



# Génération Numérique d'Hologrammes : État de l'Art

Antonin Gilles, Patrick Gioia, Rémi Cozot, Luce Morin

► **To cite this version:**

Antonin Gilles, Patrick Gioia, Rémi Cozot, Luce Morin. Génération Numérique d'Hologrammes : État de l'Art. Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique, Association Française d'Informatique Graphique, 2015, 9 (1), pp.23-35. hal-01279623

**HAL Id: hal-01279623**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01279623>**

Submitted on 26 Feb 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Génération Numérique d'Hologrammes : État de l'Art

Antonin Gilles<sup>1</sup>

Patrick Gioia<sup>1,2</sup>

Rémi Cozot<sup>1,3</sup>

Luce Morin<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> IRT b<>com  
Cesson-Sévigné  
France

<sup>2</sup> Orange Labs  
Rennes  
France

<sup>3</sup> Université de Rennes 1  
Rennes  
France

<sup>4</sup> INSA Rennes  
Rennes  
France

## Résumé

Cet article présente un état de l'art des méthodes de génération numérique d'hologrammes appliquées à la vidéo 3D. Les méthodes présentées permettent de générer l'hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par le processus physique réel d'interférence entre deux ondes lumineuses. Les principales limitations liées à l'holographie conventionnelle, qui sont (1) la nécessité d'utiliser une source laser cohérente et (2) l'obligation d'avoir un système optique extrêmement stable, peuvent ainsi être évitées.

This paper reviews Computer Generated Holography techniques applied to 3D video. Using these methods, it is possible to acquire holograms of synthetic or existing scenes without physical interference between light waves. Most limitations characterizing conventional holography, namely the need for a powerful, highly coherent laser and extreme stability of the optical system are thus avoided.

**Mots clés :** Holographie, Génération Numérique d'Hologrammes, Vidéo 3D, Laser

## 1 Introduction

Avec le développement des environnements immersifs et collaboratifs, les consommateurs souhaitent toujours plus de sentiment de présence lors de leurs interactions à distance. Les systèmes de télé-présence incluent aujourd'hui la spatialisaton du son et la

visualisation des interlocuteurs en grandeur nature. Ainsi, la capacité à fournir une visualisation 3D avec une illusion du relief naturelle et réaliste est devenue l'une des caractéristiques les plus attendues pour ces systèmes [1].

La stéréoscopie<sup>1</sup> est aujourd'hui la méthode la plus largement utilisée pour la capture et la diffusion de vidéos 3D. Ce procédé consiste à créer une illusion de relief en envoyant deux vues différentes d'une même scène à chacun des yeux de l'utilisateur. Grâce à sa simplicité d'implémentation et à sa compatibilité avec les systèmes de visualisation 2D existants, la stéréoscopie a très vite attiré l'attention de nombreux chercheurs et industriels [2]. Cependant, cette technologie présente toujours un certain nombre de contraintes et de limitations, comme la nécessité de porter des lunettes pour les écrans stéréoscopiques ou la zone de visualisation limitée des écrans auto-stéréoscopiques [3]. De plus, la stéréoscopie ne fournit pas de parallaxe de mouvement et crée un conflit entre les indices d'accommodation et de vergence, ce qui peut produire une fatigue visuelle ou des maux de tête lors d'une utilisation prolongée [4]. En réponse à ces limitations, plusieurs technologies alternatives ont été proposées ces dernières années. Parmi celles-ci, l'holographie est souvent considérée comme la plus prometteuse, puisqu'elle fournit l'illusion du relief la plus naturelle et la plus réaliste possible [5–8].

L'hologramme enregistre les informations d'amplitude et de phase provenant de la scène. C'est à dire

---

1. Il est à noter que l'utilisation du terme *stéréoscopie* pour désigner l'attribution d'une image différente à chaque œil est abusive, puisqu'étymologiquement le préfixe *stéréo* fait référence à la notion d'espace.

les informations décrivant complètement l'onde lumineuse. L'hologramme dit optique ou conventionnel n'enregistre pas directement ces informations (amplitude et phase) mais l'image d'amplitude de l'interférence entre deux ondes lumineuses. Cette image d'interférence permet de reconstruire l'onde complète. Tandis qu'en imagerie classique, chaque pixel mesure l'amplitude de l'onde provenant d'un angle solide donné (grâce au dispositif optique de l'objectif), en holographie, le pixel enregistre l'amplitude et la phase de l'onde provenant de l'ensemble de la scène. L'information de phase est importante car c'est elle qui définit la courbure du front d'onde. L'hologramme est ensuite affiché sur un écran holographique qui restitue l'onde lumineuse émise par la scène. L'holographie fournit donc tous les indices de perception de la profondeur du système visuel humain. Il n'est pas nécessaire de porter de lunettes et il n'y a pas de fatigue visuelle.

L'acquisition d'un hologramme optique s'effectue à l'aide d'un processus d'interférence entre deux faisceaux lumineux issus d'un laser. Le système optique doit être extrêmement stable car une vibration de l'ordre de la longueur d'onde du laser utilisé peut modifier radicalement les franges d'interférence. Cette contrainte, ainsi que la durée d'exposition et de développement du support photosensible, rend l'acquisition optique de vidéos holographiques très difficile [9]. En outre l'holographie optique conventionnelle suppose que la scène est éclairée par un laser, ce qui interdit l'acquisition directe de scènes illuminées par un éclairage naturel.

Pour éviter ces contraintes, plusieurs méthodes ont été proposées pour remplacer le processus d'acquisition optique d'un hologramme par des calculs numériques. Grâce à ces méthodes, il est possible de générer l'hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par le processus physique d'interférence entre deux ondes lumineuses. Les principales limitations liées à l'holographie optique conventionnelle peuvent ainsi être évitées. Cet article présente un état de l'art des méthodes de génération d'hologrammes de scènes synthétiques, qui sont les plus susceptibles d'intéresser la communauté graphique. Néanmoins, ces méthodes peuvent également s'appliquer à la génération d'hologrammes de scènes réelles en utilisant

un système de captation ou de reconstruction 3D approprié (comme un scanner tridimensionnel ou une caméra de profondeur).

La Section 2 donne quelques notions théoriques sur l'holographie conventionnelle. La Section 3 définit les paramètres de calcul des méthodes de génération numérique d'hologrammes. La Section 4 présente les différentes méthodes de calcul de l'onde objet issue de la scène. La Section 5 présente les différentes méthodes de représentation de l'onde objet complexe en hologramme à valeurs réelles et positives. Enfin, la Section 6 donne quelques éléments de comparaison entre les méthodes de génération numérique d'hologrammes et les techniques de synthèse d'image.

## 2 Holographie conventionnelle

Afin de mieux comprendre les méthodes de génération numérique d'hologrammes, cette section donne quelques notions théoriques sur l'holographie conventionnelle.

L'holographie a été inventée en 1948 par le physicien hongrois Dennis Gabor alors qu'il effectuait des recherches en microscopie électronique [10]. Toutefois, cette technique ne trouva d'application optique qu'avec le développement des premiers lasers dans les années 1960 [11]. Alors que la photographie ou la vidéo conventionnelles ne permettent de capturer que l'énergie lumineuse, qui est proportionnelle à l'intensité de l'onde lumineuse provenant de la scène, l'holographie permet d'enregistrer à la fois l'amplitude et la phase de l'onde lumineuse provenant d'un objet éclairé à la lumière d'un laser. Lorsqu'il est éclairé par le laser ayant servi pour l'enregistrement, l'hologramme restitue une image en relief de l'objet initial, donnant l'illusion à l'observateur que l'objet est physiquement présent dans la scène. L'holographie fournit ainsi une illusion de relief naturelle et réaliste.

Le procédé holographique comprend généralement deux étapes : une étape d'acquisition et une étape de restitution.

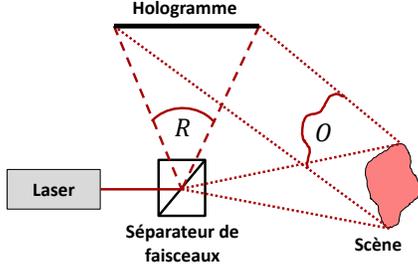


FIGURE 1 – Acquisition optique d’un hologramme : le faisceau du laser est diffracté et réfléchi par la scène donnant l’onde objet ( $O$ ) qui crée des franges d’interférence sur l’hologramme avec le faisceau de l’onde de référence ( $R$ ).

