



Yvon RENOTTE

U3A Liège – 30 mai 2023



Holographie

Hologrammes



Imagerie

Université de Liège
 Département AGO (*Astrophysique, Géophysique et Océanographie*)
HOLOLAB - Sart-Tilman, Bât.B5a, B-4000 Liège
 directeur: shabraken@ulg.ac.be / fondateur: y.renotte@ulg.ac.be – enseignant / chercheur honoraire

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

1

L'holographie est une *technique d'imagerie* . . .
 . . . comme la photographie
 On l'a souvent appelée « *la photographie en relief* » . . .
 . . . à tort !

L'holographie est une *technique d'imagerie 3D* . . .
 . . . la photographie est une *technique d'imagerie 2D*
 . . . les deux processus sont très différents
 . . . point commun: les deux techniques ont utilisé le même matériau
 photosensible pour l'enregistrement (du moins dans les débuts):
 les émulsions argentiques AgHal

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

2

L'holographie est une *technique d'imagerie 3D* . . .
 . . . comme la stéréoscopie

L'holographie est une *technique d'imagerie 3D* . . .
 . . . elle fournit des images en « **relief vrai** », perspective comprise !
 . . . elle utilise un *codage interférentiel*
 donc un éclairage cohérent: LASER

. . . la stéréoscopie fournit des images en « **relief figé** »
 . . . la perspective a été fixée par la géométrie adoptée lors de l'enregistrement
 . . . la lecture nécessite l'usage de lunettes et/ou de dispositifs spécifiques
 . . . elle exploite le principe de la vision binoculaire
 . . . éclairage naturel . . . comme la photographie dont elle est « très proche »

© Yven RENOTTE - (25 mai 2023)

3

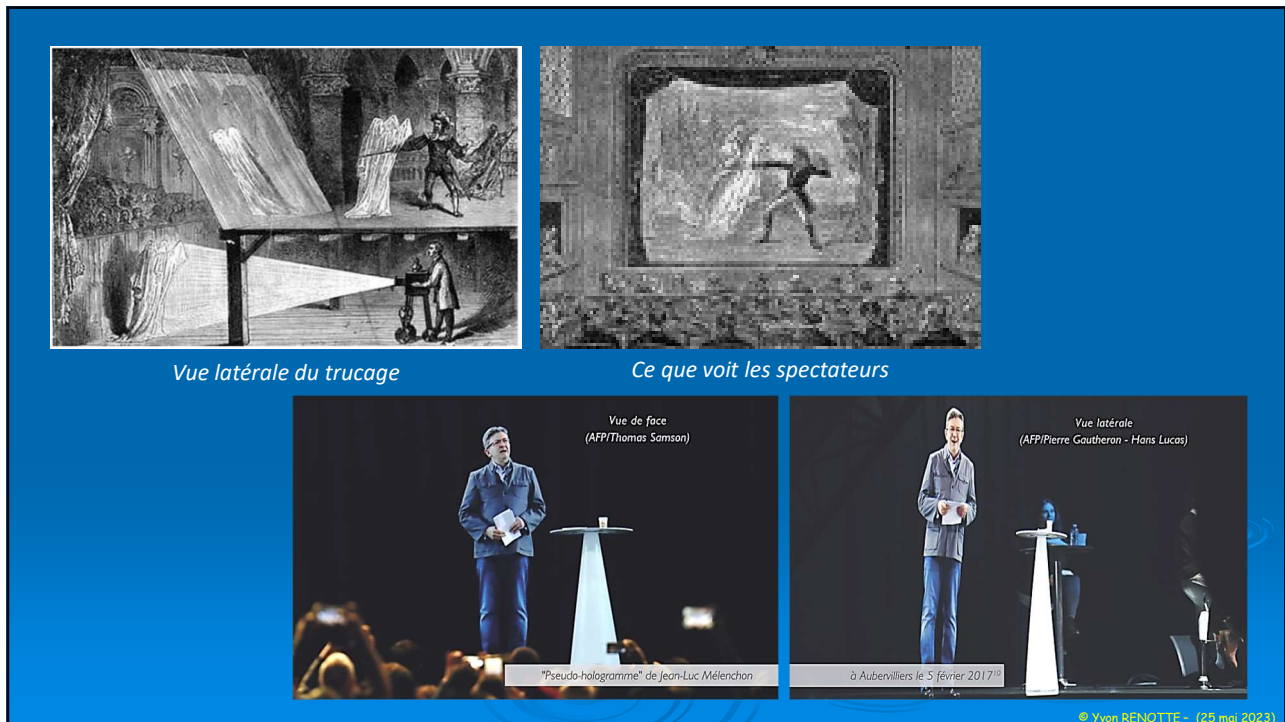
L'holographie est une *technique d'imagerie 3D* . . .
 . . . les « Pepper's Ghosts »
 . . . comme la « performance capture 3D »
 et autres avatars électroniques ou non
 qui sont des « trompe l'œil » plus ou moins sophistiqués . . .
 . . . utilisant des techniques très diverses pour simuler la 3D
 . . . ou la 2,5D

. . . les *Pepper's Ghosts* existent depuis plusieurs siècles au théâtre
 . . . *fantômes chez Shakespeare et Molière* = image virtuelle
 aujourd'hui: projection vidéo sur des écrans semi-transparents, bombés,
 sur fond sombre: *discours du candidat Mélenchon – présidentielle 2017*
shows virtuels de « personnages disparus »

. . . la *performance capture 3D* incruste électroniquement des personnages sur
 des structures « invisibles » 3D en mouvement: une forme d'animation
 films *Avatar, Tintin – Le secret de la Licorne, spectacle ABBA*, . . .

© Yven RENOTTE - (25 mai 2023)

4



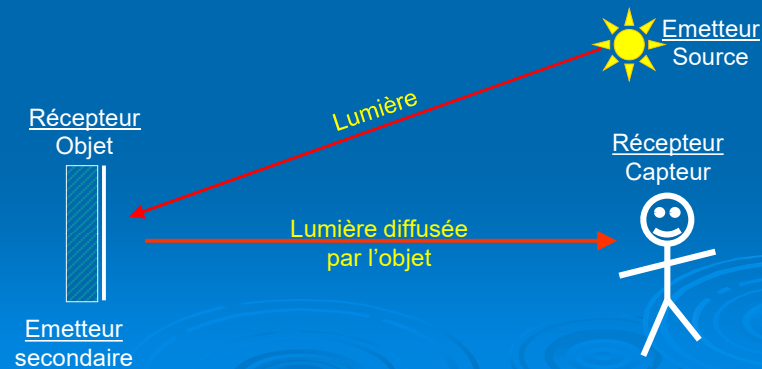
5



6

Les techniques d'imagerie utilisent un schéma commun

- un objet ou une scène à « imager » éclairée par une source de lumière
- un système imageant capable d'enregistrer les informations relatives à l'objet (forme, couleurs, texture, . . .)
- un « véhicule » qui transporte l'information : la lumière



© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

7

La lumière, une question simple ?

Qu'est-ce que la lumière ?

une question (fort) complexe

La lumière

De l'énergie en mouvement susceptible de transporter de l'information même dans le vide

la vision : 60 à 90% des informations sensorielles échangées avec notre environnement

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

8

La lumière, une question simple ?

Qu'est-ce que la lumière ?

une question (fort) complexe

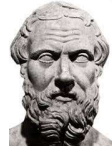
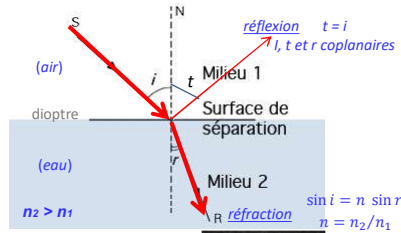
La lumière

De l'énergie en mouvement

« Décrit la propagation de la lumière dans les milieux transparents sur base des lois de la réflexion et de la réfraction sans « s'inquiéter » de la nature de la lumière » : elle rend compte de la formation des images par les instruments

4 modèles

→ un modèle géométrique – de l'antiquité à nos jours



Démocrite (~460 - 370)



René Descartes (1596-1650)



Willebrord Snell (1580-1626)



Isaac Newton (1643-1727)



télescope de 6 poudres (réplique)

La lumière, une question simple ?

Qu'est-ce que la lumière ?

une question (fort) complexe

La lumière

De l'énergie en mouvement

« Décrit les interactions lumière – lumière et rend compte des phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation ». Sa forme la plus évoluée explique la nature électromagnétique des ondes lumineuses : transversalité des composantes et perpendicularité à la direction de propagation; appartenance à une « famille large » comprenant l'IR, l'UV, les rayons X et γ et les ondes radio

4 modèles

→ un mod

→ un modèle ondulatoire / électromagnétique – au 19^{es}



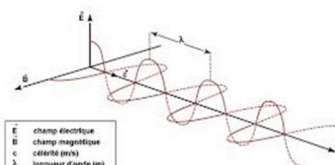
Christiaan Huygens (1629-1695)



Augustin Fresnel (1788-1827)



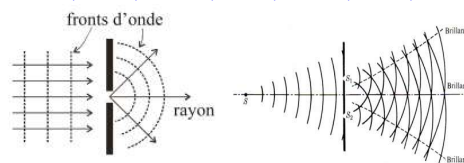
Joseph Fourier (1768-1830)



E : champ électrique
 B : champ magnétique
 c : célérité (m/s)
 λ : longueur d'onde (m)
 T : période (s)
 f : fréquence = 1/T (Hz)



James Clerk Maxwell (1831-1879)



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

Onde : phénomène spatio-temporel
 développement
 - en un point donné: en fonction du temps $y = f(t)$
 - à un moment donné: en fonction de l'espace $y = \varphi(x)$

Onde progressive sinusoïdale (simple)

$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \varphi_0)$

indice de réfraction du milieu $n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ c : vitesse de la lumière dans le vide
 λ_0 : longueur d'onde dans le vide v : vitesse de la lumière dans le milieu
 x : chemin géométrique ; nx : chemin optique $\lambda = vT$ $\lambda_0 = cT$

$c \approx 300\,000 \text{ km/s} = 3.10^8 \text{ m/s}$ (dans le vide)
 lumière visible : $400 \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ (10^{-9} m) $430 \leq \nu \leq 750 \text{ THz}$ (10^{12} Hz)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

11

La lumière, une question simple ?

Qu'est-ce que la lumière ?


une question (fort) complexe

La lumière
 De l'énergie en mouvement

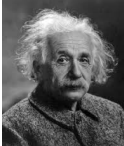
4 modèles

- un mod
- un modèle *ondulatoire / électromagnétique* – au 19^{es}
- un modèle *corpusculaire (photon) / quantique* – au 20^{es}


« Décrit les interactions lumière – matière et rend compte des phénomènes d'émission et d'absorption ainsi que de cohérence ». Elle propose une nature corpusculaire de la lumière formée de « quanta d'énergie », les photons, proportionnelle à la fréquence : elle est à la base du développement de la physique quantique



Max Planck
(1858-1947)



Albert Einstein
(1879 -1955)



Louis de Broglie
(1892-1987)

Absorption – Emission

$\tau \approx 10^{-8} \text{ s}$

E2

E1

niveau microscopique

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

12

La lumière, une question simple ?

Qu'est-ce que la lumière ?

une question (fort) complexe

La lumière

De l'énergie en mouvement

« Comme son nom l'indique, c'est une théorie du « tout » permettant de rendre compte de tous les processus faisant intervenir la lumière ». Outil exceptionnel du point de vue théorique, il s'avère souvent « lourd » à manipuler lorsqu'il s'agit de décrire des processus et/ou interactions « simples »

4 modèles

- un modèle *géométrique* – de l'antiquité à nos jours
- un modèle *ondulatoire / électromagnétique* – au 19^{es}
- un modèle *corpusculaire (photon) / quantique* – au 20^{es}
- un modèle « complet » : l'*électrodynamique quantique*



Richard Ph. Feynman
(1918–1988)

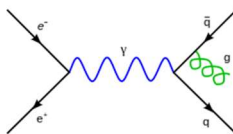


Diagramme de Feynman



Julian Schwinger
(1918 – 1994)



Sin-itiro Tomonaga
(1906–1979)

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

13

La lumière, une question simple ?

Qu'est-ce que la lumière ?

une question (fort) complexe

La lumière

De l'énergie en mouvement susceptible de transporter de l'information même dans le vide

4 modèles

- un modèle *géométrique* – de l'antiquité à nos jours
- un modèle *ondulatoire / électromagnétique* – au 19^{es}
- un modèle *corpusculaire / quantique* – au 20^{es}
- un modèle 'complet' : l'*électrodynamique quantique*

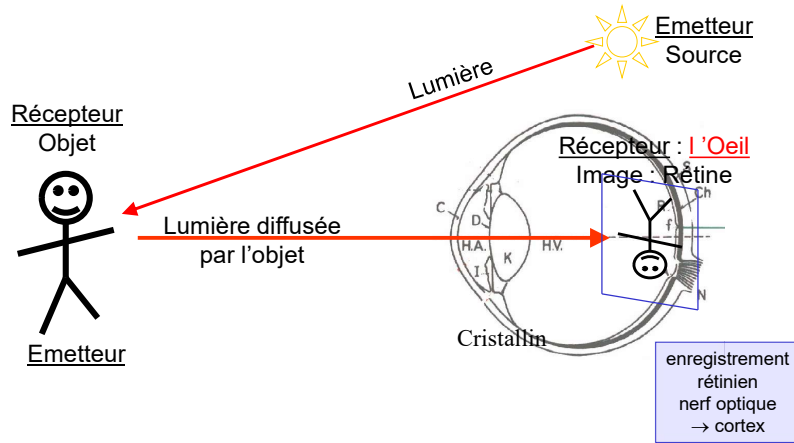
en pratique: on utilise le modèle le mieux adapté au traitement du problème considéré

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

14

Les systèmes optiques imageants

- exemple : l'œil

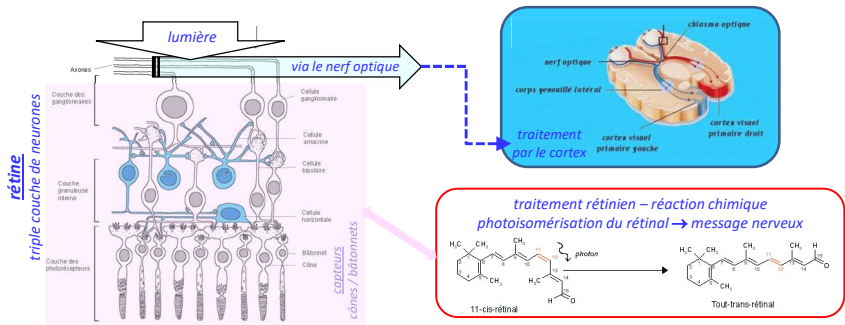


© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

15

Les systèmes optiques imageants

- exemple : le mécanisme de la vision



- pixellisation
- réactions photo-chimiques dans la rétine
 - signaux nerveux transmis au cerveau via le nerf optique
 - traités par le cortex

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

16

Nous savons intuitivement ce que c'est . . . mais qui a inventé la 3D ?



La 3D

- *Qui a inventé la 3D ?*
- **La Nature**
 - *et elle a doté les êtres vivants (du moins le règne animal) de multiples moyens de la percevoir dont la vision binoculaire*



... mais

! La vision binoculaire n'est pas indispensable pour la perception de la 3D !

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

17

Nous n'avons, si l'on peut dire, tenté que de l'imiter en développant des techniques de plus en plus sophistiquées pour reproduire nos sensations visuelles, . . .

- dessin, peinture, bas-reliefs, sculpture, perspective, trompes l'œil, Pepper's Ghost,
- photographie, stéréoscopie, cinématographie, télévision,
- holographie, Performance Capture 3D , réalité augmentée,

. . . et la liste ne cesse de s'allonger,

- . . . réelles . . . ou non
les procédés récents de réalité augmentée ne réussissent-ils pas à nous faire « évoluer dans des mondes virtuels » ?

