

CARACTÉRISATION D'UN PIGMENT PHOSPHORESCENT EN VUE DE SON UTILISATION COMME TRACEUR DE PARTICULES SOLIDES

A. GBANE^{1*}, G. ANTONINI² et M. DOUKOURE³

¹ *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences des Structures de la Matière et de Technologie, Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

² *Université de Technologie Compiègne, EA 4297 TIMR BP 20529, 60205 Compiègne Cedex, France*

³ *Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, e-mail : ahmadougbane@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Dans cette étude, il est mis en place une procédure d'étalonnage basée sur la perte de luminescence d'un matériau phosphorescent pulvérulent. Pour ce faire et après excitation par une intensité adéquate de lumière fournie par un flash d'appareil photographique, ce matériau est caractérisé en étudiant les paramètres qui peuvent modifier le signal reçu par un détecteur photosensible de type photomultiplicateur. Ces paramètres variables sont la masse (concentration) de matériau pulvérulent déposée sur une surface plane, la surface couverte par l'ensemble des particules visibles depuis le photomultiplicateur et la distance entre cette surface visible et le détecteur. On s'est intéressé d'abord au pigment phosphorescent 50000 Lumilux® effect green N. Toutefois, la procédure peut être étendue à tout solide pulvérulent enrobé de ce pigment tel que brièvement présenté à la fin de ce document.

Mots-clés : *pigment phosphorescent, coefficient de décroissance, traceur, enrobage*

ABSTRACT

Characterization of a phosphorescent pigment for its use as a tracer of solid particles

In this study, it is put in place a calibration procedure based on the loss of luminescence of a phosphor pulverulent material.

A. GBANE et al.

To do this and after excitation with an adequate intensity of light provided by a flash of camera, this material is characterized by studying the parameters which can change the received signal by a photosensitive detector such as a photomultiplier. These variable parameters are the mass (concentration) of pulverulent material deposited on a flat surface, the surface covered by all visible particles from the photomultiplier and the distance between this visible surface and the detector. We have been interested firstly to the phosphorescent pigment 50000 Lumilux® effect green N. Nevertheless, the procedure can be extended to any pulverulent solid coated of this pigment as briefly presented at the end of this paper.

Keywords : *phosphorescent pigment, decay coefficient, tracer, coating.*

I - INTRODUCTION

Un matériau phosphorescent a la propriété d'absorber de l'énergie lumineuse et de la libérer sous forme de lumière. Après avoir été donc éclairé à une certaine longueur d'onde, le matériau phosphorescent réémet de la lumière pendant une durée relativement longue. Ce phénomène très intéressant de la phosphorescence a plusieurs applications possibles : distinction d'objets dans l'obscurité, signalisation routière ou encore panneaux publicitaires. Il peut aussi être utilisé pour suivre le déplacement, par exemple, d'une population de particules solides. L'objet de cette présente étude se situe au niveau de cette dernière application. En effet, dans le but d'utiliser ultérieurement un pigment phosphorescent (50000 Lumilux® effect green N) comme traceur d'une population de particules solides (lit de particules solides), une étude préalable de caractérisation de la phosphorescence dudit pigment est faite et présentée dans ce travail. Sachant que certains paramètres affectent l'acquisition du signal reçu par le photomultiplicateur, la caractérisation a donc consisté à étudier la perte de luminescence de ce pigment en fonction de ces paramètres variables qui influent sur le signal reçu. La littérature fournit différentes études sur les lois de la perte de luminescence de matériaux phosphorescents [1]. Ces lois peuvent être :

- de type exponentiel : $I_1(t) = I_1(0)e^{-\alpha t}$ (1)

- de type hyperbolique : $I_1(t) = I_1(0)t^{-\alpha}$ (2)

- de type parabolique :
D'ordre 2 $I_1(t) = \frac{I_1(0)}{(1+\gamma t)^2}$ (3)

- D'ordre n $I_1(t) = \frac{I_1(0)}{(1+\gamma t)^n}$ (4)

$I_1(t)$ représente le signal de décroissance de la phosphorescence et $I_1(0)$, le signal obtenu pour $t = 0$. Les paramètres α et γ sont déterminés en utilisant la loi qui ajuste au mieux la courbe de décroissance. Certains auteurs ont donné dans leurs travaux, des techniques d'ajustement de courbes de décroissance en utilisant des approximations exponentielles de second ordre [2, 3], de troisième ordre [4-6] et de quatrième ordre [7]. Aussi, [8] ont utilisé une technique décrite par [9] et ont montré que la décroissance du signal émis obéit à une loi résultant de la sommation de termes exponentiels. C'est fort de ces différentes études que ce travail été effectué. Ce qui servira de base pour l'étude hydrodynamique interne des écoulements gaz / solide, notamment pour une détermination expérimentale non intrusive mais optique de la Distribution des Temps de Séjour (DTS) d'une phase solide transportée. Dans ce cas, le pigment ou tout autre produit pulvérulent enrobé de pigment peut être utilisé comme traceur pour suivre les particules solides à étudier.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Le Pigment phosphorescent

Le pigment phosphorescent utilisé est une poudre de sulfate de zinc dopé de cuivre (ZnS:Cu). L'étude de tels systèmes de composés chimiques a été rapportée depuis plusieurs décennies [10,11]. Ce pigment est commercialisé par la société *HONEYWELL* sous le nom de 50000 Lumilux® effect green N. Il a été choisi pour sa rapidité d'activation (spectre de gauche **Figure 1**) par des flashes lumineux, pour son émission dans le domaine du visible (spectre de droite **Figure 1**) et pour sa granulométrie donnée par le fabricant ($d_{50} = 37 \mu\text{m}$). Le spectre d'activation est dissocié du spectre de réémission. Ceci montre qu'une particule de pigment déjà activée ne peut pas activer les autres.

