

Synthèse et caractérisation des matériaux pérovskites à halogénure CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 pour des applications photovoltaïques

Abou B. Coulibaly*, Kouamé A. Margueritte, Djohoré A. Christine, Kré N. Raymond, Aka Boko

Université Nangui ABROGOUA, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Reçu : 19 Avril 2025 / Reçu sous sa forme révisée : 11 Juillet 2025 / Accepté : 20 Septembre 2025

Résumé :

Les matériaux pérovskites halogénures au césium, notamment CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 , sont des candidats prometteurs pour les applications photovoltaïques en raison de leurs propriétés optoélectroniques. Une synthèse et une caractérisation de ces matériaux en utilisant plusieurs techniques d'analyse ont été réalisées. La diffraction des rayons X (DRX) a permis de déterminer la taille des cristaux des matériaux étudiés, avec une taille de cristal de 35,13 nm pour CsPbI_2Br et de 24,70 nm pour CsPbIBr_2 . Ces mesures indiquent une bonne cristallinité, essentielle pour des performances photovoltaïques élevées. Les gaps optiques expérimentaux de ces matériaux ont été déterminés. Pour CsPbI_2Br , le gap optique a été mesuré à 1,85 eV, tandis que, pour CsPbIBr_2 , il est de 2,02 eV. Ces valeurs sont compatibles avec l'absorption efficace de la lumière solaire, rendant ces matériaux attractifs pour les dispositifs photovoltaïques. Les mesures de photoluminescence ont également confirmé ces gaps optiques expérimentaux, indiquant un gap optique de 1,9 eV pour CsPbI_2Br et de 2,10 eV pour CsPbIBr_2 . Ces résultats suggèrent que ces matériaux possèdent des qualités optiques favorables pour la conversion de l'énergie solaire en électricité.

Mots-clés : CsPbI_2Br ; CsPbIBr_2 ; Gap optique ; Synthèse ; Tauc ; Photoluminescence.

Abstract:

Caesium halide perovskite materials, including CsPbI_2Br and CsPbIBr_2 , are promising candidates for photovoltaic applications due to their optoelectronic properties. A synthesis and characterization of these materials using several analytical techniques has been carried out. According to X-ray diffraction (XRD), the crystal size of the materials under study was 35.13 nm for CsPbI_2Br and 24.70 nm for CsPbIBr_2 . These measurements indicate good crystallinity,

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail : [\(C.B. Abou\)](mailto:kaliema1010@gmail.com)
<https://doi.org/10.70974/mat09225001>

essential for high photovoltaic performance. The experimental optical gaps of these materials were determined. The optical gap was found to be 1.85 eV for CsPbI_2Br and 2.02 eV for CsPbIBr_2 . These values are compatible with the efficient absorption of sunlight, making these materials attractive for photovoltaic devices. Photoluminescence measurements also confirmed these experimental optical gaps, indicating an optical gap of 1.9 eV for CsPbI_2Br and 2.10 eV for CsPbIBr_2 . These results suggest that these materials possess favorable optical qualities for the conversion of solar energy into electricity.

Keywords : CsPbI_2Br ; CsPbIBr_2 ; Optical gap ; Synthesis ; Tauc ; Photoluminescence.

1 Introduction

La transition énergétique est une priorité mondiale pour lutter contre le changement climatique et réduire la dépendance aux énergies fossiles. Dans ce contexte, l'énergie solaire se présente comme une solution prometteuse grâce à son potentiel illimité et son impact environnemental minimal. Les cellules solaires, notamment celles basées sur des matériaux pérovskites, jouent un rôle crucial dans cette transition. Les pérovskites hybrides ont attiré une attention considérable en raison de leur coût de fabrication relativement bas et de leur efficacité croissante[1]. Les matériaux pérovskites inorganiques, tels que CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 , émergent comme des alternatives prometteuses en raison de leur stabilité thermique et leur durabilité accrue [2].

Les matériaux pérovskites inorganiques au césium sont au cœur de nombreuses recherches visant à améliorer les performances des cellules solaires. La caractérisation de ces matériaux est essentielle pour comprendre et optimiser leurs propriétés optoélectroniques. Les techniques telles que la diffraction des rayons X (DRX), l'absorbance et la

photoluminescence permettent d'analyser respectivement leur structure cristalline, leurs propriétés d'absorption de la lumière et leur émission de photons. Ces analyses sont cruciales pour déterminer la bande interdite des matériaux, une caractéristique clé influençant leur efficacité dans les dispositifs photovoltaïques. La bande interdite des matériaux CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 est ajustable via leur composition chimique, offrant un contrôle direct sur leurs propriétés optiques et électroniques. Ces caractéristiques dépendent également des techniques de synthèse employées [3].