## 2.1 Acquisition optique de l’hologramme

Le schéma général du processus d’acquisition optique est donné Figure 1. L’onde cohérente (monochromatique) issue d’un laser est séparée en deux faisceaux : le premier faisceau, appelé onde objet, est diffracté et/ou réfléchi par l’objet en direction de la plaque photosensible, tandis que le deuxième, appelé onde de référence, illumine la plaque directement. Les franges d’interférence ainsi obtenues sont enregistrées par développement chimique du support photosensible. Ce motif d’interférence est appelé hologramme. On note  $O = |O| \exp(j\phi(O))$  l’onde objet et  $R = |R| \exp(j\phi(R))$  l’onde de référence dans le plan de l’hologramme.  $|C|$  et  $\phi(C)$  sont respectivement l’amplitude et la phase de  $C$ . Ainsi, la transmittance enregistrée par la plaque est donnée par [12]

$$\begin{aligned} H &= K(O + R)(O + R)^* \\ &= K|O|^2 + K|R|^2 + KOR^* + KRO^*, \end{aligned} \quad (1)$$

où  $K$  est une constante et  $C^*$  est le conjugué de  $C$ . L’hologramme dépend donc à la fois de l’amplitude et de la phase de l’onde objet.

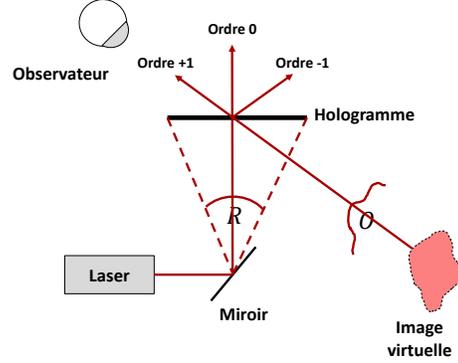


FIGURE 2 – Restitution optique d’un hologramme : l’hologramme est éclairé par l’onde de référence ( $R$ ), ce qui reproduit l’onde objet ( $O$ ).

## 2.2 Restitution optique de l’hologramme

Le schéma général du processus de restitution optique est donné Figure 2. L’hologramme est éclairé par l’onde de référence  $R$  utilisée lors de l’étape d’acquisition. Ainsi, l’onde lumineuse transmise par l’hologramme est donnée par [12]

$$\begin{aligned} U &= H \times R \\ &= K(|O|^2 + |R|^2)R + K|R|^2O + KR^2O^*. \end{aligned} \quad (2)$$

L’onde lumineuse transmise par l’hologramme comprend trois termes. Le premier terme, appelé ordre de diffraction zéro, est proportionnel à l’onde de référence  $R$ . Il représente l’onde non diffractée passant à travers l’hologramme. Le deuxième terme, appelé "image virtuelle", est proportionnel à l’onde objet  $O$ . Il produit une image en trois dimensions de l’objet, donnant l’illusion à l’observateur que l’objet est physiquement présent dans la scène. Le troisième terme, appelé "image réelle" ou "image jumelle", est proportionnel au conjugué de l’onde objet  $O^*$ . Il produit une image pseudoscopique de l’objet avec un relief inversé. L’ordre de diffraction zéro et l’image réelle sont des artefacts qui peuvent se superposer avec l’onde objet restituée. Cependant, quand l’onde de référence et l’onde objet éclairent l’hologramme avec des angles d’incidence différents lors de l’enregis-

trement, les trois ondes sont transmises à des angles différents lors de la restitution, permettant à l'image 3D de l'objet d'être clairement observée [13].

Malgré ses propriétés prometteuses pour la visualisation 3D, l'holographie conventionnelle présente de nombreuses contraintes qui l'empêchent d'être utilisée pour la capture de vidéos 3D ou pour une acquisition en extérieur. En effet, le processus d'acquisition optique nécessite que la scène soit éclairée exclusivement à l'aide d'un laser et que le dispositif optique soit extrêmement stable, car la moindre vibration peut détruire les franges d'interférence. Pour éviter ces contraintes, plusieurs méthodes ont été proposées ces dernières années pour remplacer le processus d'acquisition optique d'un hologramme par des calculs numériques. Grâce à ces méthodes, il est possible de générer l'hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par le processus physique réel d'interférence entre deux ondes lumineuses.

### 3 Paramètres pour la génération numérique d'hologrammes

Bien que toutes les méthodes présentées dans cet état de l'art ont pour même objectif de générer l'hologramme d'une scène synthétique, il est difficile de proposer un angle de comparaison de ces méthodes. En effet, aucune normalisation n'a été effectuée dans le domaine de la génération numérique d'hologrammes, et les méthodes présentées dans cet état de l'art ont toutes été proposées et testées avec des paramètres de calcul différents. Les paramètres de calcul d'un hologramme peuvent se classer en trois catégories : les paramètres de la scène (ou paramètres d'entrée), les paramètres de rendu et enfin les paramètres de l'hologramme (ou paramètres de sortie).

#### 3.1 Paramètres de la scène

Les paramètres de la scène dépendent à la fois des données d'entrée utilisées et des choix effectués pour chacune des méthodes. Les paramètres de la scène sont :

**La résolution de la scène :** En nombre de points ou de polygones, la résolution de la scène dépend des données d'entrée utilisées : une scène réelle captée à l'aide d'un scanner 3D ou d'une caméra de profondeur a souvent une résolution moins importante qu'une scène purement synthétique. Une résolution élevée permet d'avoir un grand niveau de détail dans la scène mais augmente le temps de calcul de l'hologramme.

**La taille de la scène :** L'affichage d'une scène de grande taille (de l'ordre de la dizaine de centimètres) est l'un des enjeux des méthodes de génération numérique d'hologrammes. En effet, la taille maximum de la scène est limitée par les dimensions de l'hologramme. Comme la taille des pixels de l'hologramme doit être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde (de l'ordre du micromètre), un hologramme de grande taille doit comporter un nombre de pixels très important et est donc plus long à générer. Pour cette raison, de nombreuses méthodes présentées dans cet état de l'art n'ont été testées que pour des scènes de quelques centimètres seulement.

**La distance entre la scène et l'hologramme :** Suivant les applications, la scène peut être positionnée plus ou moins proche du plan de l'hologramme. Positionner la scène proche du plan de l'hologramme permet souvent de réduire le temps de calcul de celui-ci (Section 4.1). Cependant, plus une scène est située proche de l'hologramme, plus sa taille est limitée par les dimensions de celui-ci.

#### 3.2 Paramètres de rendu

Les paramètres de rendu ont une très forte influence sur le temps de calcul de l'hologramme. Les paramètres de rendu sont :

**Le nombre de couleurs :** En fonction du nombre de lasers utilisés pour la restitution, un hologramme peut produire une scène monochromatique ou en couleur. Néanmoins, plus l'hologramme contient de couleurs, plus le temps de calcul de celui-ci est important.

**La parallaxe fournie par l'hologramme :**

L'holographie permet de fournir une parallaxe de mouvement dans les deux directions (horizontale et verticale), mais certaines méthodes font le choix de restreindre la parallaxe dans la direction horizontale uniquement, réduisant ainsi considérablement le temps de calcul de l'hologramme.

**La prise en compte des occultations :** Les occultations forment l'un des principaux indices monoculaires de perception de la profondeur. Par conséquent, la prise en compte des occultations dans la scène lors de la génération d'un hologramme est un élément très important pour fournir une illusion de la profondeur naturelle et réaliste. Comme en holographie l'observateur a la possibilité de changer son point de vue sur la scène, la prise en compte des occultations doit s'effectuer pour tous les points de vue possibles, augmentant ainsi considérablement le temps de calcul de l'hologramme. Par conséquent, certaines méthodes présentées dans ce papier utilisent un champ de vision très restreint (et donc un nombre de points de vues réduit) et ne prennent en compte les occultations que pour un seul point de vue. De même, certaines méthodes ne prennent pas du tout en compte les occultations dans la scène.