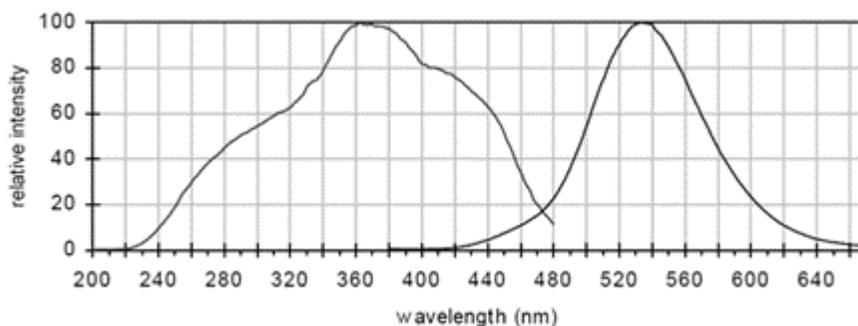


Figure 1 : Spectre d'activation et de réémission du pigment (*HONEYWELL*)

II-2. Le système de détection : Photomultiplicateur (PMT)

Il existe différents types de détecteurs de lumière permettant d'effectuer des mesures quantitatives [12]. Le choix s'est finalement porté sur un photomultiplicateur (PMT H6780-20) du fabricant *HAMAMATSU* car il est adapté au pigment utilisé. En effet, le PMT (*Figure 2*) choisi a une gamme de mesure allant de $0,3 \mu\text{m}$ à $0,92 \mu\text{m}$, avec un pic de détection à $0,63 \mu\text{m}$. Ce photomultiplicateur est donc plus performant dans le domaine du visible. Il est commandé par ordinateur via un logiciel (pas de temps de 10 ms) et un boîtier d'acquisition 8 voies conçus par le service électronique de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC).



PMT H6780-20

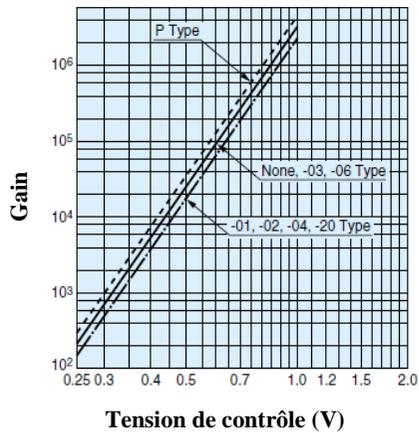


Figure 2 : PMT et sa plage de réglage de gain (*HAMAMATSU*)

La tension de contrôle permet de régler le gain (la sensibilité) du photomultiplicateur entre 10^2 et $2 \cdot 10^6$ comme rapporté par la fiche technique. Une fois le réglage du gain effectué, celui-ci doit rester le même pour tous les essais ultérieurs.

II-3. Le système d'activation

Les particules phosphorescentes sont activées à l'aide d'un flash de lumière blanche dont le temps d'action ne dure que quelques microsecondes. Le flash est actionné manuellement grâce à un interrupteur à retour automatique. Cet interrupteur est relié électroniquement au boîtier d'acquisition de sorte que son déclenchement renvoie un signal marquant le temps t_0 de démarrage.

II-4. Le banc d'essais

Pour mettre en place la méthode, le dispositif, dont le schéma de principe est représenté sur la **Figure 3**, a été monté. Ce dispositif est essentiellement composé du PMT, d'un flash et d'un réceptacle-échantillon (Surface S) contenant les particules phosphorescentes. Ces particules sont répandues sur toute la surface S en une seule couche homogène.

