



(12) **DEMANDE DE BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT APPLICATION**

(13) **A1**

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2018/12/17
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2019/06/27
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2020/06/18
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: EP 2018/085234
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2019/121528
(30) Priorité/Priority: 2017/12/19 (FR1701327)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *H04N 5/343* (2011.01),
G01J 1/44 (2006.01), *H04N 5/335* (2011.01),
H04N 5/351 (2011.01)
(71) Demandeur/Applicant:
THALES, FR
(72) Inventeurs/Inventors:
BENNAI, BAYA, FR;
MIDAVAINÉ, THIERRY, FR;
NORMANDIN, XAVIER, FR;
COURCOL, YVES, FR;
PERRUCHOT, LUDOVIC, FR
(74) Agent: MARKS & CLERK

(54) Titre : PROCÉDE ET SYSTÈME D'IMAGERIE A HAUT ET BAS NIVEAUX DE LUMIERE
(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR IMAGING AT HIGH AND LOW LIGHT LEVELS

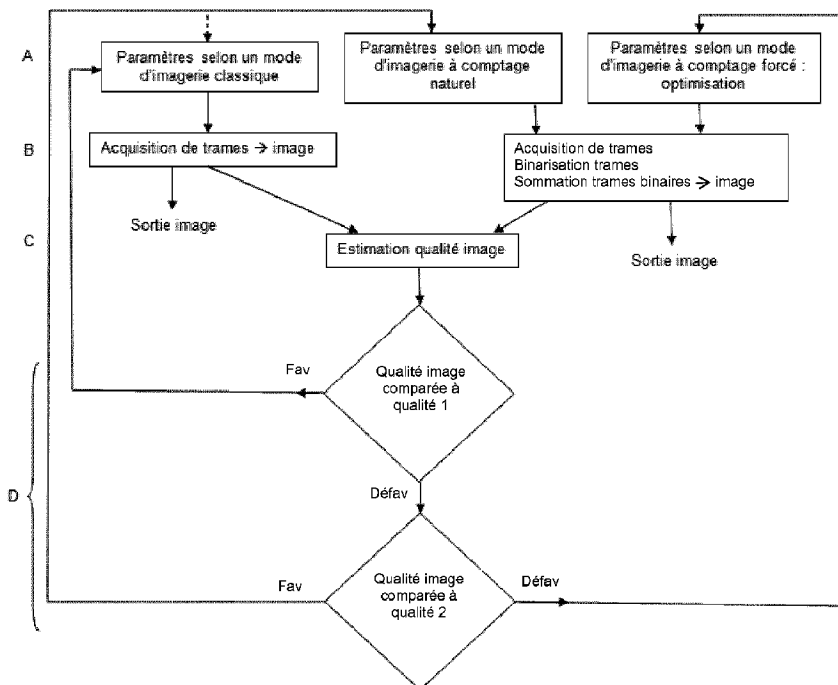


FIG.3

(57) Abrégé/Abstract:

L'invention a pour objet un procédé d'imagerie d'une scène au moyen d'un système d'imagerie permettant d'obtenir une image de la scène, le système d'imagerie comportant un dispositif d'acquisition de trames selon des paramètres d'acquisition, et une unité de

(57) **Abrégé(suite)/Abstract(continued):**

traitement des trames acquises. Le procédé comprend les étapes : A) Choix d'un mode d'imagerie parmi un mode d'imagerie classique, un mode d'imagerie à comptage de photons naturel et un mode d'imagerie à comptage de photons forcé, et en fonction du mode d'imagerie choisi, détermination par l'unité de traitement, des paramètres d'acquisition correspondant, B) acquisition d'au moins une trame par le dispositif d'acquisition paramétré avec lesdits paramètres d'acquisition, et transmission des trames acquises à l'unité de traitement pour obtenir une image, l'image étant obtenue à l'issue des sous-étapes suivantes si le mode d'imagerie choisi est le mode d'imagerie à comptage de photons naturel ou le mode d'imagerie à comptage de photons forcé : - binarisation des trames acquises et- somme des trames binarisées pour obtenir une image,C) estimation de la qualité de l'image obtenue, D) D1) en fonction de la qualité de l'image obtenue, déterminer un nouveau mode d'imagerie choisi parmi le mode d'imagerie classique, le mode d'imagerie à comptage de photons naturel et le mode d'imagerie à comptage de photons forcé, D2) répéter les étapes A, B, C et D avec le nouveau mode d'imagerie choisi comme mode d'imagerie.

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international(10) Numéro de publication internationale
WO 2019/121528 A1(43) Date de la publication internationale
27 juin 2019 (27.06.2019)

(51) Classification internationale des brevets :

H04N 5/343 (2011.01) *H04N 5/351* (2011.01)*H04N 5/335* (2011.01) *G01J 1/44* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2018/085234

(22) Date de dépôt international :

17 décembre 2018 (17.12.2018)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

1701327 19 décembre 2017 (19.12.2017) FR

(71) Déposant : **THALES** [FR/FR] ; Tour Carpe Diem, Place
des Corolles, Esplanade Nord, 92400 Courbevoie (FR).(72) Inventeurs : **BENNAI, Baya** ; Thales Optronique SA, 2,
avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt (FR). **MIDAVAINÉ,
Thierry** ; Thales Optronique SA, 2, avenue Gay-Lussac,
78995 Elancourt (FR). **NORMANDIN, Xavier** ; Thales
Optronique SA, 2, avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt
(FR). **COURCOL, Yves** ; Thales Optronique SA, 2, avenue
Gay-Lussac, 78995 Elancourt (FR). **PERRUCHOT, Ludo-
vic** ; Thales Optronique SA, 2, avenue Gay-Lussac, 78995
Elancourt (FR).(74) Mandataire : **HENRIOT, Marie-Pierre** et al. ; Immeuble
Visium, 22 avenue Aristide Briand, 94117 Arcueil Cedex
(FR).(81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR IMAGING AT HIGH AND LOW LIGHT LEVELS

(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME D'IMAGERIE A HAUT ET BAS NIVEAUX DE LUMIERE

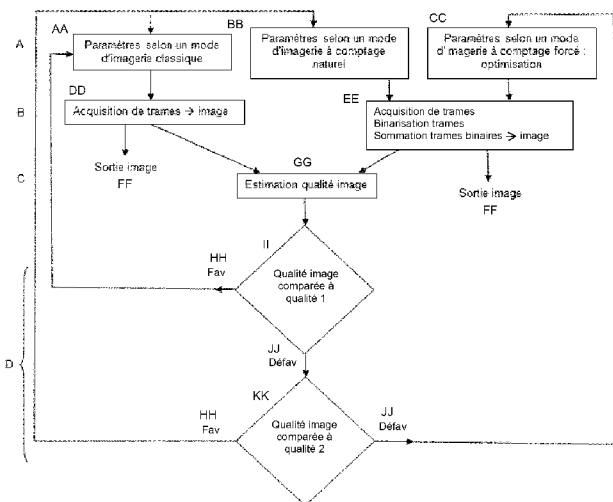


FIG.3

AA Paramètres according to a conventional imaging mode
 BB Paramètres according to a natural counting imaging mode
 CC Paramètres according to a forced counting imaging mode: optimization
 DD Acquisition of frames -> image
 EE Acquisition of frames; Frame binarization; Summation of binary frames -> image
 FF Image output
 GG Estimation of image quality
 HH Favorable
 II Image quality compared to quality 1
 JJ Unfavorable
 KK Image quality compared to quality 2

(57) Abstract: The invention relates to a method for imaging a scene using an imaging system making it possible to obtain an image of the scene, the imaging system comprising a device for acquiring frames according to acquisition parameters, and a unit for processing the acquired frames. The method comprises the steps: A) selection of an imaging mode from among a conventional imaging mode, a natural photon-counting imaging mode and a forced photon-counting imaging mode, and, depending on the selected imaging mode, determination by the processing unit of corresponding acquisition parameters, B) acquisition of at least one frame by the acquisition device parameterized with said acquisition parameters, and transmission of the frames that were acquired to the processing unit in order to obtain an image, the image being obtained at the end of the following sub-steps if the selected imaging mode is the natural photon-counting imaging mode or the forced photon-counting imaging mode: -binarization of the frames that were acquired and -summing the binarized frames to obtain an image, C) estimation of the quality of the image obtained, D) D1) depending on the quality of the image obtained, determining a new imaging mode selected among the conventional imaging mode, the natural photon-counting imaging mode, and the forced photon-counting imaging mode, and the forced photon-counting imaging mode, D2) repeating steps A, B, C and D with the new imaging mode selected as the imaging mode.