© Yven RENOTTE - (25 mai 2023)

18

Impressions visuelles

• Reproduction

• Impression visuelle : *ensemble d'informations*



- Formes / Volumes → Géométrie
 - optique géométrique : instruments

- Luminances / Eclairéments
 - photométrie / radiométrie

- Couleurs
 - colorimétrie

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

19

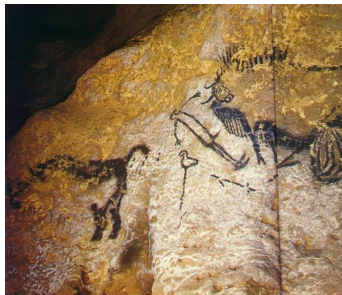
Impressions visuelles

• Reproduction

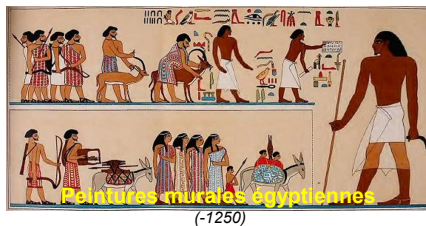
• Dessins et peintures

- les peintures rupestres
- la peinture à l'huile

Peintures pariétales et rupestres



Grottes de Lascaux (-17 / -18000 ans) et Chauvet (-30000 ans)



Peintures murales égyptiennes
(-1250)

Peintures à l'huile

Le Déluge
Voûte de la Chapelle Sixtine
(Michelangelo 1475-1564)



© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

20

Impressions visuelles

- **Reproduction**

- **Dessins et peintures**
 - les peintures rupestres
 - la peinture à l'huile

- **Sculptures**

- les bas-reliefs

Bas-relief votif
de
Guillaume de Wavre

15^e s

Eglise Saint-Jean-
l'Evangeliste
Liège



Bas-relief égyptien
Ptolémée VIII
Temple d'Edfou
(1^{er} s ac)



Fonds baptismaux

12^es
attribué à *Renier de Huy* (?-1150)

Le baptême du Christ
Collégiale Saint-Barthélemy
Liège

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

21

Impressions visuelles

- **Reproduction**

- **Dessins et peintures**
 - les peintures rupestres
 - la peinture à l'huile

- **Sculptures**

- les bas-reliefs
- les statues



**Auguste Prima
Porta**

Musée du Vatican
copie faite en 14 ap.
JC. d'un original en
bronze réalisé en 20
av. JC

**Le dompteur de taureau
(Li Tore)**



Léon Mignon (1847-1898)



Fontaine de la Vierge

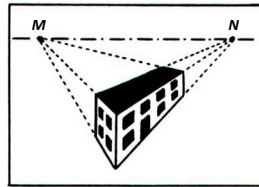
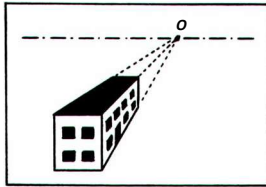
Jean Del Cour (1627-1707)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

22

La reproduction / La suggestion du relief

- La perspective dans le dessin et en peinture



La technique implique une certaine 'déformation' du dessin par rapport aux objets eux-mêmes

- cas d'un objet parallélépipédique vu de face: il y a un point de fuite O
- cas du même objet vu 'en coin': il y a deux points de fuite M et N



perspective accélérée ou 'illusionniste' - trompe l'œil

Galerie des colonnes du Palazzo Spada (1652-53), Rome

Francesco Borromini (1599-1667)



bateau dans le point de fuite central
Ulysse remet Chrysis à son père

Claude Lorraine (1600-1682) Musée du Louvre, Paris (~1644)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

23

La reproduction / La suggestion du relief

- Les trompes l'œil



voûte magistrale (17 m) réalisée en 1685

Andrea Pozzo (1642-1709)

jésuite et peintre italien fameux pour sa maîtrise de la perspective en peinture et en architecture

- Anamorphoses Street Art – Julian Beever (1959-)



la même image observée sous le bon angle...



image observée sous le mauvais angle...

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

24

Impressions visuelles

• Reproduction

- Dessins et peintures
 - les peintures rupestres
 - la peinture à l'huile
 - la **photographie**
- Sculptures
 - les bas-reliefs
 - les statues
 - la **stéréoscopie**
 - l'**holographie**

! Affaires de spécialistes ! => Techniques conviviales

Reproduction fidèle des images = Maîtrise de la reproduction des couleurs et du relief

© Yven RFNOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

25

Impressions visuelles

• Reproduction



Nicéphore Niépce
(1765-1833)

des pionniers



Louis Daguerre
(1787-1851)

- Dessins et peintures
 - les peintures rupestres
 - la peinture à l'huile
 - la **photographie**
- Sculptures
 - les bas-reliefs
 - les statues
 - la **stéréoscopie**
 - l'**holographie**



Nicéphore Niépce (1765-1833)

photographie réalisée en 1827 - la seule qui nous soit parvenue
(Saint-Loup de Varennes - bitume de Judée)

! Affaires de spécialistes ! => Techniques conviviales

Reproduction fidèle des images = Maîtrise de la reproduction des couleurs et du relief

© Yven RFNOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

26

La Photographie

- *Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 2D*
 - **Reproduction en 2D** de l'image d'un volume déterminé par la '*profondeur de champ*' de l'instrument, fonction des caractéristiques de l'instrument d'optique (objectif) formant l'image et de la taille du capteur
 - Relation entre un point objet O_i et un point image J_i
 - Chaque point J_i a une position (x, y) déterminée par celle du point O_i correspondant un éclairement E_{J_i} déterminé par celui E_{O_i} du point O_i correspondant : $E_{J_i} < \propto E_{O_i}$, une couleur ω_i déterminée par celle du point objet correspondant
- **photographie** = distribution de pixels d'éclairements E_{J_i} et de couleurs ω_i dans un plan image (x, y)

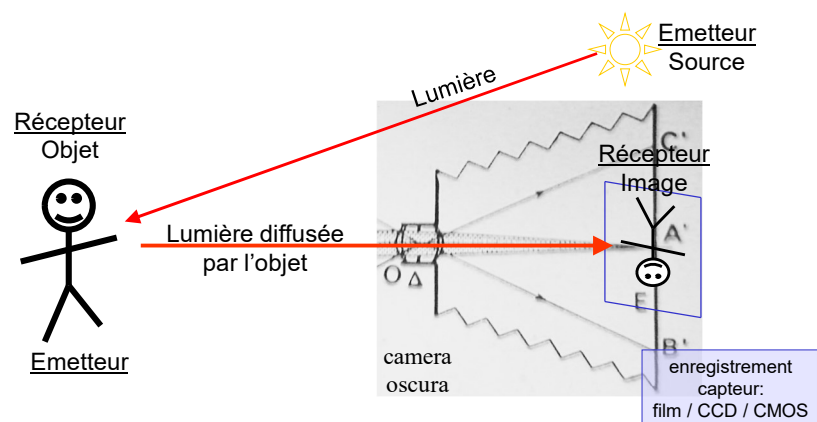
$$I = f(x, y, E_{J_i}, \omega_i)$$

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

27

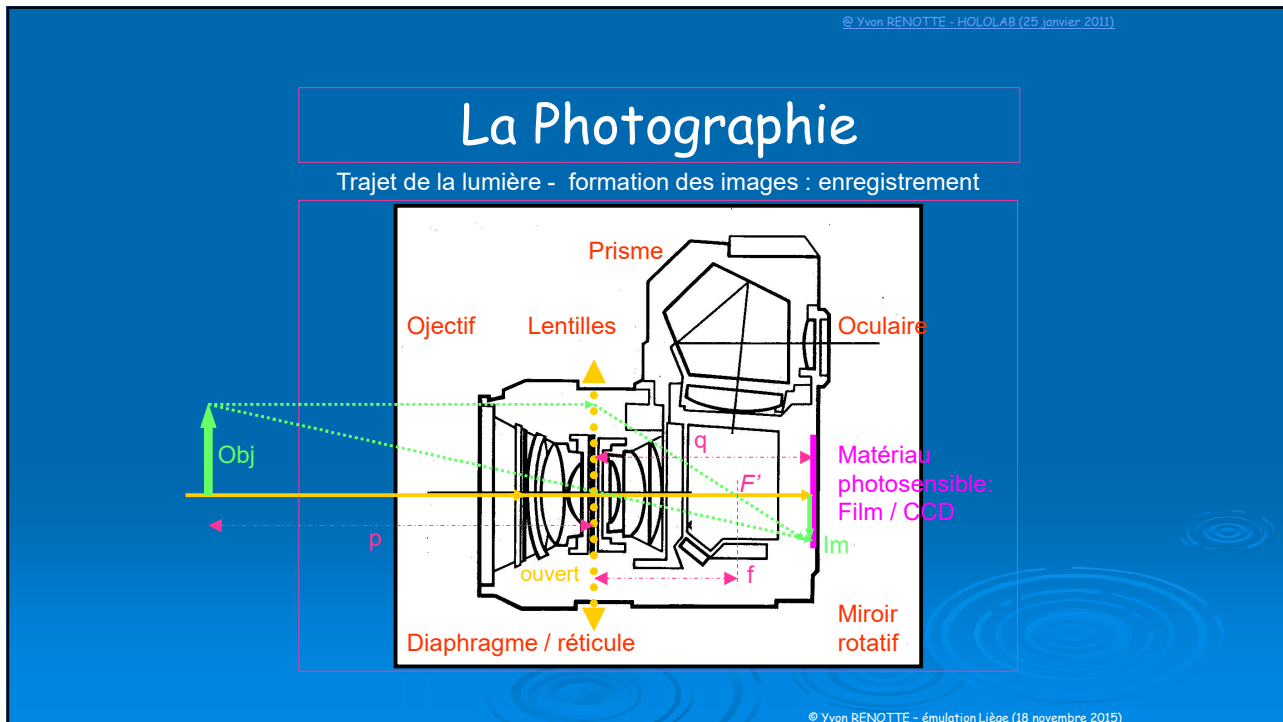
Les systèmes optiques imageants

- exemple : les caméras

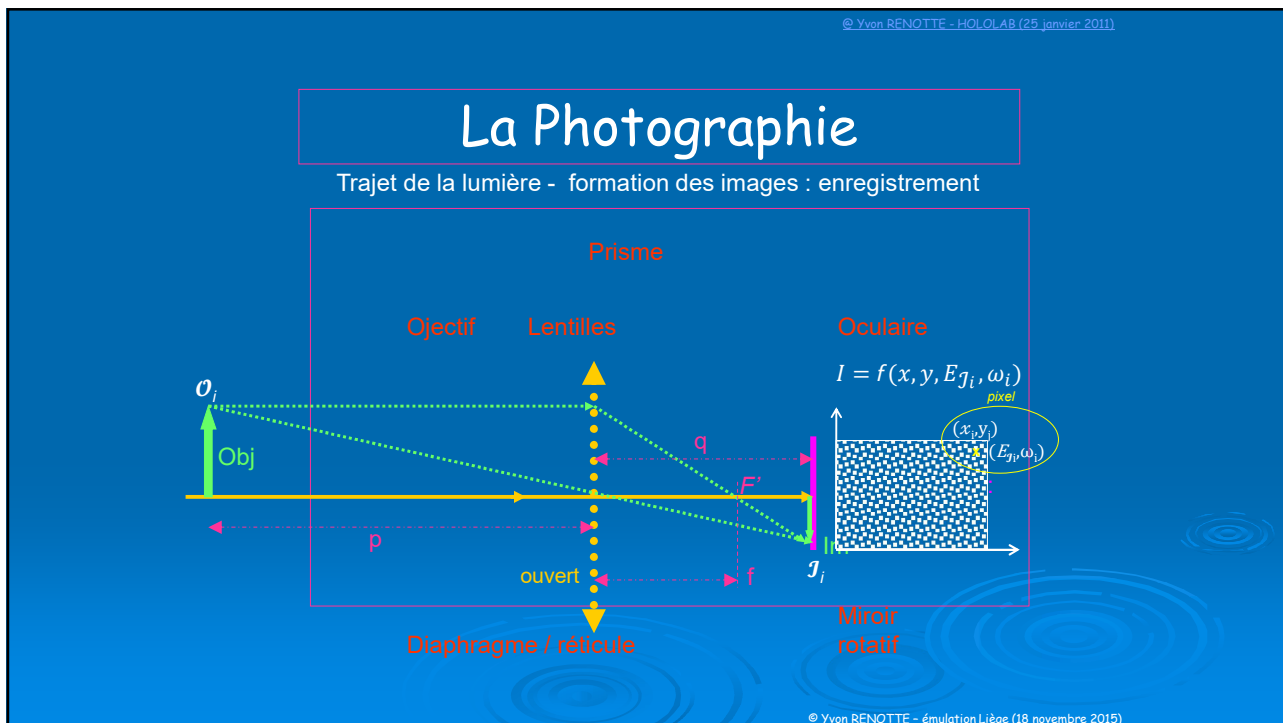


© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

28



29



30

Impressions visuelles

• Reproduction



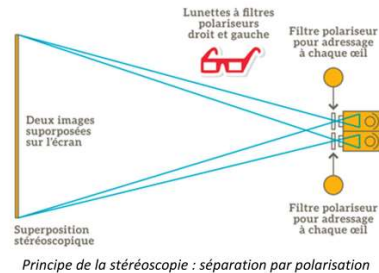
David Brewster
(1781-1868)

des pionniers



Charles Wheatstone
(1802-1875)

- Dessins et peintures
 - les peintures rupestres
 - la peinture à l'huile
 - la **photographie**
- Sculptures
 - les bas-reliefs
 - les statues
 - la **stéréoscopie**
 - l'**holographie**



! Affaires de spécialistes ! => Techniques conviviales

Reproduction fidèle des images = Maîtrise de la reproduction des couleurs et du relief

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

31

Impressions visuelles

• Reproduction



Dennis Gabor
(1900-1979)
Prix Nobel de
Physique 1971

des pionniers

- Dessins et peintures
 - les peintures rupestres
 - la peinture à l'huile
 - la **photographie**
- Sculptures
 - les bas-reliefs
 - les statues
 - la **stéréoscopie**
 - l'**holographie**



Hologramme de transmission effectué à l'ENSAT - Lanion
Yoann Atlas : HeNe (633 nm) - plaque Ultimate Holography



Hologramme de réflexion en exposition
à la Maison de la Science de Liège (lu en lumière blanche)

! Affaires de spécialistes ! => Techniques conviviales

Reproduction fidèle des images = Maîtrise de la reproduction des couleurs et du relief

