

# Distribution de lumière dans un scintillateur

KOVALEVSKIJ Marcin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UFR de Physique, Université de Paris, Paris, France

E-mail: marcin.kovalevskij@etu.univ-paris-diderot.fr

Date de déposition 16/05/2021

## Abstract

On a effectué la simulation de la distribution de la lumière dans un scintillateur inorganique. On a modélisé le scintillateur comme un rectangle de dimensions  $50 \times 10 \text{ mm}^2$ . Les faces latérales du rectangle peuvent être recouvertes par un matériau réfléchissant spéculairement ou totalement absorbant, la face supérieure pouvant être recouverte par un matériau réfléchissant spéculairement ou d'un diffusant non spéculaire lambertien et la face inférieure est la face de sortie de photons qui est couplée au photodétecteur. On observe que les photons à l'intérieur de scintillateur, sur la face de sortie, sont distribués selon la loi gaussienne, les faces latérales étant recouvertes par un matériau absorbant ont effet de diminuer le nombre des photons détectés et la face supérieure étant réfléchissante non spéculairement n'a pas beaucoup d'effet sur le nombre de photons détectés.

## 1. Introduction à la problématique des scintillateurs

Un scintillateur est un matériau ayant les propriétés d'émettre le rayonnement électromagnétique suite à l'absorption et l'interaction avec des particules énergétiques qui le traversent. En pratique, il existe une relation entre l'énergie déposée par les particules énergétiques interagissant avec le scintillateur et le nombre des particules produites par le scintillateur. Ainsi, cette relation permet de déduire l'énergie des particules interagissant avec le scintillateur et donc le type des particules.<sup>1</sup>

Il existe deux types des scintillateurs, les scintillateurs organiques et inorganiques, nous nous intéressons, dans la suite, à la modélisation d'un scintillateur inorganique solide. En particulier, on va simuler l'interaction des photons (émis par des rayons  $\gamma$ ) avec le scintillateur et donc leur trajectoire, dans le scintillateur, jusqu'à la sortie des photons de scintillateur ou leur absorption par des faces de scintillateur.

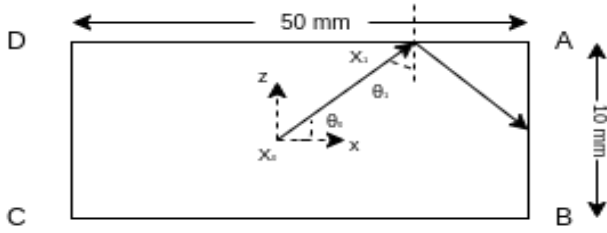
## 2. Objectifs de simulation

L'objectif principal de la simulation de distribution de la lumière dans un scintillateur c'est de tracer le profil de lumière et de tracer la distribution de la lumière. Ensuite, on va étudier ces deux grandeurs en fonction des différents revêtements possibles des faces latérales et de la face supérieure du scintillateur. Par exemple, les faces définies par les segments  $[AB]$  et  $[CD]$ , (*Figure 1*), pourront être soit totalement absorbantes le photon, soit réfléchissantes le photon avec un angle égale à l'angle d'incidence. Tandis que la face définie par le segment  $[DA]$  pourra être soit réfléchissante le photon avec un angle égale à l'angle d'incidence ou réfléchissante le photon avec un angle tiré aléatoirement selon la loi  $\theta = \arcsin(u)$ , avec  $u$  étant la variable aléatoire tiré d'une distribution uniforme sur  $[-1, 1[$ .

Les rayons de haute énergie  $\gamma$ , en contact avec le scintillateur, vont émettre 10 000 photons. Ainsi, on effectuera 10 000 simulations (de déplacement d'un photon dans le scintillateur), ensuite on pourra tracer la densité linéique de lumière. En reprenant la même simulation de 10 000 photons pour un très grand nombre, on pourra tracer la distribution de la lumière. Pour ces deux grandeurs, on s'entend d'avoir la distribution gaussienne des photons qui ont sortis du scintillateur.