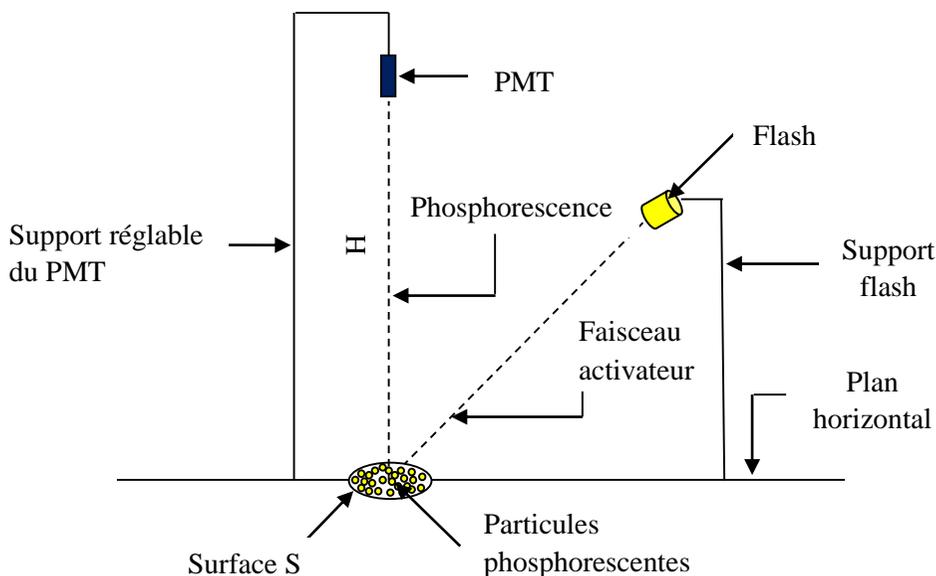


Figure 3 : Dispositif de mesure

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

La mise en place de la méthode a nécessité des essais de qualification et de calibrage. Pour cela, différentes informations ont été recherchées en faisant varier les paramètres tels que la hauteur H (distance entre le PMT et le point central de la surface S), la surface S et la masse m de pigment utilisée. Les tests effectués avec le pigment sont réalisés en séries de cinq essais à raison d'au moins une heure d'intervalle. Ce temps permet de réunir les mêmes conditions opératoires (pigment entièrement inerte, réalisation de la chambre noire du banc d'essais, élimination du bruit de fond, etc.). Après chaque série d'essais, une moyenne est effectuée et présentée. Les différentes surfaces utilisées sont indiquées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Différentes surfaces utilisées

Valeurs (cm ²)	Surfaces						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
	5,31	9,62	12,57	24,63	62,21	102,07	186,27

III-1. Signal reçu en fonction de la masse de pigment

L'objectif de ce test est de voir l'influence de la masse de pigment sur le signal reçu. Pour cela, différentes masses de pigment sont déposées sur la surface S5 de sorte que les particules y soient plus ou moins dispersées. Le résultat de ce test est présenté sur la **Figure 4** sur laquelle il est observé que le signal reçu est une fonction croissante de la masse de pigment.

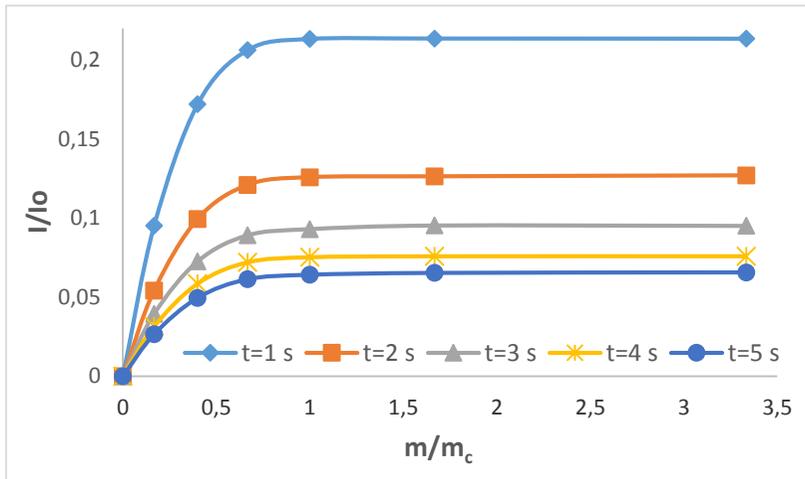


Figure 4 : Signal reçu pour différentes masses à S5 et à H = 85 cm
(m_c = 3 g)

Le signal atteint une saturation à partir d'une certaine masse appelée masse critique m_c (m_c = 3 g). Cette masse critique correspond à la masse de pigment nécessaire pour couvrir entièrement la surface source sous forme d'une monocouche. Au-delà de cette masse, les particules de pigment seront dispersées sur plusieurs couches. Le signal devient ainsi indépendant de la masse de pigment déposée car les particules supérieures formeront un écran pour les particules inférieures. Ces dernières ne seront pas excitées par le flash et par conséquent ne pourront pas être détectées par le photomultiplicateur.

Pour des masses de pigment inférieures à la masse critique, le signal est proportionnel au nombre de particules apparentes ($N_{p \text{ app}}$) vues par le photomultiplicateur. Celui-ci peut être exprimé, en considérant que les particules sont sphériques, de diamètre moyen en poids $d_{4,3}$ et de masse volumique ρ_{pi} , par :

$$N_{p \text{ app}} = \frac{6 m}{\pi \rho_{pi} (d_{4,3})^3} \tag{5}$$

Dans cette étude, la masse volumique et le diamètre moyen du pigment, déterminés expérimentalement, sont respectivement 4108 kg/m^3 et $45,56 \text{ }\mu\text{m}$. Si la population de particules observées est répartie en volume, le signal détecté sera proportionnel au nombre de particules apparentes dans la direction de visée. Soit un volume cylindrique de mesure, de diamètre D et de longueur L (**Figure 5**), contenant une densité en nombre n_p de particules supposées sphériques et de diamètre d_p .