**3.3 Paramètres de l'hologramme**

Les paramètres de l'hologramme dépendent des caractéristiques du système optique utilisé pour la restitution. Les paramètres de l'hologramme sont :

**La résolution de l'hologramme :** La résolution de l'hologramme correspond à la résolution de l'écran holographique sur lequel il doit être affiché. Comme dit Section 3.1, la résolution de l'hologramme détermine la taille maximale de la scène. Néanmoins, plus la résolution de l'hologramme est grande, plus le temps de calcul de celui-ci est long et plus la quantité de mémoire nécessaire est importante.

**La taille des pixels de l'hologramme :** La taille des pixels de l'hologramme correspond à la taille

des pixels de l'écran holographique sur lequel il doit être affiché. Elle détermine le champ de vision maximum (et donc le nombre de points de vue) fourni par l'hologramme. Plus la taille des pixels est petite, plus le champ de vision est important mais plus la taille maximum de la scène est réduite.

**3.4 Comparaison et classement des méthodes**

Afin de proposer un classement des méthodes présentées dans cet état de l'art, celles-ci devraient être comparées avec des paramètres de calcul strictement identiques. Cependant, dans la mesure où chacune des méthodes a été prévue pour fonctionner dans un cadre très spécifique, les comparer avec des paramètres de calcul identiques définis de manière arbitraire serait peu pertinent. C'est pour cette raison que nous ne comparerons dans ce papier que les complexités théoriques de ces méthodes.

Les méthodes de génération numérique d'hologrammes comprennent généralement deux étapes : (1) une étape de calcul de l'onde objet, et (2) une étape de représentation de cette onde complexe en hologramme. L'étape de calcul de l'onde objet correspond au calcul de la propagation de la lumière provenant de la scène jusqu'au plan hologramme. Durant l'étape de représentation, l'onde objet complexe doit être transformée en valeurs positives et réelles pour former un hologramme.

**4 Calcul de l'onde objet**

La première étape des méthodes de génération numérique d'hologrammes est de simuler la propagation de la lumière provenant de la scène jusqu'au plan hologramme pour former l'onde objet. Pour cela, il est possible d'utiliser un modèle 3D de la scène. Ce modèle 3D peut être décomposé en un nuage de points ou en un maillage de polygones.

Le milieu de propagation de la lumière considéré en holographie étant linéaire, isotrope, homogène et non dispersif, le calcul de la propagation de la lumière

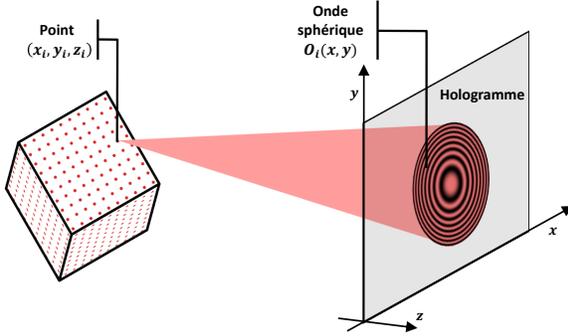


FIGURE 3 – Calcul de l’onde objet à partir d’un nuage de points : l’hologramme est calculé comme la somme des ondes sphériques issues des points arrivant sur le plan hologramme.

se fait en utilisant les équations du modèle d’onde scalaire [12].

#### 4.1 A partir d’un nuage de points

##### Méthode originale

Dans les premiers travaux sur la génération numérique d’hologrammes [14], les scènes 3D étaient représentées sous la forme d’un nuage de points non maillés, chaque point correspondant à une source lumineuse sphérique (Figure 3).

L’onde sphérique émise par un point  $i$  de coordonnées  $(x_i, y_i, z_i)$  et échantillonnée dans le plan de l’hologramme aux coordonnées  $(x, y, 0)$  est donnée par

$$O_i(x, y) = \frac{a_i}{r_i} \exp[j(kr_i + \phi_i)] h_i(x, y), \quad (3)$$

où l’amplitude initiale  $a_i$  du point  $i$  est définie par des calculs d’illuminations, et sa phase initiale  $\phi_i$  est définie arbitrairement. Le nombre d’onde  $k$  est donné par  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , avec  $\lambda$  la longueur d’onde de la lumière. La distance oblique  $r_i$  entre le point de la scène  $(x_i, y_i, z_i)$  et l’échantillon  $(x, y, 0)$  dans le plan hologramme est donnée par

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2}. \quad (4)$$

Dans l’équation (3),  $h_i$  est une fonction fenêtre utilisée pour limiter la région de contribution du point

lumineux dans le plan de l’hologramme.  $h_i$  est égale à un dans la région de contribution du point et à zéro ailleurs. Cette fonction limite les fréquences spatiales de l’onde lumineuse pour éviter le repliement de spectre. Selon le théorème d’échantillonnage de Nyquist, la fréquence spatiale maximale pouvant être représentée avec un pas d’échantillonnage  $p$  est donnée par  $f_{\max} = (2p)^{-1}$ . La relation entre la fréquence spatiale maximale  $f_{\max}$  et l’angle de diffraction maximum  $\theta$  est donnée par l’équation des réseaux de diffraction [12] par  $\sin(\theta) = \lambda f_{\max}$ . Ainsi, le rayon  $R_{i,\max}$  de la région de contribution du point lumineux  $i$  est donné par

$$R_{i,\max} = z_i \tan(\theta) = z_i \tan\left(\arcsin\left(\frac{\lambda}{2p}\right)\right), \quad (5)$$

comme illustré Figure 4.

La fonction fenêtre  $h_i$  est donc définie par

$$h_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} < R_{i,\max} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (6)$$

Enfin, il est important de noter que le terme de dépendance temporelle  $\exp(j\omega t)$  n’apparaît pas dans l’équation (3) car les calculs peuvent se faire à temps fixé sans perte de généralité [12].

Ainsi, l’onde objet complexe dans le plan de l’hologramme peut être calculée comme la superposition de toutes les ondes sphériques émises par tous les points de la scène :

$$O(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{a_i}{r_i} \exp[j(kr_i + \phi_i)] h_i(x, y), \quad (7)$$

avec  $N$  le nombre de points de la scène.

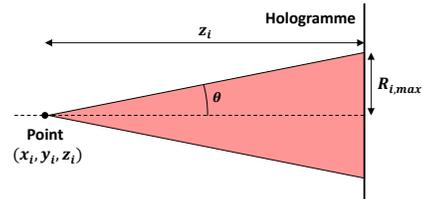


FIGURE 4 – Région de contribution d’un point lumineux

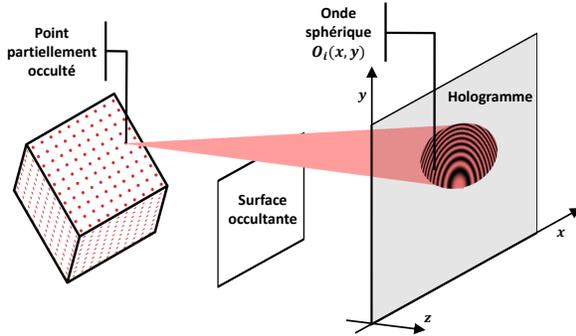


FIGURE 5 – Prise en compte des occultations lors du calcul de l’onde objet par analyse géométrique de la scène : la région de contribution du point lumineux dans le plan de l’hologramme est réduite à cause de la surface occultante.

### Prise en compte des occultations et de l’illumination

La méthode originale proposée par Brown [14] est relativement simple à mettre en œuvre et est potentiellement la plus flexible pour générer l’hologramme d’une scène 3D. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les occultations dans la scène, réduisant fortement le réalisme de la scène restituée. En effet, la prise en compte des occultations dans la scène 3D est nécessaire pour que les objets plus proches occultent correctement les objets plus lointains.

