



(51) Classification internationale des brevets :
G06T 15/50 (2011.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2010/067727

(22) Date de dépôt international :
18 novembre 2010 (18.11.2010)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0958288 24 novembre 2009 (24.11.2009) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
Thomson Licensing [FR/FR]; 1-5 rue Jeanne d'Arc,
F-92130 Issy-les-Moulineaux (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :
GAUTRON, Pascal [FR/FR]; c/o TECHNICOLOR
R&D FRANCE, 1 Avenue Belle Fontaine, F-35576
Cesson Sevigne Cedec (FR). **MARVIE, Jean-Eudes**
[FR/FR]; c/o TECHNICOLOR R&D FRANCE, 1 Avenue
Belle Fontaine, F-35576 Cesson Sevigne Cedex (FR).
DELALANDRE, Cyril [FR/FR]; c/o TECHNICOLOR
R&D FRANCE, 1 Avenue Belle Fontaine, F-35576
Cesson Sevigne (FR).

(74) Mandataires : **LE DANTEC, Claude** et al.; 1-5 rue
Jeanne d'Arc, F-92130 Issy-les-Moulineaux (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, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG,
ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR ESTIMATING LIGHT SCATTERING

(54) Titre : PROCEDE D'ESTIMATION DE DIFFUSION DE LA LUMIERE

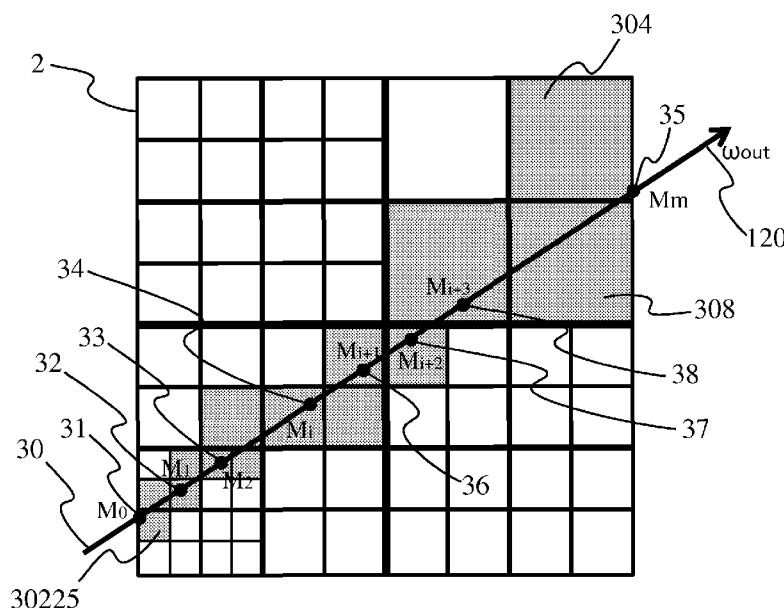


Fig 4B

(57) Abstract : The invention relates to a method for estimating the amount of light scattered by a heterogeneous participating medium (2). In order to optimize rendering while minimizing the required calculation times, the method includes the steps of: selecting at least one space subdivision level of said medium (2) from a plurality of space-subdivision hierarchical levels based on at least one piece of error information representative of a light attenuation difference in said medium in at least one direction (120) between two consecutive hierarchical levels; estimating the amount of scattered light by means of sampling said medium (2) along at least one scattering direction (120), the sampling being based on at least one selected space-subdivision level.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène (2). Afin d'optimiser le rendu tout en minimisant les temps de calculs

nécessaires, le procédé comprend les étapes de : - sélection d'au moins un niveau de subdivision spatiale dudit milieu (2) parmi une pluralité de niveaux

[Suite sur la page suivante]

**Publiée :**

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

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

hiérarchiques de subdivision spatiale selon au moins une information d'erreur représentative d'une différence d'atténuation de la lumière dans ledit milieu selon au moins une direction (120) entre deux niveaux hiérarchiques consécutifs, - estimation de la quantité de lumière diffusée par échantillonnage dudit milieu (2) le long d'au moins une direction de diffusion (120), l'échantillonnage étant fonction du au moins un niveau de subdivision spatiale sélectionné.

PROCÉDE D'ESTIMATION DE DIFFUSION DE LA LUMIÈRE

1. Domaine de l'invention.

5 L'invention se rapporte au domaine de la composition d'images de synthèse et plus particulièrement au domaine de la simulation de la diffusion de la lumière dans un milieu participant hétérogène. L'invention s'inscrit également dans le contexte des effets spéciaux pour une composition en temps réel (de l'anglais « live »).

2. Etat de l'art.

10 Selon l'état de la technique, différentes méthodes existent pour simuler la diffusion de la lumière dans des milieux participants tels que par exemple le brouillard, la fumée, la poussière ou les nuages. Les milieux participants correspondent à des milieux composés de particules en suspension qui interagissent avec la lumière pour en modifier le trajet et l'intensité notamment.

Les milieux participants peuvent être décomposés en deux parties, à savoir les milieux homogènes tels que l'eau et les milieux hétérogènes, tels que la fumée ou les nuages. Dans le cas des milieux participants homogènes, il est possible de calculer de manière analytique l'atténuation de la lumière émise par une source de lumière. En effet, de part leur nature homogène, ces milieux présentent des paramètres tels que le coefficient d'absorption de la lumière ou le coefficient de diffusion de la lumière de valeur constante en tout point du milieu. A contrario, les propriétés d'absorption et de diffusion de la lumière varient d'un point à un autre dans un milieu participant hétérogène. Les calculs nécessaires pour simuler la diffusion de la lumière dans un tel milieu hétérogène sont alors très coûteux et il n'est ainsi pas possible de calculer de manière analytique et en temps réel la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène. De plus, le milieu n'étant pas diffus, la quantité de lumière diffusée par le milieu varie également en fonction de la direction de diffusion de la lumière, c'est-à-dire de la direction dans laquelle une personne regarde ce milieu. Les calculs estimant la quantité de lumière diffusée doivent alors être réitérés pour chaque direction d'observation du milieu par une personne pour obtenir un rendu réaliste du milieu.

Pour effectuer le rendu en temps réel de milieux participant hétérogène, certaines méthodes effectuent le pré-calcul de certains paramètres représentatifs du milieu participant hétérogène. Si ces méthodes sont parfaitement adaptés pour une utilisation en studio de post-production par exemple et fournissent un rendu de bonne qualité, ces méthodes ne sont pas adaptés dans le contexte de conception interactive et de composition de rendu en temps réel d'un milieu participant hétérogène. D'autres méthodes telle que la méthode d'échantillonnage de rayon (de l'anglais « ray-marching algorithm ») bien connue de l'homme du métier (décrite par exemple dans le document intitulé « Radiative Transfer Equation » de S. Chandrasekhar, publié en 1960 dans Dover Publications) consistent à échantillonner le milieu participant hétérogène selon une direction de diffusion et/ou une direction d'émission de la lumière pour estimer l'atténuation de la lumière en un nombre de points du milieu, le nombre de points dépendant de la précision de l'échantillonnage. Un tel échantillonnage peut être très coûteux en calculs, notamment lorsqu'il est très fin et/ou lorsque le milieu échantillonné est complexe et/ou de taille importante.

Avec l'émergence de jeux et d'applications de simulation interactifs, notamment en trois dimensions (3D), le besoin se fait sentir pour des méthodes de simulations temps réel offrant un rendu de milieux participants hétérogènes réaliste.

3. Résumé de l'invention.

L'invention a pour but de pallier au moins un de ces inconvénients de l'art antérieur.

Plus particulièrement, l'invention a notamment pour objectif d'optimiser les temps de calcul nécessaire pour composer un rendu réaliste de la diffusion de la lumière dans un milieu participant hétérogène.

L'invention concerne un procédé d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène, le procédé comprenant les étapes de :

- sélection d'au moins un niveau de subdivision spatiale du milieu parmi une pluralité de niveaux hiérarchiques de subdivision spatiale selon au moins une information d'erreur représentative d'une différence d'atténuation de la lumière dans le milieu selon au moins une direction entre deux niveaux hiérarchiques consécutifs,

- estimation de la quantité de lumière diffusée par échantillonnage dudit milieu le long d'au moins une direction de diffusion, l'échantillonnage étant fonction du au moins un niveau de subdivision spatiale sélectionné.

5 De manière avantageuse, le procédé comprend une étape d'estimation d'au moins une première valeur représentative de l'atténuation de la lumière diffusée par au moins un point du milieu situé le long de ladite au moins une direction de diffusion.

10 Selon une caractéristique particulière, le procédé comprend une étape d'estimation d'au moins une deuxième valeur représentative de l'atténuation de la lumière reçue d'au moins une source lumineuse selon au moins une direction d'émission de la lumière en le au moins un point situé le long de la au moins une direction de diffusion.

15 Avantageusement, la au moins une information d'erreur est déterminée par comparaison de deux premières valeurs, les deux premières valeurs étant estimées respectivement pour deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiques consécutifs du milieu.

20 Selon une autre caractéristique, la au moins une information d'erreur est déterminée par comparaison de deux deuxièmes valeurs, les deux deuxièmes valeurs étant estimées respectivement pour deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiques consécutifs du milieu.

Selon une caractéristique spécifique, le procédé comprend une étape de comparaison de l'information d'erreur à une valeur seuil.

25 De manière avantageuse, le niveau de subdivision spatiale sélectionné correspond au niveau de position hiérarchique la plus élevée si la au moins une information d'erreur est inférieure à la valeur seuil.

4. Liste des figures.

30 L'invention sera mieux comprise, et d'autres particularités et avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, la description faisant référence aux dessins annexés parmi lesquels :

- la figure 1 illustre schématiquement un milieu participant hétérogène diffusant de la lumière, selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- 35 - les figure 2A et 2B illustrent deux représentations d'un arbre de subdivision spatiale d'un milieu de la figure 1, selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;

- les figures 3A, 3B, 4A et 4B illustrent plusieurs niveaux de subdivision spatiale d'un milieu de la figure 1 selon une direction de diffusion de la lumière, selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 5 illustre plusieurs niveaux de subdivision spatiale d'un milieu de la figure 1 selon une direction d'émission de la lumière, selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 6 illustre un dispositif mettant en œuvre une méthode d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu de la figure 1, selon un exemple de mise en œuvre particulier de l'invention ;
- la figure 7 illustre un procédé d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu de la figure 1, selon un mode de réalisation particulier de l'invention.

5. Description détaillée de modes de réalisation de l'invention.

La **figure 1** illustre un milieu participant hétérogène 10 (de l'anglais « heterogeneous participating media »), par exemple un nuage. Un milieu participant est un milieu, composé d'une multitude de particules en suspension, qui absorbe, émet et/ou diffuse de la lumière. Dans sa forme la plus simple, un milieu participant absorbe seulement de la lumière, par exemple de la lumière reçue d'une source de lumière 11 telle que le soleil par exemple. Cela signifie que de la lumière passant au travers du milieu 10 est atténuée, l'atténuation dépendant de la densité du milieu. Le milieu étant hétérogène, c'est-à-dire que les caractéristiques physiques du milieu, telle que la densité des particules le composant par exemple, varient d'un point à un autre dans le milieu. Comme le milieu participant est composée de petites particules qui interagissent avec la lumière, la lumière incidente, c'est-à-dire reçue de la source de lumière 11 selon une direction ω_{in} 110 n'est pas seulement absorbée mais elle est également diffusée. Dans un milieu participant à diffusion isotrope, la lumière est diffusée uniformément dans toutes les directions. Dans un milieu participant à diffusion anisotrope, tel que le nuage 10 illustré en figure 1, la diffusion de la lumière dépend de l'angle entre la direction d'incidence ω_{in} 110 et la direction de diffusion ω_{out} 120 de la lumière. La quantité de lumière diffusée en un point M 13 du milieu 10 dans la direction de diffusion ω_{out} 120 est calculée par l'équation suivante :

$$Q(M, \omega_{out}) = D(M) \cdot \sigma_s \cdot p(M, \omega_{out}, \omega_{in}) \cdot L_{ri}(M, \omega_{in}) \quad \text{Equation 1}$$

La quantité de lumière diffusée par un point M 13 du milieu atteignant l'œil d'un spectateur 12 situé en un point C de l'espace dans la direction ω_{out} 120, c'est-à-dire la quantité de lumière diffusée par le point M et atténuée par le milieu 10 sur le trajet M-P, le point P étant situé à l'intersection du milieu 10 et de la direction ω_{out} dans la direction du spectateur 12, est alors :

$$L_P(M, \omega_{out}) = Q(M, \omega_{out}) \cdot \exp \int_P^M -D(s) \cdot \sigma_t \cdot ds \quad \text{Equation 2}$$

10 pour laquelle :

- σ_s est le coefficient de diffusion du milieu,
- σ_a est le coefficient d'absorption du milieu,
- $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$ est le coefficient d'extinction du milieu,
- $D(M)$ est la densité du milieu en un point donné, la densité variant d'un point à un autre puisque le milieu 10 est hétérogène,
- $p(M, \omega_{out}, \omega_{in})$ est la fonction de phase décrivant comment la lumière provenant de la direction d'incidence ω_{in} est diffusée dans la direction de diffusion ω_{out} au point M,
- $L_{ri}(M, \omega_{in})$ est l'intensité lumineuse réduite au point M provenant de la direction d'incidence ω_{in} 110 et représente la quantité de lumière incidente arrivant au point M après atténuation due au trajet de la lumière dans le milieu 10 sur le segment K-M, K étant le point d'intersection entre le milieu 10 et le rayon d'incidence ω_{in} 110, et vaut :

$$25 \quad \exp \int_M^K -D(s) \sigma_t ds \quad \text{Equation 3}$$

- $\exp \int_P^M -D(s) \sigma_t ds$ représente l'atténuation de luminance diffusée due à l'absorption et à la diffusion le long du chemin allant de P 15 à M 13.