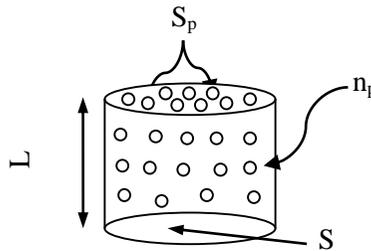


Figure 5 : *Volume cylindrique de mesure*

Pour un tel cylindre de mesure, le nombre total de particules solides peut être déterminé par :

$$N_p = n_p \left(\frac{\pi D^2}{4} L \right) \tag{6}$$

Comme indiqué en haut, le signal détecté par le photomultiplicateur est proportionnel à la surface apparente des particules projetée sur la surface de visée. Pour cela, cette surface apparente doit être inférieure ou égale à la surface de visée. Cette condition appliquée au cylindre de mesure donne :

$$N_p \frac{\pi d_p^2}{4} \leq \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow n_p \leq \frac{4}{\pi d_p^2 L} \quad (7)$$

Dans le volume cylindrique, il apparait que les particules solides, de volume V_p , ne peuvent pas occuper le volume total (V) du cylindre. Il y a par conséquent une partie de ce volume qui sera occupée par du gaz. Pour une telle configuration, on définit la notion de porosité (ε) comme étant le rapport du volume total de gaz (V_g) sur le volume du cylindre. Ainsi :

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} \quad (8)$$

$$V = V_g + V_p \text{ et } V_p = \frac{\pi d_p^3}{6} N_p \quad (9)$$

Des *Equations 7, 8 et 9*, on obtient finalement :

$$\varepsilon \geq 1 - \frac{2d_p}{3L} \quad (10)$$

On peut calculer une porosité minimale pour laquelle le signal reçu sera bien proportionnel au nombre de particules émettrices dans la direction de visée. La limite de l'applicabilité de cette méthode est liée à cette porosité minimale.

III-2. Signal reçu en fonction de la surface et de la hauteur

Le premier test effectué a été le suivant : pour une hauteur H du photomultiplicateur et pour des masses de pigment supérieures ou égales à la masse critique, on augmente progressivement l'étendue de la surface S , de $S1$ à $S7$. La *Figure 6* présente le résultat de cette étude pour $H = 75$ cm. Cette *Figure* montre que le signal détecté par le photomultiplicateur croit de manière presque linéaire avec l'augmentation de la surface S . Ainsi pour la même hauteur H , le signal le plus intense correspond à l'échantillon (surface S) le plus grand. Le signal est aussi une fonction croissante de la surface lorsqu'on opère au-dessus de la masse critique.

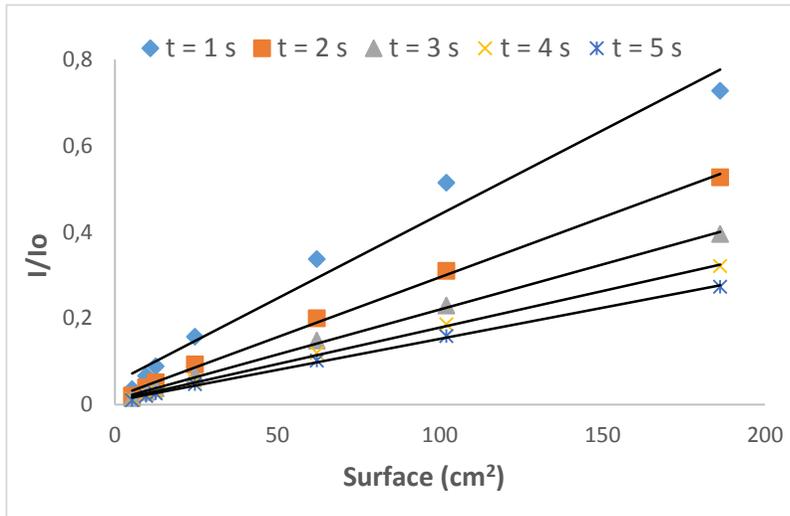


Figure 6 : Signal reçu pour différentes surfaces à $H = 75 \text{ cm}$

Après avoir analysé la variation de S , on s'est ensuite intéressé à la variation de H et de son influence sur le signal détecté. Ce test qui se fait à surface S fixe, peut permettre de positionner le photomultiplicateur par rapport à l'échantillon. Pour ces essais, trois hauteurs (75 cm, 85 cm et 95 cm) ont été choisies. La Figure 7 est la courbe caractéristique obtenue pour la surface S_5 à ces différentes hauteurs.