2 Matériel et méthodes

2.1 Préparation des solutions ioniques pérovskites

Pour étudier les propriétés optoélectroniques des films de pérovskites CsPbI_2Br et du CsPbIBr_2 , il est important de synthétiser des matériaux pérovskites de haute qualité avec une morphologie et une composition contrôlées. Pour cela, quatre précurseurs ont été utilisés : l'iodure de césium (CsI : 99,99%, Tokyo Chemical Industry (TCI)), le bromure de césium

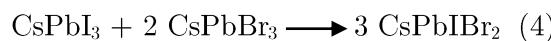
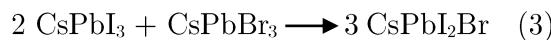
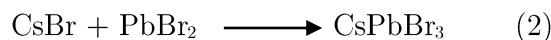
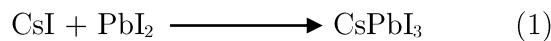
(CsBr : 99,99%, TCI), l'iodure de plomb (PbI₂ : 99,99%, TCI) et le bromure de plomb (PbBr₂ : 99,99%, TCI). Les solvants: le diméthylformamide (DMF) et le diméthylsulfoxyde (DMSO) de pureté égale à 99,9% et l'anti-solvant, le chlorobenzène (pureté 99,6%), ont été achetés chez Sigma-Aldrich. La synthèse des solutions ioniques CsPbI₂Br et de CsPbIBr₂ ayant chacune une concentration de 1,125 M, a été effectuée. Pour ce faire, tous les précurseurs sont dissous dans un mélange de solvants

DMSO : DMF (4 : 1)[4]. Les solutions des précurseurs CsI (0,750 M), CsBr (0,750 M), PbI₂ (0,750 M) et PbBr₂ (0,750 M) ont été préparées comme indiqué dans le tableau 1. Les solutions des précurseurs ont été utilisées pour préparer les solutions CsPbI₃ (0,750 M ; 1,500 M) et CsPbBr₃ (0,750 M ; 1,500 M) selon les équations (1) et (2). Les solutions ioniques de CsPbI₂Br et de CsPbIBr₂ sont également obtenues à partir des équations (3) et (4).

Tableau 1
Caractéristiques des différentes solutions préparées.

Solution	Quantités utilisées	Concentration finale
Solvant DMSO : DMF	DMSO (99,99% ; 0,8 mL) + DMF (99,96%; 0,2 mL)	
CsI	Solvant ^a (1 mL) + CsI (195 mg)	0,750 M
CsBr	Solvant ^a (1 mL) + CsBr (159,75 mg)	0,750 M
PbI ₂	Solvant ^a (1 mL) + PbI ₂ (345,75 mg)	0,750 M
PbBr ₂	Solvant ^a (1 mL) + PbI ₂ (275,25 mg)	0,750 M
CsPbI ₃	CsI (1 mL ; 0,750 M) + PbI ₂ (1 mL; 0,750 M) CsI (1 mL ; 1,500 M) + PbI ₂ (1 mL ; 1,500 M)	0,750 M 1,500 M
CsPbBr ₃	CsBr (1 mL ; 0,750 M) + PbBr ₂ (1 mL ; 0,750 M) CsBr (1 mL ; 1,500 M) + PbBr ₂ (1 mL ; 1,500 M)	0,750 M 1,500 M
CsPbI ₂ Br	CsPbI ₃ (1 mL ; 1,500 M) + CsPbBr ₃ (1 mL ; 0,750 M)	1,125M
CsPbIBr ₂	CsPbI ₃ (1 mL ; 0,750 M) + CsPbBr ₃ (1 mL ; 1,500 M)	1,125 M

^aDMF : DMSO



2.2 Obtention des films pérovskites

2.2.1 Matériel

L'ensemble du matériel utilisé pendant cette étude est présenté en Annexe (Fig. A1).

2.2.2 Nettoyage des substrats de verres FTO

Les verres FTO (Fig. A1(h)) sont placés dans un bain d'eau distillée additionnée de 2% de savon Helmannex. L'ensemble est placé dans un appareil à ultrasons (Fig. A1(d)) pendant 15 minutes. Ensuite l'eau est remplacée par l'éthanol, puis l'acétone et enfin l'isopropanol avec un temps de 15 minutes pour chaque solution utilisée. Les verres sont ensuite retirés avec des pinces et asséchés à l'aide d'un robinet d'air chaud (Fig. A1(a)). Ils sont enfin nettoyés à l'ozone (Fig. A1(b)) pendant 15 minutes [5].

2.2.3 Dépôt par « spin coating »

Le *spin-coater* (Fig. A1(e)) est placé sur une surface de sorte que son plateau

soit parfaitement horizontal afin d'éviter de mauvaise cristallisation. La mise à niveau du plateau du *spin-coater* est effectuée avec un niveau à bulle. Le plateau du *spin-coater* est nettoyé à l'éthanol puis recouvert de papier aluminium. Le substrat de verre est placé au centre du plateau à l'aide d'une pince. Une pompe à vide (Fig. A1(g)) reliée au *spin-coater* permet d'assurer une adhésion parfaite du substrat au plateau. Une fois que la solution est déposée sur le substrat (Fig. A1(h)), le plateau du *spin-coater* est activé, ce qui entraîne une rotation rapide du substrat. La centrifugation permet un étalement uniforme de la solution sur la surface du substrat. La vitesse de rotation et la durée du spin coating sont soigneusement contrôlées pour obtenir l'épaisseur de film souhaitée. La vitesse de démarrage choisie est 1000 tr/min en 10 s et la vitesse d'accélération 4000 tr/min en 40 s. À partir de 10 s de rotation, les solvants contenus dans la solution de pérovskite s'évaporent progressivement à l'aide de l'ajout d'un anti-solvant : le chlorobenzène, faisant apparaître un film mince de pérovskite CsPbIBr_2 ou CsPbI_2Br sur la surface du substrat. Après cristallisation, le film de pérovskite (Fig. 1) est soumis à l'étape de traitement thermique pour achever l'évaporation du solvant et améliorer sa stabilité et ses performances optoélectroniques.