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

32

Comparaison de deux techniques de reproduction du relief

- *La stéréoscopie*
 - *L'holographie*
-
- *avantages*
 - *inconvénients*

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

33

La perception des volumes

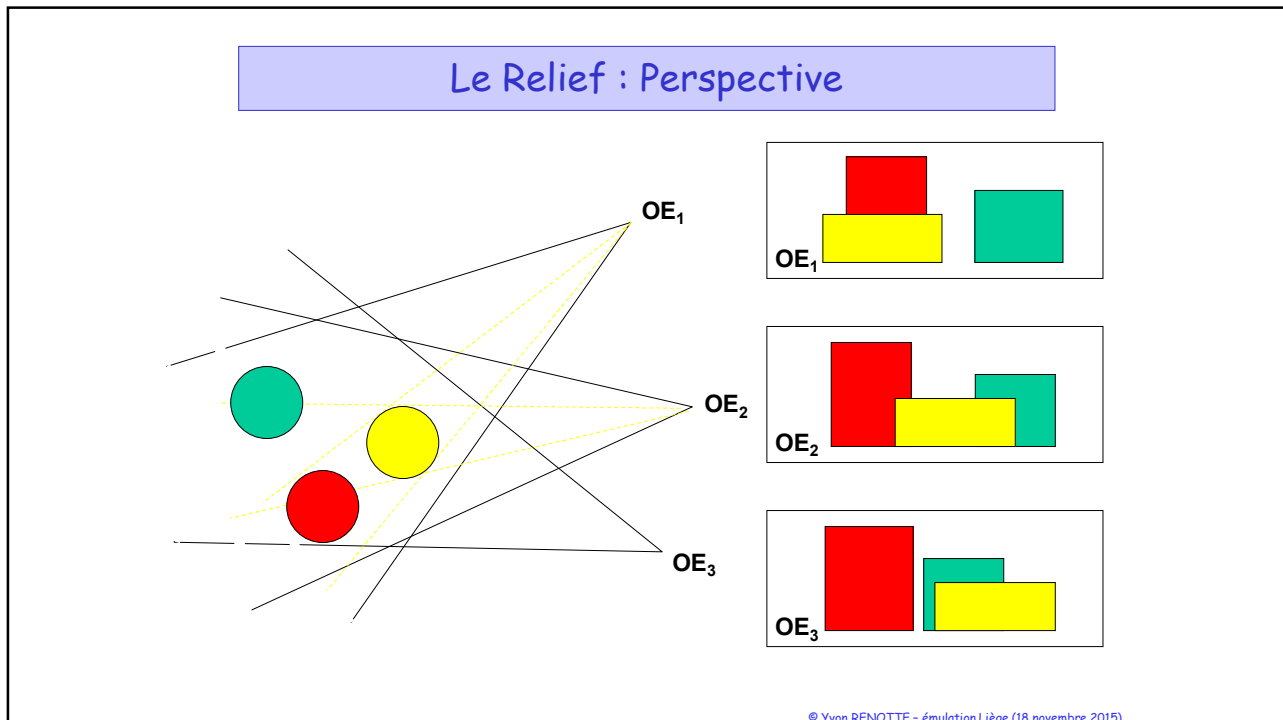
Préalables

- *La perspective*
- *La vision binoculaire*

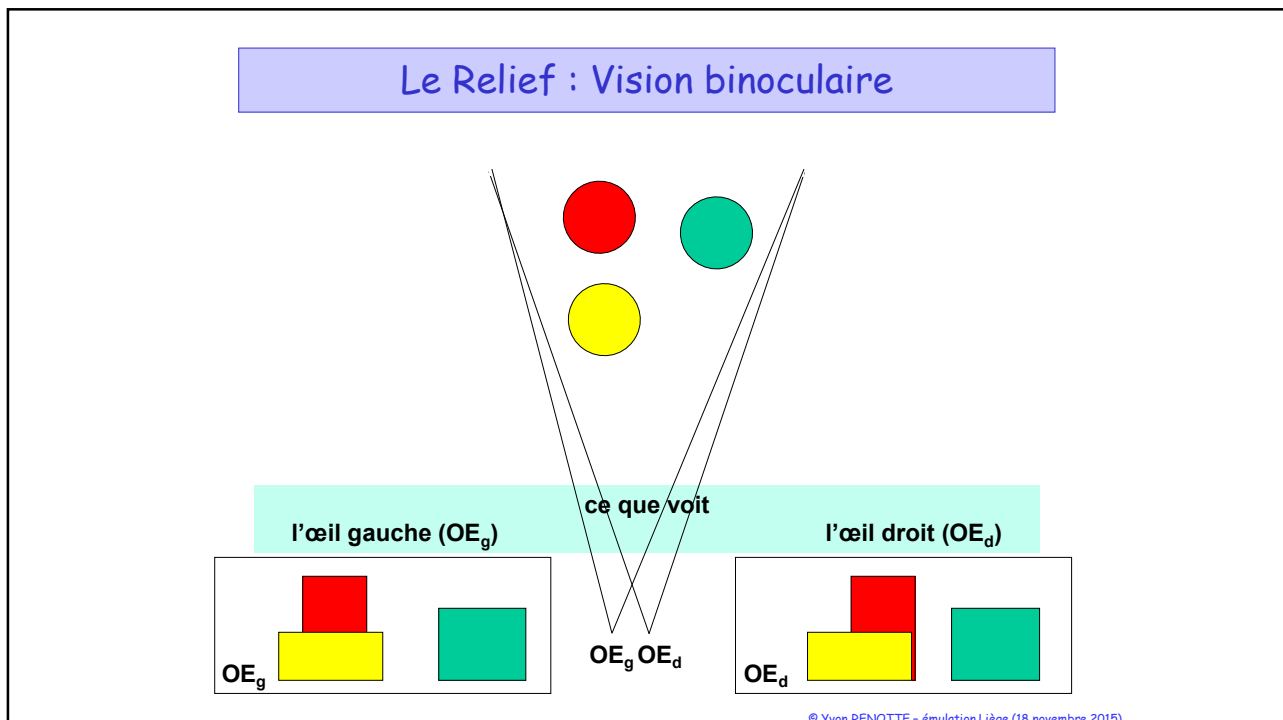
! La vision binoculaire n'est pas indispensable pour la perception de la 3D !

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

34



35



36

La Stéréoscopie

- *Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D*

Elle est quasiment née en même temps que la photographie, au 19^{es}

- **Principe**

Elle consiste à adresser séparément, à chacun des yeux d'un ou de plusieurs spectateurs, des images plus ou moins décalées d'une scène enregistrée. Le cerveau fait le reste

La technique simule en quelque sorte la vision binoculaire

De nombreuses méthodes d'adressage ont été inventées

- **Séparation des images**

- **Avantages**

Projection possible et lecture simultanées par plusieurs spectateurs

Reproduction du mouvement et des couleurs → cinéma 3D

- *dès les années '50 (anaglyphes et essais de polarisation) – tombé en désuétude*

- *réapparaît dans les années '80 : de plus en plus de succès*

Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art

Techniques d'enregistrement et de lecture similaires à la photographie et/ou la vidéo

Techniques numériques (plus récemment) – Photogrammétrie – Impression 3D (LASER - CAO)

→ *technique extrêmement populaire*

- **Inconvénients**

Lecture par lunettes à verres colorés ou polarisants (excepté l'auto-stéréoscopie)

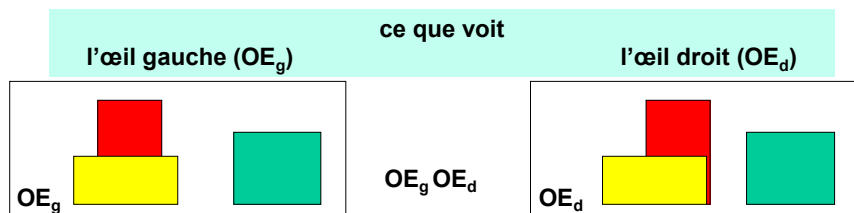
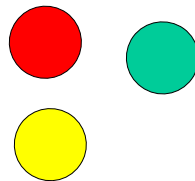
Perspective figée de la scène imagée

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

37

La Stéréoscopie

Enregistrement

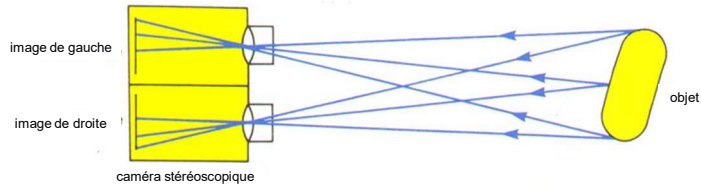


© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

38

La Stéréoscopie

Enregistrement



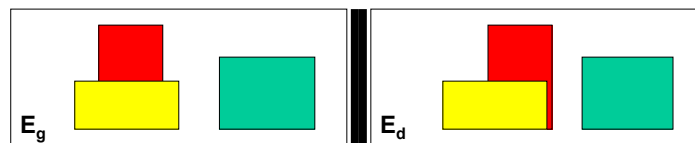
Appareil stéréo réflex, double 24 × 36,

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

39

La Stéréoscopie

Lecture



adressage séparé
à l'œil droit (OE_d)
et à l'œil gauche (OE_g)

adressage par
- couleurs
- polarisation
- système optique
- dispositif mécanique
- ...

relief figé

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

40

La Stéréoscopie

- **Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D**
Elle est quasiment née en même temps que la photographie, au 19^{es}
- **Principe**
Elle consiste à adresser séparément, à chacun des yeux d'un ou de plusieurs spectateurs, des images plus ou moins décalées d'une scène enregistrée. Le cerveau fait le reste
La technique simule en quelque sorte la vision binoculaire
De nombreuses méthodes d'adressage ont été inventées
- **Séparation des images**
- **Avantages**
Projection possible et lecture simultanées par plusieurs spectateurs
Reproduction du mouvement et des couleurs → cinéma 3D
 - dès les années '50 (*anaglyphes et essais de polarisation*) – tombé en désuétude
 - réapparaît dans les années '80 : de plus en plus de succès
 Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art
Techniques d'enregistrement et de lecture similaires à la photographie et/ou la vidéo
Techniques numériques (plus récemment) – Photogrammétrie – Impression 3D (LASER - CAO)
→ *technique extrêmement populaire*
- **Inconvénients**
Lecture par lunettes à verres colorés ou polarisants (excepté l'auto-stéréoscopie)
Perspective figée de la scène imagée

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

41

La Stéréoscopie

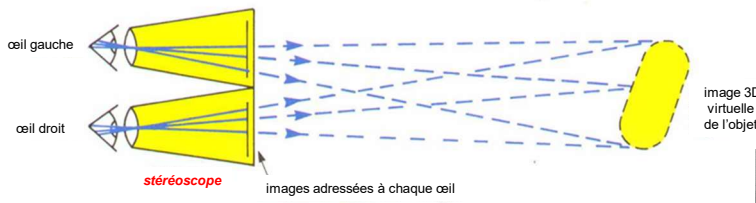
- **Séparation des images**
 - **images / photographies juxtaposées**
 - **stéréoscopes** réfractifs, à prismes ou à miroirs:
Wheatstone et Brewster (1838-1840), Holmes (1850-1900)
 - plus récemment : les **visionneuses individuelles à oculaires**
système View-Master® à disques (depuis 1940) ou Lestrade® à bandes
 - **couleurs**
 - **anaglyphes** : Rollmann (1853), D'Almeida (1858) et Ducos du Hauron (1891)
abandonné dans les '50 : lecture par lunettes à verres de couleurs différentes peu confortable, voire fatigante
 - **images imbriquées / réseaux lenticulaires**
 - **photographie intégrale** de Lippmann (début du 20^{es})
 - **auto-stéréoscopie** de Bonnet (années 1940 à 1960)
 - **polarisations croisées** des faisceaux droit et gauche
 - lecture via des lunettes à verres polarisants
 - lecture successive alternée par séparation temporelle synchronisée des images via pilotage infra-rouge

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

42

La Stéréoscopie

Lecture




œil gauche

œil droit

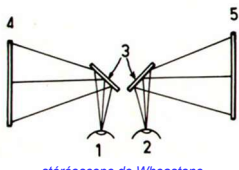
stéréoscope

images adressées à chaque œil

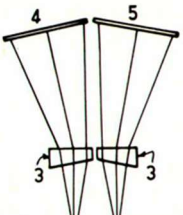
image 3D virtuelle de l'objet



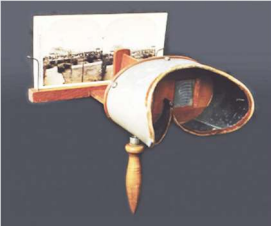
Oliver Wendell Holmes
(1809-1894)



stéréoscope de Wheatstone
1 et 2 œils gauche et droit
3 miroirs
4 et 5 images gauche et droite



stéréoscope de Brewster
1 et 2 œils gauche et droit, 3 prismes
4 et 5 images gauche et droite

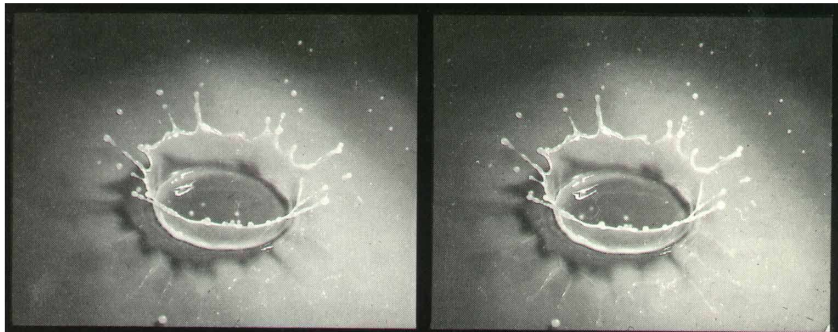


stéréoscope de Holmes

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

43

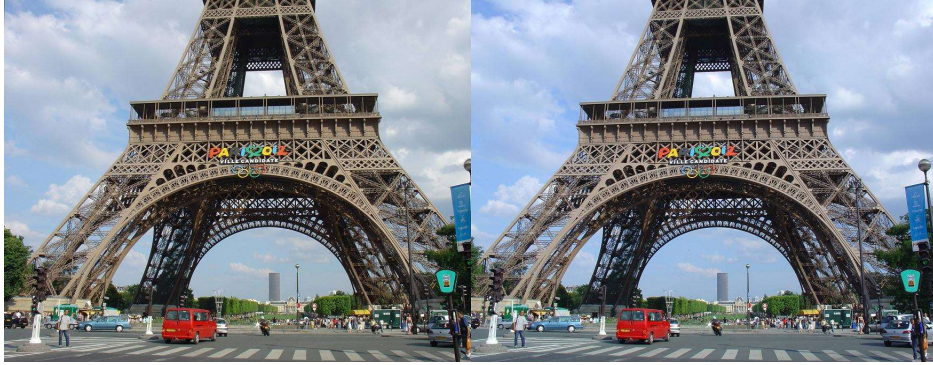
Photographies juxtaposées



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

44

Photographies juxtaposées



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

45

La Stéréoscopie

Lecture



Stéréoscope View-Master



Stéréoscope Lestrade

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

46

La Stéréoscopie



Le ViewMaster® de Mattel et Google est disponible à la vente depuis le 5 octobre 2015



© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

47

La Stéréoscopie

- Séparation des images

- images / photographies juxtaposées

- **stéréoscopes** réfractifs, à prismes ou à miroirs:
Wheatstone et Brewster (1838-1840), Holmes (1850-1900)
- plus récemment : les **visionneuses individuelles à oculaires**
système View-Master® à disques (depuis 1940) ou Lestrade® à bandes

- couleurs

- **anaglyphes** : Rollmann (1853), D'Almeida (1858) et Ducos du Hauron (1891)
abandonné dans les '50 : lecture par lunettes à verres de couleurs différentes peu confortable, voire fatigante

- images imbriquées / réseaux lenticulaires

- **photographie intégrale** de Lippmann (début du 20^{es})
- **auto-stéréoscopie** de Bonnet (années 1940 à 1960)

- polarisations croisées des faisceaux droit et gauche

- lecture via des lunettes à verres polarisants
- lecture successive alternée par séparation temporelle synchronisée des images via pilotage infra-rouge

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

48

La Stéréoscopie

Lecture

deux images superposées sur l'écran

projection stéréoscopique

filtre d'adressage à chaque œil

filtre d'adressage à chaque œil
lunettes

Lunettes pour anaglyphes

Lunettes polarisantes

Lunettes alternantes à cristaux liquides

© Yven RFNOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

49

Anaglyphes

Joseph Charles d'Almeida
(1822- 1880)

Louis Ducos du Hauron
(1837- 1920)

© Yven RFNOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

50

La Stéréoscopie

- Séparation des images

- images / photographies juxtaposées

- **stéréoscopes** réfractifs, à prismes ou à miroirs:
Wheatstone et Brewster (1838-1840), Holmes (1850-1900)
- plus récemment : les **visionneuses individuelles à oculaires**
système View-Master® à disques (depuis 1940) ou Lestrade® à bandes

- couleurs

- **anaglyphes** : Rollmann (1853), D'Almeida (1858) et Ducos du Hauron (1891)
abandonné dans les '50 : lecture par lunettes à verres de couleurs différentes peu confortable, voire fatigante

- images imbriquées / réseaux lenticulaires

- **photographie intégrale** de Lippmann (début du 20^{es})
- **auto-stéréoscopie** de Bonnet (années 1940 à 1960)

- polarisations croisées des faisceaux droit et gauche

- lecture via des lunettes à verres polarisants
- lecture successive alternée par séparation temporelle synchronisée des images via pilotage infra-rouge

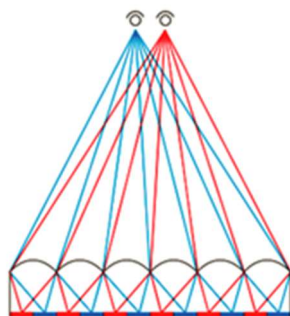
© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

51

Images imbriquées - Réseaux lenticulaires



Gabriel Lippmann
(1845-1921)
Prix Nobel de
Physique 1908



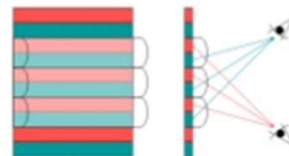
Images multivues / imbriquées
disposées en ligne horizontale derrière
réseau lenticulaire
photographie intégrale de Lippmann



Maurice Bonnet
(1907-1994)