(57) Abrégé : L'invention a pour objet un procédé d'imagerie d'une scène au moyen d'un système d'imagerie permettant d'obtenir une image de la scène, le système d'imagerie comportant un dispositif d'acquisition de trames selon des paramètres d'acquisition, et une unité de traitement des trames acquises. Le procédé comprend les étapes : A) Choix

WO 2019/121528 A1 

EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasiatique (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

d'un mode d'imagerie parmi un mode d'imagerie classique, un mode d'imagerie à comptage de photons naturel et un mode d'imagerie à comptage de photons forcé, et en fonction du mode d'imagerie choisi, détermination par l'unité de traitement, des paramètres d'acquisition correspondant, B) acquisition d'au moins une trame par le dispositif d'acquisition paramétré avec lesdits paramètres d'acquisition, et transmission des trames acquises à l'unité de traitement pour obtenir une image, l'image étant obtenue à l'issue des sous-étapes suivantes si le mode d'imagerie choisi est le mode d'imagerie à comptage de photons naturel ou le mode d'imagerie à comptage de photons forcé : - binarisation des trames acquises et- somme des trames binarisées pour obtenir une image, C) estimation de la qualité de l'image obtenue, D) D1) en fonction de la qualité de l'image obtenue, déterminer un nouveau mode d'imagerie choisi parmi le mode d'imagerie classique, le mode d'imagerie à comptage de photons naturel et le mode d'imagerie à comptage de photons forcé, D2) répéter les étapes A, B, C et D avec le nouveau mode d'imagerie choisi comme mode d'imagerie.

PROCEDE ET SYSTEME D'IMAGERIE A HAUT ET BAS NIVEAUX DE LUMIERE

Le domaine de l'invention est celui de l'imagerie et plus particulièrement l'imagerie à bas niveau de lumière.

5 Dans le domaine visible, l'être humain est doté d'une capacité de vision de jour qui décroît pour des niveaux d'éclairement décroissant. En
10 ambiance nocturne, les différentes conditions du ciel, principalement modulées par la phase de la Lune et la couverture nuageuse, permettent un éclairement au sol compris entre 1 lux et 0,1 mlux que l'on qualifie également
15 par des niveaux de nuit (d'après la norme Aero 790 40) allant respectivement de nuit 1 (débutant à 1 lux) à nuit 5 (se terminant à 0,1 mlux). Le niveau de 0,1 mlux constitue un niveau d'éclairement ultime à atteindre et à améliorer pour la vision nocturne. L'augmentation de la qualité image en nuit de niveau 5
20 constitue un avantage opérationnel. Or dans de faibles conditions d'éclairement, on ne reçoit que très peu de photons de la scène observée. Quand le flux reçu diminue, le rapport signal sur bruit (RSB) diminue jusqu'à devenir insuffisant pour la vision. Le signal est alors noyé dans le bruit
généralisé par le détecteur et l'image issue du détecteur est inexploitable ou très dégradée. Ainsi, la sensibilité et le bruit du détecteur limitent les
performances pour faire de l'imagerie à très bas niveau de lumière.

Généralement, les imageurs Bas Niveau de Lumière sont optimisés en augmentant la surface du pixel et en augmentant le temps d'intégration dans les limites du possible.

25 Actuellement, l'amélioration des performances de nuit peut aussi passer par l'utilisation de technologies à faible bruit de lecture et d'obscurité et par exemple en utilisant un milieu amplificateur introduisant des gains de multiplication sur le signal. On peut citer :

- 30 ■ ILCMOS : Tube intensificateur de lumière (tube IL) (avec galette de micro-canaux ou MCP Micro Channel Plate) couplé optiquement à une matrice CMOS ;
- EBCMOS : Photocathode + matrice CMOS (bombardée par les photoélectrons) intégrés dans un tube ;
- EMCCD : Matrice CCD avec un Multiplicateur d'Electron qui donne une amplification par avalanche sur le signal multiplexé ;

- Matrice de photodiodes APD (Avalanche PhotoDiode) soit en régime linéaire (gain multiplicateur) ou soit en régime compteur Geiger (déclenchement d'une impulsion de courant sur la génération d'un photoélectron).

5

Pour des applications scientifiques telles qu'en astronomie ou en imagerie bio-médicale, où l'on sait que l'on va recevoir très peu de photons de ce que l'on souhaite observer, on utilise la détection et l'imagerie à comptage de photons ; cette technique a été introduite il y a de nombreuses années tout d'abord avec l'emploi des photomultiplicateurs dans le traitement du signal temporel.

L'imagerie à comptage de photons repose sur le principe que le nombre de photons arrivant sur un détecteur à matrice de pixels, pendant un temps d'exposition donné est un processus stochastique. Il se caractérise par une loi de Poisson de moyenne μ_p et d'écart-type $\sqrt{\mu_p}$. En fonction du nombre moyen de photons par pixel μ_p , on peut calculer la probabilité P que n_p photons soient détectés pendant le temps d'exposition t_{ex} (pris en compte par μ_p). Cette loi est définie par la relation :

20

$$P_{\mu_p}(n_p) = e^{-\mu_p} \cdot \frac{\mu_p^{n_p}}{n_p!}$$

La Loi en figure 1 présente la distribution de Poisson pour différentes valeurs moyennes de photons par pixel. Ainsi, par exemple, en exploitant la loi de Poisson, pour un flux moyen de 0,15 photon par pixel, on a 86 % des pixels qui ne voient aucun photon, 13% qui en voient un et 1% voient plus que 1 photon. Ainsi, si on se place dans ce régime particulier de la loi de Poisson avec en moyenne 0,15 photon par pixel (ou moins), alors on peut contraindre une exploitation statistique du signal reçu en sachant a priori que soit on ne reçoit pas de photon (0 photon) soit on en reçoit seulement 1 dans 99% des cas par période du temps d'exposition. On peut donc estimer le signal de manière binaire en ne se trompant que dans moins de 1% des cas pour cet exemple du flux moyen inférieur ou égal à 0,15 photon par pixel. Pour des flux moyens plus élevés nous allons avoir un taux d'erreur de plus

25

30

en plus important avec une confusion des situations où le pixel compte un photon alors qu'il en a collecté 2 ou plus. Le raisonnement que nous venons d'avoir sur la réception de photons par un pixel s'applique aussi sur les photoélectrons générés par le processus de détection photoélectrique mis en œuvre dans le détecteur.

Le signal analogique en sortie du détecteur est fluctuant et est dominé par le bruit de lecture et le bruit d'obscurité pour un pixel qui n'a pas généré de photoélectron, et le bruit de multiplication pour les pixels ayant converti 1 ou plusieurs photoélectrons. Cependant, la connaissance a priori du nombre de photons reçus, inférieur à 0,15 en moyenne, nous contraint en sortie à deux états : soit on a reçu 0 photon soit on en a reçu 1, dans 99% des cas. On peut donc remplacer le signal analogique fluctuant en binarisant une trame élémentaire ou une acquisition élémentaire du pixel en 0 ou 1. Cela peut être fait par exemple par un algorithme de seuillage : en dessous d'un certain seuil, on considère que l'on a reçu 0 photon, la fluctuation analogique du signal initial étant dominée par les différents bruits du détecteur et non par la véritable amplitude liée à l'incidence de 0 photon. Au-delà du seuil, on considère que la détection de 1 et d'un seul photon a bien eu lieu et cette amplitude « unité » remplace l'amplitude analogique liée à la fluctuation du bruit de lecture et de multiplication du signal. La binarisation de la trame par cette méthode conduit toutefois à un bruit résiduel lié à l'erreur de taux de comptage de photons. Ce bruit résiduel peut être caractérisé par une probabilité d'erreur de comptage qui peut être estimée et bornée toujours en utilisant les statistiques de bruit et de la loi de Poisson. Cette probabilité se décompose en probabilité de compter 1 pour 0 photon incident, probabilité de compter 0 pour 1 photon incident et encore probabilité de compter 1 pour 2 photons ou plus incidents.