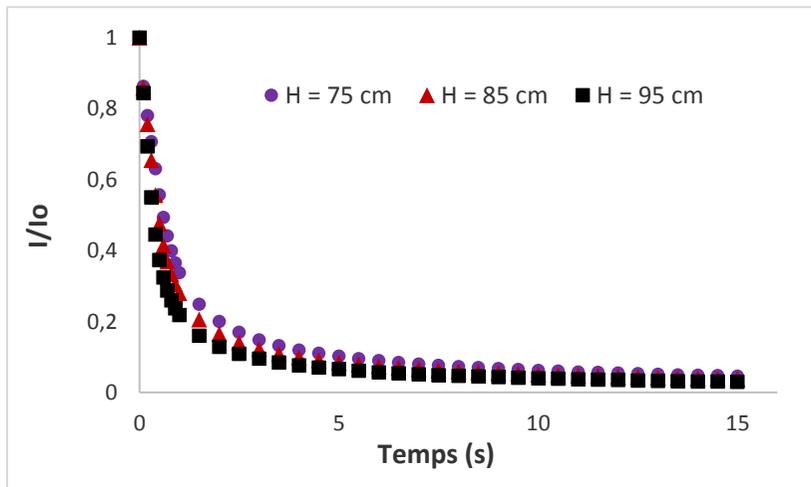


Figure 7 : Signal reçu pour trois hauteurs H à $S_5 = 62,21 \text{ cm}^2$

Comme on le constate, le signal est moins intense avec l'augmentation de la hauteur. L'explication est qu'entre ces différentes hauteurs, il y a une perte de signal due certainement à la diffusion du rayonnement lumineux. Ces deux études qui viennent d'être menées, peuvent être combinées en imaginant un signal spécifique I_{sp} , défini par la **Relation 11** :

$$I_{sp} = \frac{I}{I_0} * \frac{H^2}{S} \quad (11)$$

Dans cette expression H et S sont respectivement la hauteur fixée pour le photomultiplicateur et la surface regardée par ce dernier. La **Figure 8** montre le comportement du signal spécifique aux différentes hauteurs étudiées. On constate que les signaux spécifiques sont quasiment confondus et par conséquent, il est possible de les assimiler à un seul signal spécifique, moyenne de ces signaux spécifiques.

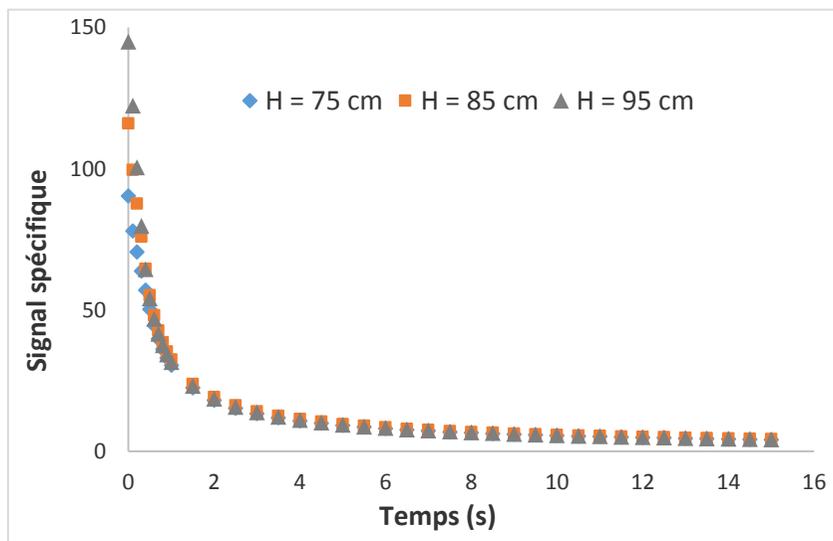


Figure 8 : Signal spécifique pour différentes hauteurs H à $S5 = 62,21 \text{ cm}^2$

Ce résultat obtenu est intéressant pour le positionnement ultérieur du photomultiplicateur sur des installations réelles. En effet, le signal spécifique étant unique, on peut s'affranchir de la hauteur à laquelle il faut placer le photomultiplicateur. La conséquence directe de ce constat est qu'en situation réelle de mesure (installations réelles), on peut placer le photomultiplicateur sur la paroi ou au contraire, l'éloigner de celle-ci car dans une installation réelle, le nombre de particules solides (lié à la masse présente au sein de l'installation), la surface S (liée à l'ouverture réalisée sur la paroi) et

la hauteur H (plus ou moins près de la paroi) sont imposées. Dans un tel cas, le signal ne devient qu'une seule fonction du temps. Conformément aux équations globales du flux de lumière rencontrées dans la littérature et par rapport aux résultats obtenus précédemment, on donne la loi d'évolution générale du signal reçu par :

$$I(m, S, H, t) = I_0 S \frac{t^{-\alpha}}{H^2} \quad (12)$$

α est l'exposant de la fonction de décroissance et sera appelé coefficient de décroissance.

III-3. Détermination expérimentale du coefficient de décroissance du pigment

L'objectif est de déterminer de manière expérimentale le coefficient de décroissance. En d'autres termes, il s'agit de déterminer la loi qui s'adapte la mieux à la décroissance de la phosphorescence du pigment en fonction de la masse m, de la hauteur H et de la surface S.

III-3-1. Coefficient de décroissance du pigment pour une variation de surface

La régression linéaire faite sur le signal obtenu en faisant varier la surface S, pour des masses supérieures ou égales à la masse critique et pour une hauteur H fixée, donne la **Figure 9**. Après avoir enregistré le signal brut, on procède à la détermination du coefficient de décroissance en traçant la courbe du logarithme du signal [$\text{Ln}(I/I_0)$] en fonction du logarithme du temps [$\text{Ln}(t)$]. Après cela, on détermine les pentes des différentes courbes obtenues qui sont en réalité les différents coefficients de décroissance recherchés.