---

<sup>1</sup> [1] et [2]



(Figure 1 - le scintillateur en 2D)

### 3. Modélisation de simulation

Pour décrire le mouvement de photons dans un scintillateur on résout l'équation différentielle vectorielle, à vitesse constante,

$$\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt} \quad (\text{eq. 1})$$

par intégration de (eq. 1), on obtient l'équation décrivant le mouvement de photon entre deux instants,

$$\vec{x}_2 - \vec{x}_1 = \vec{v}(t_2 - t_1) \quad (\text{eq. 2})$$

qui peut aussi s'écrire comme:

$$\begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_x(t_2 - t_1) \\ v_y(t_2 - t_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos(\theta)(t_2 - t_1) \\ v \sin(\theta)(t_2 - t_1) \end{pmatrix} \quad (\text{eq. 3})$$

Étant donné la position de photon à l'instant initial, l'angle de départ, la vitesse de photon et les dimensions de scintillateur, on peut résoudre ce système d'équations et donc déduire les coordonnées de photon à la sortie de scintillateur.

Il est important de noter qu'un fois le photon est réfléchi par les faces de scintillateur, la composante orthogonale (à la face de réflexion) du vecteur vitesse de photon change le signe. Par exemple, si le photon est réfléchi par la face

définie par le segment  $[AB]$  on effectue la transformation  $(v_x, v_y) = (-v_x, v_y)$ .

Pour chaque réflexion spéculaire de photon sur les faces de scintillateur on doit calculer l'angle de réflexion de photon par rapport l'axe des  $x$ . Ensuite, si le photon entre en collision avec la face  $[BC]$ , l'angle d'incidence  $\theta_i$  de photon est projeté selon la normale de la face  $[BC]$ . Pour déterminer si le photon, en collision avec la face  $[BC]$  sort de scintillateur on vérifie la condition si  $\theta_i < \theta_c$  ou  $\theta_c$  est l'angle critique donne par l'application des Lois de Snell-Descartes:  $\theta_c = \arcsin(\frac{n_2}{n_1}) = 47.46^\circ$ . Pour que  $\theta_c$  existe il est nécessaire de satisfaire la condition  $n_2 < n_1$ .

### 4. Algorithme

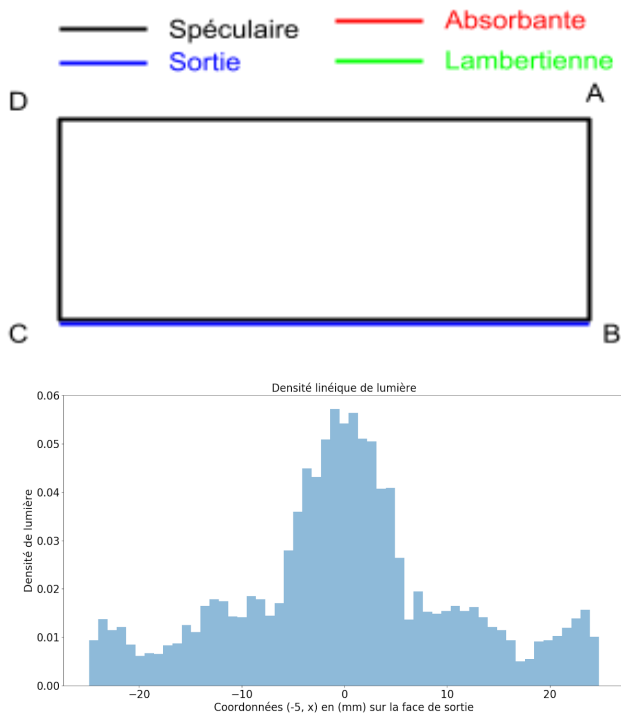
1. On commence l'algorithme en tournant la boucle pour  $n = 0$  à  $N = 10\,000$ 
  - a. On initialize les variables principales:
    - *theta* - l'angle initial qui est tirée aléatoirement selon la loi uniforme sur  $[0, 2\pi]$  (valeur)
    - *xy* - position (tableau)
    - *vxy* - vitesses initiales (tableau)
    - *d\_max* - distance maximale de photon (valeur) tirée selon la loi exponentielle d'espérance  $l = 150\text{mm}$
    - *d* = 0 (valeur) distance totale parcourue par le photon
    - *vivant* = *Vrai* - (boolean) variable indiquant si le photon est absorbé
  - b. Pour le photon  $n$  donnée boucler jusqu'à  $d < d\_max$  et *vivant* = *vrai*
    - i. Appeler la fonction *calc\_next\_collision()* qui renvoie le plus court temps de collision - *t\_next*, ainsi que le nom de parois de collision - *seg\_ID*
    - ii. Calculer les coordonnées de collision *xy\_new*
    - iii. Appeler la fonction *compute\_collision\_type()* qui renvoie *theta* - l'angle de collision, et *vivant*