Enfin, la dernière étape de l'imagerie à comptage de photons consiste à sommer plusieurs trames élémentaires binaires pour reconstituer une image correspondant à la cadence de restitution des images en sortie, par exemple pour une cadence de sortie vidéo de 25 Hz, soit 40 ms de temps d'accumulation des trames élémentaires obtenues à plus haute cadence. La somme des différentes trames binarisées permet de reconstituer une image avec différents niveaux de gris. Le nombre de

nuances de gris discernables n'est plus dominé par la dispersion des gains de multiplication du procédé d'amplification du signal qui est à l'origine de la sensation d'une neige qui domine l'image et ses nuances.

Il est important de noter que si le flux de scène augmente au-dessus de 0,15 photons moyens par trame élémentaire, alors on sort de ce régime contraint de 0 ou 1 photon pour avoir de plus en plus de cas où le pixel voit 2 photons ou plus. Or dans ce cas-là le facteur du bruit d'amplification du détecteur ne permet plus d'estimer le nombre exact de photons reçus avec un bon taux de confiance. Autrement dit, on n'est pas capable de savoir si l'on a reçu 1, 2, 3 photons ou plus. On perd en information. Ceci est une limite importante de l'imagerie à comptage de photons avec les détecteurs actuels à multiplication de charges.

Il est important de noter que ce facteur de bruit d'amplification est différent pour les différents types de détecteurs. Dans les technologies SPAD (Single Photon Avalanche Diode) ou photodiode à avalanche en mode Geiger, l'absorption d'un photon provoque un processus d'avalanche géant. Le courant généré par l'avalanche est détecté par un circuit électronique qui permet la détection du photon. Cependant, après un tel processus, un temps mort est nécessaire pour évacuer les charges et donc empêche la détection d'un nouveau photon pendant ce temps d'évacuation. Ce n'est pas ce type de technologie qui est préféré et présenté ici.

Pour certaines applications en astronomie (en utilisant par exemple une caméra de la société Nüvü ou de la société First Light Imaging) ou en imagerie bio-médicale, l'imagerie à comptage de photons est bien indiquée car l'on sait que l'on ne recevra que peu de photons. En revanche pour des applications de vision d'une scène nocturne quelconque, on ne sait pas par avance quelles conditions d'éclairage on va pouvoir rencontrer et quelle dynamique de scène sera rencontrée dans l'image vidéo (spatialement et temporellement). Si le flux de scène est fort alors que l'on fait de l'imagerie à comptage de photons, on est hors de la zone du régime d'éclairage qui permet de binariser le signal de chaque pixel dans la trame ; on perd donc en information mais toutefois dans ce régime l'imagerie classique peut être suffisante en qualité du fait que le bruit du récepteur est inférieur à $\sqrt{n_p}$ (écart type pour un niveau moyen de n_p (par exemple $n_p > 10$ photons par trames). En revanche, si le flux de scène est trop faible alors

que l'on fait de l'imagerie classique, les bruits du détecteur seront alors prépondérants et l'image inexploitable.

5 En conséquence, il demeure à ce jour un besoin pour un procédé et un système d'imagerie à grande dynamique, adapté à des conditions d'éclairement imprévues et pouvant varier d'un flux de scène fort à un flux de scène faible.

10 Le système d'imagerie selon l'invention comprend plusieurs modes d'imagerie, avec au moins :

15 ■ Un mode d'imagerie classique utilisé quand le flux de scène est important. Ce mode et les conditions d'applications de ce mode supposent un flux photonique important, supérieur au carré du bruit de lecture du détecteur et à son courant d'obscurité. Auquel cas le détecteur générera une image limitée par le bruit photonique. Si le détecteur le permet (comme dans les EMCCD) l'emploi d'un mode d'amplification ou de multiplication du signal n'est pas nécessaire et dans ce cas le S/B est typiquement proche de la racine du flux photonique accumulé par pixel et par trame. Si le flux photonique diminue et devient proche du courant d'obscurité ou du carré du bruit de lecture alors on peut enclencher un processus d'amplification ou de multiplication sur le signal pour limiter la dégradation du rapport signal sur bruit.

20 ■ Un mode d'imagerie à comptage de photons « naturel », permettant de faire de l'imagerie à très bas niveaux de lumière. A très faible flux les détecteurs sont limités par le bruit de lecture du récepteur. Auquel cas il est pertinent d'utiliser un dispositif d'amplification ou de multiplication des photoélectrons. De ce fait dans certains détecteurs le signal photo-électrique multiplié devient dominant par rapport au bruit de lecture de la matrice ou encore au courant d'obscurité. Par contre le facteur de multiplication est stochastique et apporte un bruit dit facteur de bruit d'amplification qui va dégrader le S/B. On a montré que si ce flux est inférieur à 0,15 photo électron par pixel et par trame alors une logique de seuillage permet de contraindre à 0 ou à 1 le signal analogique délivré par

30

35

chaque pixel. On est dans ce cas en mode d'imagerie à comptage de photon que nous définissons comme « naturel ». Ce mode permet d'améliorer la qualité image qui peut se définir par son S/B et une dynamique de niveaux de gris restitués plus importante.

5 Et quand le flux de scène est intermédiaire, c'est-à-dire diminue sans atteindre un seuil de très bas niveau de lumière adapté au comptage de photons « naturel », alors on peut forcer le système d'imagerie à basculer dans un mode spécifique d'imagerie à comptage de photons « forcé », en se plaçant dans des conditions permettant d'être dans ce régime contraint à 0
10 ou 1 photon par pixel pour une trame. Dans ce cas il est pertinent d'examiner si d'une part il est judicieux d'enclencher la fonction d'amplification ou de multiplication du signal pour réduire l'influence du bruit de lecture et le courant d'obscurité du capteur que nous avons vus dans le mode d'imagerie classique. Nous sommes alors dans le mode d'imagerie classique multiplié
15 ou amplifié. Néanmoins dans ce mode de multiplication nous allons voir une dégradation du S/B et de la dynamique de l'image en descendant dans les niveaux d'éclairement. Il est alors possible ensuite, paradoxalement, de réduire le flux photonique par pixel et par trame pour entrer dans un mode similaire au comptage de photon naturel pour améliorer la qualité image par son S/B et sa dynamique par rapport au mode multiplié. Ceci définit le mode
20 imagerie à comptage de photon forcé.

On peut considérer en première approche que :

- lorsque le flux de scène est inférieur à 0,15 photo électron par pixel et par trame, le mode d'imagerie est à comptage de photons naturel,
- 25 - lorsque le flux de scène est supérieur à quelques (par exemple 5) photo électron par pixel et par trame, le mode d'imagerie est classique,
- lorsque le flux de scène est intermédiaire, le mode d'imagerie est à comptage de photons forcé.

On contraint le système à se placer dans un mode d'imagerie
30 en pilotant certains paramètres tels que :

- le temps d'intégration pour avoir, par exemple, en moyenne 0.15 photon/pixel/trame ou moins, si l'on choisit le mode d'imagerie à comptage de photon. Cette valeur 0.15 peut être ajustable et dépend de l'algorithme de binarisation choisi ; on peut avoir par exemple 0.2

photon/pixel/trame en tolérant par exemple une erreur de comptage un peu plus importante,

- la cadence d'acquisition,
- l'ouverture numérique de l'optique,
- 5 ■ l'atténuation optique,
- la bande spectrale de réception pour par exemple améliorer la discrimination spectrale,
- le pas pixel ou son facteur de remplissage si la technologie le permet pour par exemple améliorer la résolution angulaire ou la FTM,
- 10 ■ etc...