30 L'équation 2 permet de calculer la quantité de lumière diffusée par un point M et atteignant l'œil d'un spectateur 12 situé sur la direction ω_{out} . Pour calculer la quantité de lumière reçue par un spectateur regardant dans la direction ω_{out} , il faut alors effectuer la somme de toutes les contributions de l'ensemble des points du milieu situés sur l'axe ω_{out} , c'est-à-dire les points situés sur le segment P-M_{max}, P et M_{max} étant les deux points d'intersection
35 entre le milieu 10 et la direction ω_{out} 120. Cette luminance diffusée totale

arrivant en P 15 depuis la direction ω_{out} 120 due à la diffusion simple est alors :

$$L(P, \omega_{out}) = \int_P^{M_{max}} L_P(M, \omega_{out}) dM \quad \text{Equation 4}$$

5

On suppose ici que la lumière parcourant le trajet C-P n'est pas atténuée, la lumière n'étant pas atténuée à l'extérieur du milieu 10.

Cette luminance diffusée totale est obtenue par intégration des contributions de tous les points situés entre P et M_{max} sur un rayon ayant ω_{out} comme direction. Une telle équation intégrale ne peut pas être résolue de manière analytique dans le cas général et encore moins pour une estimation en temps réel de la quantité de lumière diffusée. L'intégrale est évaluée numériquement en utilisant la méthode dite d'échantillonnage de rayon ou de suivi de rayon (de l'anglais « ray-marching »). Dans cette méthode, le domaine d'intégration est discrétisé en une multitude d'intervalles de taille δ_M , pour lesquels la densité varie d'un intervalle à un autre, et on obtient l'équation suivante :

20

$$L(P, \omega_{out}) \approx \sum_P^{M_{max}} L_P(M, \omega_{out}) \delta_M \quad \text{Equation 5}$$

De manière similaire, l'atténuation de la lumière issue d'une source de lumière 11 dans le milieu participant hétérogène 10 est avantageusement calculée par application de la méthode d'échantillonnage de rayon. Ainsi, l'atténuation de l'intensité lumineuse au point M $Att_L(M)$ 13 représentant la quantité de lumière incidente arrivant au point M après atténuation est représentée par l'équation suivante, équivalente à l'équation 3 :

$$Att_L(M) = \exp \int_K^M -D(s) \sigma_t ds \quad \text{Equation 6}$$

Pour estimer l'atténuation de la lumière au point M selon la méthode d'échantillonnage de rayon, le domaine d'intégration situé sur la direction d'incidence 110 considérée entre le point d'entrée K 14 du rayon lumineux 110 dans le milieu 10 et un point M 13 considéré du milieu 10 est discrétisé en une série d'intervalles de taille δ_s . Par ailleurs, la densité varie également d'un point à un autre (ou autrement dit d'un intervalle δ_s à un autre) le long de la direction d'incidence (dite aussi direction d'émission de la lumière). On obtient alors l'équation suivante :

35

$$Att_L(M) \approx \prod_K^M \exp^{-D(s) \sigma_t \delta_s} \quad \text{Equation 7}$$

De manière avantageuse, le milieu participant hétérogène 10 est un élément à trois dimensions, représenté en deux dimensions sur la figure 1 pour des raisons de clarté.

5 Selon une variante, le milieu 10 est éclairé par une pluralité de sources lumineuses, par exemple 1000, 10000, 100000 ou 1000000 sources lumineuses, les sources lumineuses formant un environnement lumineux. L'estimation de la lumière provenant de plusieurs sources lumineuses distantes est réalisée en utilisant la méthode de carte d'environnement (de
10 l'anglais « environment mapping ») bien connue de l'homme du métier. Selon la méthode dite de carte d'environnement, on considère que toutes les sources lumineuses de l'environnement lumineux sont situées à l'infini optique par rapport aux points du milieu 10. Il est ainsi possible de considérer que les directions prises par la lumière émise par différentes sources
15 lumineuses sont identiques quels que soient les points considérés du milieu. L'effet de parallaxe dû à la distance séparant différents points du milieu 10 est ainsi négligé. Selon cette variante, pour estimer l'atténuation de la lumière incidente en un point M, il est nécessaire de calculer l'atténuation de la lumière via l'équation 7 pour un ensemble de directions d'incidence
20 représentatif de l'environnement lumineux, ce qui augmente significativement les calculs.

 Selon une autre variante, les caractéristiques physiques du milieu 10, telles que le coefficient de diffusion σ_s du milieu et/ou le coefficient d'absorption σ_a du milieu, varient également d'un point à un autre dans le
25 milieu 10, tout comme la densité. Selon une variante supplémentaire, seul l'un des deux ou les deux coefficients σ_s et σ_a varient dans le milieu, la densité étant homogène dans le milieu.

 Les **figures 2A et 2B** illustrent un arbre de subdivisions spatiales
30 du milieu 10 selon deux modes de représentation différents, selon un mode de réalisation particulier de l'invention.

 Pour des raisons de clarté et de simplicité, le milieu 10 est représenté par une forme géométrique simple 2 (dite milieu 2 dans la description des figures 2A et 2B) à deux dimensions telle qu'un carré ou un
35 rectangle sur la **figure 2A**. La surface du milieu 2 est subdivisée de manière hiérarchique en cellules de taille identiques pour former une structure de type « arbre quaternaire » (de l'anglais « quadtree »). Les points du milieu 2

appartenant à une même cellule ont des caractéristiques physiques identiques, par exemple la densité du milieu est la même en chaque point du milieu 2 d'une même cellule. Les caractéristiques physiques varient avantageusement d'une cellule à une autre. Selon une variante, les caractéristiques physiques de certaines cellules du milieu 2 présentent des caractéristiques physiques identiques, le milieu 2 restant globalement hétérogène, c'est-à-dire qu'au moins deux cellules présentent des caractéristiques physiques différentes. Le niveau hiérarchique le plus élevé est représenté par une seule cellule [1] formant le premier niveau 21 de subdivision spatiale du milieu 2, cette unique cellule ayant la même surface que celle du milieu 2. Le niveau hiérarchique immédiatement inférieur au premier niveau (dit deuxième niveau 22 de subdivision spatiale du milieu 2) est représenté par quatre cellules [2], [3], [4] et [5] de taille identique correspondant au quart de la taille de la cellule [1]. Le troisième niveau 23 de subdivision spatiale du milieu 2, de niveau hiérarchique inférieur et suivant le deuxième niveau 22, est représenté par 16 cellules de tailles identiques, par exemple les cellules [6] à [17]. La taille de chacune des cellules [6] à [17] correspond au quart de la taille des cellules [2] à [5], chaque cellule [2] à [5] ayant été respectivement divisée en quatre cellules ayant une taille identique. Le quatrième niveau 24 de subdivision spatiale du milieu 2, de niveau hiérarchique inférieur à et suivant le troisième niveau 23, est représenté par 64 cellules de tailles identiques, par exemple les cellules [18] à [25]. La taille de chacune des cellules [18] à [25] correspond au quart de la taille des cellules [6] à [17], chaque cellule du troisième niveau 23 [6] à [17] ayant été respectivement divisée en quatre cellules de taille identique. Pour généraliser cette structure, pour former un niveau Y de représentation spatiale directement inférieur au niveau X, cela revient à multiplier par quatre le nombre de cellules du niveau X pour obtenir le nombre de cellules formant le niveau Y.

Cette hiérarchie des niveaux apparaît de manière plus évidente en regard de la **figure 2B** dans laquelle les niveaux hiérarchiques de subdivisions spatiales apparaissent sous la forme d'une arborescence, les cellules formant des nœuds de l'arbre. Le premier niveau 21 de subdivision spatiale du milieu 2 comprend une unique cellule [1]. Le deuxième niveau 22 de subdivision spatiale du milieu 2 (de position hiérarchiquement inférieure au premier niveau) comprend quatre fois plus de cellules que le premier niveau, soit 4 cellules [2] à [5]. Le troisième niveau 23 de subdivision spatiale

du milieu 2 (de position hiérarchiquement inférieure au deuxième niveau) comprend quatre fois plus de cellule que le deuxième niveau, soit 16 cellules [6] à [17]. Le quatrième niveau 24 de subdivision spatiale du milieu 2 (de position hiérarchiquement inférieure au troisième niveau) comprend quatre fois plus de cellule que le troisième niveau, soit 64 cellules [18] à [25], les cellules [18] à [21] correspondant par exemple à une subdivision de la cellule [12] du troisième niveau et les cellules [22] à [25] correspondant par exemple à une subdivision de la cellule [15] du troisième niveau. Un cinquième niveau de représentation spatiale du milieu 2 (non représentée sur les figures 2A et 2B) contiendrait ainsi quatre fois plus de cellules que le quatrième niveau, un sixième niveau de représentation spatiale du milieu 2 (non représentée sur les figures 2A et 2B) contiendrait ainsi quatre fois plus de cellules que le cinquième niveau et ainsi de suite.

Lorsque le milieu participant hétérogène 10 est un élément à trois dimensions, le milieu 2 est lui aussi un élément à trois dimensions et le milieu est subdivisé de manière hiérarchique en cellules de dimensions et donc de volume identiques pour former une structure de type « arbre octal » (de l'anglais « octree »). Les cellules de dimensions (et de volume) identiques formant le milieu 2 sont avantageusement appelées « voxels », un « voxel » correspondant à un élément de volume. Dans le cas d'un milieu 2 à trois dimensions, le premier niveau de subdivision spatiale (de position hiérarchique la plus élevée) comprend un unique « voxel » dont le volume est égal au volume du milieu 2. Le deuxième niveau de subdivision spatiale comprend 8 « voxels » de dimensions (et de volume) identiques ; le troisième niveau de subdivision spatiale en comprend 8 fois plus, soit 64 voxels ; le quatrième niveau de subdivision spatiale comprend 8 fois plus de « voxels » que le deuxième niveau, soit 512 volumes et ainsi de suite. Les points d'un même « voxel » possèdent des caractéristiques physiques identiques, c'est-à-dire qu'ils présentent le même coefficient d'absorption, le même coefficient de diffusion et la même densité, le volume à l'intérieur d'un « voxel » étant par conséquent homogène. De manière avantageuse, les caractéristiques physiques de points appartenant à un premier « voxel » sont différentes des caractéristiques physiques des points appartenant à un « voxel » voisin du premier « voxel », par exemple les points du premier « voxel » présentent une densité D_1 différente des points des « voxels » voisins. Selon une variante, les « voxels » du milieu 2 présentent des caractéristiques différentes les uns des autres. Selon une autre variante, certains « voxels »

du milieu 2 présentent des caractéristiques physiques identiques. Le milieu 2 reste globalement hétérogène, même si certains des « voxels » qui le composent présentent des caractéristiques physiques, par exemple une densité D_i , identiques.