- iv. Appeler la fonction *calculer\_distance()* qui calcule la distance entre *xy* et *xy\_new*, effectuer le valeur renvoyée à la variable *d*
  - v. Calculer la nouvelle vitesse *vxy\_new*,
  - vi. Effectuer *vxy = vxy\_new* et *xy = xy\_new*
- c. Vérifier si *vivant = vrai* ou  $d > d_{max}$ , si l'une des conditions est satisfaite aller vers *a*. (incrémenter *n* et recommencer la simulation pour le nouveau photon), sinon aller vers *b* (continuer la simulation jusqu'à photon sort et enregistrer ses coordonnées).

## 4. Résultats de la simulation

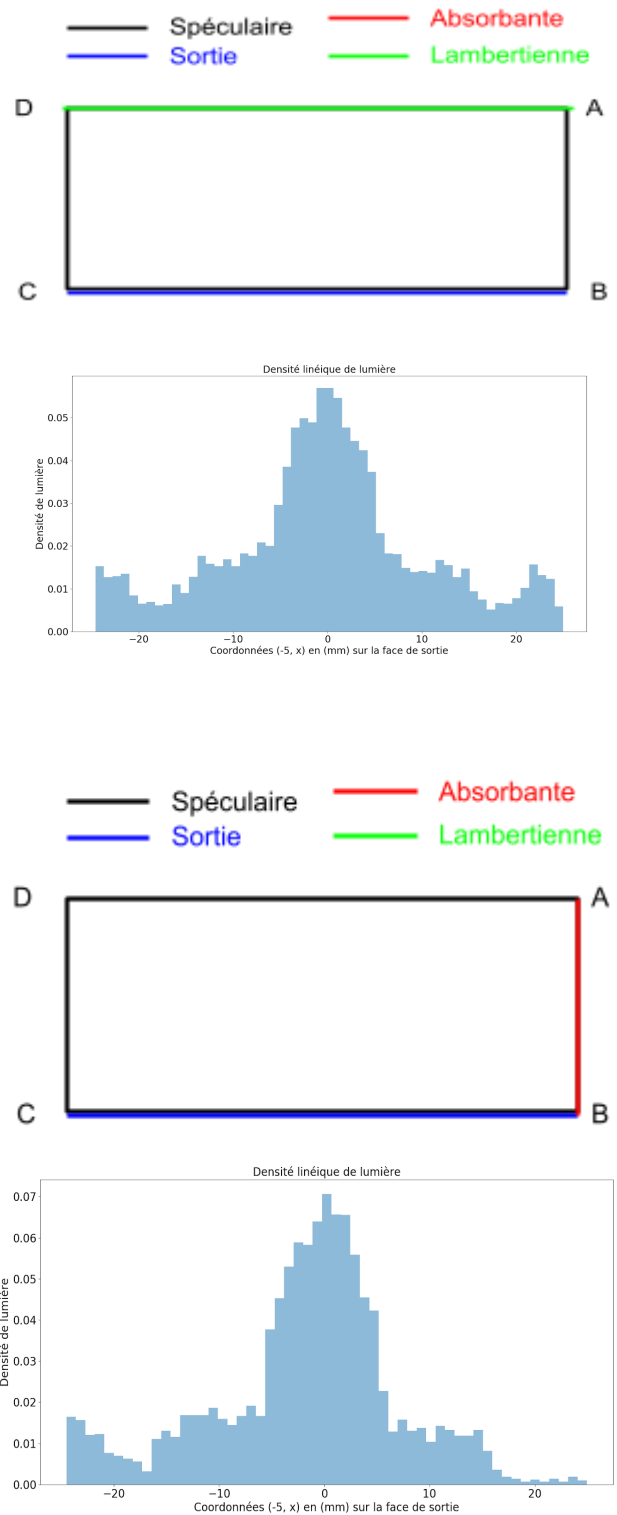
### 4.1 La densité linéique de lumière

On a effectué la simulation pour 10 000 photons en variant les paramètres de différentes faces de scintillateur. Ensuite, on a tracé la densité linéique de lumière, qui nous informe comment varie la densité de distribution des photons