Maurice Bonnet derrière son filtre réseaux lenticulaires,
surfaces gaufrées



© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

52

La Stéréoscopie

- Séparation des images

- images / photographies juxtaposées

- **stéréoscopes** réfractifs, à prismes ou à miroirs:
Wheatstone et Brewster (1838-1840), Holmes (1850-1900)
- plus récemment : les **visionneuses individuelles à oculaires**
système View-Master® à disques (depuis 1940) ou Lestrade® à bandes

- couleurs

- **anaglyphes** : Rollmann (1853), D'Almeida (1858) et Ducos du Hauron (1891)
abandonné dans les '50 : lecture par lunettes à verres de couleurs différentes peu confortable, voire fatigante

- images imbriquées / réseaux lenticulaires

- **photographie intégrale** de Lippmann (début du 20^{es})
- **auto-stéréoscopie** de Bonnet (années 1940 à 1960)

- polarisations croisées des faisceaux droit et gauche

- lecture via des lunettes à verres polarisants
- lecture successive alternée par séparation temporelle synchronisée des images via pilotage infra-rouge

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

53

Cinéma 3D



film américain réalisé en relief (3D)
par **Alfred Hitchcock**
sorti en **1954**



L'Étrange Créature du Lac Noir
(*Creature from the Black Lagoon*)
film fantastique américain (1954) tourné pour être
visionné 3D par procédé de lunettes polarisantes
version anaglyphe à la télévision française le 19 octobre **1982**



film américain de science-fiction pouvant être regardé en 3D
2009
lunettes alternantes à cristaux liquides



Les lunettes «3D Video» fournies par le magazine de
télévision partenaire de l'opération

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

54

La Stéréoscopie

- **Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D**
Elle est quasiment née en même temps que la photographie, au 19^{es}
- **Principe**
Elle consiste à adresser séparément, à chacun des yeux d'un ou de plusieurs spectateurs, des images plus ou moins décalées d'une scène enregistrée. Le cerveau fait le reste
La technique simule en quelque sorte la vision binoculaire
De nombreuses méthodes d'adressage ont été inventées
- **Séparation des images**
- **Avantages**
Projection possible et lecture simultanées par plusieurs spectateurs
Reproduction du mouvement et des couleurs → cinéma 3D
- *dès les années '50 (anaglyphes et essais de polarisation) – tombé en désuétude*
- *réapparaît dans les années '80 : de plus en plus de succès*
Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art
Techniques d'enregistrement et de lecture similaires à la photographie et/ou la vidéo
Techniques numériques (plus récemment) – Photogrammétrie – Impression 3D (LASER - CAO)
→ *technique extrêmement populaire*
- **Inconvénients**
Lecture par lunettes à verres colorés ou polarisants (excepté l'auto-stéréoscopie)
Perspective figée de la scène imagée

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

55

L'Holographie

- **Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D**
Souvent appelée 'photographie en relief', elle en diffère fondamentalement
Seul point commun: certains matériaux d'enregistrement (*émulsions argentiques*)
Elle est née au milieu du 20^{es}, après l'avènement du **LASER** (1960): *éclairage cohérent*
- **Principe**
Enregistrement de *la totalité de l'information* provenant de chacun des points de la scène imagée *dans l'épaisseur du matériau photosensible*, sous forme de franges d'interférences
→ codage interférométrique / décodage de l'information → éclairage cohérent (LASER)
Plusieurs méthodes d'enregistrement / lecture ont été inventées → *types d'hologrammes*
- **Avantages**
Lecture visuelle sans lunettes ni instrument
Matériaux variés: AgHal, DCG, photopolymères (DCPVA, Dupont, ...), cristaux photoréfractifs, semi-conducteurs, mixtes LC-photopolymères, ...
Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art
Techniques numériques (*Hologrammes générés par ordinateur*) → protections diverses
Difficilement copiable → protections diverses
Maîtrise de la perspective de la scène imagée
- **Inconvénients**
Pas de projection → lecture simultanées par plusieurs spectateurs souvent difficile
Reproduction des couleurs de mieux en mieux maîtrisée
Reproduction du mouvement non maîtrisée → cinéma holographique quasi inexistant
Techniques d'enregistrement et de lecture par codage / décodage interférométrique
→ *technique relativement confidentielle même si de nombreuses applications industrielles et médicales*

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

56

Holographie

• Historique

- 1948 : Dennis GABOR – principes prix Nobel de physique 1971
- 1960 : Lasers



Dennis Gabor (1900-1979)
il a inventé l'holographie



Emmet Leith (1927-2005)



Juris Upatnieks (1936)



Yuri Denisyuk (1927-2006)



Stephen Benton (1941-2003)

Ils ont inventé l'imagerie holographique

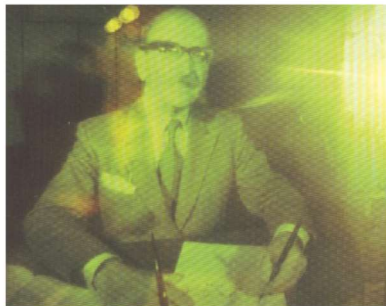
© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

57

Holographie

• Historique

- 1948 : Dennis GABOR – principes prix Nobel de physique



THE PROCEEDINGS OF THE PHYSICAL SOCIETY

Section B

VOL. 64, PART 6

1 June 1951

No. 378 B

Microscopy by Reconstructed Wave Fronts: II

By D. GABOR

Department of Electrical Engineering, Imperial College, London

MS. received 11th September 1950, and in amended form 12th December 1950

ABSTRACT. The theory of diffraction microscopy is completed and extended in different directions. In this two-step method of image formation the object is reconstructed by optical means from a diffraction diagram, taken in coherent illumination with light or with electrons. The 'projection method', originally described, and the 'transmission method', recently proposed by Haine and Dyson, are two variants which can be treated by one theory. The process of image formation, the coherence requirements, and the conditions for a good reconstruction are discussed in detail. It is shown that the reconstructed image of extended objects suffers from some spurious detail, but this can be largely suppressed in the 'dark-field' method of reconstruction, in which the illuminating wave is cut out after it has passed through the diffraction diagram.

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

58

L'Holographie

- Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D

Souvent appelée 'photographie en relief', elle en diffère fondamentalement

Seul point commun: certains matériaux d'enregistrement (*émulsions argentiques*)

Elle est née au milieu du 20^s, après l'avènement du **LASER** (1960): **éclairage cohérent** ➤

- Principe

Enregistrement de **la totalité de l'information** provenant de chacun des points de la scène imagée **dans l'épaisseur du matériau photosensible**, sous forme de franges d'interférences

→ **codage interférométrique / décodage** de l'information → éclairage cohérent (LASER) ➤

Plusieurs méthodes d'enregistrement / lecture ont été inventées → **types d'hologrammes** ➤

- Avantages

Lecture visuelle sans lunettes ni instrument

Matériaux variés: AgHal, DCG, photopolymères (DCPVA, Dupont, ...), cristaux photoréactifs, semi-conducteurs, mixtes LC-photopolymères, ...

Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art ➤

Techniques numériques (**Hologrammes générés par ordinateur**) → protections diverses ➤

Difficilement copiable → protections diverses

Maîtrise de la perspective de la scène imagée

- Inconvénients

Pas de projection → lecture simultanées par plusieurs spectateurs souvent difficile

Reproduction des couleurs de mieux en mieux maîtrisée ➤

Reproduction du mouvement non maîtrisée → cinéma holographique quasi inexistant ➤

Techniques d'enregistrement et de lecture par codage / décodage interférométrique

→ **technique relativement confidentielle même si de nombreuses applications industrielles et médicales**

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

59

Perception - Reproduction du Relief

• Perception / Détection / Enregistrement

• d'où vient la sensation de relief ?

• vision binoculaire

• vision monoculaire

• **récepteurs quadratiques** : œil, films, CCD, CMOS, ...

• Lumière – Onde électromagnétique / Information

$$\vec{E} = E_0 \vec{e} \sin(\omega t + \varphi) = E_0 \vec{e} \sin(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0)$$

Relief

→ **codage interférentiel : $\varphi \rightarrow I$**

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

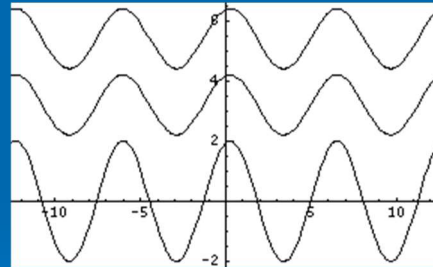
60

Interférence

ex: $I_1 = I_2 = I_0 ; V = 1$
 $I_{\max} = 4I_0, I_{\min} = 0$

résulte de la superposition d'ondes cohérentes

- en **concordance de phase**
 $\Delta\varphi = 0 \rightarrow I = 4I_0$
- en **opposition de phase**
 $\Delta\varphi = \pm\pi \rightarrow I = 0$
- en **quadrature de phase**
 $\Delta\varphi = \pm\pi/2 \rightarrow I = 2I_0$



↓
 distribution spatiale de
 maxima et de minima
 d'éclairement
 stables dans l'espace
 → **franges d'interférence**

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

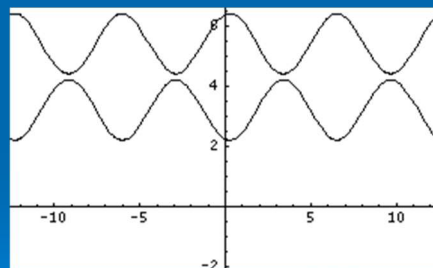
61

Interférence

ex: $I_1 = I_2 = I_0 ; V = 1$
 $I_{\max} = 4I_0, I_{\min} = 0$

résulte de la superposition d'ondes cohérentes

- en concordance de phase
 $\Delta\varphi = 0 \rightarrow I = 4I_0$
- en **opposition de phase**
 $\Delta\varphi = \pm\pi \rightarrow I = 0$
- en quadrature de phase
 $\Delta\varphi = \pm\pi/2 \rightarrow I = 2I_0$



↓
 distribution spatiale de
 maxima et de minima
 d'éclairement
 stables dans l'espace
 → **franges d'interférence**

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

62

Interférence

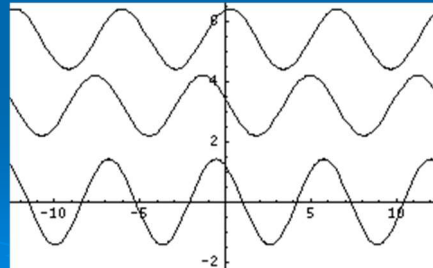
ex: $I_1 = I_2 = I_0 ; V = 1$
 $I_{\max} = 4I_0, I_{\min} = 0$

résulte de la superposition d'ondes cohérentes

- en concordance de phase
 $\Delta\varphi = 0 \rightarrow I = 4I_0$
- en opposition de phase
 $\Delta\varphi = \pm\pi \rightarrow I = 0$
- en **quadrature de phase**
 $\Delta\varphi = \pm\pi/2 \rightarrow I = 2I_0$



distribution spatiale de
maxima et de minima
d'éclairement
stables dans l'espace
→ **franges d'interférence**



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

63

Interférence

ex: $I_1 = I_2 = I_0 ; V = 1$
 $I_{\max} = 4I_0, I_{\min} = 0$

résulte de la superposition d'ondes cohérentes

- en concordance de phase
 $\Delta\varphi = 0 \rightarrow I = 4I_0$
- en opposition de phase
 $\Delta\varphi = \pm\pi \rightarrow I = 0$
- en quadrature de phase
 $\Delta\varphi = \pm\pi/2 \rightarrow I = 2I_0$



distribution spatiale de
maxima et de minima
d'éclairement
stables dans l'espace
→ **franges d'interférence**



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

64

Codage Interférentiel

L'éclairement résultant en P vaut $E_{12}^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \cos\left[\varphi_1 - \varphi_2 + \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)\right]$

$$I = E_{12}^2, I_1 = E_1^2, I_2 = E_2^2, \text{ et } \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

- en lumière naturelle (sources incohérentes): $\Delta\varphi \neq C^{te}$ et $I = I_1 + I_2$
pas d'interférence

- si les deux points sources sont cohérents: $\Delta\varphi = C^{te}$ → **LASER**

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \cos[\Delta\varphi + k(x_2 - x_1)]$$

indépendant de $\Delta\varphi$ mais fonction de la position du point P

- Codage Interférentiel : Modulation de phase → Distribution d'éclairement

- Onde Objet E_{obj} interfère avec Onde de Référence E_{ref}

On appelle **interfrange** la distance qui sépare deux franges claires ou sombres consécutives.

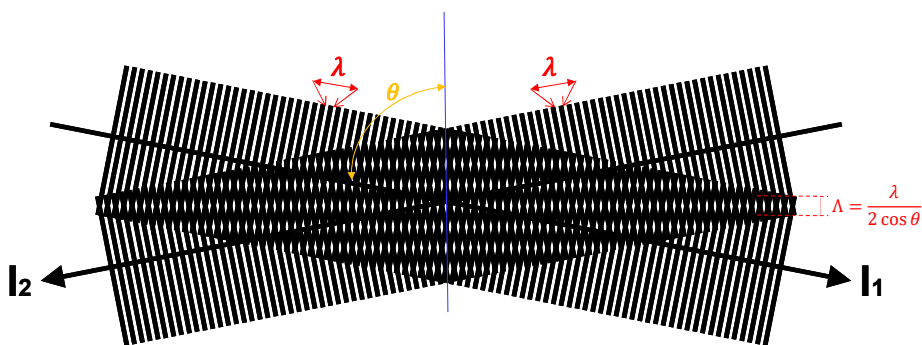
On appelle facteur de **visibilité des franges** $V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$