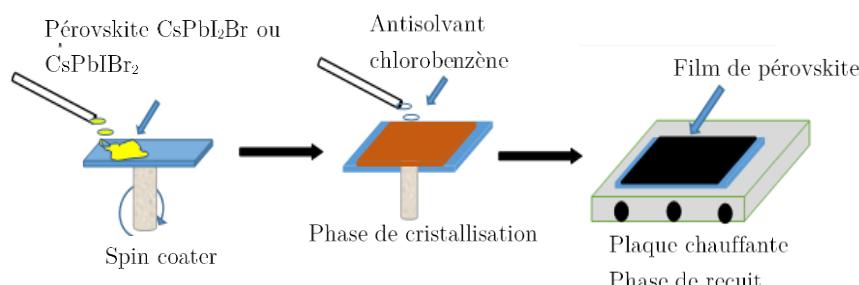


Fig. 1. Processus de dépôt par spin coating.

2 Caractérisation des matériaux

2.1 Diffraction des rayons X

Le diffractomètre utilisé pour l'analyse structurale des échantillons est le diffractomètre RIGAKU (voir Annexe, Fig. A2) qui est l'appareil couramment utilisé pour les couches minces. Il est constitué d'un générateur de rayons X (Anode tournant 9 kW, Cu ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$)), d'un faisceau parallèle ou Bragg-Brentano et d'un monochromateur avant 2x Ge (220). La technique de diffraction des rayons X (DRX) exploite la diffusion des rayons X par un cristal, produisant des pics d'interférence constructive qui révèlent la structure atomique du matériau grâce à une longueur d'onde adaptée à ses distances interplanaires [6]. Cette technique repose sur la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2ds\sin\theta \quad (5)$$

Où n est un nombre entier (l'ordre de diffraction), λ est la longueur d'onde des rayons X, d est la distance entre les plans atomiques et θ est l'angle de diffraction.

La taille des cristallites dans un matériau est déterminée par la formule de Debye Scherrer [7]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta\cos(\theta)} \quad (6)$$

Où D est la taille moyenne des cristallites (en nanomètres) ; K est une constante de forme (généralement prise égale à 0,9) ; λ est la longueur d'onde des rayons X utilisés (en nanomètres) ; β est la largeur à mi-hauteur (FWHM) du pic de diffraction (en radians) ; θ est l'angle de diffraction correspondant au pic (en radians).

2.2 Propriétés optiques

Les propriétés optiques telles que la transmittance et l'absorbance des matériaux synthétisés, ont été déterminées par le spectromètre Ocean Optic HR4000 (voir Annexe, Fig. A3). Il est équipé d'un détecteur Si-CCD et d'une sphère d'intégration pour collecter la transmittance ou l'absorbance à température ambiante. Les mesures de la photoluminescence ont été réalisées à l'aide d'un laser He-Cd de longueur d'onde égale à 325 nm par un détecteur Hamamatsu Si-CCD. Lorsque l'échantillon est éclairé par un laser, il émet une lumière dont la couleur est caractéristique de sa composition (voir Annexe, Fig. A4).

La relation entre la transmittance $T(\%)$ et l'absorbance A est rappelée à l'équation (7):

$$A = -\log(T) \quad (7)$$

Le gap optique expérimental (Eg) d'un matériau ou bande interdite peut être déterminé à partir du spectre d'absorption optique à l'aide de la méthode de TAUC [8]. Le principe repose sur la relation entre l'énergie des photons incidents ($h\nu$) et le coefficient d'absorption (α) du matériau telle que donnée par l'équation (8) :

$$(\alpha h\nu)^n = K (h\nu - Eg) \quad (8)$$

Où α est le coefficient d'absorption, $h\nu$ est l'énergie du photon, Eg est le gap optique (bande interdite), K est une constante indépendante de l'énergie, n dépend de la nature de la transition électronique dans le matériau ($n = 2$ pour une transition directe permise, $n = 1/2$ pour une transition indirecte permise).

La mise en œuvre de la méthode, connue sous le nom de « graphe de Tauc », consiste à tracer $(\alpha h\nu)^n$ en fonction de

l'énergie des photons $h\nu$. Ce graphe présente une région linéaire pour les énergies supérieures au gap. L'interpolation de cette partie linéaire jusqu'à l'axe des abscisses (où $(\alpha h\nu)^n = 0$) permet de déterminer la valeur de l'énergie du gap optique, Eg . Cette valeur représente l'énergie minimale requise pour une transition électronique interbande.

3 Résultats et discussion

3.1 Aspects des échantillons de solutions de pérovskites

Les solutions de pérovskites obtenues (Fig. 2) ont des couleurs qui sont fonction de la composition chimique. CsPbI_3 qui est une pérovskite purement iodée a une coloration jaune, tandis que CsPbBr_3 a une

couleur rose due au brome. Les solutions CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 qui sont des mélanges d'iodure et de bromure ont une coloration jaune.