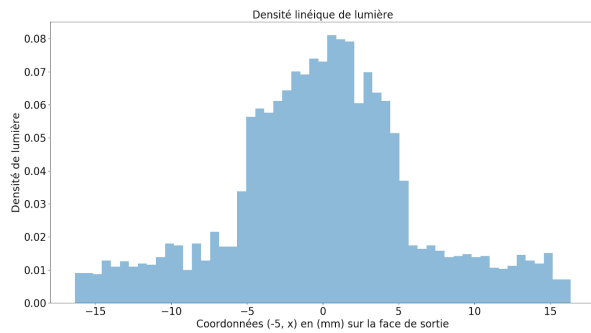
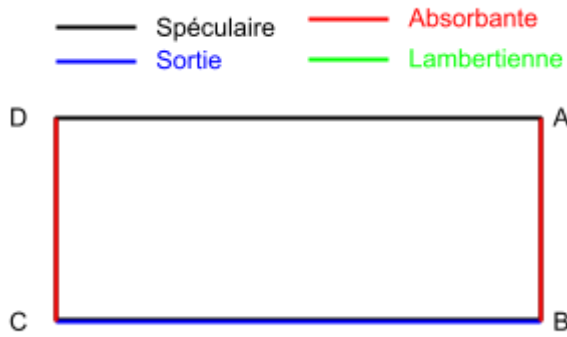
en fonction de la coordonnée *x* de la sortie du photon. Pour la facilité de lecture des résultats, au-dessus de chaque simulation, on a ajouté un scintillateur en 2D pour montrer quels paramètres de faces ont été changés.

(Figure 2 - Réflexion spéculaire)

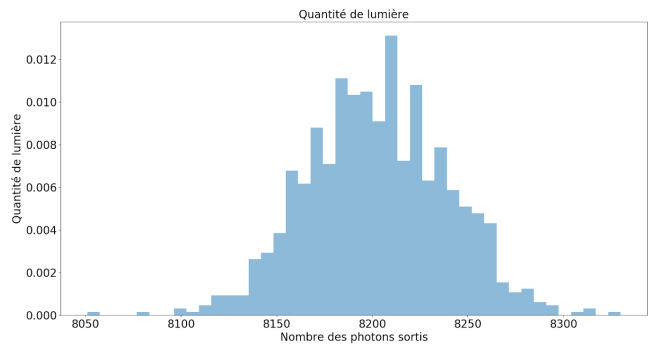


(Figure 3 - Réflexion Lambertienne)

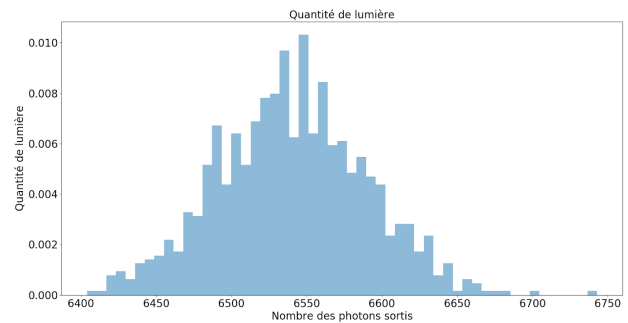
(Figure 4 - Absorption - face [AB])



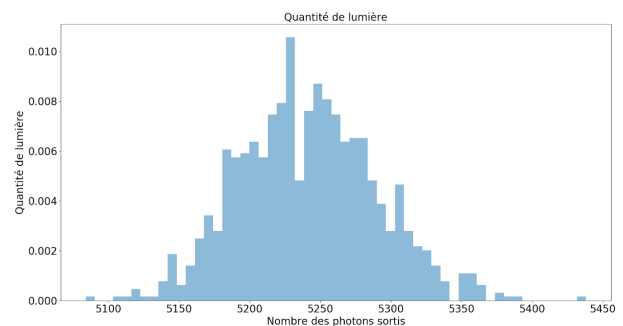
(Figure 5 - Absorption - faces [AB] et [CD] )