Dans [15], l’auteur propose une méthode pour prendre en compte les occultations dans la scène lors du calcul de l’onde objet. La méthode proposée prend en compte les occultations en effectuant une analyse géométrique de la scène : l’algorithme consiste à calculer la région de contribution de chacun des points lumineux de la scène dans le plan de l’hologramme en fonction des éventuelles surfaces occultantes entre ce point et le plan de l’hologramme (Figure 5). L’illumination de la scène est prise en compte en utilisant un nuage de points très dense avec une amplitude correspondant à la somme d’une composante d’ambiance, d’une composante diffuse et d’une composante spéculaire. Afin d’éviter que les ondes sphériques émises par les points de la scène n’interfèrent entre elles, la

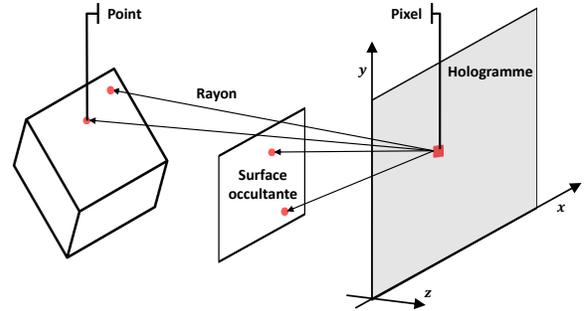


FIGURE 6 – Calcul de l’onde objet par lancer de rayons : des rayons distribués uniformément dans la direction horizontale et verticale sont lancés depuis chaque pixel de l’hologramme. L’intersection de ces rayons avec la scène produit un nuage de points qui sont considérés comme des sources lumineuses sphériques.

phase des points est initialisée de manière aléatoire.

Une autre méthode pour prendre en compte les occultations dans la scène lors du calcul de l’onde objet consiste en l’utilisation du lancer de rayons [16–18]. Des rayons distribués uniformément dans la direction horizontale et verticale sont lancés depuis chaque pixel de l’hologramme. L’intersection de ces rayons avec la scène produit un nuage de points qui sont considérés comme des sources lumineuses sphériques (Figure 6). L’onde provenant de ces points est alors calculée pour chacun des pixels de l’hologramme en utilisant la formule (7). La technique du lancer de rayons prend en compte naturellement les occultations de la scène.

### Réduction de la complexité

Une autre limitation de la méthode originale proposée par Brown [14] est sa grande complexité algorithmique puisqu’elle nécessite un calcul par point de la scène et par pixel de l’hologramme. Ainsi, sa complexité algorithmique est de l’ordre de  $\alpha NM$ , avec  $\alpha$  le nombre d’opérations arithmétiques,  $N$  le nombre de points de la scène et  $M$  le nombre de pixels de l’hologramme. Plusieurs méthodes ont été proposées

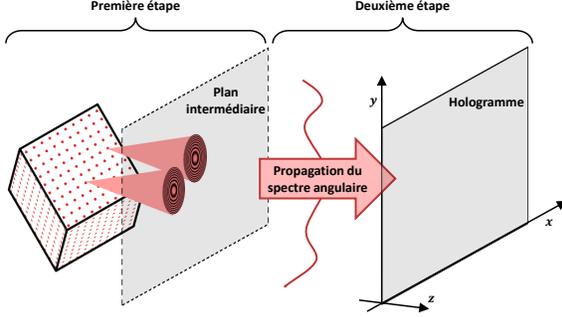


FIGURE 7 – Réduction de la complexité du calcul de l’onde objet par la méthode du plan intermédiaire : l’onde lumineuse issue de chacun des points de la scène est calculée dans le plan intermédiaire, puis propagée dans le plan de l’hologramme par la formule du spectre angulaire.

pour réduire cette complexité.

Pour réduire la complexité du calcul de l’onde objet, une méthode simple consiste à positionner la scène très proche du plan de l’hologramme et à ne calculer l’onde lumineuse issue des sources que dans leur région de contribution [19]. Comme la scène est très proche du plan de l’hologramme, la région de contribution de chacun des points de la scène est très petite, et la charge de calcul est donc réduite. La complexité algorithmique de cette méthode est de l’ordre de  $\alpha NM'$ , avec  $M'$  le nombre moyen de pixels des régions de contribution des sources dans le plan de l’hologramme. On a

$$M' = \pi \left( \frac{\overline{R_{\max}}}{p} \right)^2 < M, \quad (8)$$

avec  $\overline{R_{\max}}$  le rayon moyen des régions de contribution des sources dans le plan de l’hologramme et  $p$  le pas d’échantillonnage. Bien que cette méthode permette de réduire considérablement le temps de calcul de l’hologramme, pour certaines applications il n’est pas possible de positionner la scène suffisamment proche du plan de l’hologramme.

Une autre méthode consiste à échantillonner l’onde objet dans un plan intermédiaire situé entre la scène et l’hologramme [20–23] (Figure 7). L’algorithme de

simulation de la propagation des ondes comprend alors deux étapes. La première étape consiste à échantillonner l’onde objet issue du nuage de points lumineux dans le plan intermédiaire en utilisant la formule (7). Comme le plan intermédiaire est très proche de la scène, la région de contribution de chacun des points de la scène est très petite, et la charge de calcul est donc réduite. La complexité algorithmique de cette première étape est également de l’ordre de  $\alpha NM'$ , avec  $M'$  le nombre moyen de pixels des régions de contribution des sources dans le plan intermédiaire. La deuxième étape consiste à propager l’onde objet depuis le plan intermédiaire jusqu’au plan de l’hologramme en utilisant la formule de propagation du spectre angulaire [12], qui nécessite deux transformées de Fourier et une multiplication complexe. La complexité algorithmique de cette deuxième étape est de l’ordre de  $2\beta M \log(M)$ , avec  $\beta$  le nombre d’opérations arithmétiques. Ainsi, la complexité totale de cette méthode est de l’ordre de  $\alpha NM' + 2\beta M \log(M)$ . Lorsque  $N$  est très grand, la complexité devient  $\alpha NM' + 2\beta M \log(M) \approx \alpha NM'$ .

Une autre manière de réduire la complexité du calcul de l’onde objet est de réduire le nombre d’opérations arithmétiques  $\alpha$  nécessaires au calcul de l’onde sphérique.

Le calcul de la distance oblique donnée par l’équation (4) nécessitant un nombre d’opérations arithmétiques non négligeable, plusieurs méthodes ont été proposées pour la calculer plus rapidement. Ainsi, plusieurs méthodes tirent parti du fait que la distance d’un point de la scène change peu d’un échantillon de l’hologramme à un autre, et utilisent une relation de récurrence pour la calculer, diminuant les temps de calcul de manière significative [24, 25]. Dans [19], les auteurs proposent de pré-calculer cette distance oblique et de la stocker dans une table de correspondance indexée suivant  $x_i$ ,  $y_i$  et  $z_i$ . Cette table de correspondance est alors simplement adressée lors du calcul de l’onde objet.

Une autre méthode pour réduire le nombre d’opérations arithmétiques nécessaires au calcul de l’onde objet est de pré-calculer les ondes sphériques émises par un ensemble de sources lumineuses  $s_i$  de coordonnées  $(0, 0, z_i)$  et de les stocker dans une table de correspondance indexée suivant  $z_i$  [26–28]. Ainsi, l’onde

objet émise par la scène peut être simplement calculée en adressant la table de correspondance pour chacun des points de la scène et en ajoutant leurs contributions dans le plan de l'hologramme. Cette méthode permet de réduire considérablement le temps de calcul de l'onde objet. Dans [29], les auteurs proposent de réduire l'occupation mémoire de la table de correspondance en exploitant la symétrie circulaire d'une onde sphérique échantillonnée dans un plan. La méthode proposée consiste à ne stocker dans la table de correspondance qu'une ligne de l'onde sphérique échantillonnée dans la direction radiale. Pour chaque plan de la scène situé à la distance  $z_i$  du plan de l'hologramme, l'onde sphérique complète est générée à partir de la ligne pré-calculée et stockée dans une table de correspondance temporaire. L'onde sphérique issue de chacun des points du plan est alors générée en adressant cette table de correspondance temporaire.

Enfin, il est possible de réduire la complexité du calcul de l'onde objet en diminuant le nombre  $N$  de points de la scène dont l'onde sphérique doit être calculée.