Plus précisément l'invention a pour objet un procédé d'imagerie d'une scène au moyen d'un système d'imagerie permettant d'obtenir une image de la scène, le système d'imagerie comportant un dispositif d'acquisition de trames selon des paramètres d'acquisition, et une unité de traitement des trames acquises, caractérisé en ce que le procédé comprend les étapes suivantes :

A) Choix d'un mode d'imagerie parmi un mode d'imagerie classique, un mode d'imagerie à comptage de photons naturel et un mode d'imagerie à comptage de photons forcé, et en fonction du mode d'imagerie choisi, détermination par l'unité de traitement, des paramètres d'acquisition correspondant,

B) acquisition d'au moins une trame par le dispositif d'acquisition paramétré avec lesdits paramètres d'acquisition, et transmission des trames acquises à l'unité de traitement pour obtenir une image, l'image étant obtenue à l'issue des sous-étapes suivantes si le mode d'imagerie choisi est le mode d'imagerie à comptage de photons naturel ou le mode d'imagerie à comptage de photons forcé :

- binarisation des trames acquises et
- 30 - somme des trames binarisées pour obtenir une image,

C) estimation de la qualité de l'image obtenue,

D) D1) en fonction de la qualité de l'image obtenue, déterminer un ou deux nouveau(x) mode(s) d'imagerie choisi(s) parmi le mode d'imagerie classique, le mode d'imagerie à comptage de photons naturel et le mode d'imagerie à comptage de photons forcé,

D2) réitérer les étapes A, B, C et D avec le nouveau mode d'imagerie choisi comme mode d'imagerie.

5 Selon un mode de réalisation de l'invention, l'étape D1) est réalisée par comparaison (1ère comparaison) de la qualité de l'image obtenue à une première qualité prédéterminée correspondant au mode d'imagerie classique :

10 - si la comparaison (1ère comparaison) est favorable, réitération des étapes A, B, C et D avec le mode d'imagerie classique comme mode d'imagerie choisi,

- sinon comparaison (2è comparaison) de la qualité de l'image obtenue à une seconde qualité prédéterminée correspondant au mode d'imagerie à comptage de photons naturel, et

15 ○ si la comparaison (2è comparaison) est favorable, réitération des étapes A, B, C et D avec le mode d'imagerie à comptage de photons naturel comme mode d'imagerie choisi,

○ sinon réitération des étapes A, B, C et D avec le mode d'imagerie à comptage de photons forcé comme mode d'imagerie choisi.

20

Comme rappelé en préambule, sans mode à comptage de photon les imageurs Bas Niveau de Lumière sont optimisés, pour les très faibles flux, en augmentant la surface du pixel et en augmentant le temps d'intégration dans les limites du possible. Selon l'invention, l'introduction du mode à comptage de photon (naturel et forcé) permet de privilégier la réduction de la taille des pixels et/ou de réduire le temps d'intégration en augmentant la cadence trame pour exploiter ce mode dans une plus grande dynamique de scène.

30 Les paramètres du dispositif d'acquisition sont typiquement des paramètres de temps de cadence et/ou de temps d'intégration et/ou d'ouverture de l'optique et/ou de variation de bande spectrale et/ou de variation d'atténuation optique.

35 Les paramètres d'acquisition selon le mode d'imagerie classique et les paramètres selon le mode d'imagerie à comptage de photons naturel

ont typiquement des valeurs fixes, et les paramètres selon le mode d'imagerie à comptage de photons forcé ont typiquement des valeurs variant d'une itération à l'autre pour optimiser le critère de qualité image à chaque itération.

5

Selon une caractéristique de l'invention, le procédé comporte une étape de division spatiale de chaque trame en sous-trames et les étapes des modes d'imagerie sont appliquées à chaque sous-trame.

10 L'estimation de la qualité de l'image obtenue peut être déterminée par calcul ou par un opérateur.

En outre un tel procédé peut avantageusement être utilisé en imagerie active, c'est-à-dire avec une illumination laser. Dans ce cas les paramètres du dispositif d'acquisition peuvent avantageusement conduire à
15 réduire l'éclairement laser de la scène ou encore à augmenter sa portée.

Ainsi selon une autre caractéristique de l'invention, le procédé comporte une étape préalable d'illumination de la scène au moyen d'un dispositif d'illumination synchronisé avec le dispositif d'acquisition et le
20 dispositif d'illumination et le dispositif d'acquisition présentent la même bande spectrale. Dans ce cas, des paramètres d'illumination peuvent aussi être définis à l'étape A.

Les paramètres d'illumination sont par exemple des paramètres de puissance et/ou de durée d'illumination du dispositif d'illumination.

25 L'invention a aussi pour objet un système d'imagerie d'une scène qui comprend un dispositif d'acquisition de trames de la scène, éventuellement un dispositif d'illumination de la scène, et une unité de traitement reliée au dispositif d'acquisition et à l'éventuel dispositif d'illumination, configurés pour mettre en œuvre le procédé d'imagerie tel que
30 décrit.

Ainsi, au lieu de subir le flux de scène reçu, le système d'imagerie selon l'invention adapte ses paramètres de fonctionnement, comme par exemple sa cadence d'acquisition, pour être dans le mode d'imagerie présentant les meilleures performances.

35

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit, faite à titre d'exemple non limitatif et en référence aux dessins annexés dans lesquels :

5 la figure 1 représente schématiquement des exemples de distributions de Poisson, en l'occurrence des histogrammes des flux photoniques acquis sur une matrice, pour différentes valeurs de moyenne μ_p ,

la figure 2a représente schématiquement un premier exemple de système d'imagerie selon l'invention, la figure 2b représente
10 schématiquement un deuxième exemple de système d'imagerie selon l'invention, avec un système d'imagerie active,

la figure 3 est un exemple d'organigramme montrant différentes étapes du procédé selon l'invention.

15 On décrit, en relation avec la figure 2a un exemple de système d'imagerie 100 selon l'invention. Il comprend :

- un dispositif 1 d'acquisition de trames de la scène comportant :
 - un dispositif 12 optique de formation d'images sur un plan focal et
 - 20 ○ dans le plan focal, une matrice 11 de détection qui génère l'acquisition de trames, et
- une unité de traitement 2 reliée au dispositif d'acquisition 1.

Le système d'imagerie peut fonctionner selon plusieurs modes d'imagerie, avec au moins :

- 25 - Un mode d'imagerie classique utilisé quand le flux de scène est important,
- Un mode d'imagerie à comptage de photons dit naturel, permettant de faire de l'imagerie à très bas niveau de lumière, c'est-à-dire quand le flux de scène est faible,
- 30 - Un mode d'imagerie à comptage de photons dit forcé, permettant de faire de l'imagerie quand le flux de scène est intermédiaire entre important et faible.

Ainsi, quand le flux de scène est important, on conserve une imagerie classique. Quand le flux de scène est faible, on bascule en imagerie
35 à comptage de photons naturel. En revanche, quand le flux de scène est

intermédiaire, alors on force le système d'imagerie à basculer dans un mode spécifique d'imagerie à comptage de photons forcé, en plaçant le système d'imagerie dans des conditions permettant d'être dans ce régime contraint à 0 ou 1 photon par pixel pour une trame : on contraint le système d'imagerie en jouant sur un ou plusieurs de ses différents paramètres (temps d'intégration, cadence, ouverture, illumination pour de l'imagerie active...) pour pouvoir être dans le mode particulier où l'on peut faire avantageusement du point de vue de la qualité image restituée, du comptage de photons.

10 On contraint le système d'imagerie à se placer dans l'un ou l'autre mode d'imagerie en pilotant les paramètres du dispositif d'acquisition tels que :

- la cadence d'acquisition de la matrice de détection 11, ou la période d'acquisition,
- 15 - le temps d'intégration de la matrice de détection 11,
- l'ouverture du dispositif de formation d'images 12,
- l'atténuation optique ou la variation de bande spectrale en choisissant un filtre 13 parmi des filtres de différentes atténuations ou différentes largeurs de bandes spectrales respectivement.

20

On peut par exemple d'une manière préférée :

- Ajuster la cadence d'acquisition des trames.
- Piloter le temps d'intégration pour avoir en moyenne 0.15 photon/pixel/trame ou moins, si l'on choisit le mode d'imagerie à comptage de photons. Cette valeur 0.15 dépend de la fonction de binarisation choisie et du taux d'erreur admis sur l'image restituée.

25

On peut également jouer sur d'autres paramètres (exemple : ouverture, atténuation optique variable, illumination de la scène en imagerie active...) pour limiter artificiellement le flux issu de la scène et ainsi contraindre le système à se trouver dans le mode d'imagerie à comptage de photons. Ces paramètres sont pilotés par l'unité de traitement 2.

30

Ainsi, au lieu de subir le flux de scène reçu, le système d'imagerie selon l'invention adapte ses paramètres de fonctionnement, comme par exemple sa cadence d'acquisition, pour être dans le mode d'imagerie présentant les meilleures performances.