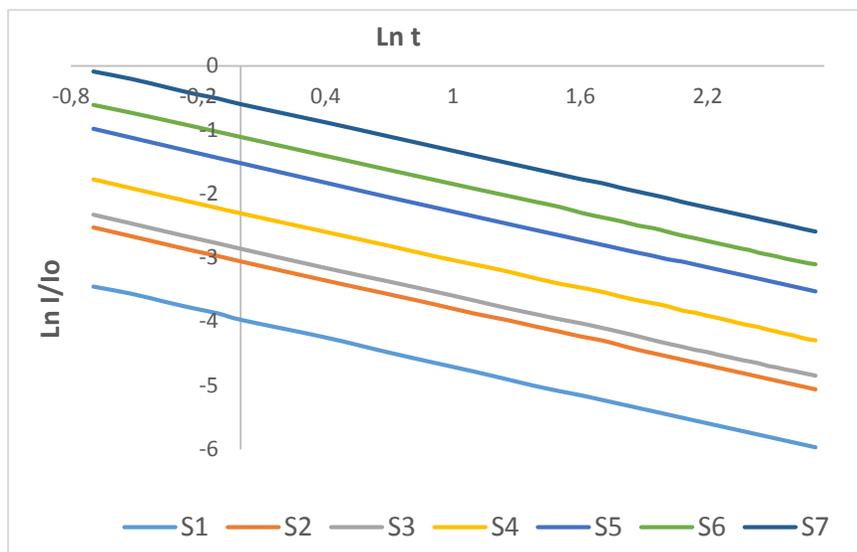


Figure 9 : Coefficient de décroissance du pigment à $H = 95$ cm

On constate que les différentes courbes obtenues sont presque parallèles entre elles. Elles ont donc approximativement la même pente. La décroissance ne dépend donc pas de la surface quand on se situe au-dessus de la masse critique. Après des calculs effectués sous Excel, nous donnons les informations du **Tableau 2**.

Tableau 2 : Coefficient de décroissance pour différentes surfaces S

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
α (-)	0,743	0,742	0,739	0,735	0,744	0,739	0,737
R^2	0,9999	0,9999	0,9997	0,9999	0,9998	0,9999	0,9998

Nous constatons que le coefficient moyen de décroissance est de 0,74, avec des coefficients de détermination d'environ 99,9 %. On montre que le signal reçu peut se mettre sous une forme hyperbolique (**Relation 13**) confirmant ainsi la **Relation 12**.

$$\frac{I}{I_0}(t) = At^{-0,74} \quad (13)$$

Ce résultat est similaire à ce que [13] ont obtenu en utilisant une méthode d'analyse de régression non linéaire. Dans leur étude, ils trouvent que la décroissance est proportionnelle à $t^{-1,09}$.

III-3-2. Coefficient de décroissance du pigment pour une variation de hauteur

Dans les mêmes conditions de masse qu'en haut, un test fait en faisant varier les différentes hauteurs H pour une surface S donnée, a montré que la décroissance ne dépend pas de la hauteur H choisie (**Figure 10**).

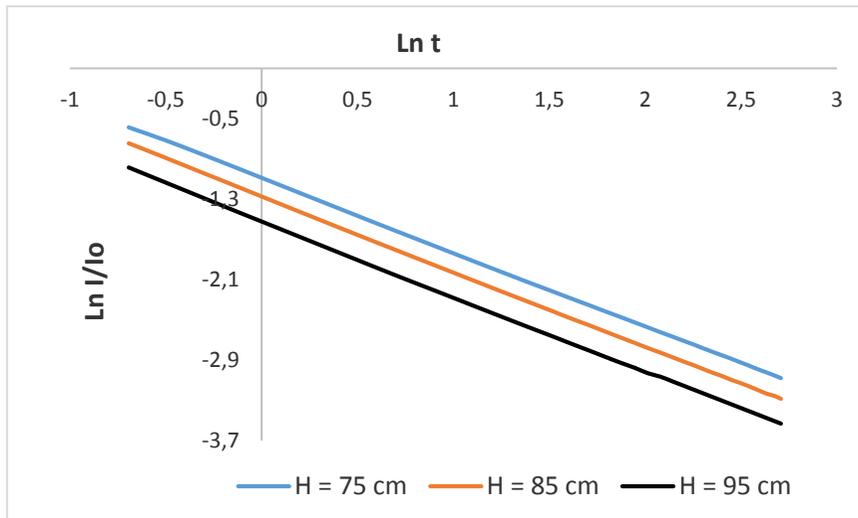


Figure 10 : Coefficient de décroissance du pigment à $S5 = 62,21 \text{ cm}^2$

Nous constatons sur cette Figure que les différentes courbes obtenues sont parallèles entre elles. Elles ont ainsi la même pente, d'où le même coefficient de décroissance recherché. Le **Tableau 3** nous en donne le récapitulatif.

Tableau 3 : Coefficient de décroissance pour différentes hauteurs H

	75 cm	85 cm	95 cm
$\alpha (-)$	0,737	0,745	0,744
R^2	0,9999	0,9999	0,9998

Le coefficient moyen de décroissance est aussi de 0,74. Nous avons donc un coefficient de décroissance unique et ce, quelle que soit la hauteur H pour une surface S donnée. Cela traduit le fait que la décroissance du signal est indépendante du positionnement du détecteur. Ce résultat est le même qu'on obtient avec le signal spécifique. En effet, la variation du signal spécifique, tel que défini plus haut, est liée à la variation du paramètre H.