la distribution de l'intensité lumineuse peut alors s'écrire

$$I = (I_1 + I_2) \{1 + V \cos[\Delta\varphi + k(x_2 - x_1)]\}$$

65

Interférences



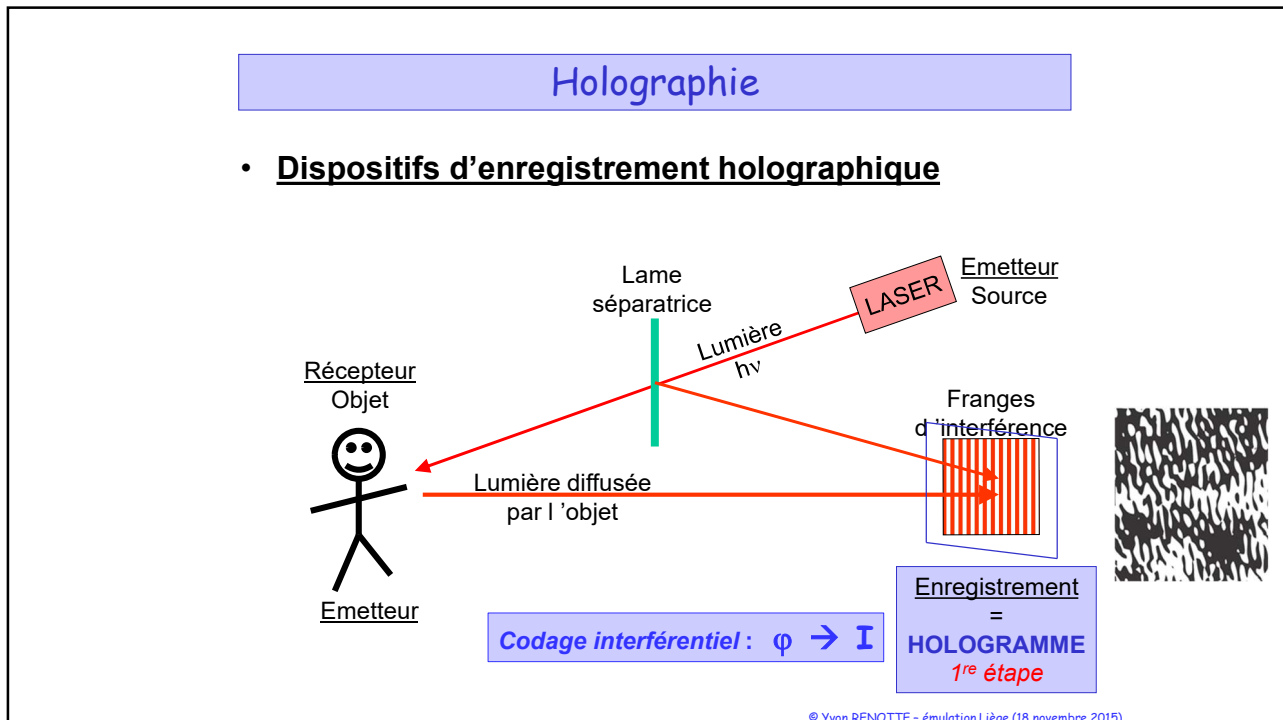
I_1 et I_2 : faisceaux cohérents

→ Interférence

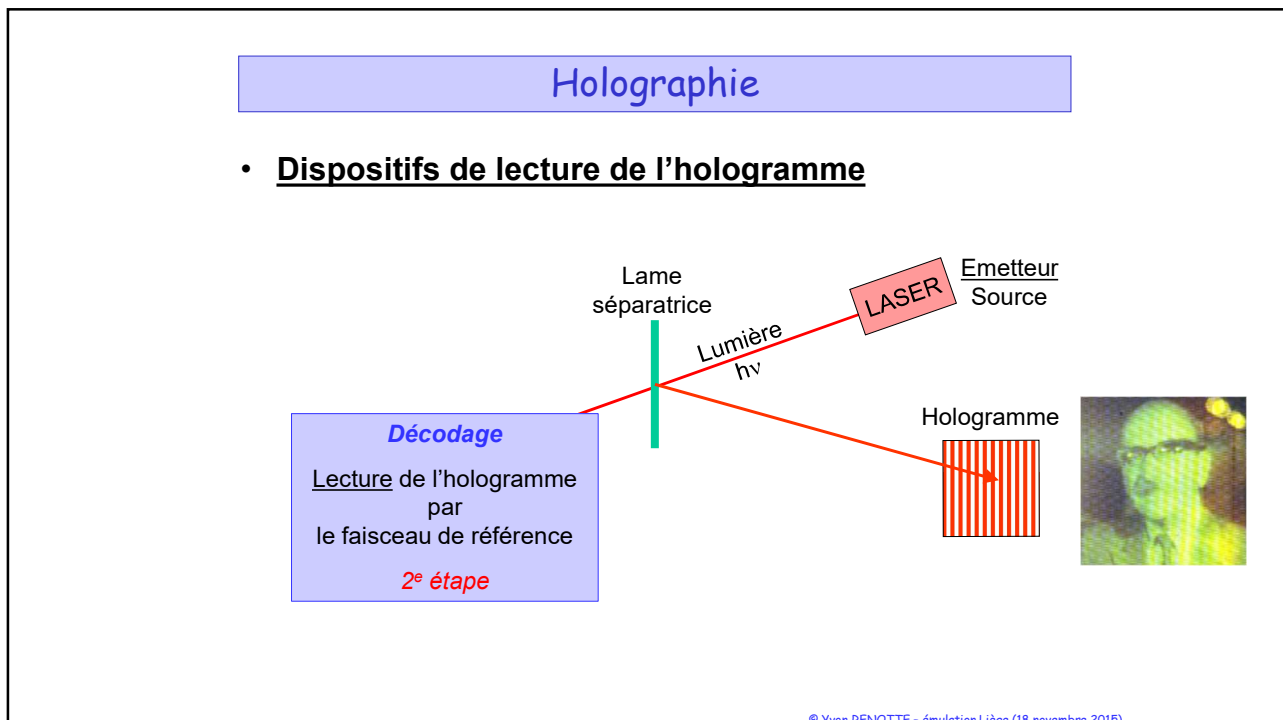
$\varphi \rightarrow I$

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

66



67

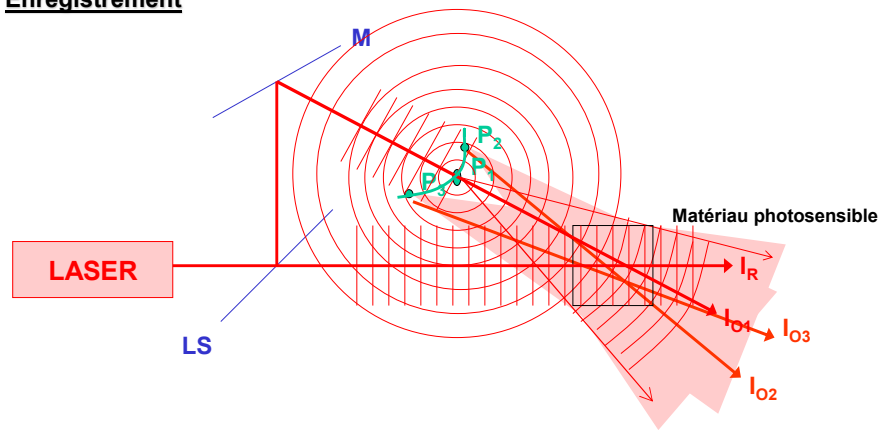


68

L' Holographie

Hologramme de plusieurs points (trois)

Enregistrement

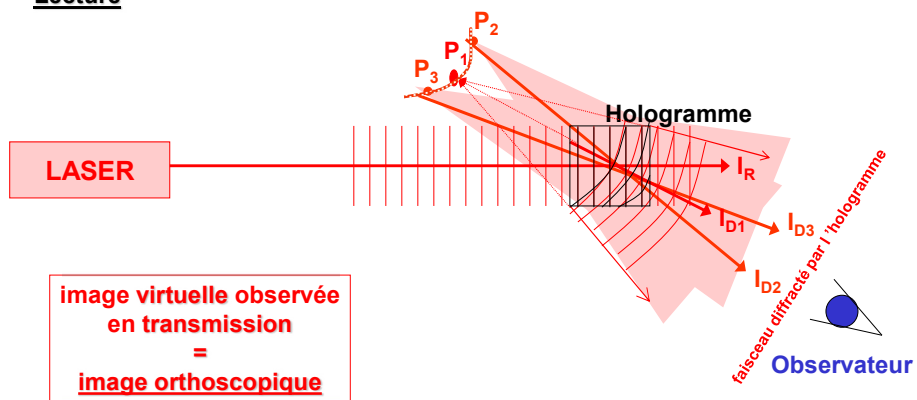


69

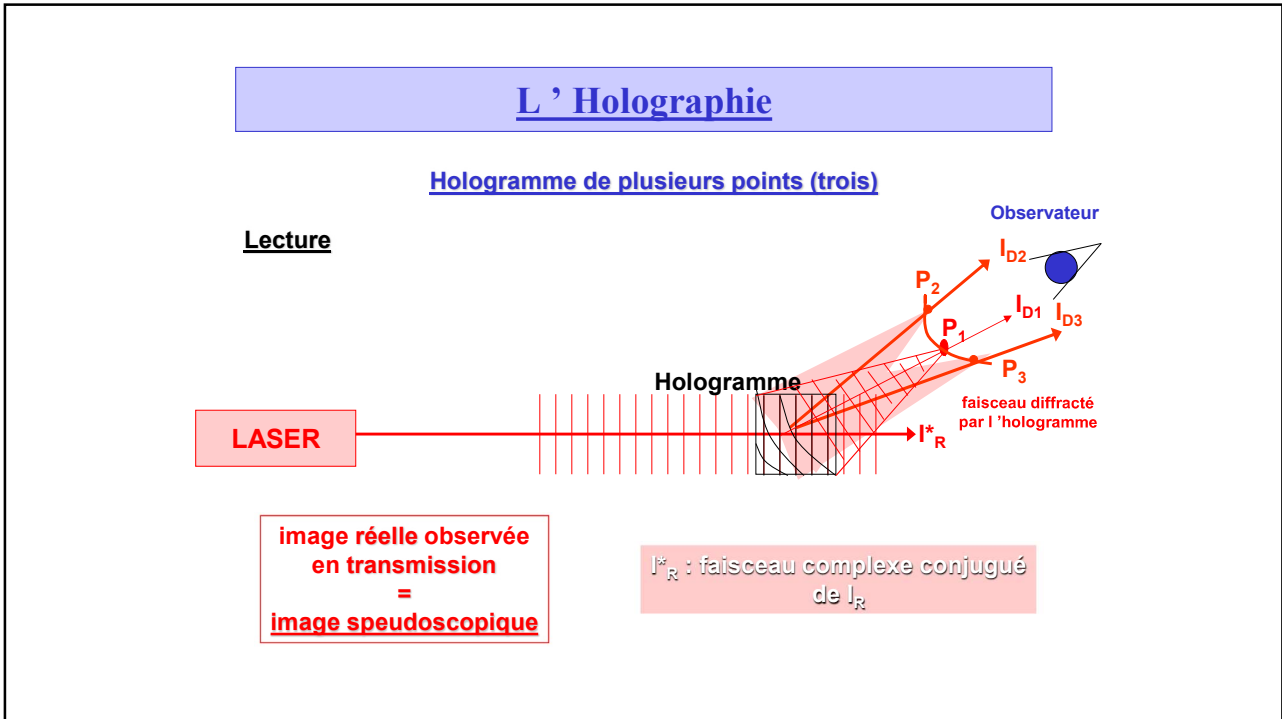
L' Holographie

Hologramme de plusieurs points (trois)

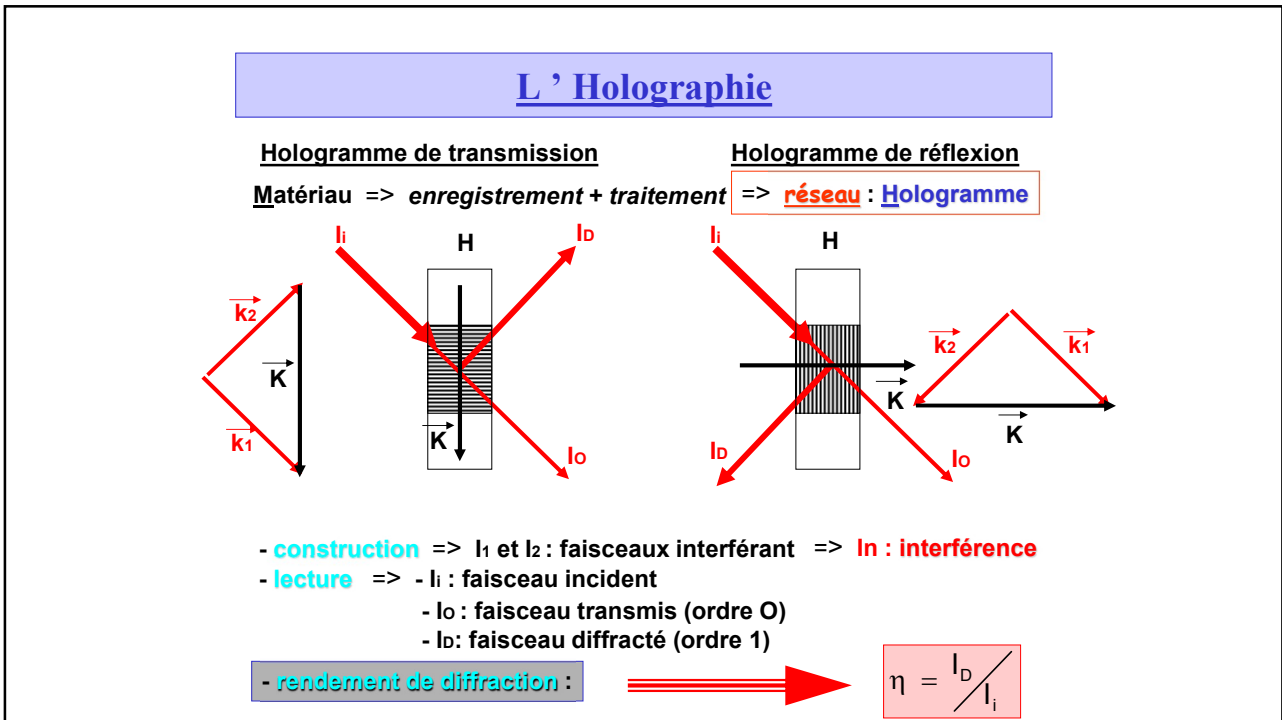
Lecture



70



71



72

Types d' Hologrammes

73

Types d' Hologrammes

Hologramme = Réseau
Divers types de réseaux → divers types d'hologrammes

Transmission

Réflexion



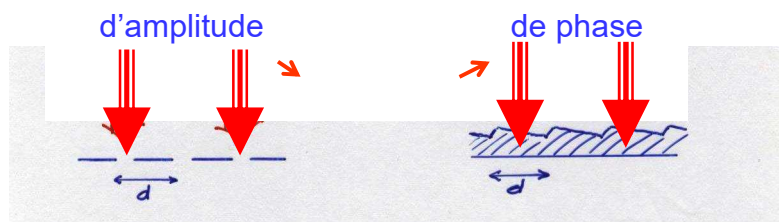
$$d(\sin \varphi - \sin \theta) = k\lambda$$

$$d(\sin \varphi + \sin \theta) = k\lambda$$

74

Types d' Hologrammes

Hologramme = Réseau
Divers types de réseaux → divers types d'hologrammes



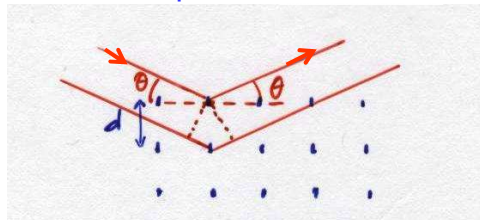
éventuellement « en relief de surface »

75

Types d' Hologrammes

Hologramme = Réseau
Divers types de réseaux → divers types d'hologrammes

Réflexion épais → **BRAGG**

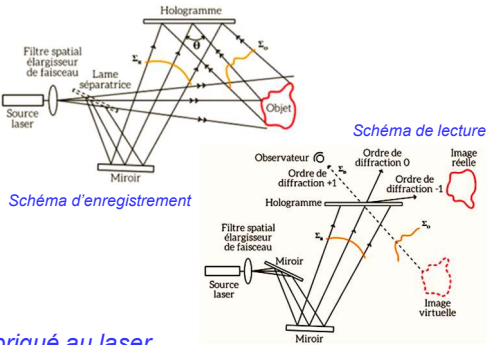
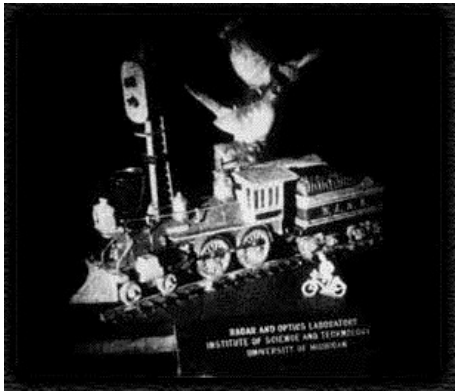


$$2d \sin \theta = k\lambda$$

76

Types d'Hologrammes

Transmission Réflexion



"Train and Bird" le premier hologramme fabriqué au laser.
 Cette image pionnière a été produite en 1964 par Emmeth Leith et Juris Upatnieks
 à l'université du Michigan seulement quatre ans après l'invention du laser.

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

77

Types d' Hologrammes

Hologramme de Transmission « in axis » Gabor

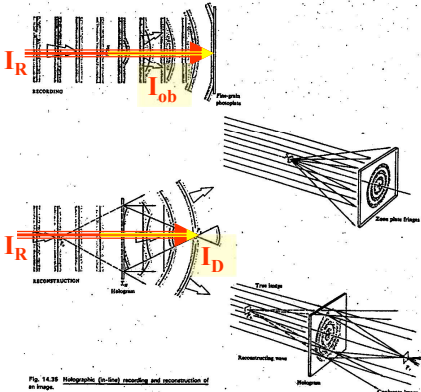


Fig. 14.38 Holographic (in-axis) recording and reconstruction of an image.

Hologramme de Transmission « off axis » Leith - Upatnieks

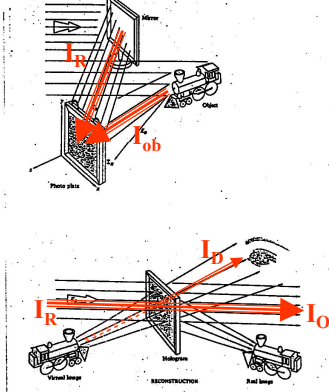
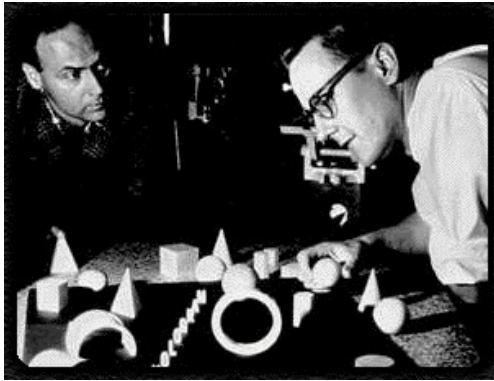


Fig. 14.39 Holographic (off-axis) recording and reconstruction of an image.