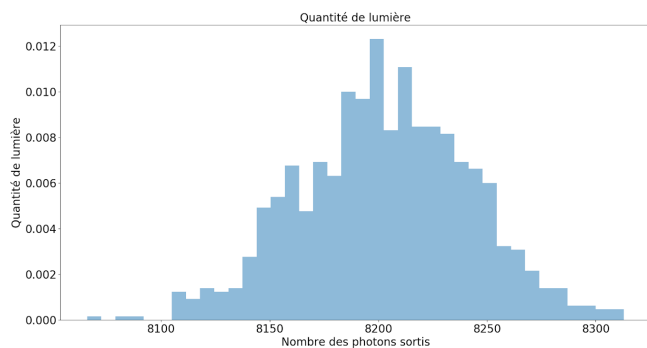
(Figure 7 - réflexion lambertienne, correspond à scintillateur représenté sur la figure 4)



(Figure 8 - la face [AB] absorbante, correspond à scintillateur représenté sur la figure 5)



(Figure 9 - les faces [AB] et [CD] absorbantes, correspond à scintillateur représenté sur la figure 6)



(Figure 6 - réflexion spéculaire, correspond à scintillateur représenté sur la figure 3)

#### 4.2 Distribution de la quantité de lumière

Pour la simulation de la distribution de la quantité de lumière, on a refait la même simulation 1000 fois pour 10000 photons. Après chaque simulation, on a enregistré le nombre de photons qui ont pu sortir, ce nombre est la quantité de lumière. De cette façon, on a tracé l'histogramme de photons sortis pour 1000 simulations, pour avoir l'histogramme de la quantité de la lumière.

## 5. Analyse physique de résultats de la simulation

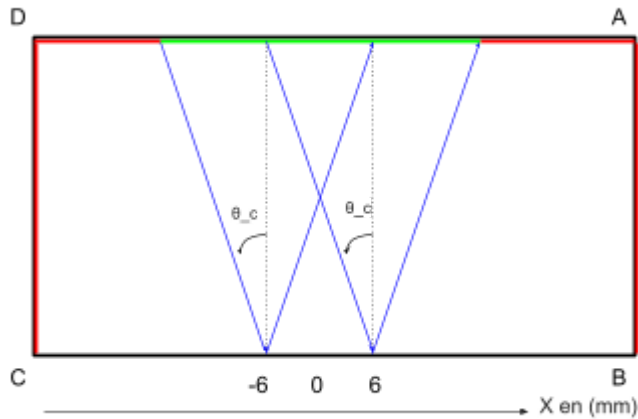
### 5.1 Analyse de densité linéique de lumière

La (Figure 2) correspond à la réflexion spéculaire sur toutes les faces, sauf la face de la sortie. On observe qu'on obtient la distribution gaussienne des photons qui ont pu sortir. La figure qu'on observe est symétrique, la fraction des photons, qui ont pu sortir, tel que  $x \in [0; 25] \text{ mm}$  est .408 et la fraction tel que  $x \in [0; -25] \text{ mm}$  est .4056, en total fraction des photons sortis est .8136.

Sur la (Figure 2) on peut distinguer trois régions de sortie de photons, région 1 t.q.  $|x| \in [0; 6] \text{ mm}$ , région 2 t.q.  $|x| \in [6; 20] \text{ mm}$  et le région 3 t.q.  $|x| \in [20; 25] \text{ mm}$ .

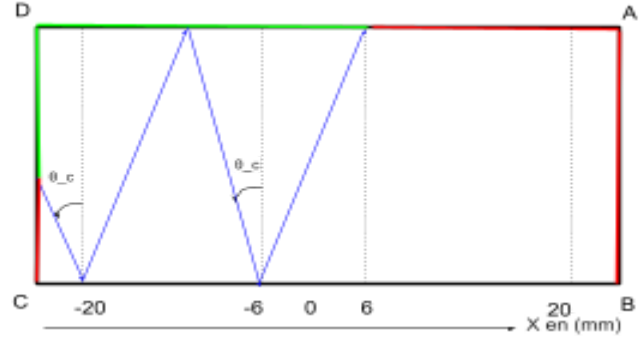
On interprète le région 1 comme le région où plupart des photons qui arrivent à sortir sont des photons dont l'angle de départ est inférieur à  $\theta_{\text{critique}}$ , ce sont des photons dont plupart sortent après le premier contact avec la face de sortie  $[BC]$ , la fraction de ces photons est .2635.