5 Dans le reste de la description, le terme « voxel » sera utilisé pour désigner un élément de subdivision spatiale du milieu 2, même si l'élément de subdivision spatiale est représenté par une cellule en deux dimensions pour des raisons de clarté des figures. Pour un élément à deux dimensions, le terme cellule sera à substituer au terme « voxel », le raisonnement décrit
10 s'appliquant de manière identique à une cellule et à un « voxel ». Les valeurs de densité sont tout d'abord calculées selon toute méthode connue de l'homme du métier, par exemple à l'aide d'un logiciel de simulation de dynamique des fluides ou par une personne souhaitant créer un effet ou un rendu particulier pour le milieu 10, en tout point du milieu 10 pour représenter
15 le milieu 10, cette valeur de densité étant appelée densité initiale d'un point. La valeur de densité assignée aux points appartenant à un « voxel » est ensuite calculée pour correspondre à la moyenne des densités initiales précédemment calculées de chacun des points constituant le « voxel ». Par exemple, pour le premier niveau de subdivision spatiale (le plus élevé
20 hiérarchiquement) dans lequel il n'y a qu'un seul « voxel », la valeur de densité assignée à tous les points du « voxel » correspond à la valeur moyenne des densités initiales du milieu 2. Pour le deuxième niveau dans lequel le milieu 2 est subdivisé en 8 « voxels », la moyenne de la densité des points est calculée en faisant la moyenne des densités initiales des points appartenant à un « voxel », cette valeur moyenne est assignée à tous les
25 points du « voxel » considéré et l'opération est répétée pour les sept autres « voxels ». Le même raisonnement est appliqué pour chaque niveau de subdivision spatiale du milieu 2.

Faire la moyenne de la densité initiale des points d'un « voxel »
30 pour assigner cette valeur moyenne à tous les points formant un « voxel » revient à introduire une erreur d'estimation de densité, l'erreur étant d'autant plus importante que la subdivision spatiale du milieu 2 est grossière, c'est-à-dire que l'erreur est d'autant plus grande que le nombre de « voxels » formant le milieu 2 est faible. L'erreur d'estimation de densité entre deux
35 niveaux de subdivision spatiale hiérarchiquement consécutifs est calculée en utilisant par exemple la formule suivante :

$$D_{err} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (|D_{n+1,i} - D_n|) \quad \text{Equation 8}$$

où D_{err} représente l'erreur d'estimation de densité d'un niveau hiérarchique n par rapport au niveau hiérarchique inférieur ($n+1$),

$D_{n+1,i}$ représente la densité moyenne des points d'un « voxel » i d'un niveau hiérarchique ($n+1$) directement inférieur au niveau hiérarchique n ,

D_n représente la densité moyenne des points du « voxel » représenté par un nœud d'un niveau n de subdivision spatiale qui se décompose en 8 « voxels » au niveau inférieur ($n+1$).

Pour rappel, l'atténuation de la lumière traversant un « voxel » est donnée par la formule suivante :

$$Att = \exp \int_{x=x_{min}}^{x=x_{max}} -\sigma_t D(x) dx \quad \text{Equation 9}$$

où x_{min} et x_{max} correspondent respectivement au premier point et au deuxième point d'intersection d'une direction (de diffusion ou d'émission de la lumière) avec le « voxel » considéré du niveau de subdivision spatiale n ,

D représente la densité.

En considérant l'erreur de densité calculée par la formule 8 par exemple, on en déduit les limites inférieure et supérieure de l'atténuation dans un « voxel » :

$$Att_{min} = \exp \int_{x=x_{min}}^{x_{max}} -\sigma_t D(x) (1 - D_{err}) dx \quad \text{Equation 10}$$

$$Att_{max} = \exp \int_{x=x_{min}}^{x_{max}} -\sigma_t D(x) (1 + D_{err}) dx \quad \text{Equation 11}$$

Les **figures 3A, 3B, 4A et 4B** illustrent plusieurs niveaux de subdivision spatiale d'un milieu 10 de la figure 1 selon une direction de diffusion de la lumière, selon un mode de réalisation particulier de l'invention. Les figures 3A, 3B, 4A et 4B illustrent également une méthode de sélection d'un niveau de subdivision spatiale du milieu 2 (représentant le milieu 10 selon une forme géométrique simple) le long d'une direction de diffusion de la lumière ω_{out} 120, selon un mode de réalisation particulier de l'invention.

La **figure 3A** est une représentation en deux dimensions du niveau de subdivision spatiale le plus bas du milieu 2, correspondant par exemple au niveau 24 ou à un niveau inférieur représenté sur la figure 2B. Le milieu 2 est composé de n « voxels » 30001 à 30001. Les « voxels » traversés par la direction de diffusion de la lumière ω_{out} 120, par exemple les « voxels » 30225 et 30064, apparaissent en grisé sur la figure 3A. La partie de la droite représentant la direction de diffusion de la lumière ω_{out} traversant

le milieu 2 est échantillonnée en un ensemble de m points M_0 31, M_1 32, M_2 33 ... M_i 34 ... M_m 35 pour l'estimation de l'atténuation de la lumière le long de cette direction de diffusion en utilisant la méthode dite d'échantillonnage de rayon.

5 La **figure 3B** est une représentation en deux dimensions du niveau de subdivision spatiale hiérarchiquement immédiatement supérieur au niveau de subdivision spatiale représenté sur la figure 3A, par exemple le niveau 23 si la figure 2A représente le niveau 24. Le milieu 2 ainsi représenté comprend p « voxels » 3001 à 30 p , chaque « voxel » de la figure 2B
10 correspondant à la fusion de 8 « voxels » de la figure 2A, ces 8 « voxels » étant reliés au « voxel » hiérarchiquement supérieur dans l'arbre octal représentant la structure arborescente des niveaux de subdivision spatiale du milieu 2. Les « voxels » traversés par la direction de diffusion ω_{out} 120, par exemple les « voxels » 3049 et 3016, apparaissent également grisés.
15 Les éléments communs aux figures 3A et 3B possèdent les mêmes signes de référence, par exemple l'ensemble de m points M_0 31, M_1 32, M_2 33 ... M_i 34 ... M_m 35 formant l'échantillonnage de la direction ω_{out} 120.

 Pour choisir le niveau de subdivision spatiale formant le meilleur compromis vitesse de calcul/justesse de l'estimation de la quantité de
20 lumière diffusée, c'est-à-dire le niveau de subdivision spatiale le plus élevé hiérarchiquement pour lequel l'erreur induite pour l'estimation de la quantité de lumière diffusée est acceptable en terme de rendu (c'est-à-dire par exemple non visible pour l'œil humain), la quantité de lumière diffusée par le point M_0 31 est estimée dans un premier temps en utilisant la méthode
25 décrite en regard de la figure 1, c'est-à-dire en calculant l'atténuation de la lumière incidente au point M_0 , avec le niveau de subdivision spatiale le plus bas hiérarchiquement, c'est à dire celui décrit en regard de la figure 2A. Cette valeur calculée forme la première valeur de référence de quantité de lumière diffusée. Dans un deuxième temps, la quantité de lumière diffusée
30 par le point M_1 32 est calculée selon la même méthode (après calcul de l'atténuation de la lumière incidente au point M_1) avec le niveau de subdivision spatiale le plus bas hiérarchiquement. On calcule alors à partir de cette valeur l'atténuation de la lumière entre M_1 et M_0 pour estimer la quantité de lumière diffusée totale par M_1 et M_0 au point M_0 , la valeur d'atténuation
35 dépendant de la densité et donc des « voxels » traversés, selon les équations 6 et 9. Dans un troisième temps, la quantité de lumière diffusée par le point M_1 32 est calculée selon la même méthode avec le niveau de

subdivision spatiale hiérarchiquement immédiatement supérieur au niveau le plus bas, c'est-à-dire le niveau représenté en regard de la figure 2B. On calcule alors à partir de cette valeur l'atténuation de la lumière entre M_1 et M_0 pour estimer la quantité de lumière diffusée totale par M_1 et M_0 au point M_0 ,
5 cette valeur d'atténuation étant différente de celle calculée en deuxième temps puisque les « voxels » traversés entre M_0 et M_1 ne sont pas les mêmes d'un niveau de subdivision spatiale au niveau de subdivision spatiale consécutif hiérarchiquement supérieur. En comparant les valeurs de quantité de lumière totale diffusée par les points M_1 et M_0 au point M_0 pour les deux
10 niveaux de subdivisions spatiales consécutifs, on obtient une valeur représentative d'une erreur liée à la différence de représentation du milieu 2 (c'est-à-dire par des niveaux de subdivision spatiale consécutifs différents). Cette valeur représentative de l'erreur est enfin comparée à une valeur seuil, cette valeur seuil étant par exemple représentative d'un défaut admissible
15 car non visible pour l'œil humain. Si l'erreur est inférieure à la valeur seuil, cela signifie que l'on choisit le niveau de subdivision spatiale le plus élevé car il est induit peu d'erreur pour l'estimation de la quantité de lumière diffusée tout en réduisant les calculs, les « voxels » étant de taille plus importante et la densité variant donc moins souvent dans le milieu 2, ce qui réduit les
20 calculs d'atténuation de la lumière dont la complexité dépend directement de la variation de la densité.

Si l'erreur est supérieure à la valeur seuil, cela signifie que l'on sélectionne le niveau de subdivision spatiale de plus bas niveau, c'est à dire avec le plus de « voxels », car cela signifie que le niveau hiérarchiquement
25 plus élevé entraîne une erreur trop importante, par exemple visible par l'œil humain. Les mêmes calculs sont alors effectués pour le point suivant M_2 33. La quantité de lumière diffusée par le point M_2 est calculée pour le niveau de subdivision spatiale le plus bas, puis l'atténuation de la lumière sur le chemin M_2M_0 est calculée pour estimer la quantité de lumière diffusée par M_2 au point M_0 pour le niveau de subdivision spatiale le plus bas. La valeur de
30 référence à laquelle la quantité de lumière diffusée par M_2 au point M_0 est comparée est la quantité de lumière diffusée par les points situés en amont de M_2 sur la direction 120, à savoir les points M_0 et M_1 . Puis la quantité de lumière diffusée par M_2 au point M_0 est estimée de la même manière pour le
35 niveau de subdivision spatiale hiérarchiquement directement supérieur, à savoir celui représenté en figure 2B. Cette quantité de lumière est à son tour comparée à la référence constituée par la quantité de lumière diffusée par

les points M_0 et M_1 pour le niveau de subdivision spatiale le plus bas, à savoir celui de la figure 2A. En comparant la quantité de lumière diffusée par M_2 à la quantité de lumière diffusée par M_0 et M_1 pour deux niveaux de subdivision spatiale consécutifs, une erreur d'estimation représentative d'une

5 différence d'atténuation estimée pour chacun des deux niveaux est déterminée. Si cette erreur est inférieure à la valeur seuil, cela signifie que le niveau de subdivision le plus élevé est suffisant pour une bonne estimation. Sinon, si cette erreur est supérieure à la valeur seuil, le niveau de subdivision le plus élevé est insuffisant et il convient de conserver le niveau de

10 subdivision le plus fin, à savoir le moins élevé des deux hiérarchiquement et les mêmes opérations sont à effectuer pour le point suivant M_i 34. Si le niveau de subdivision le moins fin est suffisant pour M_i , alors il est suffisant pour tous les points situés en aval de M_i sur la direction de diffusion jusqu'à M_m . En effet, plus on s'enfonce dans le milieu 2, plus l'atténuation de la

15 lumière diffusée par les points est importante et moins la quantité de lumière diffusée par ces points est importante par rapport à la quantité de lumière totale diffusée en M_0 . Si l'erreur est admissible pour un point M_i , elle est donc aussi a fortiori admissible pour un point M_{i+1} situé en aval vers M_m . Ceci est représenté en **figure 4B** dans laquelle on voit que pour les points M_0 à M_2 ,