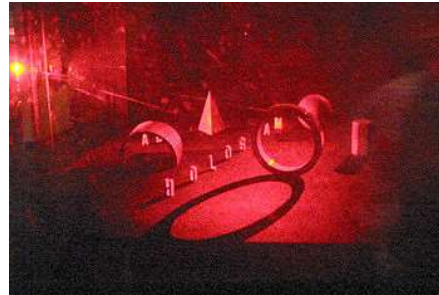
78

Types d'Hologrammes

Transmission Réflexion



Leith et Upatnieks se préparent à enregistrer un hologramme de transmission en utilisant la technique "hors-axe"



Hologramme de transmission correspondant reconstruit avec un LASER

HeNe : $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

79

Types d'Hologrammes

Transmission Réflexion



Schéma d'enregistrement

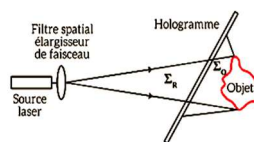
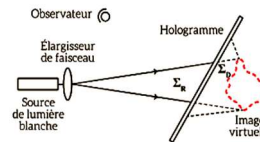


Schéma de lecture



Lisibles en lumière « blanche »

→

Hologramme = Filtre interférentiel
sélectionne λ_L de lecture

→

Rétreint du matériau → $\lambda_L < \lambda_E$

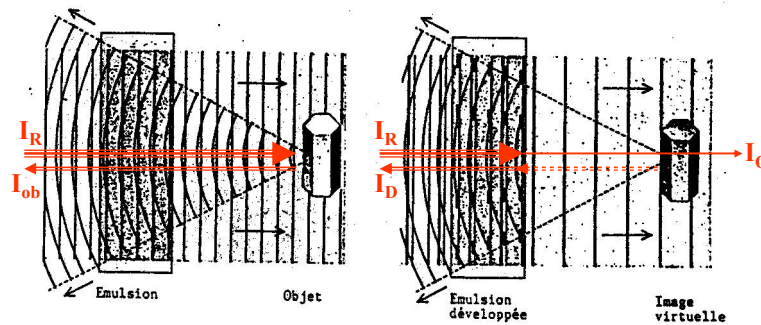
Hologramme de réflexion type Denisjuk «in-axis» enregistré au HOLOLAB sur émulsion argentique (H. Thiry)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

80

Types d'Hologrammes

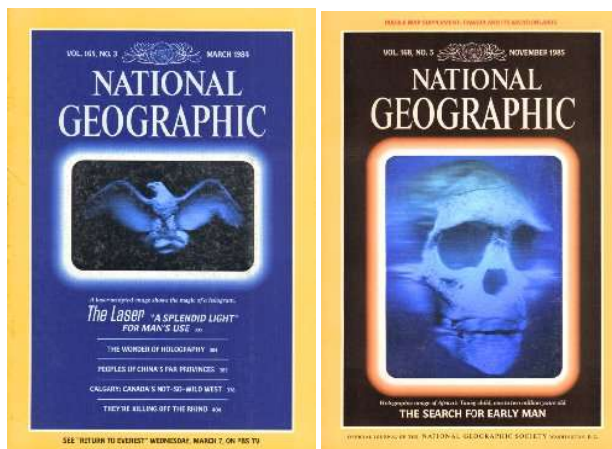
Hologramme de Réflexion
« in axis »
Denisyuk



81

Types d'Hologrammes

Transmission
Réflexion



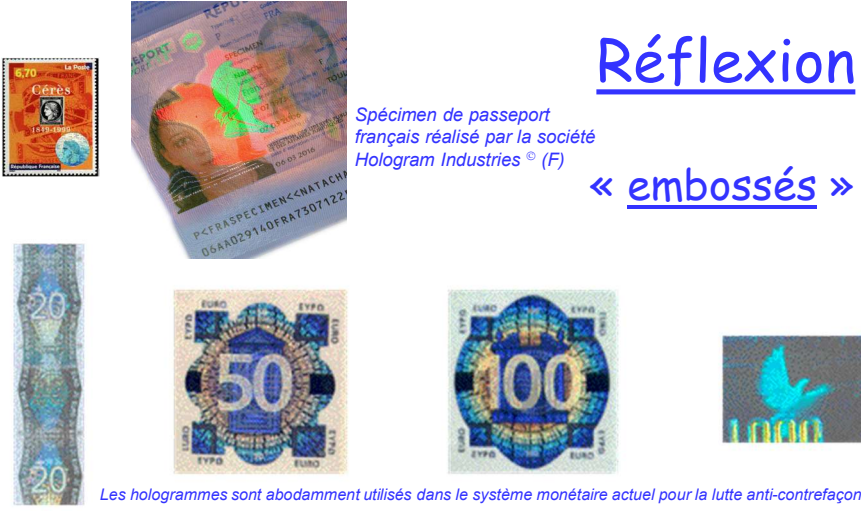
« embossés »

*mars 1984 (à gauche) - 11 millions d'hologrammes à travers le monde.
le même magazine réitéra l'expérience en novembre 1985 (à droite)*

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

82

Types d'Hologrammes



Spécimen de passeport français réalisé par la société Hologram Industries® (F)

« embossés »

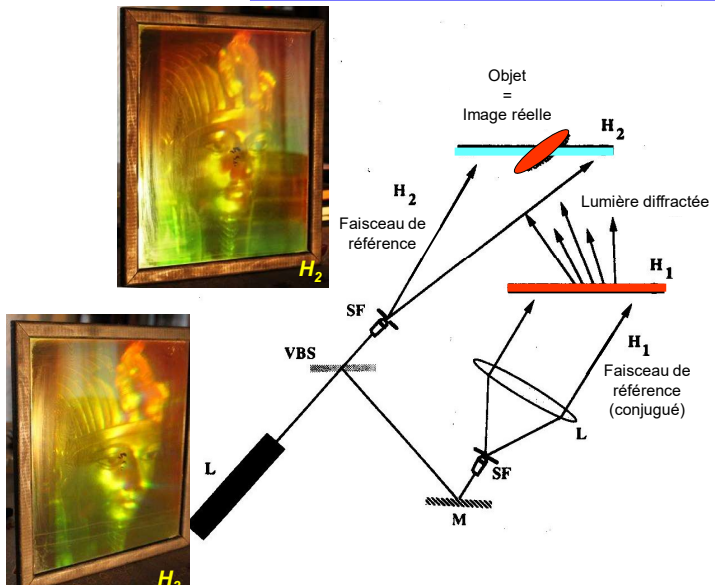
Les hologrammes sont abondamment utilisés dans le système monétaire actuel pour la lutte anti-contrefaçon

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

Réflexion

83

Types d'Hologrammes



2^{ème} génération

Hologramme H_2 de l'image réelle d'un hologramme H_1 (Master)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

84

Types d'Hologrammes

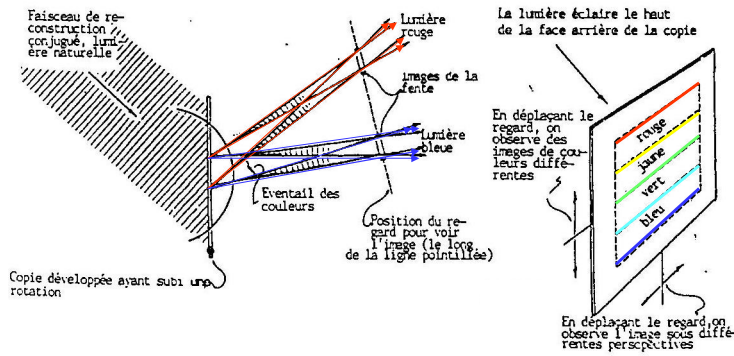
Technique complexe → pseudo-couleurs

Rainbow

(Arc en Ciel)

Lecture

(S. Benton)



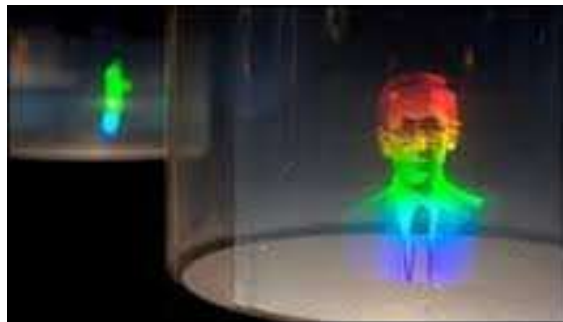
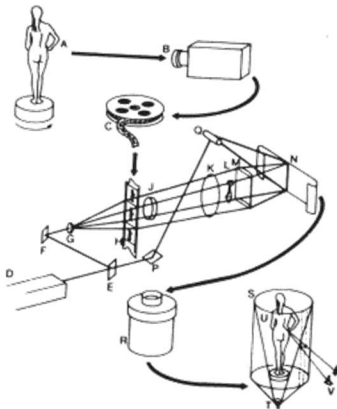
© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

Types d'Hologrammes

Rainbow

Multiplex

Schéma d'enregistrement



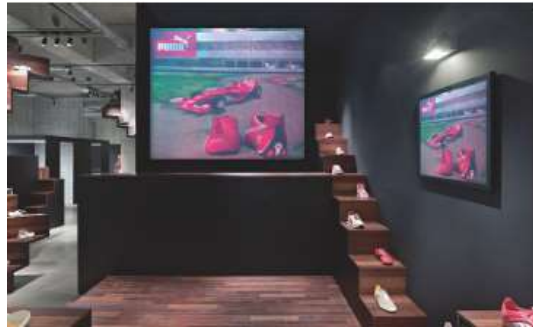
Hologramme 'multiplex' arc en ciel

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

Types d'Hologrammes

Hologrammes générés par ordinateur

CoHOEs



Stanislovas Zacharovas

Hologrammes digitaux en couleurs: système i-Lumogram™
Panneau publicitaire pour la marque Puma © Geola UAB - Vilnius, Lithuanie

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

87

L'Holographie

- **Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D**
Souvent appelée 'photographie en relief', elle en diffère fondamentalement
Seul point commun: certains matériaux d'enregistrement (*émulsions argentiques*)
Elle est née au milieu du 20^{es}, après l'avènement du **LASER** (1960): *éclairage cohérent*
- **Principe**
Enregistrement de *la totalité de l'information* provenant de chacun des points de la scène imagée *dans l'épaisseur du matériau photosensible*, sous forme de franges d'interférences
→ codage interférométrique / décodage de l'information → éclairage cohérent (LASER)
Plusieurs méthodes d'enregistrement / lecture ont été inventées → *types d'hologrammes*
- **Avantages**
Lecture visuelle sans lunettes ni instrument
Matériaux variés: AgHal, DCG, photopolymères (DCPVA, Dupont, ...), cristaux photoréfractifs, semi-conducteurs, mixtes LC-photopolymères, ...
Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art
Techniques numériques (*Hologrammes générés par ordinateur*) → protections diverses
Difficilement copiable → protections diverses
Maîtrise de la perspective de la scène imagée
- **Inconvénients**
Pas de projection → lecture simultanées par plusieurs spectateurs souvent difficile
Reproduction des couleurs de mieux en mieux maîtrisée
Reproduction du mouvement non maîtrisée → cinéma holographique quasi inexistant
Techniques d'enregistrement et de lecture par codage / décodage interférométrique
→ *technique relativement confidentielle même si de nombreuses applications industrielles et médicales*

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

88

- Stérorgramme - réseau lenticulaire : *type Bonnet* → perspective figée



Photo par la droite

Photo de face

Photo par la gauche

- Hologramme en réflexion : *type Denisyuk* → perspective parfaitement reproduite

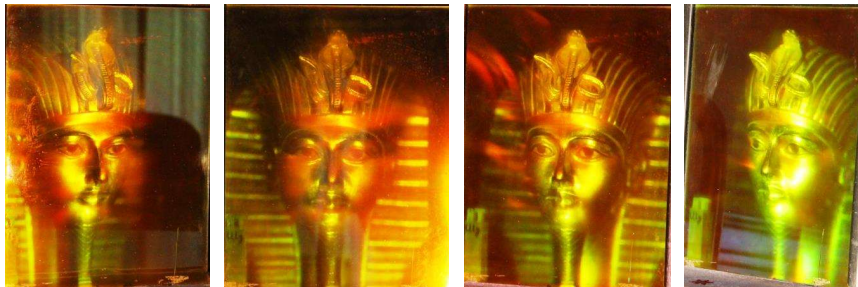


Photo par la droite

Photo de face

Photo par la gauche

id. plus à gauche

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

89

L'Holographie

- **Technique d'enregistrement et de reproduction d'images en 3D**
Souvent appelée 'photographie en relief', elle en diffère fondamentalement
Seul point commun: certains matériaux d'enregistrement (*émulsions argentiques*)
Elle est née au milieu du 20^s, après l'avènement du **LASER** (1960): *éclairage cohérent*
- **Principe**
Enregistrement de *la totalité de l'information* provenant de chacun des points de la scène imagée *dans l'épaisseur du matériau photosensible*, sous forme de franges d'interférences
→ codage interférométrique / décodage de l'information → éclairage cohérent (LASER)
Plusieurs méthodes d'enregistrement / lecture ont été inventées → *types d'hologrammes*
- **Avantages**
Lecture visuelle sans lunettes ni instrument
Matériaux variés: AgHal, DCG, photopolymères (DCPVA, Dupont, ...), cristaux photoréfractifs, semi-conducteurs, mixtes LC-photopolymères, ...
Nombreux champs d'application : de l'imagerie à l'industrie via le bio-médical et l'art
Techniques numériques (*Hologrammes générés par ordinateur*) → protections diverses
Difficilement copiable → protections diverses
Maîtrise de la perspective de la scène imagée
- **Inconvénients**
Pas de projection → lecture simultanées par plusieurs spectateurs souvent difficile
Reproduction des couleurs de mieux en mieux maîtrisée
Reproduction du mouvement non maîtrisée → cinéma holographique quasi inexistant
Techniques d'enregistrement et de lecture par codage / décodage interférométrique
→ *technique relativement confidentielle même si de nombreuses applications industrielles et médicales*

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

90

Types d'Hologrammes



Couleur



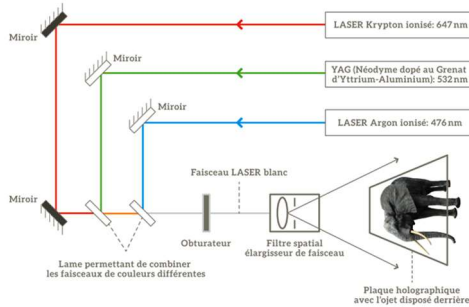
Yves Gentet

Hologrammes couleurs haute résolution réalisés par Yves Gentet © The Ultimate Holography (F)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

91

Types d'Hologrammes



Hans Bjelkhagen

Couleur

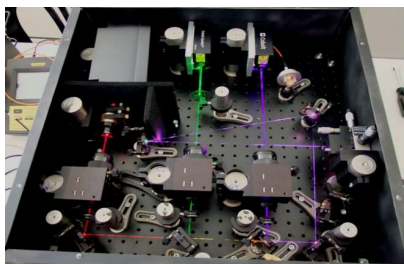


Statuette en ivoire



Artefact d'une cruche hibou époque Tudor

Hologrammes couleurs haute résolution Ultra-Realistic Imaging © Hans Bjelkhagen (UK)



© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

92

Holographie Couleur



Yvon Renotte

Mise au point d'une installation d'holographie en couleurs haute résolution - SilverCross Project

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

HOLOLAB

93

Cinéma holographique

Principe : réalisation d'une succession d'hologrammes sur un film à l'aide d'un LASER fonctionnant avec une cadence de répétition déterminée – ex. 25 Hz

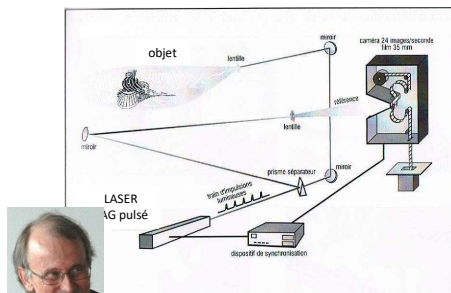
1976: V.G. Komar (URSS) a réalisé un film 70 mm – 8Hz