Une méthode pour réduire le nombre  $N$  de points de la scène est de tirer parti des redondances spatiales au sein d'une scène 3D [30]. La méthode proposée comprend trois étapes. La première étape consiste à analyser les redondances spatiales dans la scène en regroupant les points adjacents de la scène ayant la même profondeur  $z_i$  et la même intensité. Ces groupements de points sont ensuite classés en fonction du nombre  $N_i$  de points qui les composent. La seconde étape consiste à utiliser une table de correspondance indexée par  $z_i$  et  $N_i$  pour stocker l'onde lumineuse issue des groupements de  $N_i$  points en ajoutant les ondes sphériques émises par chacun des points du groupement. La troisième étape consiste à adresser cette table de correspondance pour calculer l'onde issue de tous les groupements de points. En utilisant cette approche, le nombre de points de la scène  $N$  peut ainsi être fortement diminué, et par conséquent le temps de calcul de l'onde objet est réduit.

Une autre méthode pour réduire le nombre de points de la scène  $N$  est de tirer parti des redondances temporelles entre deux images consécutives d'une vidéo 3D [31–35]. En effet, il n'y a que peu

de changements entre deux images d'une vidéo, et il n'est pas nécessaire de recalculer toute l'onde objet pour chaque image. Le principe est de détecter les changements dans la scène, de calculer l'onde lumineuse des points qui ont changé et d'ajouter cette onde à l'onde objet de l'image précédente.

Bien que de nombreuses méthodes aient été proposées pour réduire le temps de calcul de l'onde objet à partir d'un nuage de points, cette approche présente toujours une grande complexité. En effet, pour que l'image 3D de l'objet apparaisse solide et continue, la scène doit être composée d'une grande densité de points, rendant le calcul de l'onde objet beaucoup trop long pour être utilisé dans un système temps réel.

## 4.2 A partir d'un maillage de polygones

### Méthode originale

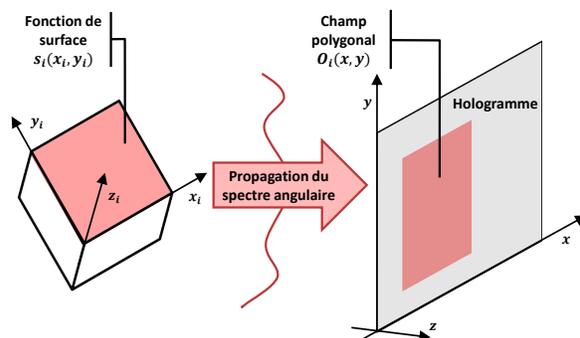


FIGURE 8 – Calcul de l'onde objet à partir d'un maillage de polygones : chaque polygone propage une onde jusqu'au plan hologramme.

Pour contourner les limites des méthodes basées sur une représentation de la scène sous forme d'un nuage de points, une méthode basée sur un maillage de la scène en polygones a été proposée [36]. Suivant cette approche, la scène est représentée sous la forme d'un maillage de polygones en 3D (Figure 8). Chacun des polygones constituant la scène est considéré comme une source de lumière surfacique.

Le système de coordonnées global est défini par  $(x, y, z)$  tel que l'hologramme est situé dans le plan de coordonnées  $(x, y, 0)$ . Des coordonnées locales sont définies pour chaque polygone  $i$  par  $(x_i, y_i, z_i)$ , telles que le polygone est situé dans le plan  $(x_i, y_i, 0)$ . Pour chaque polygone, une fonction surfacique complexe  $s_i(x_i, y_i)$  est définie par

$$s_i(x_i, y_i) = a_i(x_i, y_i) \exp[j\phi_i(x_i, y_i)], \quad (9)$$

où l'amplitude  $a_i(x_i, y_i)$ , définie par des calculs d'illuminations, donne au polygone sa forme et sa texture, et la phase  $\phi_i(x_i, y_i)$  est définie arbitrairement.

Le champ lumineux complexe  $O_i$  émis par le polygone dans le plan hologramme est appelé champ polygonal.  $O_i(x, y)$  ne peut pas être calculé à l'aide des formules de propagation classiques telles que la propagation du spectre angulaire car ces formules ne peuvent s'appliquer que dans le cas de la propagation entre deux plans parallèles [12]. Dans [37–41], les auteurs proposent une méthode pour calculer la propagation d'une onde lumineuse entre deux plans non parallèles basée sur une rotation de coordonnées dans le domaine de Fourier. Cette méthode peut être implémentée en utilisant deux transformées de Fourier rapide, une multiplication complexe et une interpolation du spectre de Fourier. La complexité algorithmique de cette méthode est de l'ordre de  $2\beta M \log(M)$ , avec  $\beta$  le nombre d'opérations arithmétiques et  $M$  le nombre de pixels de l'hologramme. Le temps de calcul de cette propagation est comparable à celui des formules de propagation classiques entre deux plans parallèles.

L'onde objet peut ainsi être calculée comme la somme des champs polygonaux  $O_i(x, y)$  dans le plan de l'hologramme :

$$O(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} O_i(x, y). \quad (10)$$

La complexité algorithmique de cette méthode est de l'ordre de  $2\beta NM^n \log(M^n)$ , avec  $N$  le nombre de polygones de la scène et  $M^n$  le nombre moyen d'échantillons des polygones. Bien que le calcul d'un champ polygonal est plus lent que celui d'une onde sphérique émise par un point, le nombre de polygones nécessaire

pour former la surface d'un objet est très inférieur au nombre de points. Ainsi, le calcul total de l'onde objet dans le cas d'une approche par maillage polygonal peut être moins long que dans le cas d'une approche par nuage de points.

### Prise en compte des occultations et de l'illumination

Malgré ses nombreux atouts, la méthode originale proposée par Leseberg [36] ne prend pas en compte les occultations, ni l'illumination de la scène, réduisant fortement le réalisme de l'image restituée. Dans [39], les auteurs proposent un modèle numérique d'illumination pour améliorer l'aspect visuel de l'objet. Dans [42, 43], les auteurs proposent une méthode pour prendre en compte les occultations lors du calcul de l'onde objet. Cette méthode utilise la formule de propagation entre deux plans non parallèles présentée dans [37] pour calculer l'occultation d'une onde lumineuse par une surface polygonale.

Dans [44, 45], les auteurs utilisent le modèle d'illumination de Blinn et Torrance-Sparrow [46, 47] pour la prise en compte de surfaces avec diverses propriétés de réflexion. La méthode consiste à décomposer chaque polygone de la scène en un ensemble de micro-facettes inclinées. L'onde lumineuse incidente sur chaque micro-facette est réfléchie dans une direction déterminée par l'angle d'incidence de la lumière et par l'angle d'inclinaison de la facette. Ainsi, l'onde lumineuse émise par chaque polygone est donnée par la somme des ondes lumineuses réfléchies par l'ensemble des micro-facettes le composant. Dans [48, 49], les auteurs utilisent la méthode Finite Difference Time Domain (FDTD) [50] pour calculer l'onde lumineuse réfléchie par un polygone donné en fonction de ses propriétés de surface.

Le principal inconvénient des méthodes basées sur un maillage polygonal de la scène est la grande quantité de mémoire nécessaire au calcul de la propagation de tous les champs polygonaux lorsque l'hologramme est de grande résolution. Dans [51], les auteurs proposent une méthode pour réduire l'utilisation de la mémoire principale durant le calcul de l'onde objet en divisant l'onde objet en segments. Seuls quelques segments de l'onde sont stockés et traités simultanément.

ment. Cette méthode permet de calculer la propagation d'un grand champ lumineux, même dans le cas où il ne peut pas être stocké entièrement dans la mémoire principale.

### Réduction de la complexité

Dans [52], les auteurs proposent une méthode pour calculer de manière analytique l'onde objet d'une scène composée de facettes polygonales directement dans le domaine fréquentiel. L'algorithme permet de calculer directement le spectre de Fourier d'un champ polygonal dans le plan hologramme analytiquement, en évitant ainsi de devoir faire une transformée de Fourier par polygone. Une fois le spectre de Fourier de l'onde objet calculé, il faut effectuer une transformée de Fourier inverse pour obtenir l'onde objet dans le plan hologramme. La complexité algorithmique de cette méthode est de l'ordre de  $\alpha NM + \beta M \log(M)$ , avec  $N$  le nombre de polygones de la scène et  $M$  le nombre de pixels de l'hologramme.