35

Le basculement entre les différents modes d'imagerie se fait en fonction du flux de scène reçu ou plus précisément en fonction de la qualité de l'image obtenue selon l'un ou l'autre mode d'imagerie, cette qualité étant liée au flux de scène reçu. Il peut se faire de manière automatique en étant
5 assuré par l'unité de traitement 2 ou bien manuellement. Il peut se faire sur l'ensemble de la matrice de détection 11 (→ sur chaque trame acquise) ou seulement sur une partie (→ sous-trame ou fenêtre), voire si la matrice le permet, par pixel, ce qui permet d'adapter au plus fin le mode d'imagerie au flux reçu.

10

Si le flux de scène est relativement faible alors le système d'imagerie adapte ses paramètres pour rester dans un mode d'imagerie à comptage de photons.

Si le flux de scène est trop important et que l'on ne peut plus
15 contraindre le système à être dans le régime spécifique du mode comptage de photons ou si les performances sont meilleures en imagerie classique alors on rebascule dans un mode d'imagerie classique où on accumule les photons pendant un temps d'intégration égal à celui de l'image finale (40 ms dans le cas d'une vidéo à 25 Hz par exemple).

20

En imagerie à bas niveau de lumière, pour augmenter la sensibilité ou la qualité d'image, il est classique d'augmenter le temps d'intégration par trame et/ou d'augmenter la surface du pixel et/ou d'augmenter la bande spectrale de réception. Selon l'invention, pour exploiter
25 le mode à comptage de photons, les paramètres du dispositif d'acquisition sont pilotés en privilégiant l'augmentation de la cadence trame et ainsi la réduction du temps d'intégration, la limitation ou même la réduction de la bande spectrale.

Le procédé selon l'invention permet aussi d'utiliser une matrice de
30 détecteurs dont la taille des pixels est réduite, quitte à utiliser des modes de binning (comme dans les CCD) qui permettent de sommer les charges sur des pixels adjacents (2x2, 3x3 ou 4x4) par exemple pour effectivement augmenter la taille des pixels.

On va décrire en relation avec la figure 3, des étapes d'un exemple de procédé d'imagerie selon l'invention.

A) Détermination par l'unité de traitement 2, des paramètres d'acquisition du dispositif d'acquisition 1 selon un mode d'imagerie choisi.

5 Les paramètres du mode d'imagerie classique et ceux du mode d'imagerie à comptage naturel sont prédéterminés et ont des valeurs prédéterminées. Celles des paramètres du mode d'imagerie à comptage naturel correspondent aux conditions d'utilisation ultimes du dispositif d'acquisition, correspondant par exemple à 0.15 photon/pixel ou moins pour chaque trame.

10 Les paramètres du mode d'imagerie à comptage forcé sont variables : les paramètres peuvent varier d'une image à l'autre et leurs valeurs sont optimisées d'une image à l'autre pour optimiser le critère de qualité image d'une image à l'autre. Elles sont généralement optimisées par l'unité de traitement dans une fourchette de valeurs, en procédant par pas
15 d'une itération à l'autre. Ces fourchettes de valeurs se situent entre les valeurs des paramètres en mode classique et celles des paramètres en mode à comptage naturel.

B) Acquisition d'au moins une trame par le dispositif d'acquisition paramétré selon le mode d'imagerie en cours et transmission de ces trames
20 à l'unité de traitement au fur et à mesure de leur acquisition.

Si le mode d'imagerie en cours (choisi à l'étape A) est le mode classique, une image est obtenue à partir de ces trames par l'unité de traitement de manière classique (acquisition d'au moins une trame et
25 sommation des trames pour obtenir l'image finale).

Si le mode d'imagerie en cours (choisi à l'étape A) est le mode d'imagerie à comptage naturel ou à comptage forcé, les sous-étapes suivantes sont effectuées par l'unité de traitement :

- Binarisation des trames acquises,
- 30 - Somme des trames binarisées pour former une image.

Pour la binarisation des trames acquises, on peut utiliser une fonction de binarisation à seuil (on attribue 1 à un pixel lorsque l'amplitude mesurée sur ce pixel est supérieur à un seuil prédéterminé, 0 sinon), mais d'autres fonctions de binarisation peuvent être envisagées telles que décrites
35 dans les publications suivantes :

- - E. Lantz et al « Multi-imaging and Bayesian estimation for photon counting with EMCCDs » Mon. Not. R. Astron. Soc, 386, 2262-2270 (2008)
- - K.B.W. Harpsoe et al « Bayesian photon counting with EMCCDs », A&A, 537 (2012).

5

En sortie de l'unité de traitement, l'image obtenue selon l'un ou l'autre mode est envoyée par exemple vers un dispositif d'affichage.

C) Estimation par l'unité de traitement 2 de la qualité de l'image obtenue.

10

D) Comparaison (1ère comparaison) à une première qualité d'image prédéterminée (qualité1) correspondant à une qualité d'image en mode classique, par l'unité de traitement. Si la comparaison (1ère comparaison) est favorable au mode d'imagerie classique (la qualité de l'image obtenue est par exemple donnée par le niveau d'éclairement de la scène mesuré dans le domaine spectral Visible compris entre 100 000 lux et 0,01 lux, ou moins suivant la configuration optique et les performances du détecteur), on réitère les étapes A, B, C et D en choisissant le mode d'imagerie classique (qui peut être le mode en cours). Ce critère de niveau d'éclairement peut être réalisé aussi en entrée pupille ou encore sur le plan focal, il peut être mesuré en W/m^2 ou encore en photons/s/m² dans le domaine spectral des filtres 13, par exemple dans le proche IR ou encore dans le SWIR. Si la comparaison (1ère comparaison) est défavorable au mode d'imagerie classique, on compare (2è comparaison) la qualité de l'image obtenue à une seconde qualité d'image prédéterminée (qualité2), correspondant à une qualité d'image en mode à comptage naturel, au moyen de l'unité de traitement. Si la comparaison (2è comparaison) est favorable au mode à comptage naturel (la qualité de l'image obtenue est par exemple comprise entre des éclairnements de 1mlux et 1 μ lux), on réitère les étapes A, B, C et D en choisissant le mode à comptage naturel (qui peut être le mode en cours) sinon (= la comparaison (2è comparaison) est donc favorable au mode à comptage forcé avec une qualité de l'image obtenue par exemple pour des éclairements compris entre 1mlux et 10 mlux)) on réitère les étapes A, B, C et D en mode à comptage forcé (qui peut être le mode en cours)

15

20

25

30

35

avec donc une optimisation des paramètres d'acquisition en étape A. Lorsque la qualité 1 et/ou éventuellement la qualité 2 ne sont pas prédéterminées, on peut acquérir de nouvelles trames selon deux modes d'imagerie (classique et à comptage forcé, ou à comptage forcé et à comptage naturel) et on choisit entre les deux, le mode d'imagerie qui donne le meilleur critère de qualité. Cela revient à définir ces critères de qualité de manière relative.

On a donné comme exemple de critère de qualité un niveau d'éclairement incident sur la scène ou encore en entrée pupille ou encore dans le plan focal; on peut bien sûr prendre d'autres critères connus de l'homme du métier tels que le rapport signal à bruit (temporel ou spatial), la dynamique en niveaux de gris restitués.

Le mode d'imagerie initial peut être l'un ou l'autre mode. Ce mode initial est enclenché sans connaître le niveau d'éclairement du flux de scène reçu. Dans l'exemple de la figure 3, on a choisi le mode classique comme mode initial symbolisé par une flèche en pointillé. Mais si l'on choisit un mode d'imagerie par comptage par photon (naturel ou forcé), les tests de comparaison aux qualités 1 et 2 sont bien sûr inversés pour conserver les paramètres d'acquisition tant qu'il n'est pas nécessaire de les changer.

Dit autrement, le procédé comporte les étapes suivantes.

A) Choix d'un mode d'imagerie parmi un mode d'imagerie classique, un mode d'imagerie à comptage de photons naturel et un mode d'imagerie à comptage de photons forcé, et détermination par l'unité de traitement 2, des paramètres d'acquisition du dispositif d'acquisition 1 selon un mode d'imagerie choisi. Les paramètres du mode d'imagerie classique et ceux du mode d'imagerie à comptage naturel sont prédéterminés et ont des valeurs prédéterminées. Celles des paramètres du mode d'imagerie à comptage naturel correspondent aux conditions d'utilisation ultimes du dispositif d'acquisition, correspondant par exemple à 0.15 photon/pixel ou moins pour chaque trame.

