dans l'ancienne version de la norme, on
évoquait un temps de 18 μ s, ce temps
est passé à 5 μ s dans la nouvelle

Résultats préliminaires

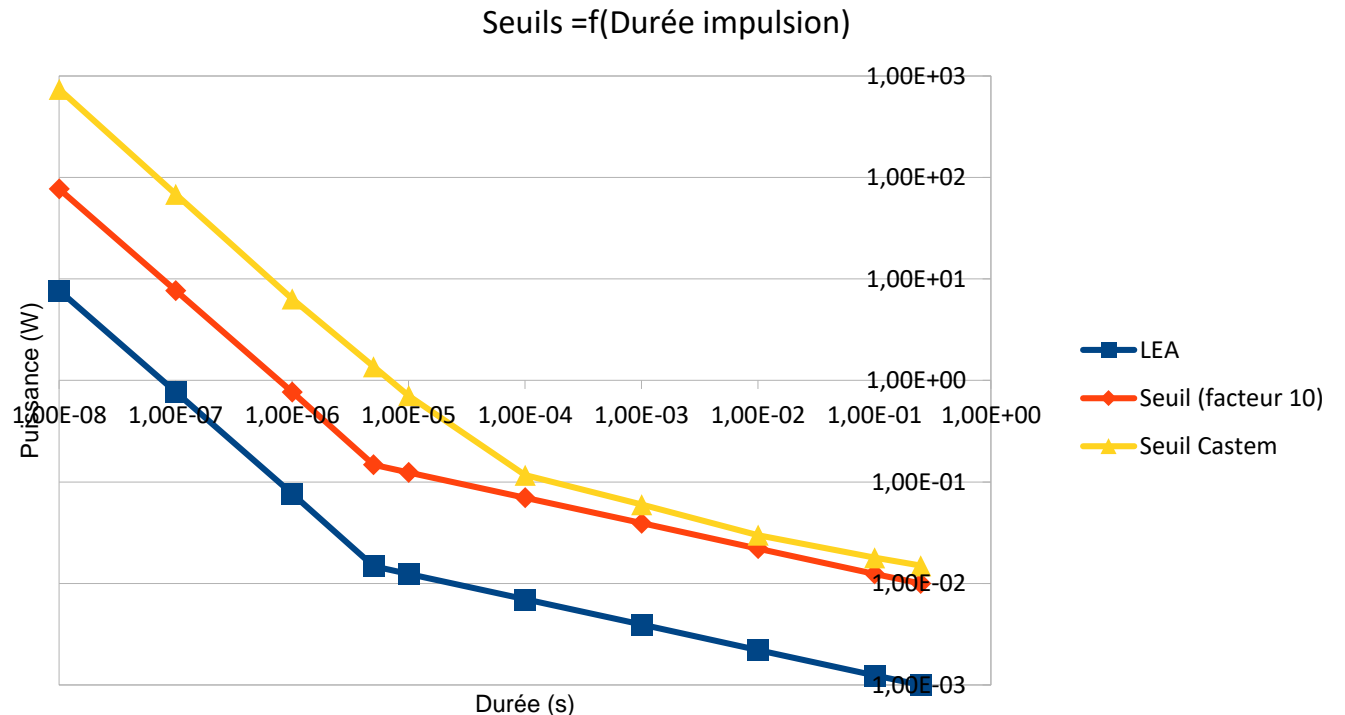
Influence de la durée d'impulsion et comparaison avec les VLE

La norme prévoit une variation des LEA (ou VLE) en t^{-1} jusqu'à 5 μs et en $t^{-0,25}$ en deçà.

Les résultats fournis par Castem sont **globalement cohérents** avec les LEA et les seuils de dommage extrapolés en appliquant un facteur de sécurité de 10.

On retrouve **cette cassure de pente** avec Castem mais moins prononcé.

Les facteurs de sécurité sont **importants** (>50) **en deçà de 10 μs** , en revanche ils semblent **cohérents** avec la norme **au delà de 1 ms**.