Les films de CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 (Fig. 3) mettent en lumière les différences notables entre ces deux composés. Grâce à sa grande stabilité optique, le composé CsPbI_2Br , reconnaissable à sa couleur jaune foncé, se révèle particulièrement adapté aux applications photovoltaïques. CsPbIBr_2 , a une teinte rouge écarlate. Les différences de couleur observées entre les matériaux sont la conséquence directe de modifications de leur composition chimique, lesquelles gouvernent leurs performances optoélectroniques et, par conséquent, leurs applications potentielles.

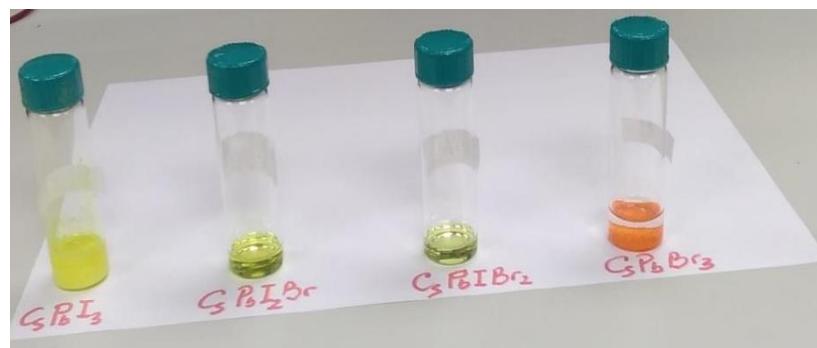


Fig. 2. Solutions ioniques de pérovskites.

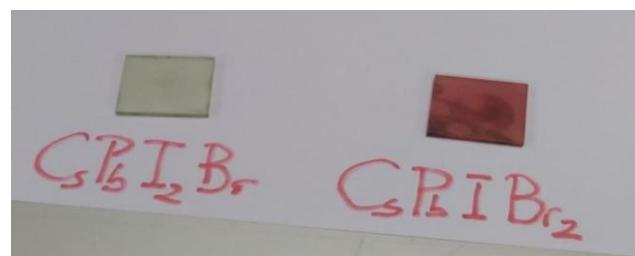


Fig. 3. Échantillons de pérovskites.

3.2. Diffraction des rayons X (DRX)

Les courbes DRX pour les matériaux CsPbIBr_2 et CsPbI_2Br (Fig. 4) montrent des différences significatives dans leurs structures cristallines. Pour CsPbIBr_2 , les pics principaux se situent à $2\theta = 37,67^\circ$ et $2\theta = 26,26^\circ$ avec des intensités élevées, ce qui indique des orientations cristallines dominantes dans ces plans. Les autres pics, bien que moins intenses, montrent la présence d'autres orientations. Pour CsPbI_2Br , le pic le plus intense est à $2\theta = 21,06^\circ$ indique une forte orientation dans ce plan particulier. Les autres pics, notamment à $2\theta = 29,84^\circ$ et $2\theta = 14,82^\circ$,

ont également des intensités importantes, soulignant une structure cristalline distincte. Ces différences dans les positions et intensités des pics indiquent que CsPbI_2Br a une structure cristalline plus ordonnée et homogène, tandis que CsPbIBr_2 présente une distribution plus diversifiée des orientations cristallines. Ces variations influencent les propriétés optiques et électroniques des matériaux, essentiels pour des applications comme les cellules solaires à pérovskites.

La détermination des « FWHM » (*Full Width at Half Maximum*) (Fig. 5) a permis de calculer la taille des cristaux (Tableau 2) à l'aide de la formule de Debye Scherrer (Eq. (6)).

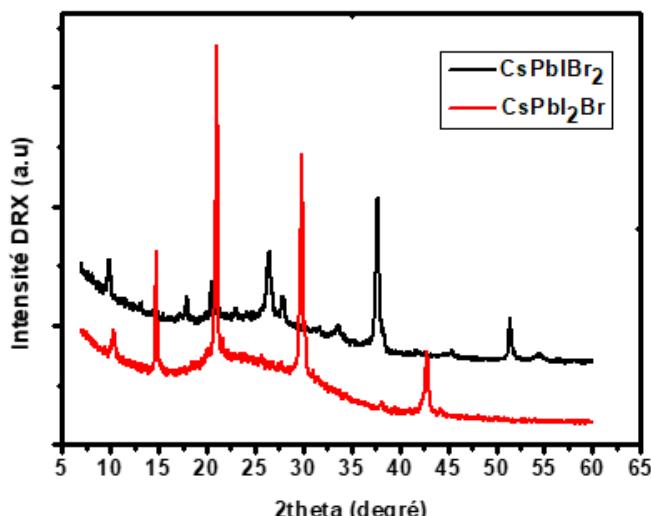


Fig. 4. Diffractogrammes de CsPbIBr_2 et CsPbI_2Br .