Les paramètres du mode d'imagerie à comptage forcé sont variables : les paramètres peuvent varier d'une image à l'autre et leurs valeurs sont optimisées d'une image à l'autre pour optimiser le critère de qualité image d'une image à l'autre. Elles sont généralement optimisées par

l'unité de traitement dans une fourchette de valeurs, en procédant par pas d'une itération à l'autre. Ces fourchettes de valeurs se situent entre les valeurs des paramètres en mode classique et celles des paramètres en mode à comptage naturel.

5

B) Acquisition d'au moins une trame par le dispositif d'acquisition paramétré selon le mode d'imagerie en cours et transmission de ces trames à l'unité de traitement au fur et à mesure de leur acquisition.

10 Si le mode d'imagerie en cours (choisi à l'étape A) est le mode classique, une image est obtenue à partir de ces trames par l'unité de traitement de manière classique (acquisition d'au moins une trame et sommation des trames pour obtenir l'image finale).

15 Si le mode d'imagerie en cours (choisi à l'étape A) est le mode d'imagerie à comptage naturel ou à comptage forcé, les sous-étapes suivantes sont effectuées par l'unité de traitement :

- Binarisation des trames acquises,
- Somme des trames binarisées pour former une image.

En sortie de l'unité de traitement, l'image obtenue selon l'un ou l'autre mode est envoyée par exemple vers un dispositif d'affichage.

20

C) Estimation par l'unité de traitement 2 de la qualité de l'image obtenue.

25 D) D1) en fonction de la qualité de l'image obtenue, déterminer un (ou deux comme indiqué précédemment) nouveau mode d'imagerie choisi parmi le mode d'imagerie classique, le mode d'imagerie à comptage de photons naturel et le mode d'imagerie à comptage de photons forcé.

D2) réitérer les étapes A, B, C et D avec le (ou chaque) nouveau mode d'imagerie choisi comme mode d'imagerie.

30

Selon une variante, préalablement aux étapes d'obtention d'images, les trames acquises sont spatialement divisées en sous-trames ou fenêtres, cette division spatiale pouvant aller jusqu'à considérer dans chaque trame une fraction des pixels (fenêtre, lignes, colonnes ou encore pixels

déterminés). Les étapes des différents modes d'imagerie sont alors appliquées à chaque sous-trame.

Ce procédé d'imagerie est en particulier bien adapté à l'imagerie active qui comporte alors une étape préalable d'illumination de la scène par un dispositif d'illumination (laser, LED, lampe) 200 montré figure 2b généralement synchronisé avec le dispositif d'acquisition 1. On va alors restreindre la bande spectrale du dispositif d'acquisition à celle du dispositif d'illumination et ainsi ne compter que les photons de la scène réfléchis dans cette bande. On peut aussi réduire la puissance ou les durées d'illumination du dispositif d'illumination. La bande spectrale, la puissance ou les durées d'illumination sont alors des paramètres d'illumination aussi pilotés par l'unité de traitement 2.

REVENDEICATIONS

- 5 1. Procédé d'imagerie d'une scène au moyen d'un système d'imagerie (100) permettant d'obtenir une image de la scène, le système d'imagerie comportant un dispositif (1) d'acquisition de trames selon des paramètres d'acquisition, et une unité (2) de traitement des trames acquises, caractérisé en ce que le procédé comprend les
- 10 étapes suivantes :
- A) Choix d'un mode d'imagerie parmi un mode d'imagerie classique, un mode d'imagerie à comptage de photons naturel et un mode d'imagerie à comptage de photons forcé, et en fonction du mode d'imagerie choisi, détermination par l'unité de traitement, des
- 15 paramètres d'acquisition correspondant,
- B) acquisition d'au moins une trame par le dispositif d'acquisition paramétré avec lesdits paramètres d'acquisition, et transmission des trames acquises à l'unité de traitement pour obtenir une image, l'image étant obtenue à l'issue des sous-étapes suivantes si le mode
- 20 d'imagerie choisi est le mode d'imagerie à comptage de photons naturel ou le mode d'imagerie à comptage de photons forcé :
- binarisation des trames acquises et
 - somme des trames binarisées pour obtenir une image,
- C) estimation de la qualité de l'image obtenue,
- 25 D) D1) en fonction de la qualité de l'image obtenue, déterminer un ou deux nouveau(x) mode(s) d'imagerie choisi(s) parmi le mode d'imagerie classique, le mode d'imagerie à comptage de photons naturel ou le mode d'imagerie à comptage de photons forcé,
- D2) réitérer les étapes A, B, C et D avec le nouveau mode
- 30 d'imagerie choisi comme mode d'imagerie.
2. Procédé d'imagerie d'une scène selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le nouveau mode d'imagerie choisi de l'étape D1) est obtenu par comparaison (1ère comparaison) de la
- 35 qualité de l'image obtenue à une première qualité prédéterminée (qualité1) correspondant au mode d'imagerie classique :

- si la comparaison (1ère comparaison) est favorable, le nouveau mode d'imagerie choisi est le mode d'imagerie classique,
 - sinon comparaison (2ème comparaison) de la qualité de l'image obtenue à une seconde qualité prédéterminée (qualité2)
5 correspondant au mode d'imagerie à comptage de photons naturel, et
 - o si la comparaison (2ème comparaison) est favorable, le nouveau mode d'imagerie choisi est le mode d'imagerie à comptage de photons naturel,
 - o sinon le nouveau mode d'imagerie choisi est le mode
10 d'imagerie à comptage de photons forcé.
3. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les paramètres d'acquisition sont des paramètres de cadence d'acquisition et/ou de temps d'intégration
15 et/ou d'ouverture et/ou de variation de bande spectrale et/ou de variation d'atténuation optique.
4. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les paramètres d'acquisition selon le mode
20 d'imagerie classique et les paramètres selon le mode d'imagerie à comptage de photons naturel ont des valeurs fixes, et en ce que les paramètres d'acquisition selon le mode d'imagerie à comptage de photons forcé ont des valeurs variant d'une itération à l'autre.
- 25 5. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte une étape de division spatiale de chaque trame en sous-trames et en ce que les étapes des modes d'imagerie sont appliquées à chaque sous-trame.
- 30 6. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'estimation de la qualité de l'image obtenue est déterminée par calcul ou par un opérateur.
- 35 7. Procédé d'imagerie selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte une étape préalable d'illumination de

la scène au moyen d'un dispositif d'illumination (200) synchronisé avec le dispositif d'acquisition (1) et en ce que le dispositif d'illumination et le dispositif d'acquisition présentent la même bande spectrale.

5

8. Procédé d'imagerie selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le dispositif d'illumination présente des paramètres d'illumination définis à l'étape A.

10

9. Procédé d'imagerie selon la revendication précédente, caractérisé en ce que les paramètres d'illumination sont des paramètres de puissance et/ou de durée d'illumination du dispositif d'illumination.

15

10. Système (100) d'imagerie d'une scène qui comprend un dispositif (1) d'acquisition de trames de la scène et une unité de traitement (2) reliée au dispositif d'acquisition, configurés pour mettre en œuvre le procédé d'imagerie selon l'une des revendications 1 à 6.

20

11. Système (100) d'imagerie d'une scène qui comprend un dispositif d'illumination (200) de la scène, un dispositif (1) d'acquisition de trames de la scène et une unité de traitement (2) reliée au dispositif d'illumination et au dispositif d'acquisition, configurés pour mettre en œuvre le procédé d'imagerie selon l'une des revendications 7 à 9.