Résultats préliminaires

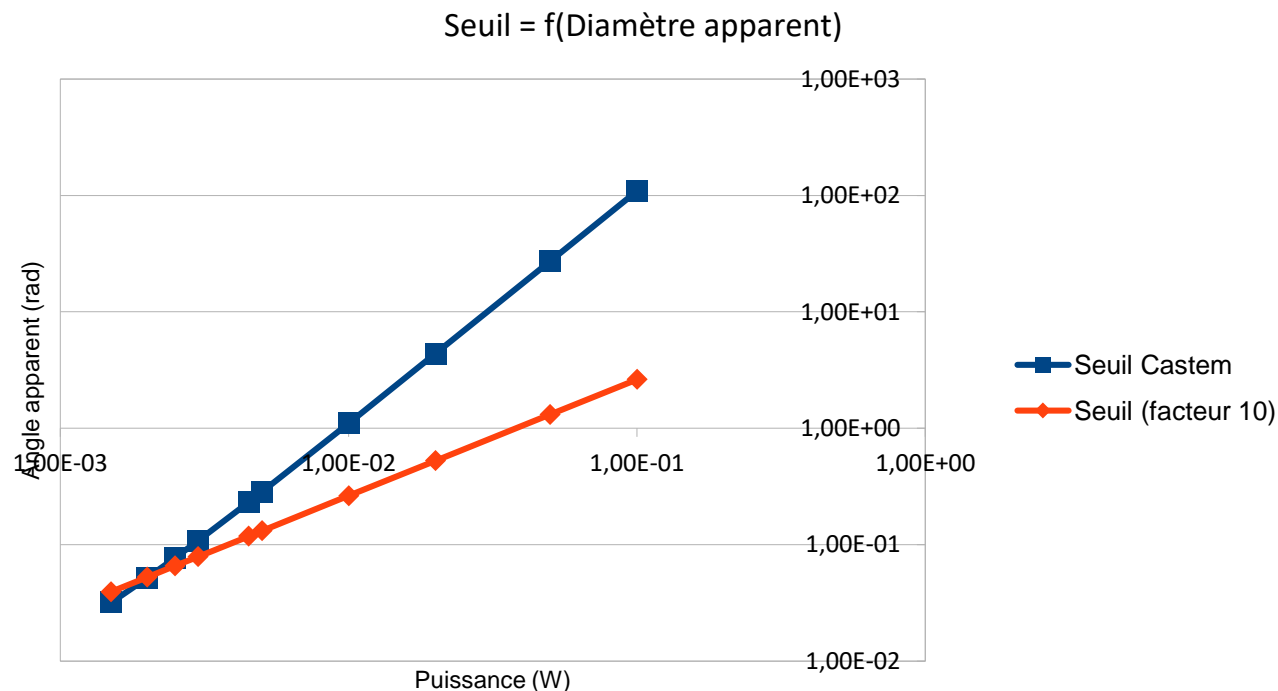
Influence de la dimension d'image rétinienne et comparaison avec les VLE

La dimension d'image rétinienne (espace image) est relié à l'angle apparent α de la source (espace objet) par la focale de l'oeil.

Du fait de l'effet thermique et d'une diffusion de la chaleur altérée par la dimension de l'image, la norme prévoit une variation des LEA (ou VLE) en α jusqu'à α égal à 100 mrad.

Les résultats fournis par Castem **ne suivent pas** ceux de la norme puisque la variation est plutôt en α^2 . Donc cet effet thermique serait négligeable.

Ces résultats changeraient assez fondamentalement, les VLE. Les calculs doivent être consolidés.