1982: A.J. Decker (NASA – USA) a réalisé un film 70 mm – 20Hz

1983: I.S.L. (*Institut Franco-Allemand de Recherche – St Louis - F*): 1^{er} film 35 mm – 24 Hz

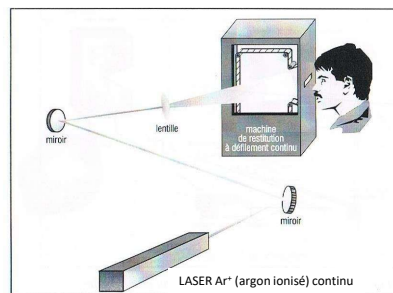
1985: I.S.L.: 1^{er} film holographique d'un personnage vivant: film 126 mm – 25 Hz :

« *Christiane et les Holobulles* » [P. Smigielski, H. Fagot, F. Albe]



Montage d'enregistrement du premier film holographique à la fréquence cinéma

Paul Smigielski
RHENAPHOTONICS ALSACE
Parc d'Innovation – ILLKIRCH (Strasbourg) - France

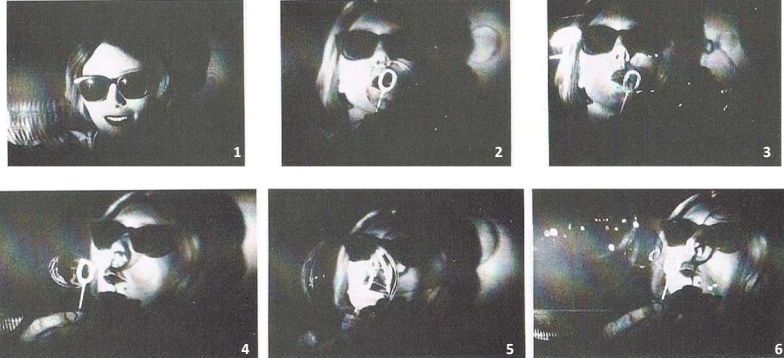


Montage de restitution : format permettant une vision stéréoscopique confortable sans lunette
Lecture à travers une fente de 10 mm de hauteur

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

94

Cinéma holographique



Paul Smigielski
RHENAPHOTONICS ALSACE
Parc d'Innovation – ILLKIRCH (Strasbourg) - France

Séquence de six vues extraites du film holographique « Christiane et les Holobulles »
(doc. I.S.L. 1985)

1^{er} film holographique d'un personnage vivant: film 126 mm – 25 Hz :
« *Christiane et les Holobulles* » [P. Smigielski, H. Fagot, F. Albe]

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

95

Holographie - Applications

• Multiples domaines d'applications

- **Imagerie** : qqes % (protection, publicité, ...)
- **En physique** : astrophysique, métrologie, spectroscopie, interférométrie, ...
- **En médecine** : imagerie médicale 3D, tomographie, ophtalmologie, chirurgie, ...
- **En télécommunication** : composants optiques, (dé)multiplexeurs, stockage d'informations, ...
- **En milieu industriel** : analyse des déformations, vibrations, déformations, traitements des surfaces, métrologie, ...

... (liste non limitative ni exclusive)

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

96

Holographie - Applications

au HOLOLAB : les principaux domaines

- Matériaux d'enregistrement (argentiques et non-argentiques)
Projet (européen) SilverCross
matériaux pour l'holographie en « vraies » couleurs
- Métrie optique : étude des formes, déformations, vibrations, ...
Moiré optique → Projet OSIRIS (first spin-off Région Wallonne)
collaboration : Centre Européen d'Archéométrie
(Dr Dimitri Laboury, Dépt. Egyptologie ULg)
spin-off → DEIOS s.a.
- Scanner + Shearographie → Projet MINT (plan Marshall - Région Wallonne)
collaboration : CMI (Maintenance **I**NTelligente en Sidérurgie)
(Cockerill Maintenance et Ingénierie + ~ 20 partenaires)
dispositif intégré : scanner 3D et Shearographie
- Composants optiques : HOEs, DOEs, CoHOEs, CoDOEs
Luminothérapie → Projet ECLAT (Région Wallonne)
collaborations : CETES - CHU - ULg (Pr Robert Poirrier) et Shröder s.a. (Ans)
spin-off → Lucimed s.a.
- Composants mixtes : réfractifs - diffractifs → coopérations avec le CSL

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

97

Holographie - Applications

au HOLOLAB : deux exemples

- **La 'luminette[®]' : de l'holographie à la luminothérapie**
- **Les projets OSIRIS, DEIOS et MINT :**
- **de l'archéométrie à la sidérurgie**

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

98

- **La 'luminette'® : de l'holographie à la luminothérapie**

But : conception, mise au point et réalisation d'un *dispositif pour la luminothérapie* traitement de la dépression saisonnière et autres troubles du sommeil

cahier des charges

Commanditaires : **Pr Robert Poirrier**, CHU – ULg et Schreider s.a. – Ans

Projets

- **Projet ECLAT** (Emission Ciblée de Lumière Ana-Thymique) : *projet Initiative de la Région Wallonne* accordé par la DGTRÉ en collaboration à la Société de Constructions Electriques **Schröder s.a.** (4430 Ans) / au **HOLOLAB**, Bât. B5a, ULg (**Prs Yves Lion, Directeur et Yvon Renotte**, co-fondateur) / au Centre d'Etude des Troubles de l'Eveil et du Sommeil – CHU, Bât. B 35 (**Pr Robert Poirrier**, directeur)
- **Le projet UBIQUO**: trois parties: (2) : étude des éclairagements rétinien – modèle physique de l'œil
- durée : 2 ans (2001-03), 1 chercheur: **Dr Vincent Moreau**

Délivrables

- la «**luminette**»® : design: **INOV sprl** (Jacques Tilman, 4530 Villers-le-Bouillet)
- un brevet '**Procédé et Dispositif de Photothérapie**', inventeurs: Robert Poirrier et Vincent Moreau; demandeur: Constructions Electriques Schreider (2005)

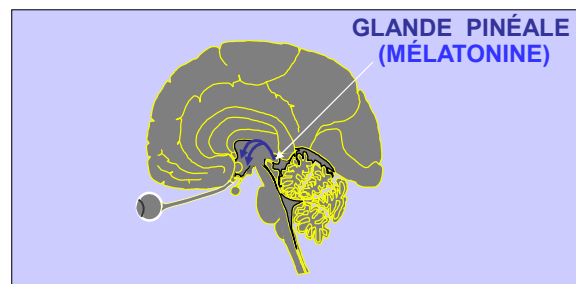
Distribution : **Lucimed s.a.** – Eric Delloye, Managing Director
Rue le Marais 12a, Z.I. 4530 Villers-le-Bouillet – Belgique, www.lucimed.com

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

99

La luminothérapie

Le manque de lumière agit sur l'équilibre chimique du cerveau en entraînant une **augmentation du taux de mélatonine** (hormone du sommeil)



entre 2000 et 10000 lx sur la cornée

Le traitement consiste à exposer le patient à un « **fort éclairage lumineux** » pendant un certain temps, dans un environnement contrôlé


→ *Régulation de la production de mélatonine*

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

100


Le manque d'éclairage

Le traitement : conditions d'éclairage idéales



Soleil


Symptômes



Eté (extérieur) : > 10000 lx
 Hiver (extérieur) : < 600 lx
 Intérieur éclairé : < 400 lx

- Dépression saisonnière (Blues de l'hiver)
 - 10 à 15% population du Benelux
- Dérèglement des cycles circadiens (veille-sommeil)
- Prise de poids
- Baisse d'énergie ,...

→ Régulation de la production de mélatonine



- **traitement** : exposer le patient à un « **fort éclairage lumineux** » pendant un certain temps, dans un environnement contrôlé

Études antérieures

- exposition « optimale » : 30 min / 10000 lx
- lumière bleue ~ 470 nm

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

101

La Luminette®

Etat de l'art

essentiellement

- les bancs lumineux (TL - PHILIPS s.a.)
(plus récemment : LEDs)
- les casques (TL - Schröder s.a.)



Banc de lumière




Casque « lumino »

→ problèmes

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

102



Vincent Moreau
Yvon Renotte Robert Poirrier

La Luminette[®]

problème(s) posé(s) par le Pr Robert Poirrier
(CHU de Liège / Centre d' Etude des Troubles de l'Eveil et du Sommeil)


Cahier des charges ...

- Un dispositif efficace
 - éclairage correct, comparable à celui des dispositifs antérieurs
 - peu encombrant, évitant les défauts et inconvénients des autres
 - léger / toujours efficace
 - orientable / toujours bien orienté
 - si possible « portable »

(on peut réellement « faire quelque chose » en cours de traitement)

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

103



Vincent Moreau
Yvon Renotte Robert Poirrier

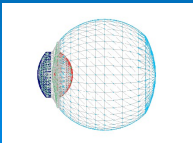
La Luminette[®]

problème(s) posé(s) par le Pr Robert Poirrier
(CHU de Liège / Centre d' Etude des Troubles de l'Eveil et du Sommeil)

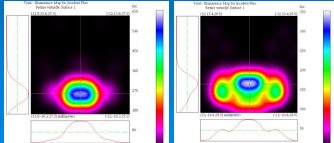
Réponse du HOLOLAB ...

- Un dispositif très efficace
 - modélisation de l'œil (Christine Serré - lic. sci. phys.)
 - bancs
 - Casques (Dr Vincent Moreau - UBIQUO 2)

Modèle analytique de l'œil



Éclairages rétiens
axe optique: 0° 10°



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

104



La Luminette[®]

problème(s) posé(s) par le Pr Robert Poirrier
(CHU de Liège / Centre d' Etude des Troubles de l'Eveil et du Sommeil)

Réponse du HOLOLAB ...

- Un dispositif très efficace (si prescriptions respectées)

- éclairement,

→ id. aux dispositifs concurrents : 10000 lx / 30 min sur la cornée

→ sources: spectre adapté à la courbe de blocage de la mélatonine

→ orientation du regard : > 15° possible en-dessous de l'axe optique

→ adressé : pas de compétition avec la zone de formation des images sur la rétine → vision nette de l'environnement / contraste élevé

- peu encombrant,

→ léger / portable : format lunettes thérapeutiques

→ toujours bien orienté (si prescriptions respectées)

on peut réellement « faire quelque chose » en cours de traitement

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

105

Conception – Réalisation de la « luminette[®] »

Verre de lunette



Lentille diffractive hors-axe (DOE)
= visière holographique

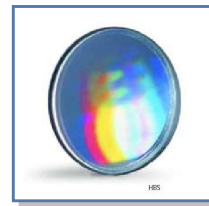


Schéma de fonctionnement

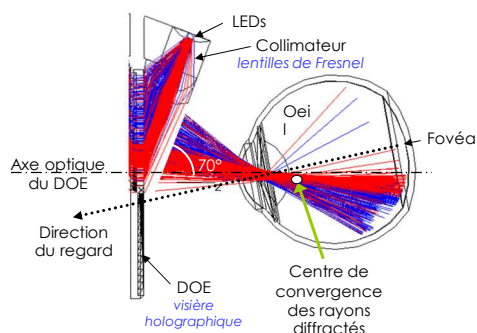
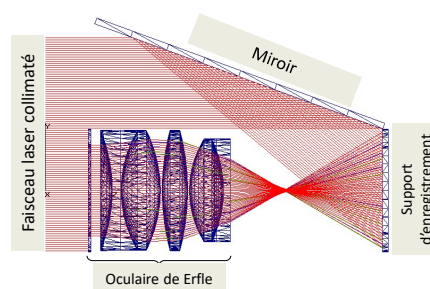


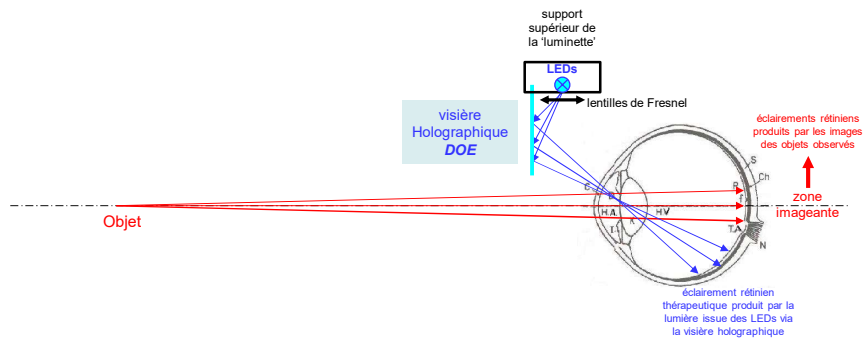
Schéma d'enregistrement du DOE



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

106

Éclairages rétiniens Image vs éclairage rétinien produit par la « luminette® » *Principe de fonctionnement*



Il n'y a pas compétition (ou très faible) entre les éclairages rétiniens produits par les images et l'éclairage fourni par la 'luminette'
→ intérêt du système 'luminette' qui produit l'effet thérapeutique escompté sans éblouissement et sous faible encombrement

*Les couleurs attribuées aux faisceaux sont arbitraires
Les échelles ne sont pas respectées*

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

107



La Luminette®

un peu de design



au début



© INOV - J. Tilman

et la « Luminette® » fut

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

108

- **Les projets OSIRIS, DEIOS et MINT :**
- **de l'archéométrie à la sidérurgie**

But : conception, mise au point et réalisation d'un *scanner 3D* pour le relevé des œuvres d'art anciennes, des monuments et des objets archéologiques ➤
technique : interférométrie par projection de lumière structurée : moiré optique

Commanditaires : **Dr Dimitri Laboury**, Égyptologie – ULg et Centre Européen d'Archéométrie



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

109

- **Les projets OSIRIS, DEIOS et MINT :**
- **de l'archéométrie à la sidérurgie**

But : conception, mise au point et réalisation d'un *scanner 3D* pour le relevé des œuvres d'art anciennes, des monuments et des objets archéologiques ➤
technique : interférométrie par projection de lumière structurée : moiré optique

Commanditaires : **Dr Dimitri Laboury**, Égyptologie – ULg et Centre Européen d'Archéométrie

Projets ➤

- **Projet OSIRIS** (Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning) : projet First Spin-Off de la Région Wallonne accordé par la DGTR en collaboration au CEA – ULg (**Dr Dimitri Laboury**) / au **HOLOLAB**, Bât. B5a, ULg (**Pr Yvon Renotte**)
- durée : 4 ans (2001-05), 2 chercheurs: Ing Marie Dominique (2 ans) **Dr Vincent Moreau** (2ans)
- **Spin-Off DEIOS s.a.** (Development and Enhancement of Interferometric Optical Systems): Drs Bernard Tilkens, Vincent Moreau et Pr Yvon Renotte (2004-07)

Délivrables

- un scanner pour la saisie et la restitution 3D
- un brevet '*Process and apparatus for measuring 3D shape of an object*', inventeurs: Bernard Tilkens, Yvon Renotte et Vincent Moreau; demandeur: Interface Entreprise - ULg (2005)

Distribution : **DEIOS s.a.** – Bernard Tilkens, Managing Director
a cessé ses activités en novembre 2007

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

110

- **Les projets OSIRIS, DEIOS et MINT :**
- **de l'archéométrie à la sidérurgie**

But : conception, mise au point et réalisation d'un *scanner 3D* pour le relevé des œuvres d'art anciennes, des monuments et des objets archéologiques

technique : interférométrie par projection de lumière structurée : moiré optique

Commanditaires : **Dr Dimitri Laboury**, Égyptologie – ULg et Centre Européen d'Archéométrie

Projets

- **Projet OSIRIS** (Optical Systems for Interferometric Relief Investigation and Scanning) : projet First Spin-Off de la Région Wallonne accordé par la DGTR en collaboration au CEA – ULg (**Dr Dimitri Laboury**) / au **HOLOLAB**, Bât. B5a, ULg (**Pr Yvon Renotte**)
- durée : 4 ans (2001-05), 2 chercheurs: Ing Marie Dominique (2 ans) **Dr Vincent Moreau** (2ans)
- **Spin-Off DEIOS s.a.** (Development and Enhancement of Interferometric Optical Systems): Drs Bernard Tilkens, Vincent Moreau et Pr Yvon Renotte (2004-07)