Dans [53], les auteurs proposent une méthode pour calculer l'onde objet à partir d'un champ polygonal pré-calculé correspondant à un polygone de taille et de forme connues. La méthode consiste à pré-calculer et à stocker dans une table de correspondance le champ polygonal émis dans le plan de l'hologramme par un polygone de taille et de forme connues. Ensuite, pour chaque polygone de la scène, le champ pré-calculé est transformé en fonction de la translation et de la rotation du polygone à traiter pour générer le champ polygonal associé. Enfin, l'onde objet est calculée par superposition de tous les champs polygonaux de la scène. La complexité algorithmique de cette méthode est de l'ordre de  $\alpha NM$ , avec  $N$  le nombre de polygones de la scène et  $M$  le nombre de pixels de l'hologramme.

## 5 Représentation de l'onde objet

Une fois l'onde objet calculée dans le plan de l'hologramme, il faut adopter une représentation de celle-ci qui puisse être encodée en hologramme, c'est-à-dire en valeurs réelles et positives. Une fois l'hologramme

obtenu, celui-ci peut être imprimé sur une diapositive transparente ou affiché sur un *Spatial Light Modulator* (SLM). Tandis qu'un hologramme acquis optiquement ne peut moduler que l'amplitude de l'onde de référence incidente, un hologramme généré numériquement et affiché sur un SLM peut moduler l'amplitude et/ou la phase de l'onde incidente [12].

### 5.1 Modulation d'amplitude

Un hologramme qui module uniquement l'amplitude de l'onde de référence incidente est appelé hologramme d'amplitude. Un hologramme d'amplitude peut facilement être généré en simulant l'interférence entre l'onde objet préalablement calculée et l'onde de référence. Ainsi, si  $O = |O| \exp(j\phi(O))$  et  $R = |R| \exp(j\phi(R))$  représentent respectivement l'onde objet et l'onde de référence dans le plan de l'hologramme, l'intensité calculée est donnée par

$$\begin{aligned} I_{total} &= (O + R)(O + R)^* \\ &= |O|^2 + |R|^2 + 2\Re\{OR^*\}, \end{aligned} \quad (11)$$

où  $\Re\{C\}$  correspond à la partie réelle du nombre complexe  $C$ . Dans l'équation (11), les premier et second termes sont respectivement l'intensité de l'onde objet et l'intensité de l'onde de référence. Lors de la restitution, ces termes sont inutiles et produisent l'ordre de diffraction zéro, un artefact indésirable. Le troisième terme est le motif d'interférence entre l'onde objet et l'onde de référence. Ce motif d'interférence contient toute l'information holographique nécessaire et suffisante pour la restitution de l'onde objet.

Comme toute l'information holographique est contenue dans le troisième terme de l'équation (11), les deux premiers termes n'ont pas besoin d'être calculés, et l'équation (11) devient

$$I = 2\Re\{OR^*\}. \quad (12)$$

Cette technique a été introduite pour la première fois par Burch [54], puis proposée à nouveau par Lucente [26]. Lucente la désigne "intensité bipolaire" car l'intensité calculée contient à la fois des valeurs positives et négatives. Cette intensité est numériquement plus simple à calculer que  $I_{total}$  et présente l'avantage de ne pas produire l'ordre de diffraction zéro lors de

la restitution. Une fois que cette intensité bipolaire a été calculée, elle doit être normalisée afin d'avoir des valeurs positives pour pouvoir être imprimée sur une diapositive ou affichée sur un SLM. L'étape de normalisation ne modifie pas les capacités de restitution de l'hologramme.

## 5.2 Modulation de phase

Un hologramme qui module la phase de l'onde de référence incidente est appelé hologramme de phase. Comme il ne module pas l'amplitude de l'onde incidente, un hologramme de phase a une meilleure efficacité de diffraction qu'un hologramme d'amplitude. Cependant, la génération d'un hologramme de phase à partir de l'onde objet complexe est un problème non-linéaire pour lequel on ne peut pas trouver de solution analytique. En effet, plusieurs hologrammes de phase différents peuvent restituer la même onde objet. Par conséquent, la génération d'un hologramme de phase ne peut être effectuée qu'en utilisant un algorithme itératif.

Il existe plusieurs familles d'algorithmes itératifs permettant de générer un hologramme de phase, telles que les algorithmes de recuit simulé, de direct binary search ou encore les algorithmes génétiques. Parmi celles-ci, la plus connue est la famille des Transformée de Fourier Itératives (IFTA). Le premier algorithme IFTA a été proposé par Hirsch et al. en 1971 [55], puis adapté pour la génération d'hologrammes de phase par Gerchberg et Saxton [56]. Cet algorithme est ainsi souvent référencé comme algorithme de Gerchberg-Saxton dans la littérature. La Figure 9 présente un schéma bloc de cet algorithme.

Cet algorithme commence avec un hologramme initial, qui peut être défini comme l'onde objet complexe dans le plan de l'hologramme. A chaque itération  $k$ , l'algorithme suit ces étapes :

1. Le champ lumineux dans le plan hologramme est propagé jusqu'au plan objet, formant le champ objet  $O_k = a_k \exp(j\varphi_k)$
2. L'amplitude  $a_k$  du champ  $O_k$  est remplacée par l'amplitude cible de la scène  $a$ , produisant un nouveau champ objet  $O'_k = a \exp(j\varphi_k)$
3. Ce nouveau champ objet est propagé jusqu'au

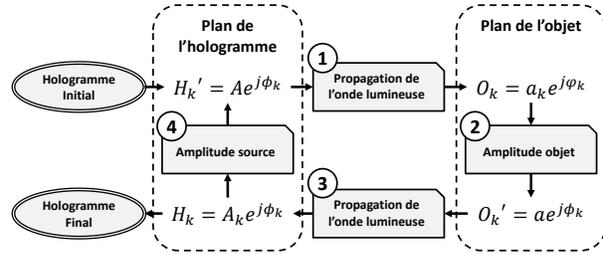


FIGURE 9 – Schéma bloc de l'algorithme de Gerchberg-Saxton

plan de l'hologramme, produisant le champ lumineux  $H_k = A_k \exp(j\phi_k)$

4. L'amplitude  $A_k$  du champ  $H_k$  est remplacée par l'amplitude  $A$  de l'onde de référence utilisée pour la restitution, produisant un nouvel hologramme  $H'_k = A \exp(j\phi_k)$

Ce processus est réitéré jusqu'à ce qu'un hologramme de phase qui reproduit l'onde objet soit atteint à une certaine erreur près. Fienup a démontré que cet algorithme permet de diminuer l'erreur de l'onde objet restituée à chaque pas d'itération [57].

## 5.3 Modulation d'amplitude et de phase

Un hologramme qui module à la fois l'amplitude et la phase de l'onde de référence est appelé hologramme à modulation complexe. En modulant à la fois l'amplitude et la phase de l'onde incidente, la restitution de l'onde objet par l'hologramme ne présente aucun artefact, permettant à l'objet d'être observé clairement. Malheureusement, les SLMs actuels peuvent moduler soit la phase, soit l'amplitude d'une onde lumineuse, mais pas les deux. Ainsi, l'affichage d'un hologramme complexe ne peut se faire qu'à l'aide de deux SLMs, l'un permettant de moduler l'amplitude de l'onde de référence, l'autre permettant d'en moduler la phase [58–60]. Une autre méthode est d'utiliser un séparateur de faisceaux pour combiner les ondes lumineuses diffractées par deux SLMs, l'un affichant la partie réelle et l'autre affichant la partie imaginaire de l'hologramme complexe [61–63]. Enfin,

d'autres méthodes ont été proposées pour afficher un hologramme complexe à l'aide d'un seul SLM en utilisant plusieurs pixels pour chaque valeur complexe de l'hologramme [64–66] au prix d'une perte de résolution ; de plus l'hologramme doit être recalculé pour convenir aux spécificités de l'affichage.

## 6 Liens avec la synthèse d'image

Les méthodes de génération numérique d'hologrammes peuvent faire penser à certaines techniques utilisées en synthèse d'image. En effet, en génération numérique d'hologrammes comme en synthèse d'images, on cherche à calculer une représentation de l'onde lumineuse provenant d'une scène 3D dans un plan 2D. De plus, dans les deux cas la scène peut être décomposée en un nuage de points ou en un maillage de polygones.