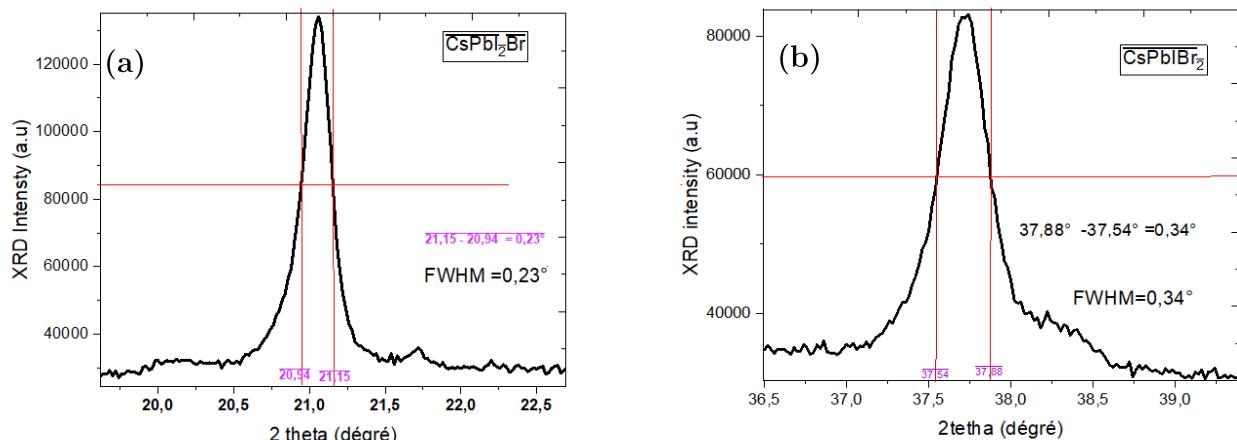


Fig. 5. Détermination des « FWHM » : (a) CsPbI_2Br ; (b) CsPbIBr_2 .

Tableau 2

Taille des cristaux.

Matériaux	FWHM (°)	Taille (nm)
CsPbI ₂ Br	0,23	35,13
CsPbIBr ₂	0,34	24,70

La largeur à mi-hauteur (FWHM) est une mesure de la dispersion des énergies d'émission d'un matériau, liée à la pureté et à la qualité cristalline. CsPbI₂Br a une FWHM extrêmement faible de 0,23°, tandis que CsPbIBr₂ présente une « FWHM » beaucoup plus large de 0,34° (Tableau 2). Une « FWHM » plus étroite, comme celle de CsPbI₂Br, indique une distribution d'émission plus homogène et une faible dispersion d'énergie, indiquant une meilleure qualité cristalline avec moins de défauts et d'imperfections structurelles. La taille des particules influence également les propriétés optiques et électroniques des

matériaux [9]. CsPbIBr₂ a une faible taille de particule de 24,70 nm, ce qui est typique des matériaux nanostructurés, tandis que CsPbI₂Br possède des particules de taille beaucoup plus grande (35,13 nm) (Tableau 2), ce qui indique une structure plus grossière ou une cristallisation moins contrôlée. Une taille de particule plus grande peut augmenter les pertes non-radiatives en raison d'une plus grande diffusion interne [10], ce qui peut réduire l'efficacité de la cellule solaire.

3.3 Transmittance, absorbance et gap optique

Les transmittances et les absorbances des deux composés CsPbI₂Br et CsPbIBr₂ sont présentées sur la figure 6.

Le tracé des courbes Tauc pour les deux matériaux est montré à la figure 7.

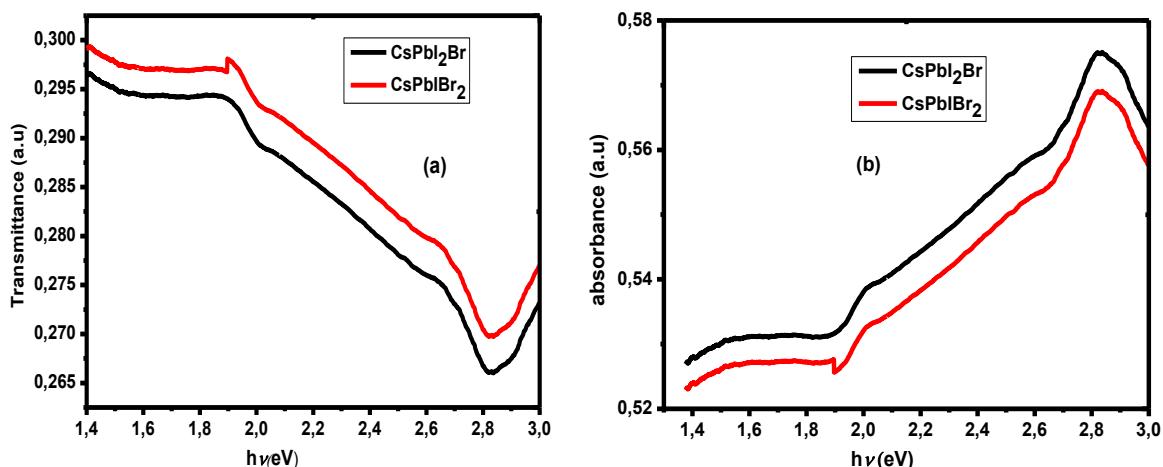


Fig. 6. Courbes de transmittance (a) et d'absorbance (b).