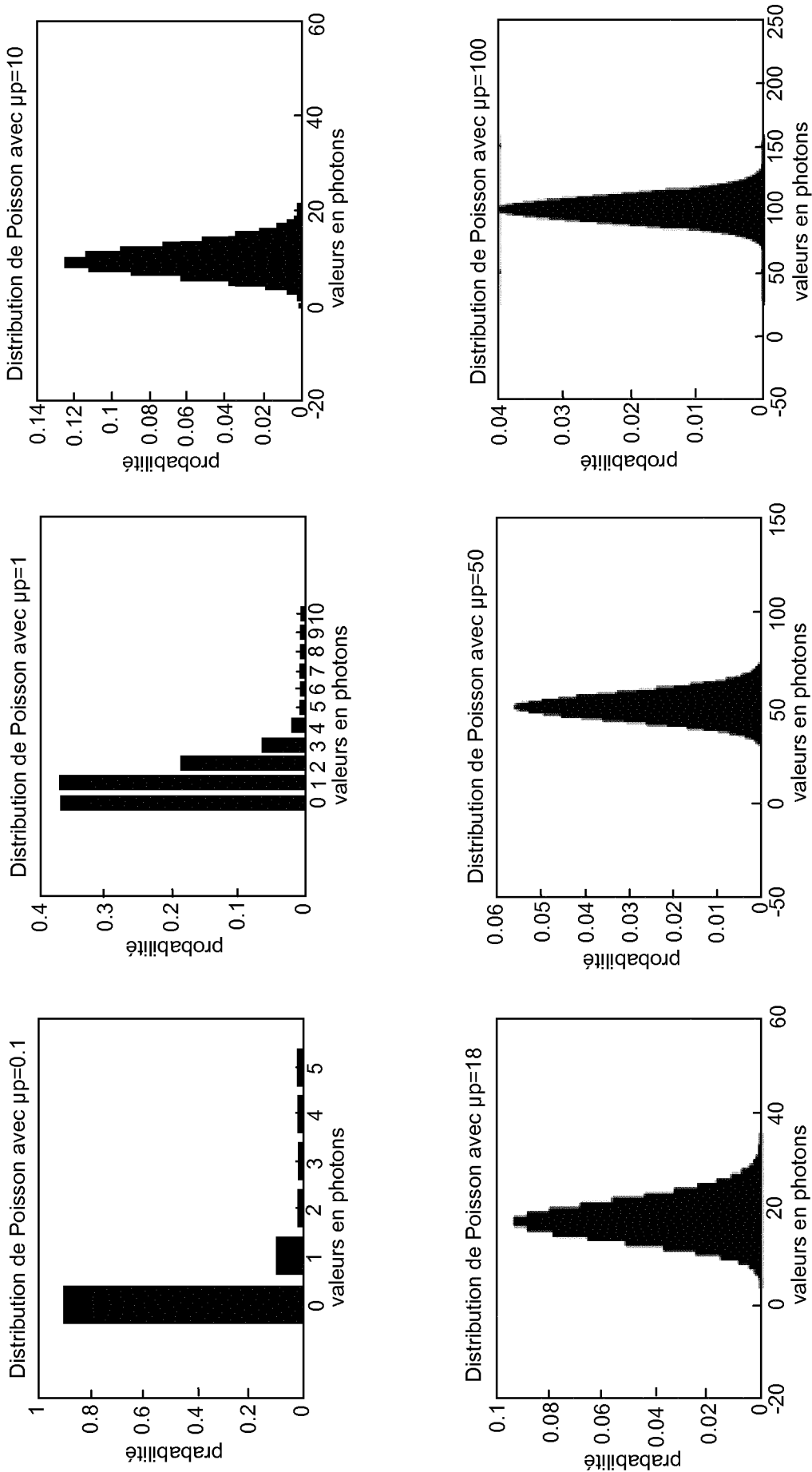


FIG.1

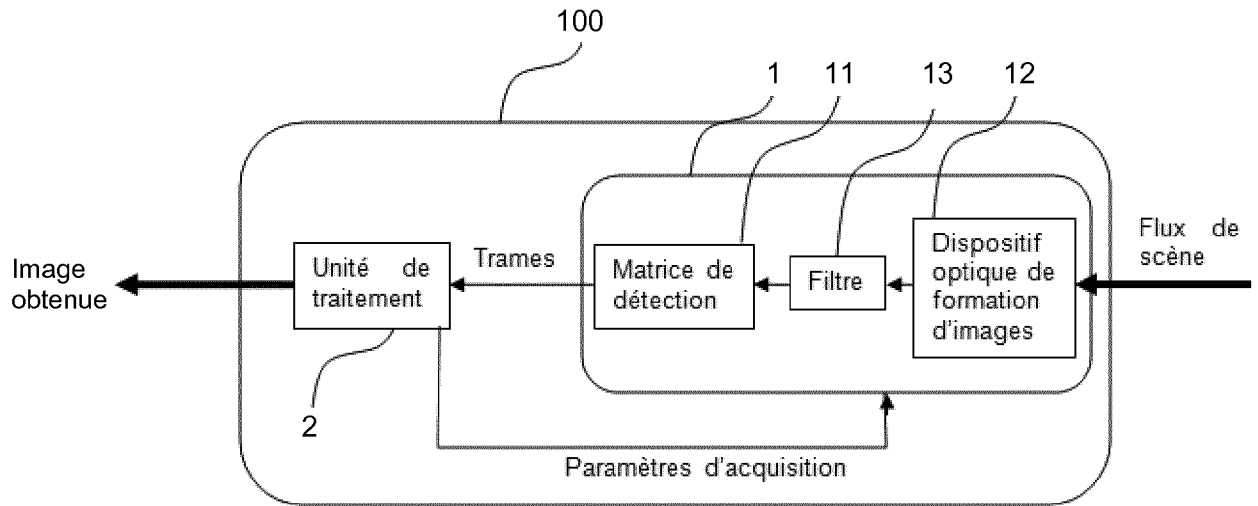


FIG.2a

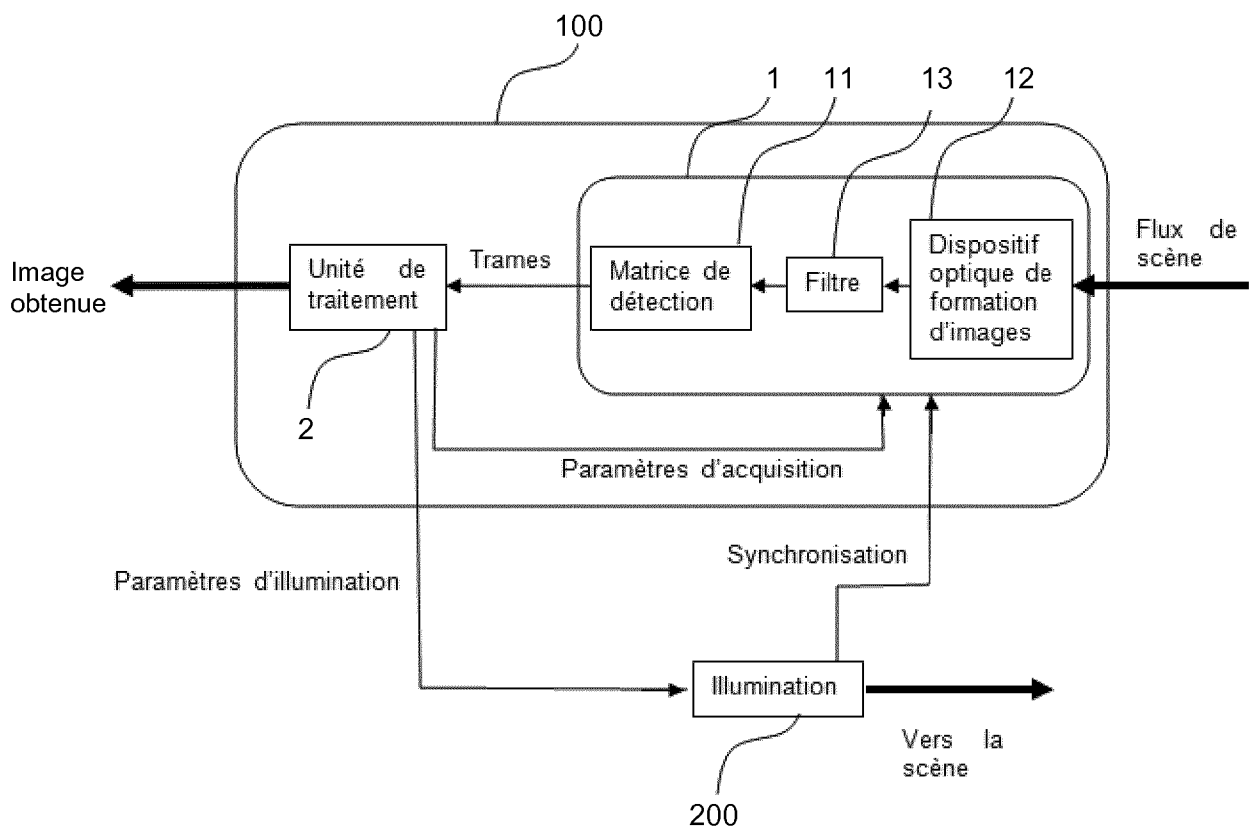