Cependant, en synthèse d'image l'objectif est de calculer l'image perçue par une caméra virtuelle depuis un point de vue donné. La valeur de chaque pixel de l'image est proportionnelle à l'intensité de l'onde lumineuse émise par l'élément de surface visible depuis celui-ci. Pour les méthodes de génération numérique d'hologrammes, en revanche, l'objectif est de calculer la totalité du champ lumineux issu de la scène dans un plan de coupe donné, puis de représenter ce champ sous la forme d'une transmittance à valeurs réelles et positives. Ce processus ne correspond pas à la formation optique d'une image sur le capteur d'une caméra.

Néanmoins, bien que leurs objectifs soient différents, les calculs impliqués en synthèse d'image et en génération numérique d'hologrammes présentent certaines similitudes. De ce fait, certaines techniques utilisées en synthèse d'image telles que le lancer de rayons ont été directement adaptées à la génération d'hologrammes. De la même façon, on peut penser que d'autres méthodes utilisées en synthèse d'images puissent être adaptées pour améliorer l'efficacité des méthodes de génération numérique d'hologrammes.

## 7 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un état de l'art des méthodes de génération numérique d'hologrammes. Nous avons vu que le processus de génération numérique d'un hologramme se fait généralement en deux étapes : (1) une étape de calcul de l'onde lumineuse issue de la scène, et (2) une étape de représentation de cette onde complexe en hologramme à valeurs réelles et positives. Nous avons présenté deux approches différentes pour le calcul de l'onde objet : une approche basée sur une représentation de la scène sous forme d'un nuage de points et une approche basée sur un maillage polygonal de la scène. Une fois calculée, l'onde objet doit être représentée sous la forme d'un hologramme à valeurs réelles et positives qui peut moduler l'amplitude et/ou la phase de l'onde lumineuse cohérente issue d'un laser pour restituer une image en trois dimensions de la scène.

Grâce à ces méthodes, il est possible de générer l'hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par un processus d'interférence entre deux ondes lumineuses. Les principales limitations liées à l'holographie conventionnelle, telles que la nécessité d'utiliser une source laser cohérente ainsi que d'avoir un système optique extrêmement stable, peuvent ainsi être évitées. Les scènes réelles peuvent être capturées à la lumière naturelle à l'aide d'une caméra de profondeur, permettant à l'holographie d'être utilisée en extérieur et ouvrant son champ d'application à la vidéo 3D. Ainsi, de nombreuses applications pratiques telles que les systèmes de télé-présence ou la télé-médecine pourront bénéficier des nombreux atouts de l'holographie pour la visualisation 3D.

## Références

- [1] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin, and Henry Fuchs. The Office of the Future : A Unified Approach to Image-based Modeling and Spatially Immersive Displays. In *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*,

- SIGGRAPH '98, pages 179–188, New York, NY, USA, 1998. ACM. 00817.
- [2] Charles Wheatstone. Contributions to the Physiology of Vision.—Part the First. On Some Remarkable, and Hitherto Unobserved, Phenomena of Binocular Vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 128 :371–394, January 1838. 01156.
- [3] Neil A. Dodgson. Analysis of the viewing zone of multiview autostereoscopic displays. volume 4660, pages 254–265, 2002. 00056.
- [4] David M. Hoffman, Ahna R. Girshick, Kurt Akeley, and Martin S. Banks. Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3) :33, March 2008.
- [5] Robert Jacob Collier, Christoph B. Burckhardt, and Lawrence H. Lin. *Optical holography*. Academic Press, 1971. 00022.
- [6] P. Hariharan. *Optical Holography : Principles, Techniques and Applications*. Cambridge University Press, July 1996. 00989.
- [7] C. Slinger, C. Cameron, and M. Stanley. Computer-Generated Holography as a Generic Display Technology. *Computer*, 38(8) :46–53, August 2005. 00154.
- [8] Myung K. Kim, Chau-Jern Cheng, Jinwoong Kim, Wolfgang Osten, Pascal Picart, and Hiroshi Yoshikawa. Digital Holography and 3d Imaging : introduction. *Applied Optics*, 53(27) :DH1–DH1, September 2014.
- [9] Paul Smigielski. *Holographie Optique - Principes*, volume base documentaire : 42528210. Editions T.I., October 1998. 00002 fre.
- [10] Denis Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161(4098) :777, 1948. 03149.
- [11] Emmet N. Leith and Juris Upatnieks. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory. *Journal of the Optical Society of America*, 52(10) :1123–1128, October 1962. 01366.
- [12] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. Roberts and Company Publishers, Englewood, Colo, 3rd edition, 2005.
- [13] Emmet N. Leith and Juris Upatnieks. Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects. *Journal of the Optical Society of America*, 54(11) :1295–1301, November 1964. 00902.
- [14] B. R. Brown and A. W. Lohmann. Complex Spatial Filtering with Binary Masks. *Applied Optics*, 5(6) :967–969, June 1966. 00641.
- [15] John S. Underkoffler. Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography. In *Practical Holography XI and Holographic Materials III*, volume Proc. SPIE 3011, pages 19–30, April 1997. 00048.
- [16] Rick H-Y Chen and Timothy D Wilkinson. Computer generated hologram with geometric occlusion using GPU-accelerated depth buffer rasterization for three-dimensional display. *Applied optics*, 48(21) :4246–4255, July 2009.
- [17] Hao Zhang, Neil Collings, Jing Chen, Bill Crossland, Daping Chu, and Jinghui Xie. Full parallax three-dimensional display with occlusion effect using computer generated hologram. *Optical Engineering*, 50(7) :074003–074003–5, 2011. 00014.
- [18] Hao Zhang, Qiaofeng Tan, and Guofan Jin. Full parallax three-dimensional computer generated hologram with occlusion effect using ray casting technique. *Journal of Physics : Conference Series*, 415(1) :012048, February 2013. 00000.
- [19] Hiroshi Yoshikawa, Takeshi Yamaguchi, and Ryo Kitayama. Real-Time Generation of Full Color Image Hologram with Compact Distance Look-up Table. In *Advances in Imaging*, OSA Technical Digest (CD), page DWC4. Optical Society of America, April 2009. 00033.
- [20] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane. *Optics Letters*, 34(20) :3133–3135, October 2009.
- [21] Tomoyoshi Shimobaba, Hirotaka Nakayama, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table