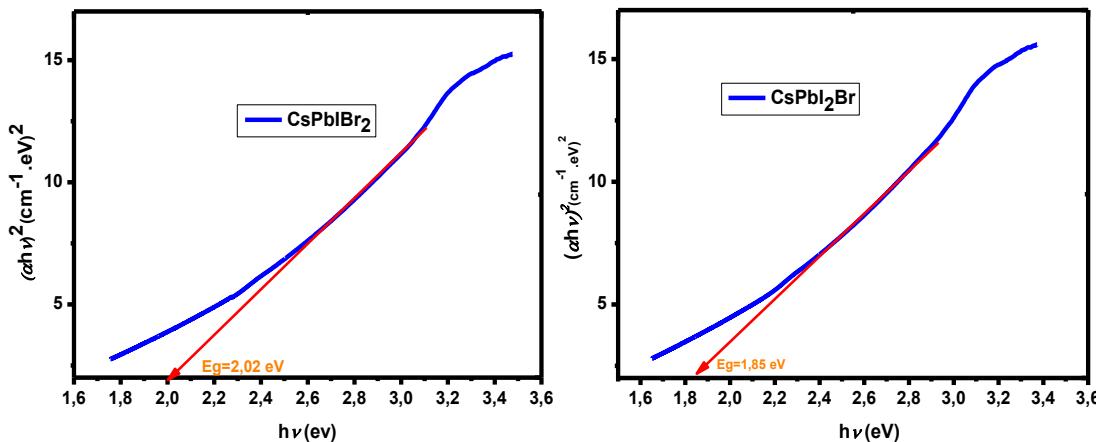


Fig. 7. Graphes de Tauc : (a) CsPbIBr_2 ; (b) CsPbI_2Br .

Les pérovskites halogénées CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 adoptent une structure cristalline de type pérovskite cubique ou orthorhombique [11], avec des distorsions potentielles dues à la substitution des halogènes (iode et brome) dans la structure. Ces distorsions affectent directement les propriétés électroniques et optiques du matériau.

L'augmentation de la teneur en brome dans CsPbIBr_2 conduit à une structure cristalline plus compacte par rapport à CsPbI_2Br . Les atomes de brome, étant plus petits que ceux de l'iode, réduisent la distance interatomique dans le réseau cristallin, ce qui peut expliquer l'augmentation du gap optique.

Les propriétés électroniques de ces matériaux sont intimement liées à leur structure cristalline et à leur composition chimique. Les pérovskites, telles que CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 sont connues pour avoir une bande interdite directe, ce qui les rend particulièrement efficaces pour l'absorption de la lumière. La substitution partielle de l'iode par le brome affecte la largeur de la bande interdite, comme en témoignent les valeurs du gap optique : 1,85

eV pour CsPbI_2Br et 2,10 eV pour CsPbIBr_2 (Fig. 7).

L'augmentation du gap optique de CsPbIBr_2 est due à la présence accrue de brome, qui a une énergie d'affinité électronique plus élevée que l'iode. En conséquence, la différence d'énergie entre la bande de valence (constituée principalement par les orbitales des ions I^- et Br^-) et la bande de conduction (constituée principalement des orbitales Pb^{2+}) augmente. Cela modifie également la mobilité des porteurs de charge (électrons et trous), qui sont déterminés par les interactions orbitales et les états de défaut dans la structure cristalline.

Cette différence dans les gaps optiques suggère que CsPbI_2Br peut absorber une plus large gamme de photons de basse énergie (longueur d'onde plus grande) par rapport à CsPbIBr_2 . Cependant, CsPbIBr_2 , avec son gap optique plus large, est plus efficace pour des applications nécessitant une meilleure sélectivité spectrale, où seule la lumière de plus haute énergie est convertie en électricité.

En termes d'applications photovoltaïques, un gap optique plus faible comme celui de CsPbI_2Br permet une meilleure

absorption dans le spectre visible et proche infrarouge, maximisant ainsi l'efficacité de conversion de la lumière solaire. D'un autre côté, un gap optique plus élevé comme celui de CsPbIBr_2 peut offrir une meilleure stabilité thermique et environnementale, ce qui est crucial pour les dispositifs exposés à des conditions de fonctionnement défavorables.

3.4 Photoluminescence

La figure 8 présente les courbes de photoluminescence des composés CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 .

Les pics d'intensité photoluminescente normalisée des deux matériaux sont très similaires. Ces valeurs élevées et proches de 1 indiquent une grande efficacité de photoluminescence pour les deux matériaux. Cela suggère que la majeure partie de la lumière absorbée par ces matériaux est réémise sous forme de lumière, ce qui est une caractéristique recherchée pour des applications comme les LEDs et les lasers. Les énergies du pic de photoluminescence de CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 sont respectivement égales à 1,9 eV et 2,1 eV. Ces valeurs d'énergie correspondent aux photons émis par ces

matériaux après excitation. La différence d'énergie de 0,2 eV entre les deux matériaux peut sembler minime, mais elle est significative dans le contexte des propriétés électroniques et optiques.

L'énergie du pic de photoluminescence est directement liée au gap optique (ou bande interdite) du matériau, qui est l'énergie minimale nécessaire pour exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Le gap optique détermine la longueur d'onde et donc la couleur de la lumière qu'un matériau peut absorber ou émettre. Dans ce cas, CsPbI_2Br qui a une énergie de pic plus petite (1,9 eV), aura un gap optique légèrement plus faible par rapport à CsPbIBr_2 qui a une énergie de 2,1 eV.