FIG.2b

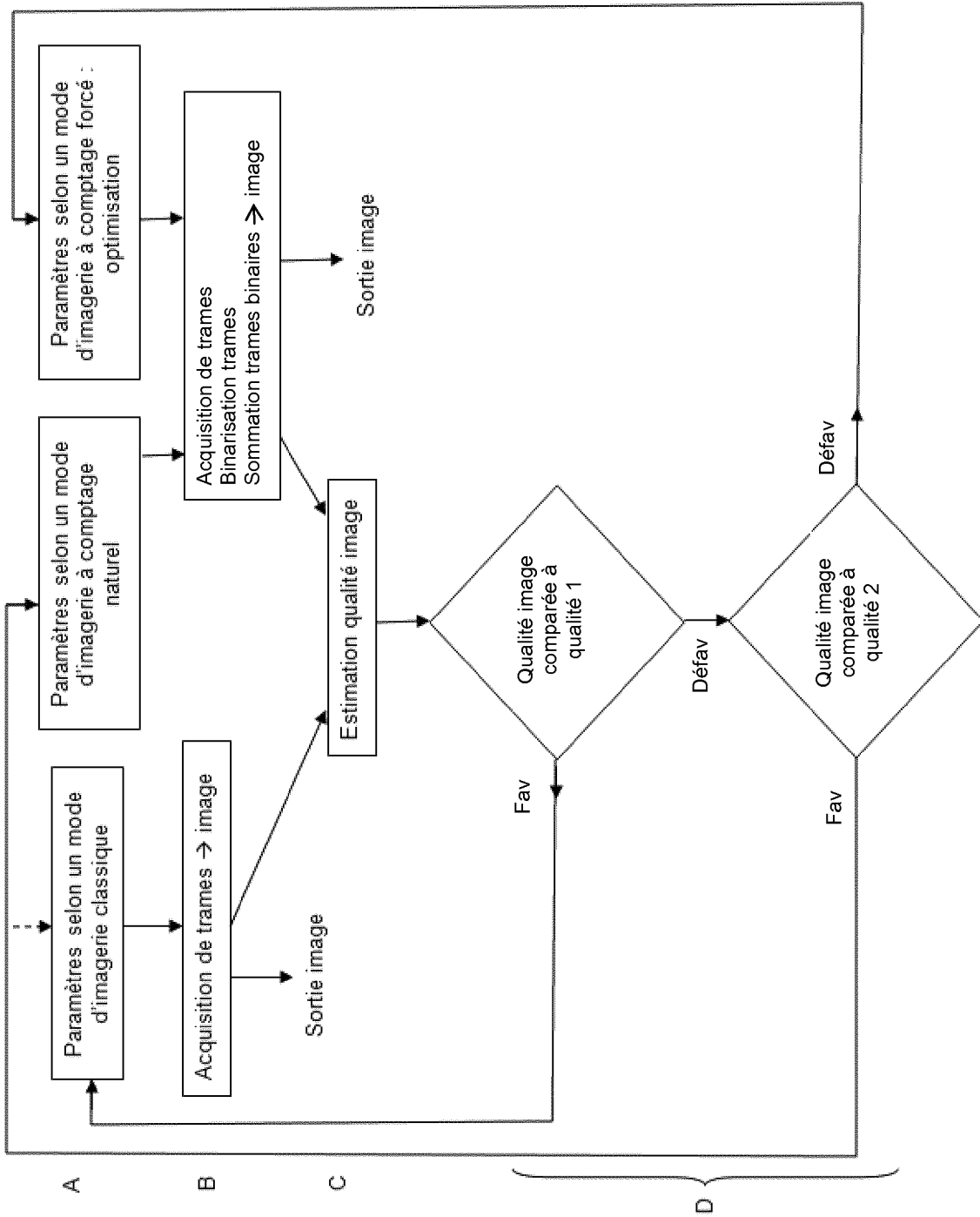


FIG.3

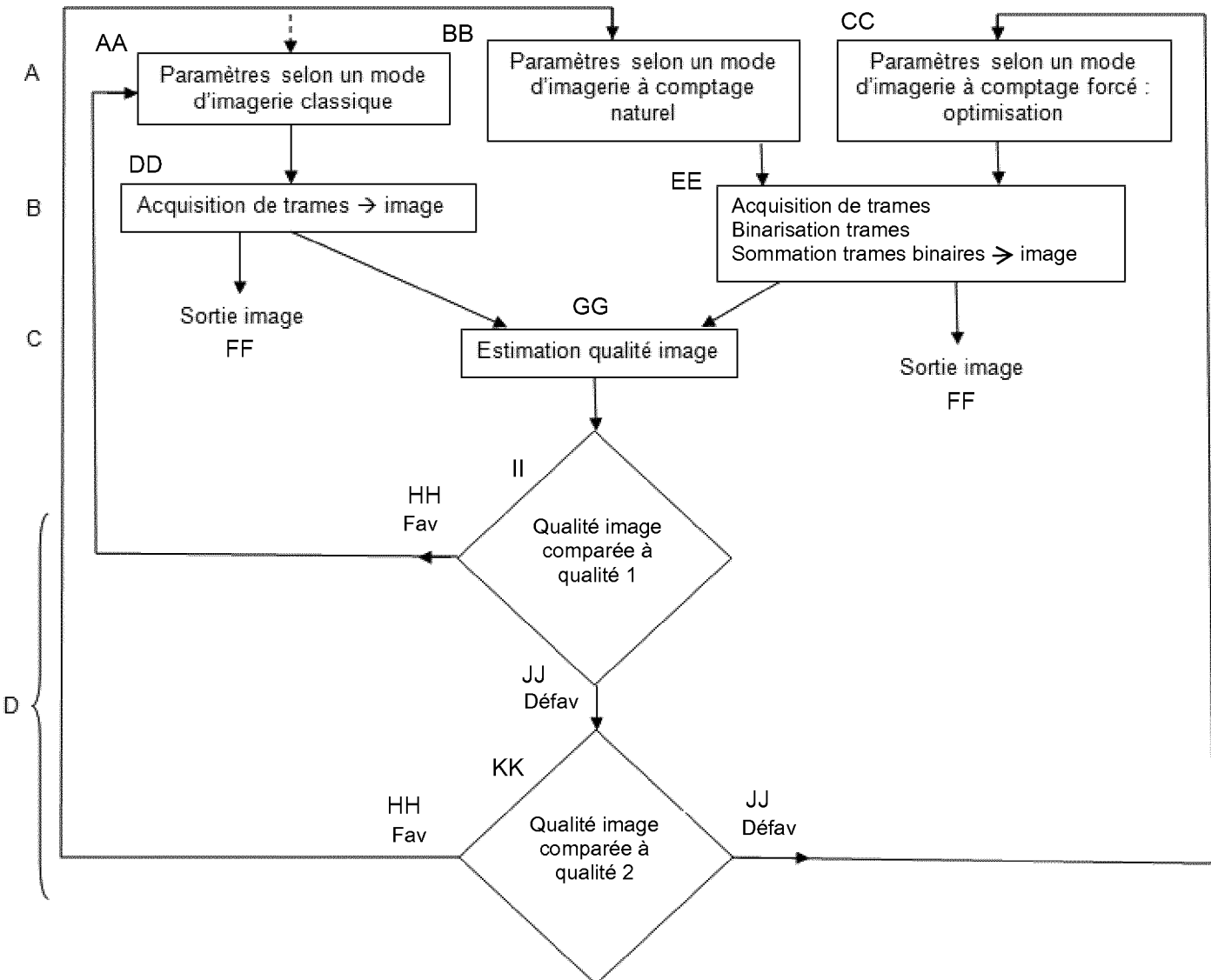


FIG.3