On peut mieux comprendre le comportement des photons dans le région 1 en suivant photon à la renverse de sa trajectoire (représentée en bleu) en faisant le schéma qualitatif représente au-dessous. En vert on a représenté la partie de segment  $[DA]$  d'où les photons peuvent arriver dans la région 1, tandis que les segments représentés en rouge sont les segments d'où les photons ne peuvent pas venir sur la région 1.



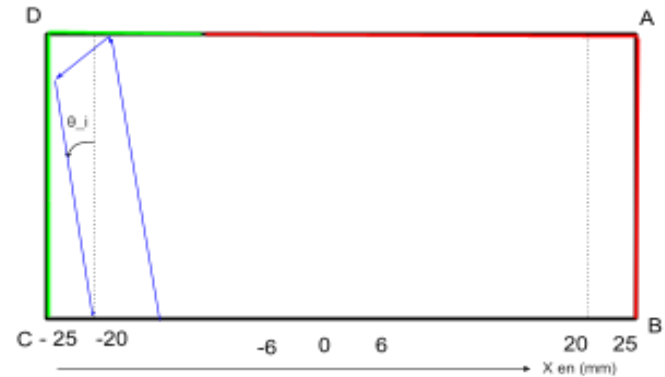
(Figure 10 - schéma de suivi de photon )

Ensuite, le région 2 correspond à des photons sortis dont l'angle de départ est supérieur à  $\theta_{\text{critique}}$ , donc ce sont les photons qui arrivent sur la face de sortie après plusieurs réflexions dans le scintillateur. De même, on peut refaire le même raisonnement qualitatif que pour le région 1, pour voir d'où les photons peuvent arriver sur la face de sortie dans le région 2, pour  $x \in [-20; -6] \text{ mm}$ .



(Figure 11 - schéma de suivi de photon )

Dans la région 3 t.q.  $|x| \in [20; 25] \text{ mm}$  On observe qu'il y a une accumulation de photons dans les extrémités du scintillateur. L'accumulation des photons dans les extrémités peut-être cause par des photons qui n'arrivent pas à sortir de scintillateur après plusieurs réflexions sur la face  $[BC]$ , donc les photons qui sortent seulement quand ils sont réfléchis par les faces latérales avec  $\theta_{\text{incident}} < \theta_{\text{critique}}$ .



(Figure 12 - schéma de suivi de photon)

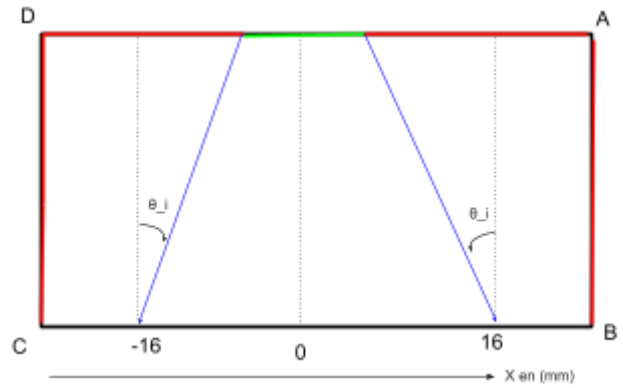
Sur la (Figure 3), on a représenté l'histogramme des photons sortis dans le scintillateur dont la face supérieure est recouverte par diffusant non spéculaire lambertien. On observe la même distribution de photons sur la face de sortie, que pour un scintillateur dont toutes les faces sont réfléchissantes. En comparant les histogrammes de distribution de la quantité de lumière (Figure 6 et Figure 7), de deux simulations, on observe que les deux simulations sont similaires.

Sur la (Figure 4), on a représenté la simulation pour la face  $[AB]$  recouverte d'un diffusant absorbant, ainsi on observe que la distribution des photons pour  $x \in [0; 25] \text{ mm}$  a diminué. La fraction totale des photons qui sortent est .6543 la fraction des photons qui sortent de la face  $[CD]$  t.q.  $x \in [0; -25] \text{ mm}$  est 0.3577 et la fraction de ceux qui sortent de la face  $[AB]$  est 0.2966. Le résultat de la simulation est en accord avec ce qu'on s'attend avec 'un bon sens physique', puisque la face  $[AB]$  étant absorbante, seule la fraction 0.0058 de photons qui sortent sont réfléchis par la partie d'extrémité droite de la face  $[DA]$ .