20 le niveau hiérarchique le plus bas est sélectionné alors que pour les points suivants des niveaux hiérarchiques plus élevés sont choisis. Si pour M_i le niveau hiérarchiquement immédiatement supérieur au niveau le plus bas est suffisant pour obtenir une estimation de quantité de lumière diffusée avec une marge d'erreur acceptable, la question se pose de savoir si le niveau

25 consécutif hiérarchiquement plus élevé est lui aussi suffisant. C'est ce qui est illustré par la **figure 4A**. Pour les points M_i 34 puis M_{i+1} 36 puis M_{i+2} 37 puis M_{i+3} 38, la quantité de lumière diffusée par le point considéré au point M_0 pour le niveau de subdivision représentée en figure 3B est comparée à la quantité de lumière diffusée par les points situés en amont avec le niveau de

30 subdivision sélectionné pour ces points. Puis pour ces mêmes points, l'un après l'autre, la quantité de lumière diffusée par ces points au point M_0 pour un niveau de subdivision consécutif plus élevé, par exemple le niveau 22 (si le niveau 23 est représenté en figure 2B) est elle aussi comparée à la même valeur de référence représentant la quantité de lumière diffusée au point M_0

35 par les points amonts. Une information d'erreur représentative de la différence d'atténuation de la lumière entre les deux niveaux de subdivision consécutifs en est déduite. Pour les points pour lesquels cette erreur est

supérieure à une valeur seuil, cela signifie que le niveau de subdivision le plus élevé des deux est insuffisant pour une estimation correcte de la quantité de lumière diffusée. Lorsque pour un point cette erreur est inférieure à une valeur seuil, alors en ce point le niveau de subdivision le plus élevé est
5 suffisant et il sera sélectionné car moins coûteux en terme de puissance et/ou temps de calcul nécessaire pour l'estimation de l'atténuation de la lumière, les variations de densité d'un point à un autre étant moins nombreuses que pour un niveau de subdivision de plus bas niveau hiérarchiquement. Pour les points suivant ce dernier point (c'est-à-dire le
10 premier point pour lequel l'erreur est inférieure à la valeur seuil), le niveau de subdivision le plus élevé sera également suffisant et il se pose alors la question de savoir si un niveau de subdivision hiérarchiquement plus élevé ne serait pas lui aussi suffisant, et ce jusqu'à arriver au point M_m 35 en limite du milieu 2 sur la direction ω_{out} 120.

15 On arrive de cette façon à la représentation de la figure 4B où le niveau de subdivision spatiale est d'autant plus élevé hiérarchiquement que l'on s'enfonce dans le milieu 2 le long de la direction ω_{out} 120 en allant vers M_m 35. Le meilleur compromis entre puissance de calcul nécessaire et qualité de l'estimation de la quantité de lumière diffusée le long d'une
20 direction de diffusion est ainsi trouvé.

La **figure 5** illustre le milieu 2 représentatif du milieu participant hétérogène 10 avec plusieurs niveaux de subdivision spatiale le long d'une direction de lumière incidente ω_{in} 110, selon un mode de réalisation
25 particulier de l'invention. Comme cela a été décrit en regard des figures 3A, 3B, 4A et 4B, la quantité de lumière émise par le milieu 2 le long de la direction de diffusion (dite également direction d'observation) ω_{out} 120 est réalisée en utilisant la méthode dite d'échantillonnage de rayon. Pour calculer la quantité de lumière diffusée par un point de la direction de
30 diffusion ω_{out} 120, par exemple le point M_i 34, il est nécessaire au préalable d'estimer l'atténuation de la lumière incidente en ce point M_i 34. L'estimation de l'atténuation de la lumière incidente en un point M_i est également réalisée en utilisant la méthode d'échantillonnage de rayon et le même raisonnement que celui décrit en regard des figures 3A, 3B, 4A et 4B est appliqué pour
35 sélectionner les niveaux de subdivision spatiale optimaux le long de la direction de lumière incidente ω_{in} 110. Dans un premier temps, le niveau de subdivision spatial le plus fin, c'est-à-dire le plus bas hiérarchiquement, est

appliqué au milieu 2 le long de la direction ω_{in} 110 et l'atténuation de la lumière au point M_i le long de la direction ω_{in} 110 est estimée en utilisant la méthode d'échantillonnage de rayon telle que décrite en regard de la figure 1. Cette valeur d'atténuation représente une première valeur de référence.

5 Puis l'atténuation de la lumière au point N_0 est estimée pour le niveau de subdivision spatiale le plus bas hiérarchiquement puis pour le niveau directement supérieur au niveau le plus bas. Ces valeurs sont comparées à la valeur de référence, c'est-à-dire que l'on extrait de ces valeurs la part qu'elles représentent dans l'atténuation totale au point M_i , et l'erreur

10 d'estimation de l'atténuation au point N_0 en est déduite. Si cette erreur est inférieure à une deuxième valeur seuil, alors le niveau de subdivision spatiale le plus élevé des deux (c'est-à-dire avec le moins de « voxels ») est considéré comme étant suffisant pour une estimation de l'atténuation de la lumière de bonne qualité. Si cette erreur est supérieure à la deuxième valeur

15 seuil, alors le niveau de subdivision spatiale le plus élevé n'est pas sélectionné car entraînant une estimation trop approximative de l'atténuation au point N_0 . Les mêmes opérations sont alors réalisées successivement sur le point N_1 puis N_2 puis N_i jusqu'à arriver au point N_i pour lequel le niveau de subdivision spatiale le plus élevé des deux est suffisant car entraînant une

20 erreur d'estimation de l'atténuation en ce point (ou plus précisément la part de l'atténuation en ce point par rapport à l'atténuation totale au point M_i) inférieure à la deuxième valeur seuil lorsqu'elle est comparée à une estimation faite pour une subdivision spatiale plus fine. Pour les points N_0 à N_2 , la subdivision spatiale de plus bas niveau est sélectionnée et pour les

25 points N_i et suivant, jusqu'à M_i , l'atténuation de la lumière incidente est de nouveau estimée pour deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiquement consécutifs en remontant dans l'arbre octal de représentation des niveaux de subdivision spatiale pour déterminer quel est le niveau de subdivision spatiale offrant le meilleur compromis entre

30 diminution des calculs nécessaires et exactitude de l'estimation de l'atténuation de la lumière incidente par comparaison avec une deuxième valeur seuil. On arrive finalement à appliquer un niveau de subdivision spatiale le plus fin pour les premiers points de la direction d'incidence N_0 à N_2 , puis un deuxième niveau de subdivision spatiale directement supérieur

35 au niveau le plus bas d'un point de vue hiérarchique pour les points suivants, à savoir les points N_i et N_{i+1} , puis un troisième niveau de subdivision spatiale

directement supérieur au deuxième niveau pour les points suivants le point N_{i+1} jusqu'au point M_i .

La sélection de plusieurs niveaux de subdivision spatiale le long de la direction de lumière incidente ω_{in} 110 offre l'avantage de conserver une estimation de l'atténuation totale de la lumière au point M_i avec une erreur minimale, inférieur à une troisième valeur seuil par exemple, tout en minimisant les calculs en diminuant de façon optimale le nombre de « voxels » traversés par le rayon incident ω_{in} 110, ce qui revient à réduire le nombre de points pour lesquels la densité varie, la complexité des calculs étant directement liée aux variations de densité d'un point à un autre.

De manière avantageuse, le milieu 2 est éclairé par plus d'une source lumineuse 11. Chaque point M_i de la direction de diffusion ω_{out} 120 reçoit ainsi plusieurs rayons incidents et la quantité de lumière reçue par le point M_i correspond à la somme des quantités de lumière incidente élémentaires reçues (c'est-à-dire pour chaque rayon de lumière incidente). Pour estimer l'atténuation de la lumière au point M_i , les opérations décrites ci-dessus sont réitérées pour chaque direction de lumière incidente.

La **figure 6** illustre schématiquement un exemple de réalisation matérielle d'un dispositif 6 adapté à l'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène 10 et à la création de signaux d'affichage d'une ou plusieurs images. Le dispositif 6 correspondant par exemple à un ordinateur personnel PC, à un ordinateur portable (de l'anglais « laptop ») ou à une console de jeux.

Le dispositif 6 comprend les éléments suivants, reliés entre eux par un bus 65 d'adresses et de données qui transporte également un signal d'horloge :

- un microprocesseur 61 (ou CPU) ;
- une carte graphique 62 comprenant :
 - plusieurs processeurs de traitement graphique 620 (ou GPUs) ;
 - une mémoire vive de type GRAM (de l'anglais « Graphical Random Access Memory ») 621 ;
- une mémoire non volatile de type ROM (de l'anglais « Read Only Memory ») 66 ;
- une mémoire vive ou RAM (de l'anglais « Random Access Memory ») 67 ;

- un ou plusieurs dispositifs I/O (de l'anglais « Input/Output » ou en français « Entrée/Sortie ») 64, tels que par exemple un clavier, une souris, une webcam ; et
- une alimentation 68.

5 Le dispositif 6 comprend également un dispositif d'affichage 63 de type écran d'affichage relié directement à la carte graphique 62 pour afficher notamment le rendu d'images de synthèse calculées et composées dans la carte graphique, par exemple en temps réel. L'utilisation d'un bus dédié pour relier le dispositif d'affichage 63 à la carte graphique 62 offre l'avantage
10 d'avoir des débits de transmission de données beaucoup plus important et ainsi de diminuer le temps de latence pour l'affichage d'images composées par la carte graphique. Selon une variante, un appareil pour afficher est externe au dispositif 6 et est relié au dispositif 6 par un câble transmettant les signaux d'affichage. Le dispositif 6, par exemple la carte graphique 62,
15 comprend un moyen de transmission ou connecteur (non représenté sur la figure 6) adapté à transmettre un signal d'affichage à un moyen d'affichage externe tel que par exemple un écran LCD ou plasma, un vidéoprojecteur.

On observe que le mot « registre » utilisé dans la description des mémoires 62, 66 et 67 désigne dans chacune des mémoires mentionnées,
20 aussi bien une zone de mémoire de faible capacité (quelques données binaires) qu'une zone mémoire de grande capacité (permettant de stocker un programme entier ou tout ou partie des données représentatives de données calculées ou à afficher).

A la mise sous tension, le microprocesseur 61 charge et exécute
25 les instructions du programme contenu dans la RAM 67.

La mémoire vive 67 comprend notamment :

- dans un registre 670, le programme de fonctionnement du microprocesseur 61 chargé à la mise sous tension du dispositif 6 ;
- 30 - des paramètres 671 représentatifs du milieu participant hétérogène 10 (par exemple paramètres de densité, de coefficients d'absorption de la lumière, de coefficients de diffusion de la lumière).

Les algorithmes mettant en œuvre les étapes du procédé propres
35 à l'invention et décrits ci-après sont stockés dans la mémoire GRAM 67 de la carte graphique 62 associée au dispositif 6 mettant en œuvre ces étapes. A la mise sous tension et une fois les paramètres 670 représentatifs du milieu

chargés en RAM 67, les processeurs graphiques 620 de la carte graphique 62 chargent ces paramètres en GRAM 621 et exécutent les instructions de ces algorithmes sous la forme de microprogrammes du type « shader » utilisant le langage HLSL (de l'anglais « High Level Shader Language » ou en français « Langage de programmation « shader » de haut niveau »), le langage GLSL (de l'anglais « OpenGL Shading language » ou en français « Langage de shaders OpenGL ») par exemple.

La mémoire vive GRAM 621 comprend notamment :

- dans un registre 6210, les paramètres représentatifs du milieu 10 ;
- des paramètres de subdivision spatiale 6211 représentatifs des différents niveaux de subdivision spatiale du milieu 2 ;
- des valeurs d'atténuation d'intensité lumineuse 6212 pour un ensemble de points du milieu 2, 10 ;
- des informations d'erreur 6213 représentatives de différence d'atténuation de lumière entre deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiquement consécutifs ; et
- une ou plusieurs valeurs seuils 6214.