- and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display. *Optics Express*, 18(19) :19504–19509, September 2010. 00065.
- [22] Peter Tsang, W.-K. Cheung, T.-C. Poon, and C. Zhou. Holographic video at 40 frames per second for 4-million object points. *Optics Express*, 19(16) :15205–15211, August 2011.
- [23] Jiantong Weng, Tomoyoshi Shimobaba, Naohisa Okada, Hirotaka Nakayama, Minoru Oikawa, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method. *Optics Express*, 20(4) :4018–4023, February 2012. 00038.
- [24] Kyoji Matsushima and Masahiro Takai. Recurrence Formulas for Fast Creation of Synthetic Three-Dimensional Holograms. *Applied Optics*, 39(35) :6587–6594, December 2000. 00075.
- [25] Hiroshi Yoshikawa, Susumu Iwase, and Tada-shi Oneda. Fast computation of Fresnel holograms employing difference. In *Practical Holography XIV and Holographic Materials VI*, volume Proc. SPIE 3956, pages 48–55, May 2000. 00066.
- [26] Mark E. Lucente. Interactive computation of holograms using a look-up table. *Journal of Electronic Imaging*, 2(1) :28–34, January 1993. 00355.
- [27] Seung-Cheol Kim, Jong-Kil Lee, and Eun-Soo Kim. Fast Generation of Computer Generated Hologram with Reduced Look-up Table. In *Adaptive Optics : Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-ROM*, OSA Technical Digest (CD), page DTuB7. Optical Society of America, June 2007. 00002.
- [28] Seung-Cheol Kim and Eun-Soo Kim. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method. *Applied Optics*, 47(19) :D55–D62, July 2008.
- [29] Takashi Nishitsuji, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Fast calculation of computer-generated hologram using the circular symmetry of zone plates. *Optics Express*, 20(25) :27496–27502, December 2012. 00008.
- [30] Seung-Cheol Kim and Eun-Soo Kim. Fast computation of hologram patterns of a 3d object using run-length encoding and novel look-up table methods. *Applied Optics*, 48(6) :1030–1041, February 2009. 00073.
- [31] Wendy Plesniak. Incremental update of computer-generated holograms. *Applied Optics*, 42(6) :1560–1571, June 2003. 00020.
- [32] Seung-Cheol Kim, Jung-Hoon Yoon, and Eun-Soo Kim. Fast generation of three-dimensional video holograms by combined use of data compression and lookup table techniques. *Applied Optics*, 47(32) :5986–5995, November 2008. 00049.
- [33] Seung-Cheol Kim, Xiao-Bin Dong, Min-Woo Kwon, and Eun-Soo Kim. Fast generation of video holograms of three-dimensional moving objects using a motion compensation-based novel look-up table. *Optics Express*, 21(9) :11568–11584, May 2013. 00011.
- [34] Xiao-Bin Dong, Seung-Cheol Kim, and Eun-Soo Kim. MPEG-based novel look-up table for rapid generation of video holograms of fast-moving three-dimensional objects. *Optics Express*, 22(7) :8047, April 2014. 00003.
- [35] Xiao-Bin Dong, Seung-Cheol Kim, and Eun-Soo Kim. Three-directional motion compensation-based novel-look-up-table for video hologram generation of three-dimensional objects freely maneuvering in space. *Optics Express*, 22(14) :16925, July 2014. 00001.
- [36] Detlef Leseberg and Christian Frère. Computer-generated holograms of 3-D objects composed of tilted planar segments. *Applied Optics*, 27(14) :3020–3024, July 1988. 00133.
- [37] Kyoji Matsushima, Hagen Schimmel, and Frank Wyrowski. New creation algorithm for digitally

- synthesized holograms in surface model by diffraction from tilted planes. In *Practical Holography XVI and Holographic Materials VIII*, volume Proc. SPIE 4659, pages 53–60, June 2002. 00012.
- [38] Kyoji Matsushima, Hagen Schimmel, and Frank Wyrowski. Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves. *Journal of the Optical Society of America A*, 20(9) :1755–1762, September 2003. 00194.
- [39] Kyoji Matsushima and Akinobu Kondoh. Wave optical algorithm for creating digitally synthetic holograms of three-dimensional surface objects. In *Practical Holography XVII and Holographic Materials IX*, volume Proc. SPIE 5005, pages 190–197, May 2003. 00023.
- [40] Kyoji Matsushima. Rotational Transformation for Reconstruction of Digital Holography and CGH Creation. In *Adaptive Optics : Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-ROM*, OSA Technical Digest (CD), page DWB4. Optical Society of America, June 2007. 00000.
- [41] Kyoji Matsushima. Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography. *Applied Optics*, 47(19) :D110–D116, July 2008.
- [42] Kyoji Matsushima and Akinobu Kondoh. A wave-optical algorithm for hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms for three-dimensional objects. In *Practical Holography XVIII : Materials and Applications*, volume Proc. SPIE 5290, pages 90–97, June 2004. 00028.
- [43] Kyoji Matsushima. Exact hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms. In *Practical Holography XIX : Materials and Applications*, volume Proc. SPIE 5742, pages 25–32, May 2005.
- [44] Kazuhiro Yamaguchi and Yuji Sakamoto. Computer generated hologram with characteristics of reflection : reflectance distributions and reflected images. *Applied Optics*, 48(34) :H203–H211, 2009. 00022.
- [45] Kazuhiro Yamaguchi, Tsubasa Ichikawa, and Yuji Sakamoto. Calculation method for computer-generated holograms considering various reflectance distributions based on microfacets with various surface roughnesses. *Applied Optics*, 50(34) :H195–H202, 2011. 00002.
- [46] James F. Blinn. Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures. In *Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH ’77, pages 192–198, New York, NY, USA, 1977. ACM. 01231.
- [47] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57(9) :1105, September 1967. 01655.
- [48] Tsubasa Ichikawa, Yuji Sakamoto, Agus Subagyo, and Kazuhisa Sueoka. Calculation method of reflectance distributions for computer-generated holograms using the finite-difference time-domain method. *Applied Optics*, 50(34) :H211–H219, 2011. 00002.
- [49] Tsubasa Ichikawa, Yuji Sakamoto, Agus Subagyo, and Kazuhisa Sueoka. A method of calculating reflectance distributions for CGH with FDTD using the structure of actual surfaces. volume 7957, pages 795707–795707–6, 2011. 00001.
- [50] Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3) :302–307, 1966. 12243.
- [51] Kyoji Matsushima and Sumio Nakahara. Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method. *Applied Optics*, 48(34) :H54–H63, December 2009.
- [52] Lukas Ahrenberg, Philip Benzie, Marcus Magnor, and John Watson. Computer generated holograms from three dimensional meshes using

- an analytic light transport model. *Applied Optics*, 47(10) :1567–1574, April 2008.
- [53] Hironobu Sakata and Yuji Sakamoto. Fast computation method for a Fresnel hologram using three-dimensional affine transformations in real space. *Applied Optics*, 48(34) :H212–H221, December 2009. 00041.
- [54] J.J. Burch. A computer algorithm for the synthesis of spatial frequency filters. *Proceedings of the IEEE*, 55(4) :599–601, April 1967. 00120.
- [55] P. M. Hirsch, J. A. Jordan, and B. J. Lesem. Method of making an object independent diffuser, 1971. 00000.
- [56] RW Gerchberg and Owen Saxton. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 35 :237–246, 1972. 03267.
- [57] J. R. Fienup. Iterative Method Applied To Image Reconstruction And To Computer-Generated Holograms. *Optical Engineering*, 19(3) :193297–193297–, 1980. 00434.
- [58] Luiz Gonçalves Neto, Danny Roberge, and Yunlong Sheng. Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions. *Applied Optics*, 35(23) :4567–4576, August 1996. 00121.
- [59] R. Tudela, I. Labastida, E. Martin-Badosa, S. Vallmitjana, I. Juvells, and A. Carnicer. A simple method for displaying Fresnel holograms on liquid crystal panels. *Optics Communications*, 214(1–6) :107–114, December 2002.
- [60] Mei-Li Hsieh, Mao-Ling Chen, and Chau-Jern Cheng. Improvement of the complex modulated characteristic of cascaded liquid crystal spatial light modulators by using a novel amplitude compensated technique. *Optical Engineering*, 46(7) :070501–070501–3, 2007. 00018.
- [61] Raul Tudela, Estela Martin-Badosa, Ignasi Juan I. Labastida, Encarnacion Pleguezuelos, Santiago Vallmitjana, Ignacio P. Juvells, and Arturo Carnicer. Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices. In *19th Congress of the International Commission for Optics : Optics for the Quality of Life*, volume Proc. SPIE 4829, pages 458–459, November 2003. 00049.
- [62] Raul Tudela, Estela Martin-Badosa, Ignasi Labastida, Santiago Vallmitjana, and Artur Carnicer. Wavefront reconstruction by adding modulation capabilities of two liquid crystal devices. *Optical Engineering*, 43(11) :2650–2657, 2004. 00000.
- [63] Soo-Gil Kim, Byoung-ho Lee, and Eun-Soo Kim. Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram. *Applied Optics*, 36(20) :4784–4791, July 1997. 00057.
- [64] Philip Birch, Rupert Young, Chris Chatwin, Maria Farsari, David Budgett, and John Richardson. Fully complex optical modulation with an analogue ferroelectric liquid crystal spatial light modulator. *Optics Communications*, 175(4–6) :347–352, March 2000.
- [65] Victor Arrizón. Complex modulation with a twisted-nematic liquid-crystal spatial light modulator : double-pixel approach. *Optics Letters*, 28(15) :1359–1361, August 2003. 00027.
- [66] Victor Arrizón, Guadalupe Méndez, and David Sánchez-de La-Llave. Accurate encoding of arbitrary complex fields with amplitude-only liquid crystal spatial light modulators. *Optics Express*, 13(20) :7913–7927, October 2005. 00030.