Ces variations dans le gap optique sont importantes, car elles permettent d'ajuster les propriétés optiques des matériaux pour des applications spécifiques. Par exemple, un matériau avec un gap optique plus petit peut être préférable pour des dispositifs qui doivent fonctionner à des longueurs d'onde plus grandes, comme les cellules solaires, tandis qu'un matériau avec un gap optique plus grand peut être utilisé pour des LEDs émettant dans le bleu.

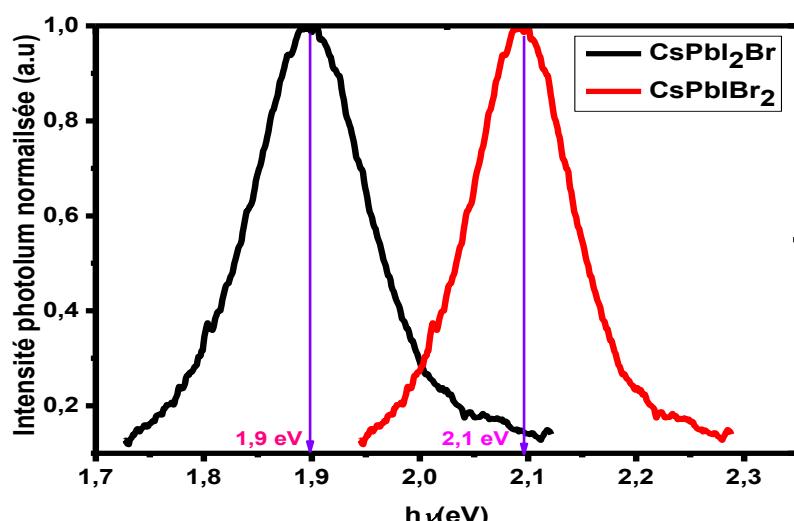


Fig. 8. Courbes de photoluminescence des composés CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 .

4 Conclusion

Dans ce travail, deux pérovskites halogénées au césium CsPbI_2Br et CsPbIBr_2 ont été synthétisées et caractérisées à l'aide de différentes techniques.

Le gap optique qui constitue l'une des propriétés importantes dans l'évaluation de l'efficacité photovoltaïque, a été déterminé. Pour CsPbI_2Br , le gap optique est de 1,85 eV selon la méthode de Tauc, et de 1,9 eV selon la photoluminescence. Le léger écart observé entre les deux valeurs est imputable à la nature même des phénomènes mesurés. La méthode de Tauc, sensible à l'absorption par des états de défaut situés sous la bande de conduction, tend à sous-estimer la bande interdite. En revanche, la photoluminescence, qui mesure l'émission issue de la recombinaison radiative des porteurs,

donne une valeur plus proche du gap fondamental.

Pour CsPbIBr_2 , le gap optique mesuré par la méthode de Tauc est de 2,02 eV, tandis que celui mesuré par photoluminescence est de 2,1 eV. Quelle que soit la méthode utilisée, CsPbIBr_2 a montré un gap optique légèrement supérieur à celui de CsPbI_2Br .

La différence de bande interdite optique entre les deux matériaux est directement gouvernée par leur stœchiométrie en halogènes (I/Br). Ainsi, l'enrichissement en iodé dans CsPbI_2Br abaisse la bande interdite, élargissant son spectre d'absorption pour des applications photovoltaïques. Inversement, la prédominance du brome dans CsPbIBr_2 augmente la bande interdite, le prédestinant à des applications d'émission dans le spectre visible (LED).

Annexe

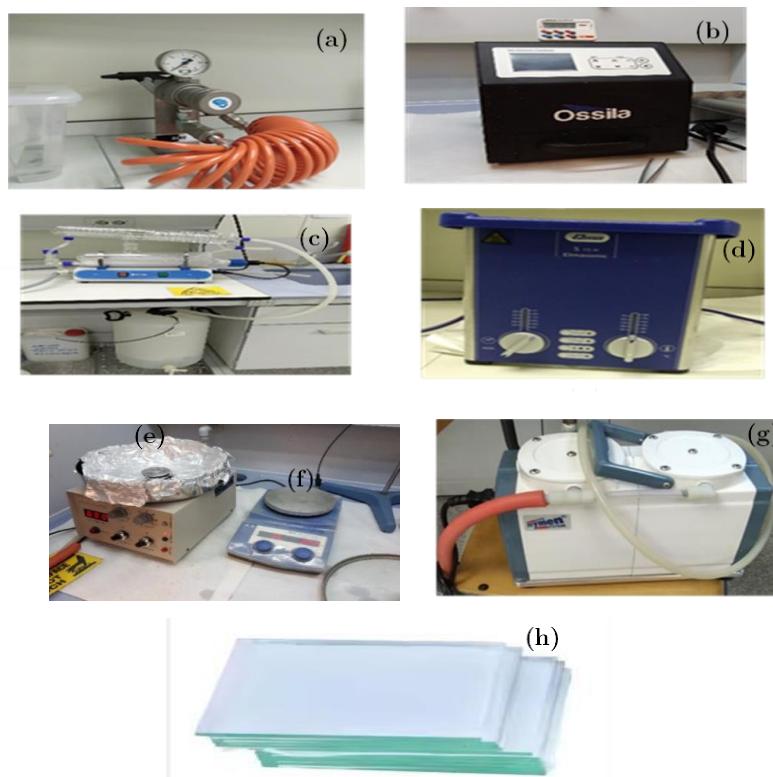


Fig. A1. (a) Robinet d'air ; (b) Appareil à UV Ozone ; (c) Distillateur ; (d) Appareil de traitement des verres ; (e) *Spin-coater* ; (f) Plaque chauffante ; (g) Appareil à vide ; (h) Verre FTO.