Selon une variante, une partie de la RAM 67 est allouée par le CPU 61 pour stocker les paramètres 6211, les valeurs 6212 et 6214 et les informations d'erreur 6213 si l'espace mémoire disponible en GRAM 621 est insuffisant. Cette variante entraîne cependant des temps de latence plus importants dans la composition d'une image comprenant une représentation du milieu 2, 10 composée à partir des microprogrammes contenus dans les GPUs puisque les données doivent être transmises de la carte graphique à la mémoire vive 67 en passant par le bus 65 dont les capacités de transmission sont généralement inférieures à celles disponibles dans la carte graphique pour faire passer les données des GPUs à la GRAM et vice-versa.

Selon une autre variante, l'alimentation 68 est externe au dispositif 6.

La **figure 7** illustre un procédé d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène 10 mis en œuvre dans un dispositif 6, selon un exemple de mise en œuvre non limitatif particulièrement avantageux de l'invention.

Au cours d'une étape d'initialisation 70, les différents paramètres du dispositif 6 sont mis à jour. En particulier, les paramètres représentatifs du milieu participant hétérogène 10 sont initialisés d'une manière quelconque.

Ensuite, au cours d'une étape 71, un ou plusieurs niveaux de subdivision spatiale du milieu 2 représentant le milieu 10 sont sélectionnés le long d'une ou plusieurs directions de diffusion ω_{out} 120 (dites également directions d'observation) et/ou le long d'une ou plusieurs directions de lumière incidente (dites également direction d'émission de la lumière) ω_{in} 110. Ce ou ces niveaux de subdivision sont sélectionnés parmi une pluralité de niveaux de subdivision spatiale 21 à 24 ordonnés hiérarchiquement dans un arbre octal (ou un arbre quaternaire pour un milieu 2 à deux dimensions) en fonction d'une ou plusieurs informations d'erreur représentatives d'une différence d'atténuation de la lumière dans le milieu 2 entre deux niveaux de subdivision spatiale consécutifs hiérarchiquement. Le long d'une direction de diffusion de la lumière ω_{out} , une valeur représentative de l'atténuation de la lumière diffusée par le point d'intersection entre le milieu 2 et la direction ω_{out} est estimée pour le niveau de subdivision spatiale du milieu 2 le plus bas hiérarchiquement (c'est-à-dire le niveau de représentation le plus fin du milieu, c'est-à-dire celui comprenant le plus grand nombre de « voxels »), cette valeur servant de valeur de référence. Puis une première valeur représentative de l'atténuation de la lumière diffusée par le premier point d'un ensemble de points de la direction, cet ensemble de point correspondant à un échantillonnage de la direction de diffusion réalisée pour l'application de la méthode d'échantillonnage de rayon (de l'anglais « ray-marching process »), est estimée pour le niveau de subdivision spatiale le plus bas. Puis, pour le même premier point, une autre estimation d'une valeur représentative de l'atténuation de lumière diffusée est estimée pour le niveau de subdivision spatiale hiérarchiquement directement supérieur au niveau le plus bas. Ces deux premières valeurs sont comparées à la valeur de référence pour déterminer la part (de chacune de ces deux premières valeurs) de l'atténuation de la lumière de ce premier point dans l'atténuation totale au point d'intersection du milieu et de la direction ω_{out} . En comparant ces deux parts dans la totalité de l'atténuation de la lumière diffusée, il est ainsi possible d'en déduire une information d'erreur représentant l'erreur induite par le niveau de subdivision spatiale le plus élevé des deux (le moins fin des deux car comprenant moins de « voxels ») dans le calcul de l'atténuation de la lumière diffusée. En fonction de cette erreur, le niveau de

subdivision spatiale adaptée, c'est-à-dire induisant une erreur admissible, par exemple non visible pour l'œil humain, pour le premier point est sélectionné. Ces opérations sont répétées point par point pour chaque point d'échantillonnage de la direction de diffusion en s'enfonçant dans le milieu 2 dans la direction d'observation. Si pour un point donné le niveau de subdivision spatiale le plus élevé des deux est suffisant, alors le niveau est jugé suffisant pour tous les points suivants. A partir de ce point donné, l'atténuation est estimée pour le niveau directement supérieur au niveau le plus bas et pour le niveau directement supérieur à ce dernier pour estimer l'erreur qui serait induite par le niveau le plus élevé. Ces opérations sont répétées pour tous les points d'échantillonnage de la direction d'observation ω_{out} jusqu'à atteindre la limite de fin du milieu 2. Plusieurs niveaux de subdivision spatiale sont avantageusement sélectionnés le long d'une direction de diffusion de la lumière par le milieu 2. Le même raisonnement est appliqué aux points d'échantillonnage d'une direction de lumière incidente, pour lesquels des deuxièmes valeurs représentatives de l'atténuation de la lumière reçue d'une source de lumière sont estimées pour deux niveaux de subdivision hiérarchiquement consécutifs, pour sélectionner les niveaux de subdivision spatiale le long de la direction de lumière incidente pour lesquels les erreurs induites sont jugées acceptables.

Selon une variante, l'information d'erreur, dite première information d'erreur, issue de la comparaison des premières valeurs représentatives de l'atténuation de la lumière diffusée par un point d'échantillonnage de la direction de diffusion est comparée à une première valeur seuil, au cours d'une étape de comparaison non représentée sur la figure 7, pour sélectionner l'un ou l'autre des deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiquement consécutifs pour lesquels ont été calculées les deux premières valeurs d'atténuation de lumière diffusée. Si la première information d'erreur est inférieure à la première valeur seuil, le niveau de subdivision spatiale de position hiérarchique la plus élevée est sélectionné, cela signifiant que le niveau le plus élevé entraîne une erreur acceptable dans l'estimation de l'atténuation de la lumière alors que les coûts de calcul sont inférieurs à ceux engendrés pour un niveau de position inférieure, un niveau de position inférieure présentant plus de « voxels » dans le milieu et donc plus de variation de caractéristiques physiques, notamment de densité, du milieu 2. Si la première information d'erreur est supérieure à la première valeur seuil, le niveau de subdivision spatiale de position hiérarchique la plus

basse est sélectionné, cela signifiant que le niveau le plus élevé entraîne une erreur non acceptable, par exemple visible par l'œil humain, dans l'estimation de l'atténuation de la lumière.

Selon une autre variante, l'information d'erreur, dite deuxième
5 information d'erreur, issue de la comparaison des deuxièmes valeurs représentatives de l'atténuation de la lumière reçue d'une source de lumière en un point d'échantillonnage de la direction de lumière incidente est comparée à une deuxième valeur seuil, au cours d'une étape de comparaison non représentée sur la figure 7, pour sélectionner l'un ou l'autre
10 des deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiquement consécutifs pour lesquels ont été calculées les deux deuxièmes valeurs d'atténuation de lumière diffusée. Si la deuxième information d'erreur est inférieure à la deuxième valeur seuil, le niveau de subdivision spatiale de position hiérarchique la plus élevée est sélectionné, cela signifiant que le niveau le
15 plus élevé entraîne une erreur acceptable dans l'estimation de l'atténuation de la lumière reçue alors que les coûts de calcul sont inférieures à ceux engendrés pour un niveau de position inférieure, un niveau de position inférieure présentant plus de « voxels » dans le milieu et donc plus de variation de caractéristiques physiques, notamment de densité, du milieu 2.
20 Si la deuxième information d'erreur est supérieure à la deuxième valeur seuil, le niveau de subdivision spatiale de position hiérarchique la plus basse est sélectionné, cela signifiant que le niveau le plus élevé entraîne une erreur non acceptable, par exemple visible par l'œil humain, dans l'estimation de l'atténuation de la lumière reçue.

25 De manière avantageuse, les première et deuxième informations d'erreur ont des valeurs différentes. Selon une variante, les première et deuxième informations d'erreur sont de même valeur. Selon une autre variante, la première (respectivement deuxième) information d'erreur change de valeur en fonction des niveaux de subdivision spatiale qui sont comparés.

30 Puis au cours d'une étape 72, la quantité de lumière diffusée par le milieu 2 est estimée en utilisant une méthode d'échantillonnage, avantageusement une méthode d'échantillonnage de rayon. De manière avantageuse, l'échantillonnage est choisi de manière à ce qu'il y ait un point d'échantillonnage par « voxel » le long de la direction de diffusion. Selon une
35 variante, l'échantillonnage est choisi de manière à être plus fin lorsque le niveau de subdivision est le plus fin et plus grossier au fur et à mesure que le niveau de subdivision est élevé hiérarchiquement. Selon une autre variante,

l'échantillonnage est régulier, c'est-à-dire que les points d'échantillonnage sont régulièrement espacés. Cette dernière variante n'est pas non plus très coûteuse en terme de calcul puisque la densité ne varie pas d'un point à un autre d'un même « voxel ».

5 Les étapes 71 et 72 sont avantageusement réitérées au fur et à mesure qu'un spectateur 12 se déplace autour du milieu 10, l'image formant le rendu du milieu 10 étant recomposée pour chaque déplacement élémentaire du spectateur 12 autour du milieu 10. Selon une variante, les étapes 71 et 72 sont réitérées lorsque les conditions du milieu environnant,
10 notamment la ou les sources de lumière, changent.

Bien entendu, l'invention ne se limite pas aux modes de réalisation décrits précédemment.

En particulier, l'invention n'est pas limitée à un procédé
15 d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène mais s'étend également à tout dispositif mettant en œuvre ce procédé et notamment tous les dispositifs comprenant au moins un GPU. La mise en œuvre des équations décrites en regards des figures 1 à 5 pour l'estimation des réductions d'intensité lumineuse dans les directions
20 d'incidence et d'émission, de la quantité de lumière diffusée n'est pas non plus limitée à une mise en œuvre dans des microprogrammes de type shader mais s'étend également à une mise en œuvre dans tout type de programme, par exemple des programmes exécutables par un microprocesseur de type CPU.

25 L'utilisation de l'invention n'est pas limitée à une utilisation temps réel mais s'étend également à toute autre utilisation, par exemple pour les traitements dits de postproduction en studio d'enregistrement pour le rendu d'images de synthèse par exemple. La mise en œuvre de l'invention en postproduction offre l'avantage de fournir un excellent rendu visuel en termes
30 de réalisme notamment tout en diminuant les temps de calcul nécessaires.

L'invention concerne également un procédé de composition d'une image vidéo, en deux dimensions ou en trois dimensions, pour lequel la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène est calculée et l'information représentative de la luminance qui en découle est utilisée
35 pour l'affichage des pixels de l'image, chaque pixel correspondant à une direction d'observation selon une direction d'observation ω_{out} . La valeur de

luminance calculée pour affichage par chacun des pixels de l'image est recalculée pour s'adapter aux différents points de vue du spectateur.

L'invention concerne également un procédé de sélection d'un ou plusieurs niveaux de subdivision spatiale représentatifs d'un milieu participant hétérogène.

La présente invention peut être utilisée dans des applications de jeux vidéo par exemple, que ce soit par des programmes exécutables dans un ordinateur de type PC ou portable ou dans des consoles de jeux spécialisées produisant et affichant des images en temps réel. Le dispositif décrit en regard de la figure 6 est avantageusement doté de moyens d'interactions tels que clavier et/ou manette de jeux, d'autres modes d'introduction de commandes telle que par exemple la reconnaissance vocale étant également possibles.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'estimation de la quantité de lumière diffusée par un milieu participant hétérogène (10), caractérisé en ce que le procédé comprend les étapes de :
 - sélection (71) d'au moins un niveau de subdivision spatiale dudit milieu (10) parmi une pluralité de niveaux (21, 22, 23, 24) hiérarchiques de subdivision spatiale selon au moins une information d'erreur représentative d'une différence d'atténuation de la lumière dans ledit milieu selon au moins une direction (110, 120) entre deux niveaux hiérarchiques consécutifs,
 - estimation (72) de la quantité de lumière diffusée par échantillonnage dudit milieu (10) le long d'au moins une direction de diffusion (120), l'échantillonnage étant fonction du au moins un niveau de subdivision spatiale sélectionné.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le procédé comprend une étape d'estimation d'au moins une première valeur représentative de l'atténuation de la lumière diffusée par au moins un point dudit milieu situé le long de ladite au moins une direction de diffusion.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que le procédé comprend une étape d'estimation d'au moins une deuxième valeur représentative de l'atténuation de la lumière reçue d'au moins une source lumineuse selon au moins une direction d'émission de la lumière en ledit au moins un point situé le long de ladite au moins une direction de diffusion.
4. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que la au moins une information d'erreur est déterminée par comparaison de deux premières valeurs, lesdites deux premières valeurs étant estimées respectivement pour deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiques consécutifs dudit milieu.
5. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la au moins une information d'erreur est déterminée par comparaison de deux deuxièmes valeurs, lesdites deux deuxièmes valeurs étant estimées respectivement

pour deux niveaux de subdivision spatiale hiérarchiques consécutifs dudit milieu.