III-3-3. Coefficient de décroissance du pigment pour une variation de masse

Ce test est effectué pour une surface S et une hauteur H données et avec des masses inférieures à la masse critique. Elle vise à analyser l'influence de la masse sur le coefficient de décroissance du pigment. La **Figure 11** illustre le résultat de cette analyse. Les droites obtenues ne sont pas parallèles entre elles.

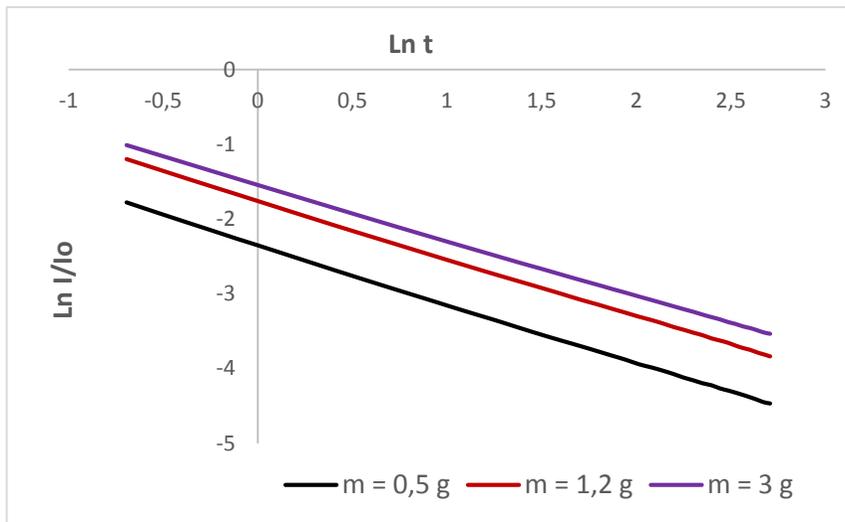


Figure 11 : Coefficient de décroissance pour $S5$ et pour $H= 85$ cm
($m_c = 3$ g)

Les différentes pentes déterminées pour ces droites confirment cela. Nous résumons dans le **Tableau 4** les différents coefficients obtenus.

Tableau 4 : Coefficients de décroissance obtenus pour différentes masses

	0,5 g	1,2 g	3 g
α (-)	0,785	0,769	0,740
R^2	0,9998	0,9998	0,9998

À travers ce **Tableau**, nous constatons que le coefficient de décroissance diminue avec l'augmentation de la masse. Donc, plus la masse utilisée est inférieure à la masse critique, plus vite décroît le signal détecté. Le coefficient de décroissance varie de 0,79 pour une masse de 0,5 g à 0,74 pour une masse de 3 g. Nous voyons donc que lorsqu'on a atteint la saturation en masse, le coefficient de décroissance reste identique et égal aux coefficients moyens obtenus aux paragraphes *III-3-1* et *III-3-2*.

Pour pouvoir utiliser au mieux le caractère phosphorescent du pigment pour une surface S et une hauteur H données, il est nécessaire de travailler avec une masse supérieure ou égale à la masse critique. Dans ce cas, la décroissance ne dépendra que de la nature du matériau du pigment et des conditions d'activation [14-16].

III-4. Étude du sable enrobé du pigment 50000 Lumilux® effect green N

On peut utiliser n'importe quel matériau pulvérulent comme traceur dans la détermination expérimentale non intrusive et optique de la DTS solide. Cela n'est possible que si on confère à ce matériau une propriété lumineuse, d'où la nécessité que celui-ci soit, par exemple, enrobé d'un pigment phosphorescent. Le cas présenté ici est du sable enrobé dont le diamètre moyen et la masse volumique, déterminés expérimentalement, sont respectivement $248 \mu\text{m}$ et 2793 kg/m^3 .

III-4-1. Enrobage du sable

Pour les besoins de cette étude, nous avons travaillé en voie humide [17] où nous avons ajouté un liant au mélange sable-pigment. Ce mélange est effectué avec un sable initial de diamètre moyen $200 \mu\text{m}$ et dans des proportions massiques de 15 %. Le liant utilisé comme colle [18] est du silicate de sodium. Il est ajouté dans une proportion massique estimée par l'opérateur, mais inférieure à 10 % de sable à enrober. Un mélangeage attentif doit être mené à l'aide d'un agitateur mécanique à pales qui réalise un très bon cisaillement du milieu et contribue à la qualité des produits enrobés [19]. Les particules enrobées sont ensuite mises à l'étuve à 80°C pour sécher le liant, puis tamisées et analysées en granulométrie pour ne conserver que celles qui ont gardé la granulométrie recherchée. La **Figure 12** présente différents produits enrobés avec le pigment green N. On trouve successivement de gauche à droite : des billes de verre enrobées, du sable enrobé et une poudre de bois enrobé.