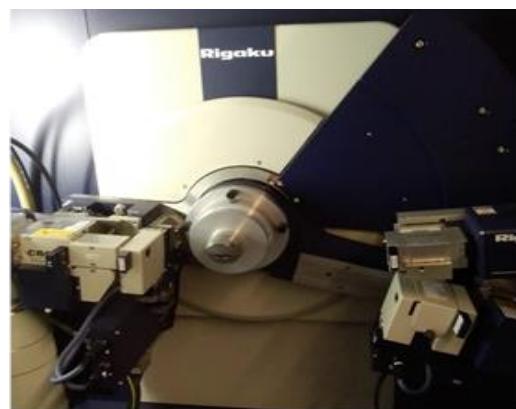


Fig. A2. Diffractomètre RIGAKU.



Fig. A3. Spectromètre Ocean Optic HR4000.

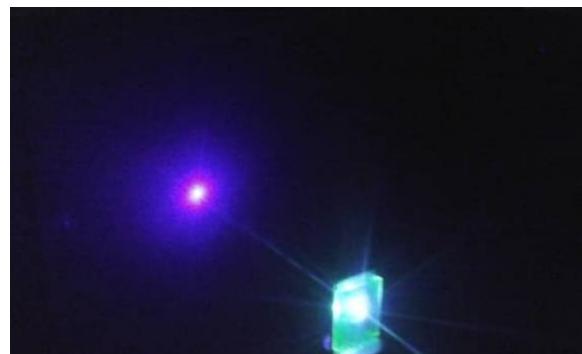


Fig. A4. Rayon Laser.

Références bibliographiques

- [1] A. Pierre, E. Deleporte, J. Even, C. Katan, F. Odobel, Organic and hybrid solar cells: Recent developments and rise of a new perovskite-based generation, *L'actualité chimique*, juin-juillet (2015), n° 397-398.
<https://new.societechimiquedefrance.fr/lactualite-chimique-le-journal-de-la-scf/>

- [2] S. W. Yang, J. Y. Kim, S. J. Cho, K. H. Kim, S. K. Park, *Comparative evaluation of radiation detection capabilities of CsPbI₂Br and CsPbIBr₂ materials for the development of QA relative dosimeter for brachytherapy*, *Journal of Instrumentation* 18 (2023) P09016.
doi: 10.1088/1748-0221/18/09/P09016

- [3] H. Diab, Propriétés optiques des pérovskites hybrides 3D pour le photovoltaïque, Thèse de doctorat en Optique. Université Paris Saclay, France (2017).
(NNT : 2017SACLN061). (tel-01708869)
- [4] S. Wanyonyi, B. Omogo, C. Awino, M. Shatsala, M.A. Nalianya, F.A. Lisouza, A.S. Odhiambo, F.M. Gaitho, *Crystallization dynamics of MAPbI₃ perovskite solar cells via solvent engineering methods*, South Florida Journal of Development 5 (2024) 1-19.
- [5] F. Berry, Nanostructuration et cristaux photoniques à base de pérovskites hybrides pour applications photovoltaïques, Thèse de doctorat, Université de Lyon, France (2020).
(NNT : 2020LYSEC022). (tel-03137883)
- [6] W. L. Tan, C. McNeill, *X-ray diffraction of photovoltaic perovskites: Principles and applications*, Applied Physics Reviews 9 (2022) 021310.
doi: 10.1063/5.0076665
- [7] F. Uzun, D. Daisenberger, K. Liogas, Z.I. Wang, J. Chen, C. Besnard, A.M. Korsunsky, *Extended Caking Method for Strain Analysis of Polycrystalline Diffraction Debye-Scherrer Rings*, Crystals 14 (2024) 716.
doi: 10.3390/cryst14080716.
- [8] P. Chamberlin, K. Adu, *Determining bandgap from simulated absorbance: The Tauc approach*, MRS Advances 9(12) (2024) 1031-1036.
doi: 10.1557/s43580-024-00889-y
- [9] B. Wild, Étude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photovoltaïques bidimensionnels et de leur accordabilité, Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, France (2006).
doi: 10.5075/epfl-thesis-3573.
- [10] W. Blanc, B. Dussardier, E. Burov, A. Pastouret, Formation et applications des nanoparticules dans les fibres optiques à base de silice, Dans "Du verre au cristal" EDP Sciences (2013).
- [11] J. M. Frost, A. Walsh, *What is moving in hybrid halide perovskite solar cells?*, Accounts of chemical research 49(3) (2016) 528-535.