5 6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le procédé comprend une étape de comparaison de ladite information d'erreur à une valeur seuil.

10 7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que le niveau de subdivision spatiale sélectionné correspond au niveau de position hiérarchique la plus élevée si ladite au moins une information d'erreur est inférieure à ladite valeur seuil.

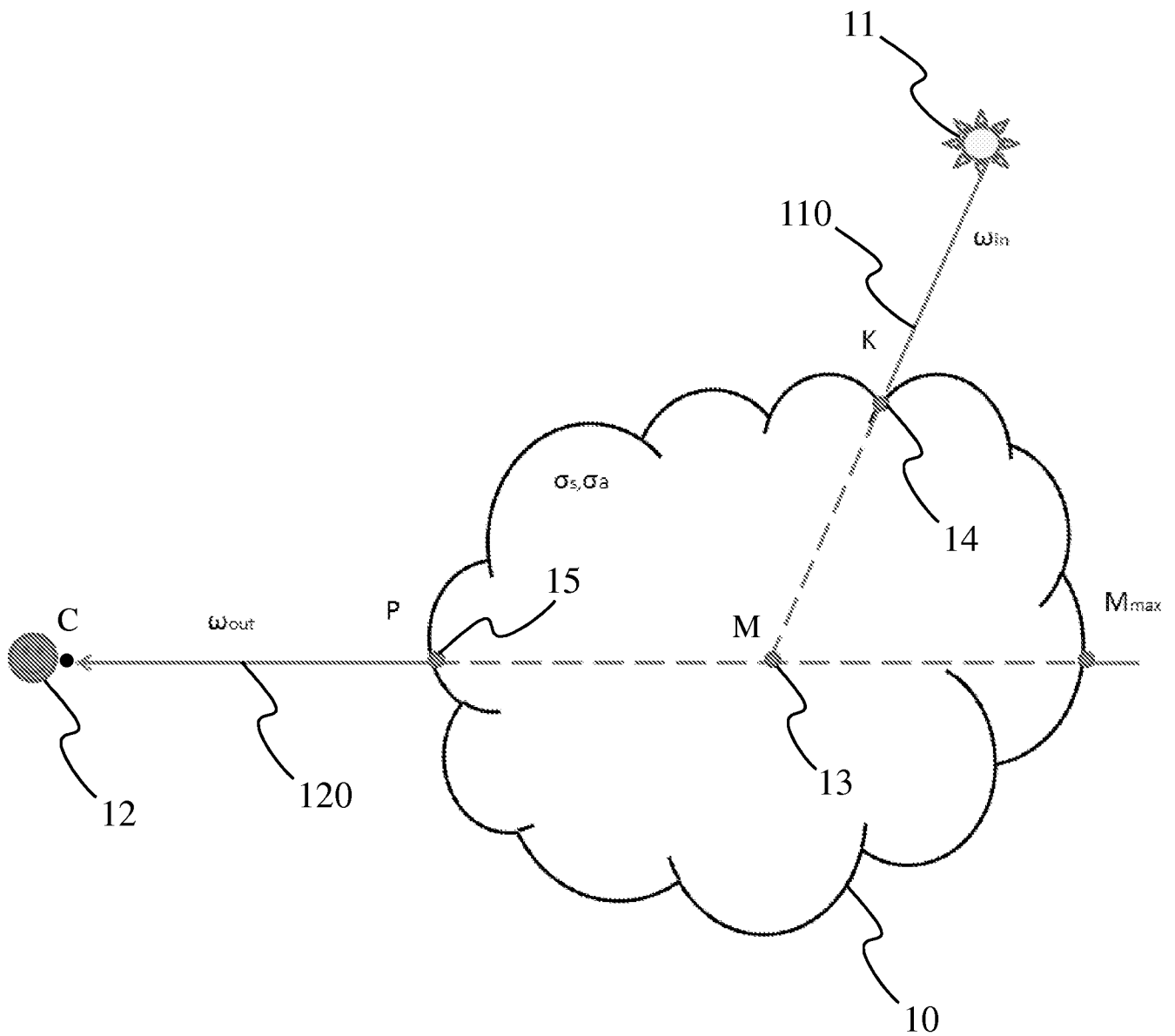


Fig 1

2/7

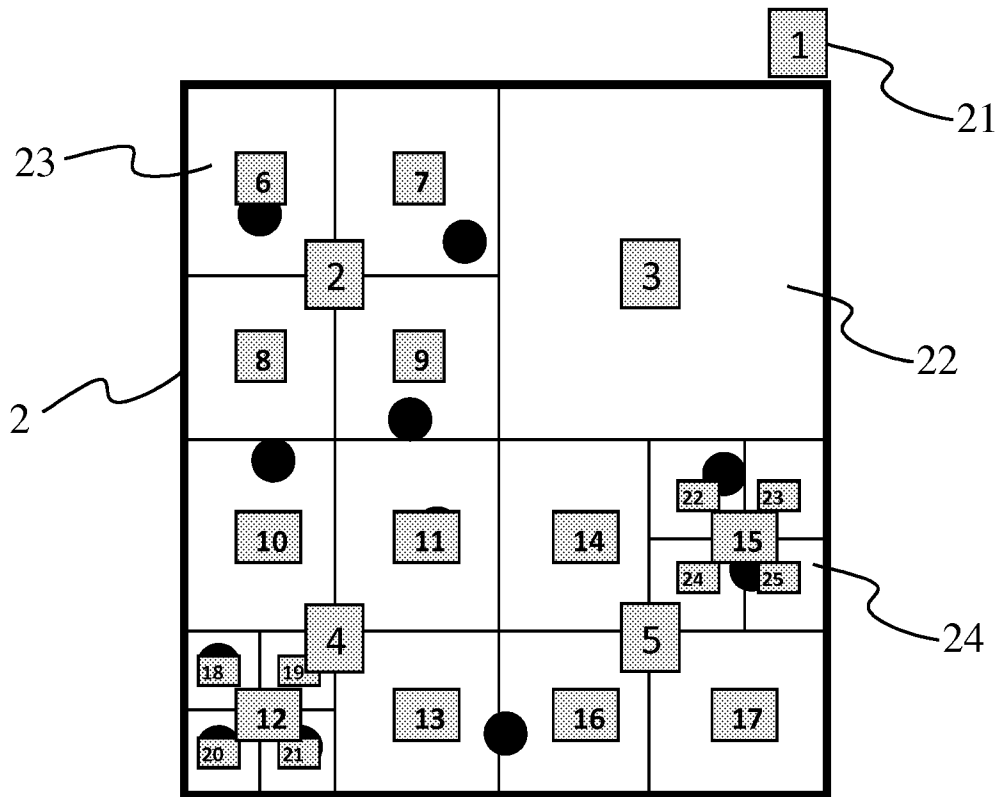


Fig 2A

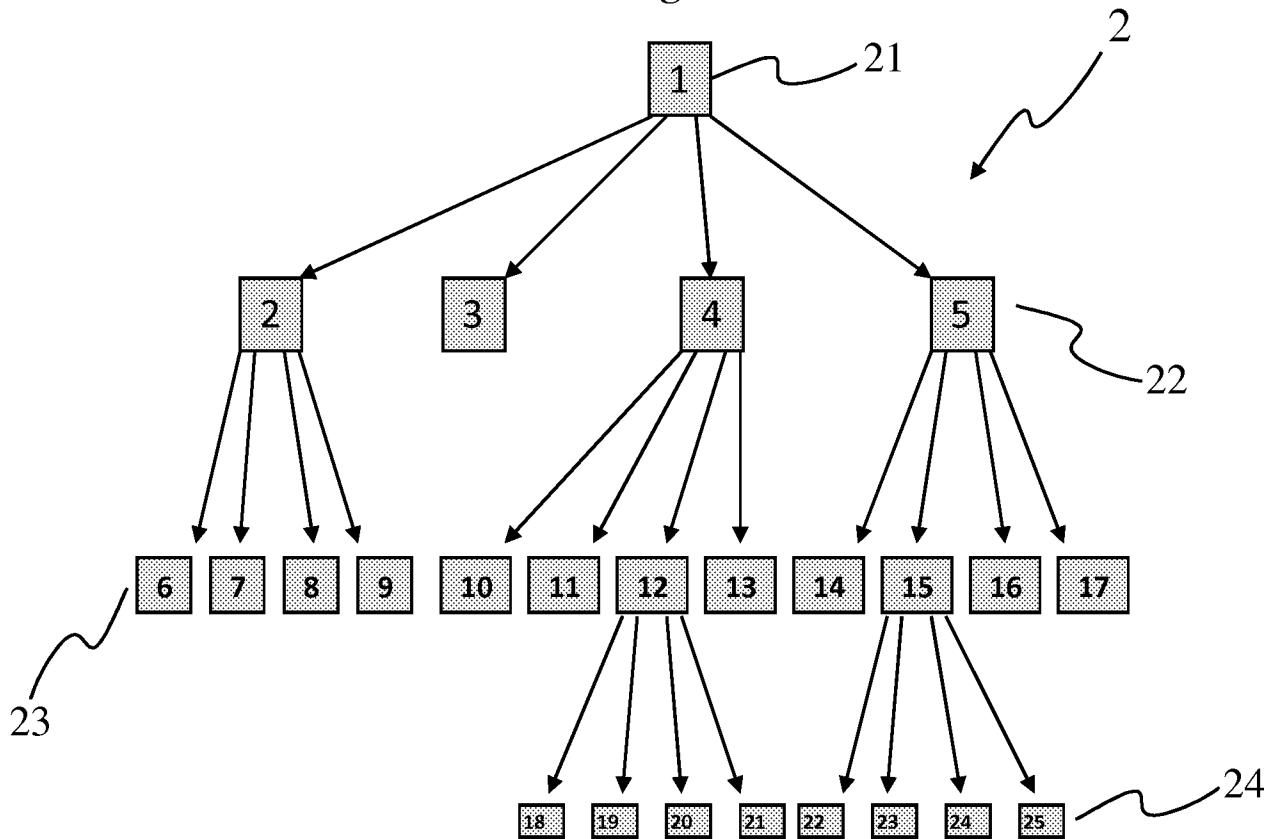
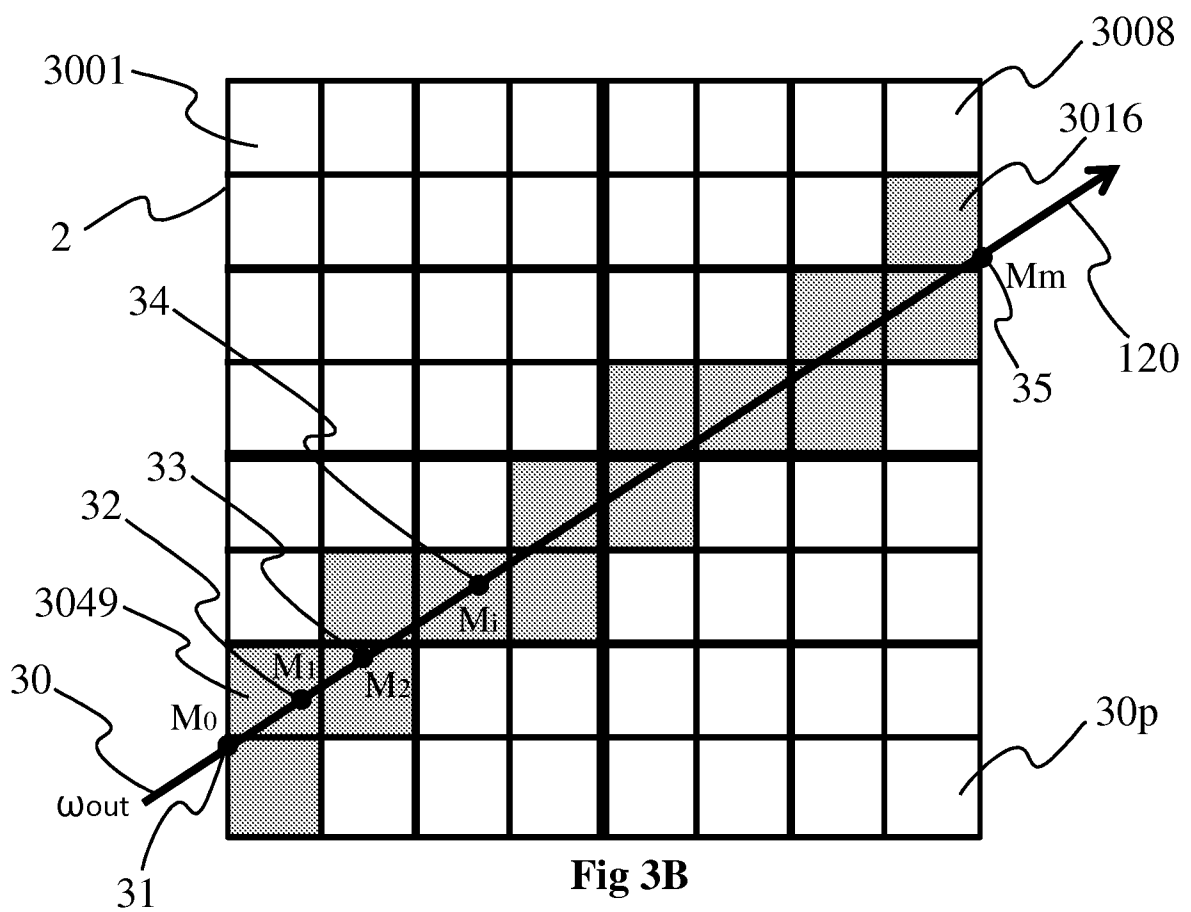
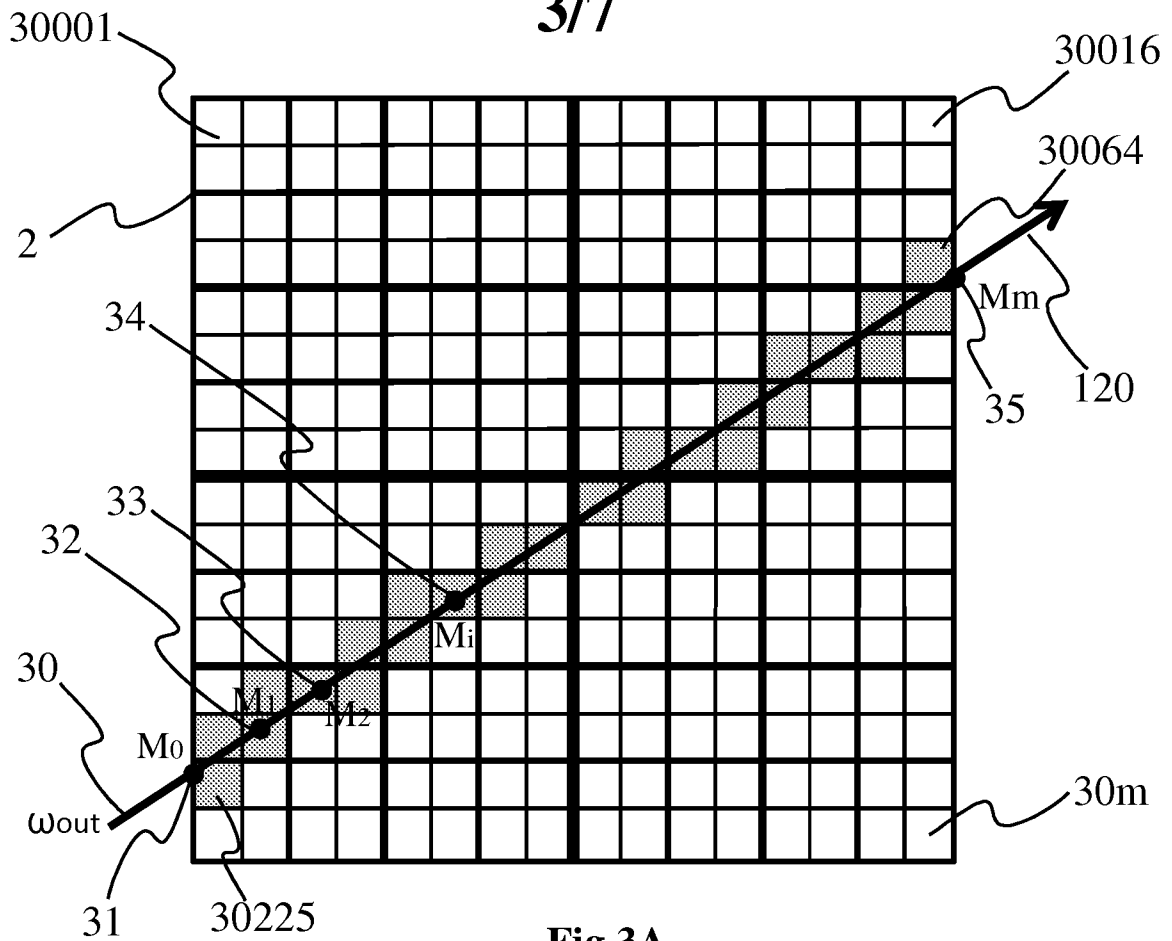