Figure 12 : Exemples de solides enrobés

III-4-2. Décroissance naturelle de la luminescence du sable enrobé

La décroissance de la luminescence du sable enrobé a été évaluée expérimentalement avec la même procédure de détermination du coefficient de décroissance que celle du pigment green N. Une moyenne est effectuée sur une série de dix essais et présentée sur la **Figure 13**.

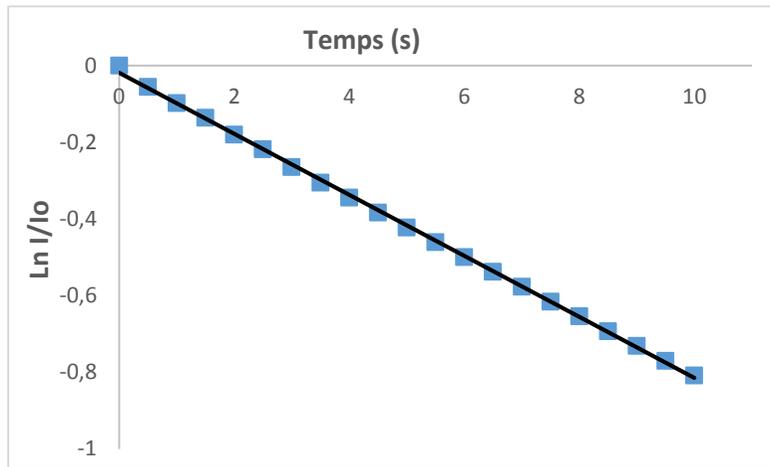


Figure 13 : Coefficient de décroissance du sable enrobé à S5 et à H = 85 cm

Cette **Figure** montre que la perte de la luminescence du sable enrobé suit une loi exponentielle semblable à celle de [20]. Le coefficient de décroissance est de 0,0796 et il a été obtenu avec un coefficient de détermination de 99,94 %. Pour caractériser la décroissance du sable enrobé, on donne la loi suivante :

$$\frac{I}{I_0}(t) = Ae^{-0,08t} \quad (14)$$

IV - CONCLUSION

Ce travail a permis de mettre au point une méthodologie de caractérisation de la perte de luminescence d'un pigment phosphorescent et de l'étendre à du sable enrobé de ce pigment. Il a été établi que la décroissance de la phosphorescence du pigment 50000 Lumilux® effect green N suit une loi hyperbolique tandis que celle du sable enrobé suit une loi exponentielle. Ce travail a été capital car il servira de fondement pour le développement d'une technique originale de caractérisation des écoulements gaz / solide.

Mais pour cela, il est recommandé de procéder à la détermination du coefficient de décroissance telle que décrite dans ce travail. Ce faisant, on pourra utiliser ultérieurement ce matériau comme traceur dans la détermination expérimentale de la DTS de phases solides.

RÉFÉRENCES

- [1] - S. SHIONOYA, W.M. YEN, Phosphor Handbook, CRC Press, New York, (1999).
- [2] - A. NAG, TRN KUTTY, Mater. Res. Bull. 39 (2004) 331.
- [3] - H. Chander, D. Haranath, V. Shanker, P. Sharma, J. Cryst. Growth 271 (2004) 307.
- [4] - T. KATSUMATA, T. NABAE, K. SASAJIMA and al., J. Electrochem. Soc. 144 (1997) L243
- [5] - C. CHANG, D. MAO, J. SHEN, C. FENG, J. Alliage Compd. 348 (2003) 224.
- [6] - D. JIA, opt. Mater. 22 (2003) 65.
- [7] - M. KOWATARI, D. KOYAMA, Y. SATO and al., Nucl. Instrum. Methods A 480 (2002) 431.
- [8] - S. K. SHARMA, S. S. PITALE, M. M. MALIK and al., Journal of Luminescence, 129 (2009) 140–147.
- [9] - J. RANDALL, M.H.F. WILKINS, Proc. R. Soc. 366 (1945) 184.
- [10] - R. H. BUBE, Phys. Rev. 80 (1950) 655.
- [11] - S. SHIONOVA, H. P. KALLMANN, B. KRAMER, Phys. Rev. 121 (1961) 1607.
- [12] - K. J. KAUFMANN, Photonics spectra (2000) 145-153.
- [13] - F. WEI, Z. WEN, Y. JIN and al., Powder technology 81 (1994) 25-30.
- [14] - ZHIYI HE, XIAO-JUN WANG, W. M. YEN, Journal of Luminescence, 119-120 (2006) 309-313.
- [15] - SANG-DO HAN, C. KRISHAN SINGH, TAI-YEON CHO and al., Journal of Luminescence, 128 (2008) 301-305.
- [16] - A. J. SIMONS, I. P. MCCLEAN, R. STEVENS, Electronics Letters 32 (1996) 253.
- [17] - Y. LUO, J. ZHU, Y. MA, H. ZHANG, Inter. J. of Pharma. 358 (2008) 16–22.
- [18] - B. S. BREWSTER, J. D. SEADER, AIChE Journal 26 (2) (1980) 325-327.
- [19] - L. FORNY, K. SALEH, I. PEZRON and al., Powder Techn. 189 (2009) 263-269.
- [20] - S. V. YAP, R. M. RANSON, W. M. CRANTON and al., Journal of Luminescence, 129 (2009) 416–422.