Le résultat de simulation est symétrique pour la face  $[CD]$  (en effectuant la simulation pour la face  $[CD]$  recouverte d'un diffusant absorbant, tandis que la face  $[AB]$  laissant réfléchissante spéculairement).

Sur la (Figure 5) on a représenté l'histogramme de densité de la lumière, pour la simulation en recouvrant les deux faces latérales par un revêtement parfaitement absorbant, représentées par les segments  $[AB]$  et  $[CD]$ .

On observe que les photons sortent seulement dans la région t.q.  $|x| \in [0; 16.25] \text{ mm}$ . Par conséquent, avec les deux faces latérales absorbantes il existe 'une zone morte' dans laquelle les photons ne peuvent pas pénétrer, longueur de cette zone, ici  $(25 \text{ mm} - 16.25 \text{ mm}) = 8.725 \text{ mm}$  dépend de l'angle critique (et donc d'indices de réfraction du scintillateur  $n_1$  et d'indice de réfraction du photodétecteur  $n_2$ ).<sup>2</sup> On peut représenter un schéma qualitatif d'où les photons peuvent parvenir pour  $|x| \in [0; 16] \text{ mm}$  représente au-dessous.



(Figure 13 - schéma de suivi de photon)

### 5.1 Analyse de la distribution de la quantité de lumière

L'analyse de la distribution de la lumière, pour une simulation donnée, nous permet de réduire les fluctuations statistiques. De ce fait, on peut s'intéresser aux grandeurs statistiques (pour chaque simulation) comme la moyenne, médiane, écart-type et intervalle de la distribution.

Grandeur Statistique	Réflec. spéc. (Fig. 7)	Réflec. lamb. (Fig. 8)	Absorb. [AB] (Fig. 9)	Abosrb. [AB] et [DA] (Fig. 10)
Moyenne	8200	8202	6541	5243
Mediane	8203	8202	6541	5244
Ecart-type	39	39	47	48
Intervalle	268	217	299	280

(Tableau 1 - les grandeurs statistiques)

On observe que pour chaque simulation *médiane*  $\approx$  *moyenne*, donc comme on peut voir sur les figures 6 à 9 il s'agit des distributions gaussiennes.

En changeant la face  $[DA]$  de réflexion spéculaire à la réflexion lambertienne les distributions restent similaires, cependant l'intervalle de la distribution change.

En outre, pour les simulations avec les faces latérales absorbantes le nombre de photons sortis diminue considérablement.

## 6. Conclusion

La simulation de distribution de la lumière dans un scintillateur inorganique solide nous a permis d'avoir une perspective comment la lumière est distribuée dans un scintillateur.

En particulier, on observe que le plus grand nombre des photons qui sortent de scintillateur c'est pour un scintillateur dont toutes les faces sont réfléchissantes spéculairement, ou bien, dont la face  $[DA]$  réfléchisse selon la loi lambertienne. Aussi, la différence entre le nombre des photons sortis lorsque la face  $[DA]$  réfléchisse spéculairement ou lambertiennement n'est pas significative.

En recouvrant l'une des faces latérales avec un matériau absorbant, on observe qu'il y a une diminution des photons qui sortent par la côte de face absorbante.

En recouvrant les deux faces latérales avec un matériau absorbant, la zone de sortie de photons du scintillateur diminue.

La simulation de scintillateur peut être améliorée davantage en implémentant la simulation 3D ainsi que les autres paramètres qui permettront de mieux modéliser le scintillateur réel. Ainsi, dans ce projet on a fait le choix de se focaliser sur le modèle 2D et le bien l'étudier avant de commencer la simulation en 3D.

## Remerciements

- Merci à M. Philippe Schwemling pour la rédaction de sujet sur la distribution de la quantité de la lumière dans un scintillateur, ainsi pour m'avoir expliqué les concepts importants sur la simulation de la lumière dans un scintillateur.
- Merci à M. Sébastien Charnoz pour m'avoir aidé pendant les séances de TP.

## Références

[1] Philippe Schwemling, Projet de physique numérique S1 Énoncés des projets, Distribution de lumière dans un scintillateur, l'Université de Paris

[2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Scintillateur>