Fig 2B

3/7



4/7

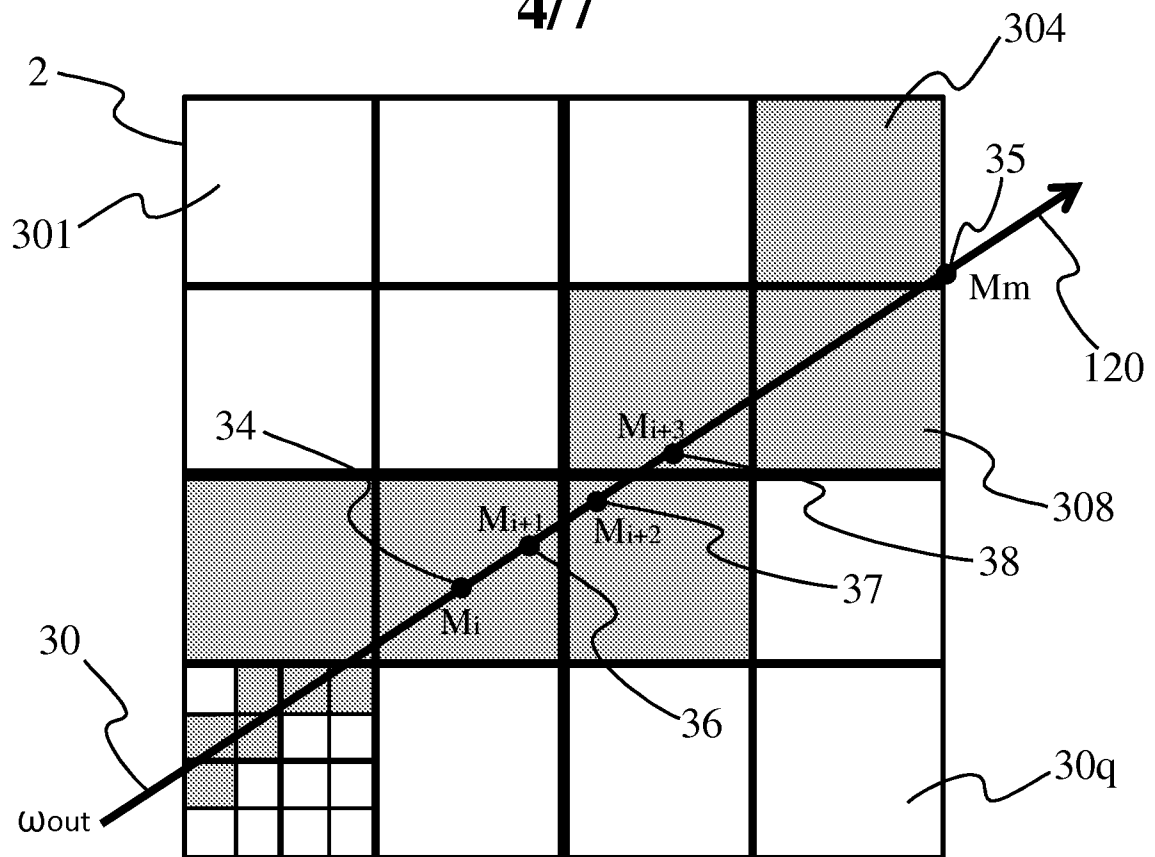


Fig 4A

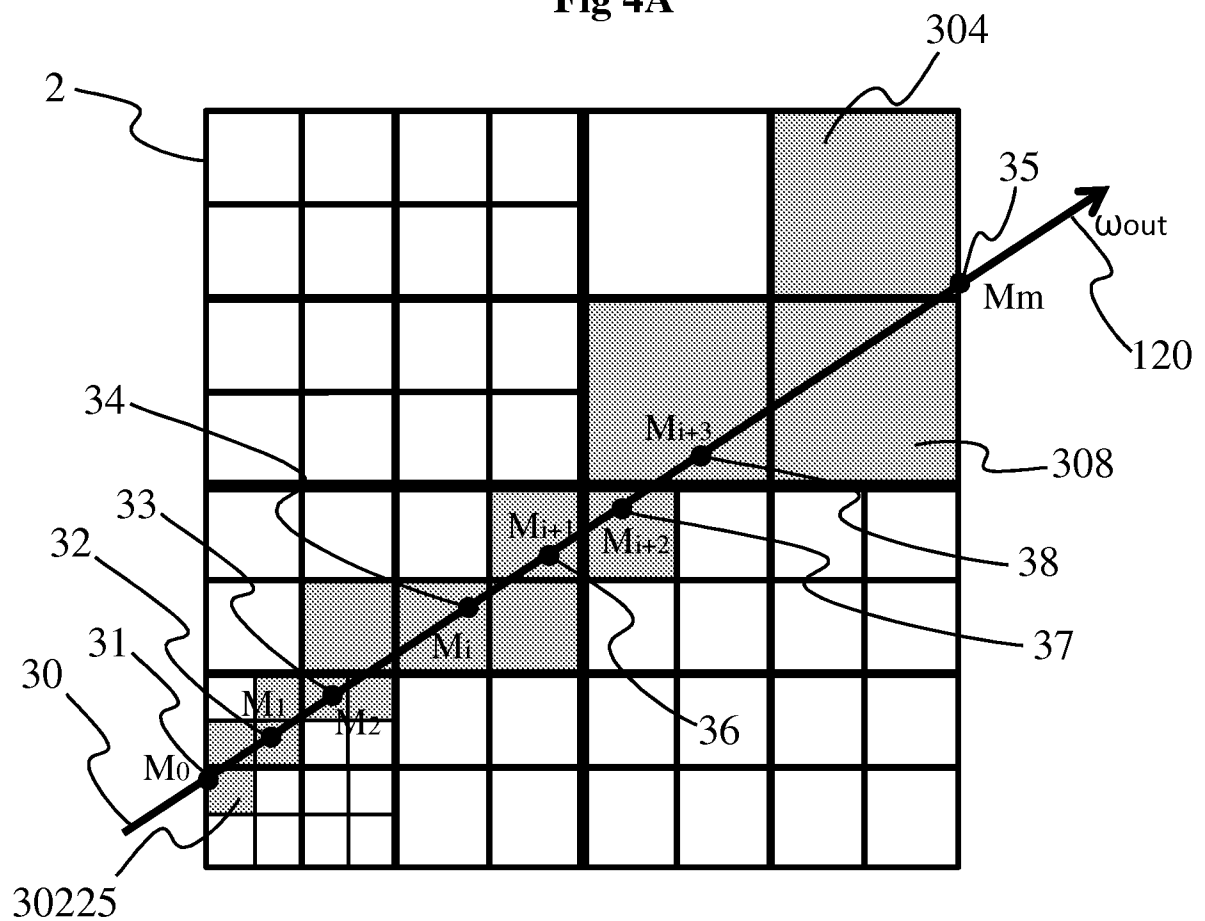


Fig 4B

5/7

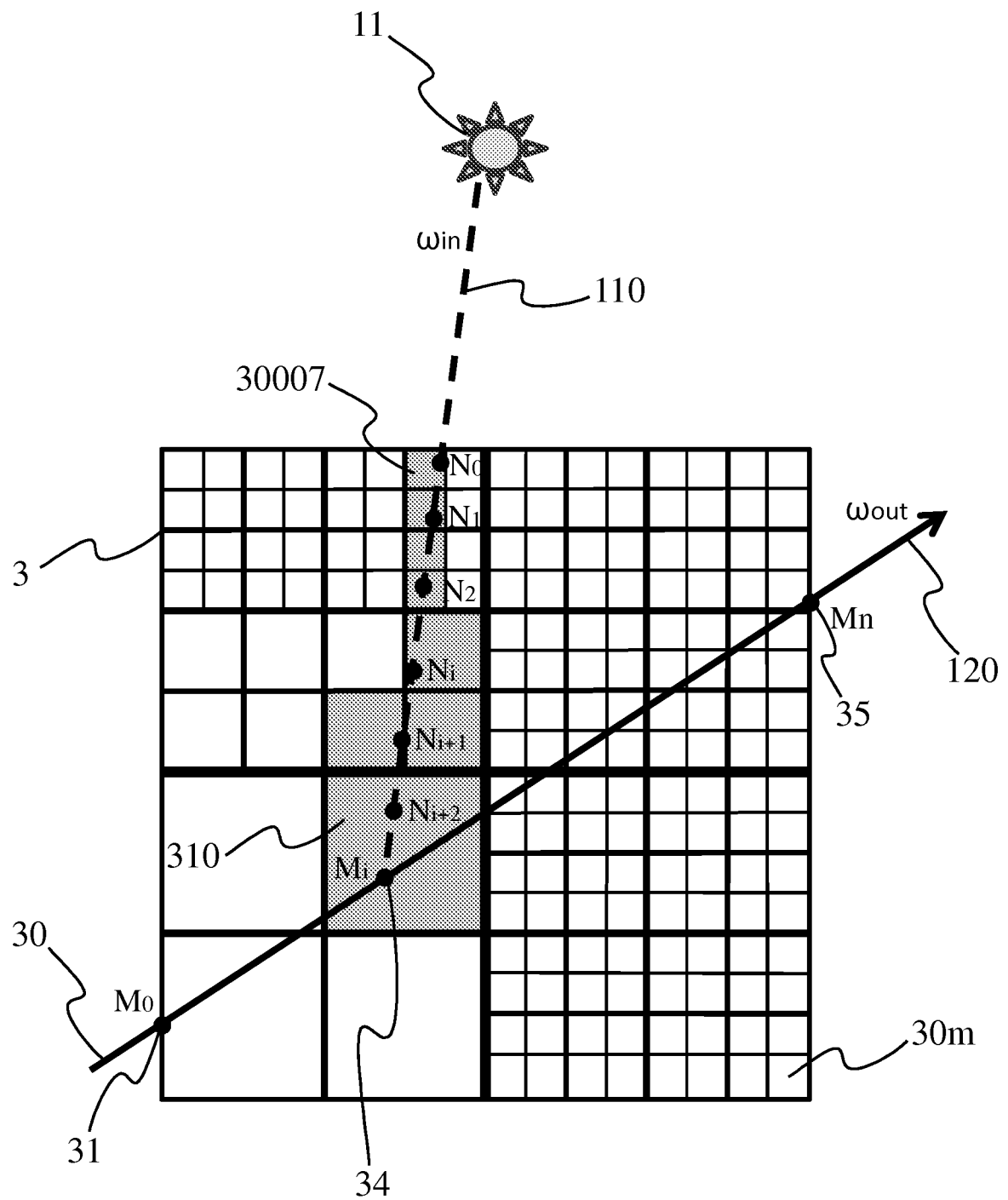


Fig 5

6/7

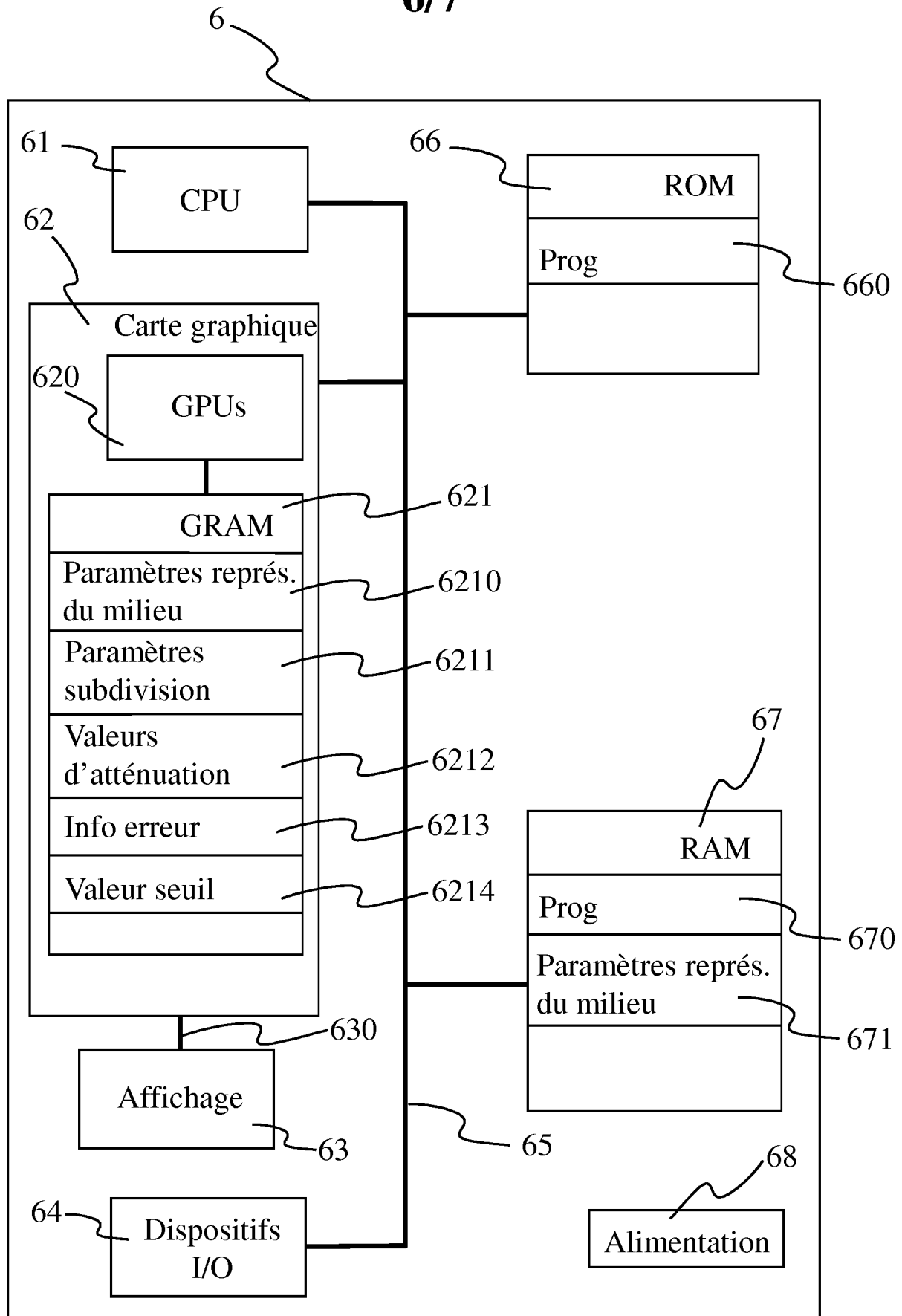
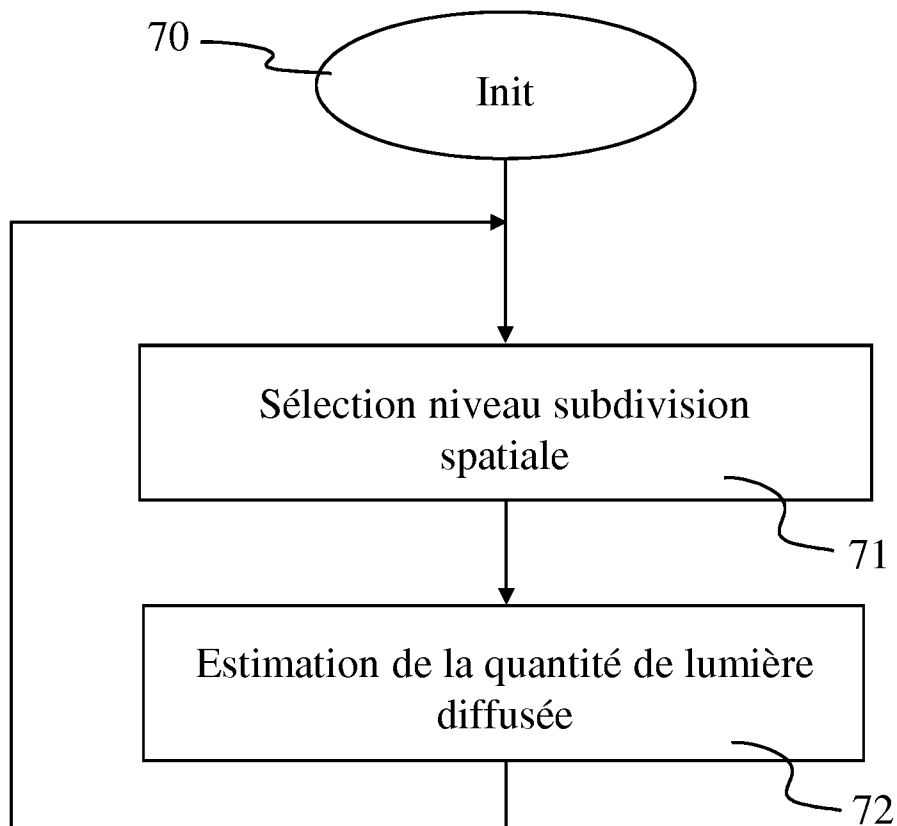


Fig 6

7/7

**Fig 7**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2010/067727A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G06T15/50
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	TOKUYOSHI Y ET AL: "A fast rendering method for a scene with participating media of anisotropic scattering property", COMPUTER GRAPHICS INTERNATIONAL 2005 STONY BROOK, NY, USA JUNE 22-24, 2005, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE LNKD-DOI:10.1109/CGI.2005.1500423, 22 June 2005 (2005-06-22), pages 227-233, XP010830152, ISBN: 978-0-7803-9330-1 the whole document ----- -/--	1-7



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

2 May 2011

Date of mailing of the international search report

10/05/2011

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Bouchaâla, Nicolas

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/067727

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>EVA CEREZO ET AL: "A survey on participating media rendering techniques", THE VISUAL COMPUTER ; INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER GRAPHICS, SPRINGER, BERLIN, DE LNKD- DOI:10.1007/S00371-005-0287-1, vol. 21, no. 5, 1 June 2005 (2005-06-01), pages 303-328, XP019339111, ISSN: 1432-8726 the whole document</p> <p>-----</p>	1-7

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06T15/50 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G06T		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	TOKUYOSHI Y ET AL: "A fast rendering method for a scene with participating media of anisotropic scattering property", COMPUTER GRAPHICS INTERNATIONAL 2005 STONY BROOK, NY, USA JUNE 22-24, 2005, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE LNKD-DOI:10.1109/CGI.2005.1500423, 22 juin 2005 (2005-06-22), pages 227-233, XP010830152, ISBN: 978-0-7803-9330-1 le document en entier ----- -/-	1-7
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
<p>* Catégories spéciales de documents cités:</p> <p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> <p>"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>"&" document qui fait partie de la même famille de brevets</p>		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 2 mai 2011		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 10/05/2011
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Bouchaâla, Nicolas

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>EVA CEREZO ET AL: "A survey on participating media rendering techniques", THE VISUAL COMPUTER ; INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER GRAPHICS, SPRINGER, BERLIN, DE LNKD- DOI:10.1007/S00371-005-0287-1, vol. 21, no. 5, 1 juin 2005 (2005-06-01), pages 303-328, XP019339111, ISSN: 1432-8726 le document en entier -----</p>	1-7