Résultats préliminaires

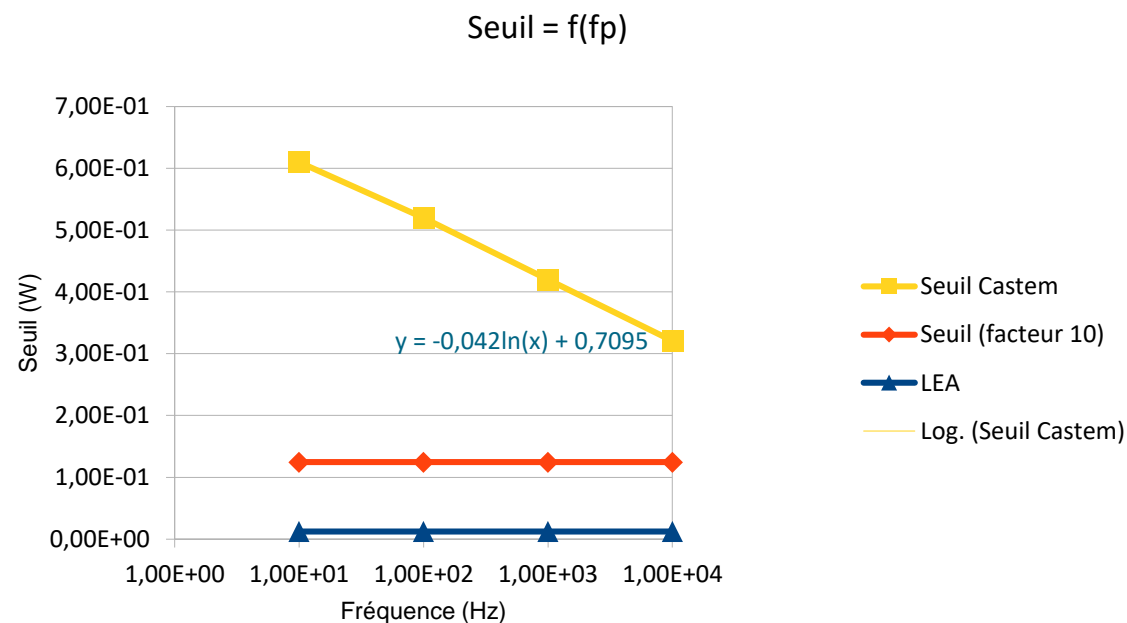
Influence de la fréquence et comparaison avec les VLE

La **fréquence** de recurrence des impulsions intervient sur le **seuil de dommage**. Dans la norme, la formulation actuelle prend le **minimum** entre la **LEA moyenne** sur la durée d'exposition et la **LEA sur la durée d'impulsion corrigée** par un coefficient C_5 .

Dans l'exemple ci-contre compte tenu du nombre d'impulsions ($C_5 = 1$), la **LEA** et le **seuil** évalué à partir du coefficient de sécurité de 10 sont **constants**, alors que le seuil calculé à l'aide de CAST3M **décroit** en fonction de la fréquence, selon une **fonction logarithme**. Le refroidissement est plus important pour des fréquences faibles.

Ces résultats, à consolider, changeraient assez fondamentalement, les VLE.

Les calculs sont réalisés pour un train de 5 impulsions de durée de 10 μ s



Prochains axes de développement à court et moyen terme

Optimisation des temps de calcul :

- par une résolution spatiale adaptée :
 - * suivre la focalisation du faisceau dans le maillage (par exemple se limiter à 5 fois la dimension du faisceau à $1/e^2$)
- par une résolution temporelle optimisée pour les impulsions et entre les impulsions :
 - * faire des tests pour évaluer leur influence et optimiser
- par une optimisation des boucles de calcul du seuil de dommage

Passage en 3D :

- pour prendre en compte des faisceaux non symétriques
- pouvoir focaliser le faisceau dans une autre structure (pour les applications médicales)

Evaluer des seuils de dommage pour la cornée (IRA et IRB), le cristallin voire la peau

- rechercher des données optiques (absorption spectrale) des structures
- maillage spécifique

Conclusion

Cast3M s'avère être un **outil « souple » et performant** pour étudier les **seuils de dommage oculaires (ou cutanés)** mais aussi sur des **protecteurs laser**.

Les résultats obtenus sont **préliminaires** et doivent **être complétés** notamment pour :

- étudier l'influence du **nombre et de la fréquence des impulsions** et vérifier ou infirmer la **formulation actuelle de l'ICNIRP**,
- proposer une description mathématique de **l'influence de la puissance crête** et
- analyser l'influence de la **répartition spatiale de la tache rétinienne** sur les VLE.

Ces deux derniers points ne sont pas pris en compte aujourd'hui dans les guidelines de l'ICNIRP.

L'intégration de la lecture d'un **fichier de données** permet à terme d'envisager vérifier les seuils de dommage et de dimensionner des **protecteurs laser** (matériaux, lunettes, rideaux ...) en utilisant une **description générique par couches**.