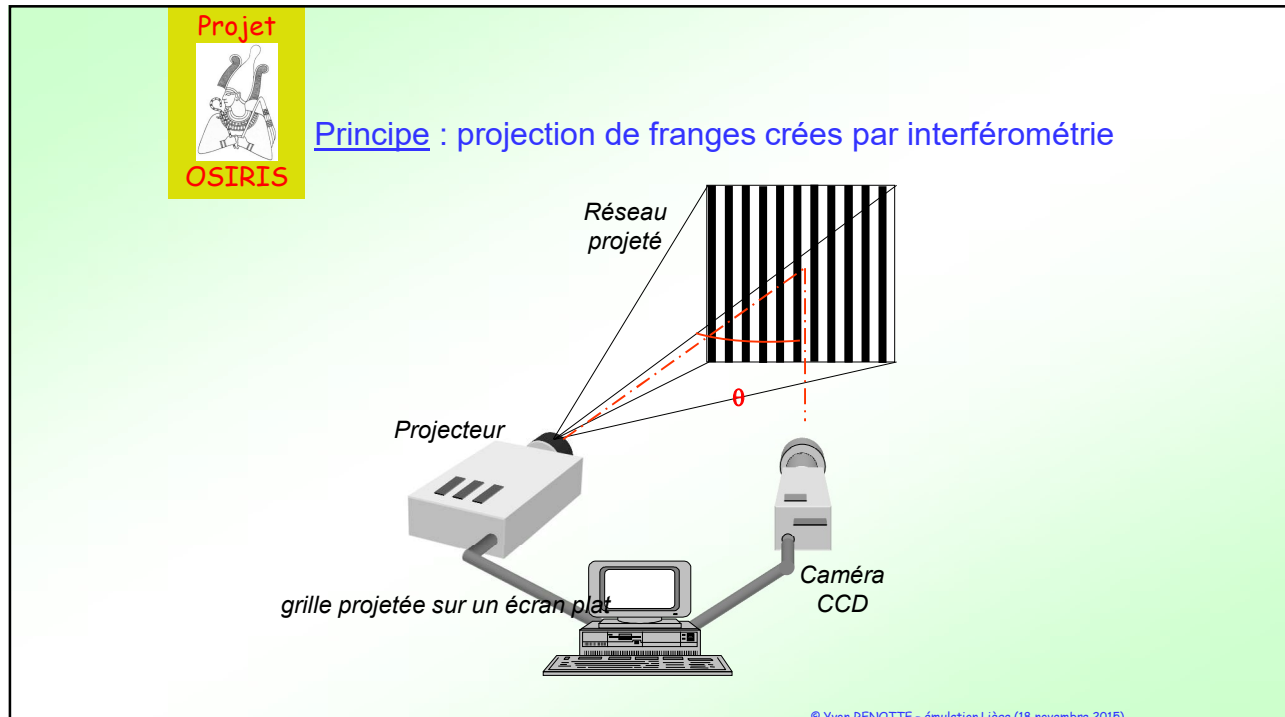
Délivrables

- un scanner pour la saisie et la restitution 3D
- un brevet '*Process and apparatus for measuring 3D shape of an object*', inventeurs: Bernard Tilkens, Yvon Renotte et Vincent Moreau; demandeur: Interface Entreprise - ULg (2005)


Distribution : **DEIOS s.a.** – Bernard Tilkens, Managing Director
a cessé ses activités en novembre 2007

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

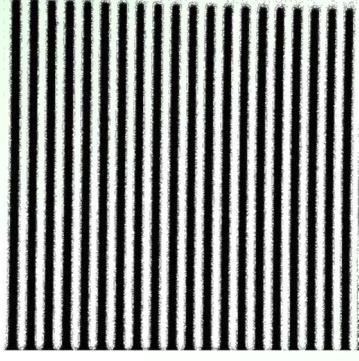
111



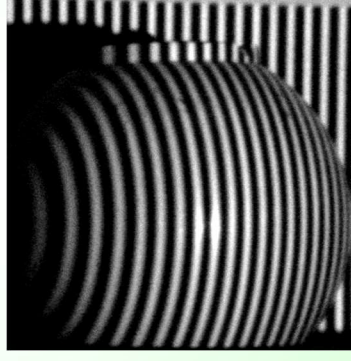
112

Projet

OSIRIS

Principe : projection de franges créées par interférométrie




grille projetée sur un écran plat



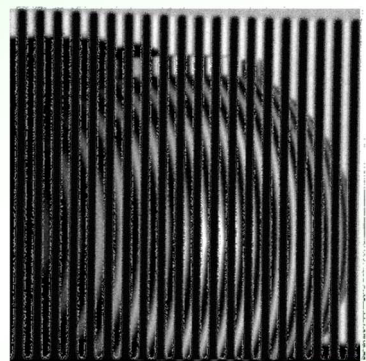
grille projetée sur une sphère

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

113

Projet

OSIRIS

Principe : projection de franges créées par interférométrie



*superposition des grilles → moirure
 → extraction de l'information 'relief'*

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

114

Projet



OSIRIS



DEIOS

L'outil de base : le scanner DEIOS

Dispositif DEIOS s.a. pour la projection et la lecture de franges structurées
Interférence par séparation des états de polarisation via un coHOE®



le résultat



coHOE sép
faisceaux




la reconstitution




© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

115

Projet



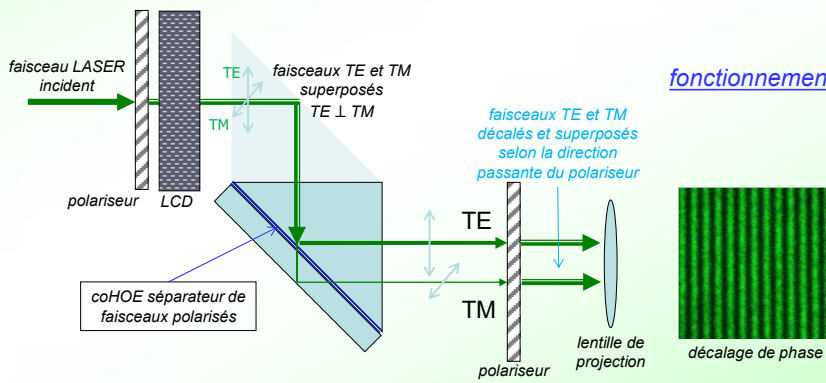
OSIRIS



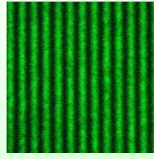
DEIOS

L'outil de base : le scanner DEIOS

Dispositif DEIOS s.a. pour la projection et la lecture de franges structurées
Interférence par séparation des états de polarisation via un coHOE®



fonctionnement



décalage de phase

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

116

Projet



OSIRIS



DEIOS



Dimitri Laboury *Vincent Morosan*
British Museum

L'outil de base : le scanner DEIOS

Séquence des opérations de saisie, de numérisation et de restitution du relief



Objet : bas-relief égyptien



Réseau virtuel de référence
non déformé



Fringes interférométriques
projetées sur l'objet et déformées
par son relief



Interférogramme (fringe de phase)
résultat de la
combinaison des deux figures
précédentes



Reconstitution numérique du
bas-relief en fausses couleurs



Copie 3D du bas-relief par usinage
LASER (dans un matériau
polymère) obtenue à partir de la
reconstitution numérique (principe
de l'imprimante 3D)

© Yven RFNOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

117

Projet



OSIRIS



DEIOS



Dimitri Laboury *Vincent Morosan*
British Museum

L'outil de base : le scanner DEIOS

Séquence des opérations de saisie, de numérisation et de restitution du relief

Cas d'un objet complet en 3D



Mise en station
du scanner



Mise en place
de l'objet



Éclairage par les franges
interférométriques



Prise de
scan



Prise de
texture



Traitement
des résultats



Post
traitement
recollage



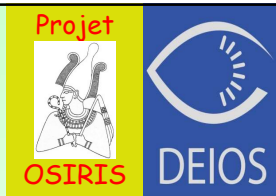
Sauvegarde
finale



Dimitri Laboury *Vincent Morosan*
British Museum

© Yven RFNOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

118



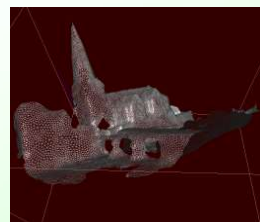
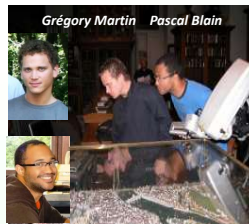
Exemple : *digitalisation sur site*

“VIRTUAL LEODIUM” - *modèle virtuel de la ville de Liège au 18^e siècle*

Maquette Rulh

R. Billen, P. Blain, O. Donneau, S. Habracken,
Y. Renotte, V. Silva, M. Van Ruymbeke

3D Stereo-Media, 3 Dec. 2009



Église Saint Nicolas – reproduction 3D

disparue : ± hôtel Passerelle / Simenon - Chaussée des Près

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

119

- Les projets OSIRIS, DEIOS et MINT : - de l'archéométrie à la sidérurgie

But : conception, mise au point et réalisation d'un *dispositif intégré scanner 3D / shearographie* pour la maintenance intelligente en sidérurgie ➤
reconnaissance de formes et détection de défauts (cachés)

Commanditaires : **CMI Group** (Cockerill Maintenance et Ingénierie), 4100 Seraing
10 partenaires

Projets

- **Projet MINT** (Maintenance **INT**elligente en sidérurgie): *plan Marshall de la Région Wallonne* : Développement d'un ensemble d'outils permettant "de rendre intelligente la maintenance des chaînes/outils de production de la sidérurgie wallonne" / au **HOLOLAB**, Bât. B5a, ULg (**Pr Yvon Renotte**)
- durée : 5 ans (2007-12), 2 chercheurs: **Dr Pascal Blain** et **Grégory Martin**, informaticien (4 ans)
+ 2 doctorants HOLOLAB: **Drs Vanessa Rosso et Fabrice Michel**

Délivrables

- un dispositif intégré scanner 3D / shearographie pour la saisie, la restitution 3D et la détection de défauts cachés ➤
- un brevet '*Low coherence interferometric system for phase stepping shearography combined with 3D profilometry*', inventeurs: Pascal Blain, Serge Habracken, Yvon Renotte (HOLOLAB) et Pascal Waroux (CMI) ; demandeur: Cockerill Maintenance & Ingénierie S.A. (2012)

© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

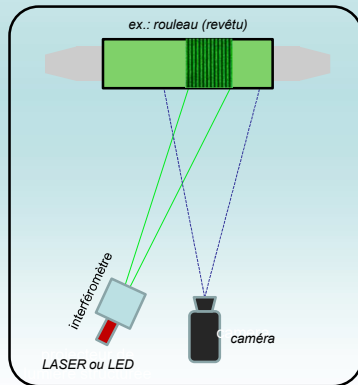
120



Rouleaux de four et rouleaux revêtus

Mesures de forme

- Projection de lumière structurée



- Précision : de 0,1 à 0,3 mm sur 5x5 à 20x20 cm² (*
(* adaptable en fonction de l'optique utilisée)
- Profondeur de champ : 2 à 20 cm (*)
- Temps d'acquisition : 2s
- Temps de traitement : 2 à 120 min (si recollage)
- Zone contrôlée : bande latérale de rouleau par morceaux
- Avantages : interféromètre peu sensible aux vibrations extérieures, travail sous éclairage ambiant (jusque 10⁴ lux)
- Inconvénients : granularité speckle, vitesse d'acquisition et post-traitement des données

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

121

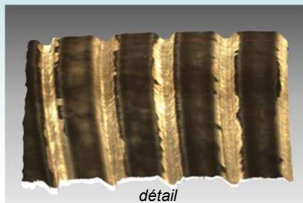


Rouleaux de four et rouleaux revêtus

Mesures de forme

Mesure de forme off line sur un rouleau de fond

Défauts d'origine mécanique sur des rouleaux enducteurs



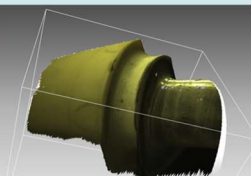
détail



Pascal Blain



Grégory Martin



Reconstruction analytique d'une extrémité de rouleau enducteur

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

122

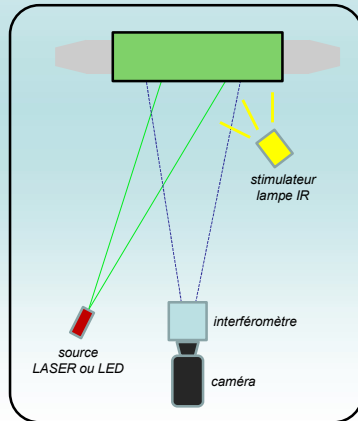


Rouleaux de four et rouleaux revêtus

Détection de défauts du revêtement

y compris défauts « cachés »

• Shearographie



- Précision : de 10 à 50 μm sur 5x5 à 20x20 cm^2 (*
(* adaptable en fonction de l'optique utilisée)
- Profondeur de champ : 2 à 20 cm (*)
- Temps d'acquisition : 5s à 15 min (suivant sollicitation et durée de relaxation)
- Temps de traitement : 10s à 15 min (selon niveau d'information choisi)
- Zone contrôlée : bande latérale de rouleau par morceaux
- Avantages : interféromètre peu sensible aux vibrations extérieures, travail sous éclairage ambiant (jusque 10^4 lux)
- Inconvénients : vitesse d'acquisition et post-traitement des données

© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

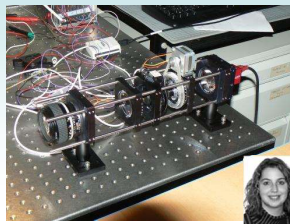
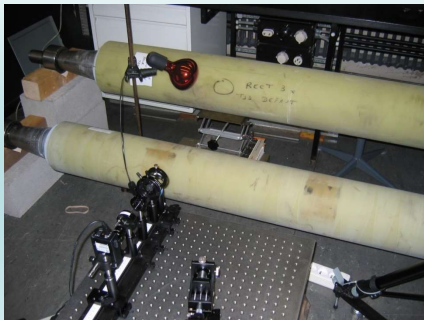
123



Adjonction de la Shearographie

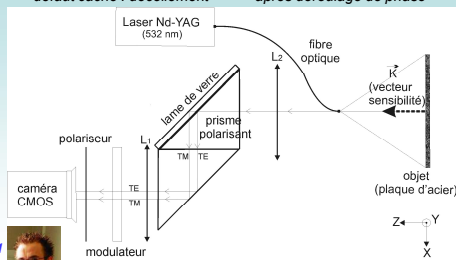
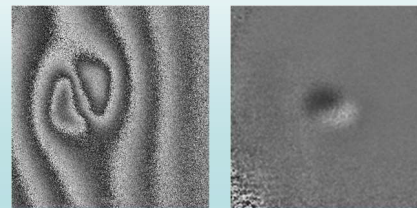
→ détection de défauts cachés

Détection de défauts cachés sur rouleau enducteur



Dispositif de Shearographie « in-line »

Fabrice Michel – 2011
Vanessa Rosso – 2007



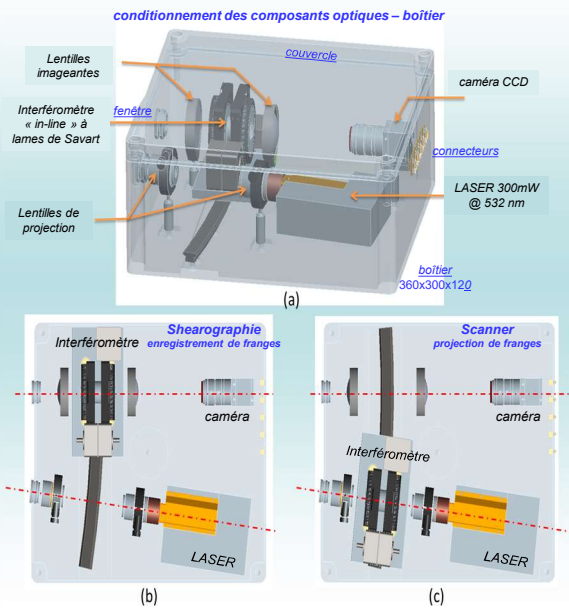
© Yven RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

124



Sous projet 6 : Les livrables

- Détection de formes et de défauts de surface en lumière rasante
- Projection de franges avec une lame de Savart
- Shearographie avec une lame de Savart
- [Brevet](#)
- [Combinaison de deux techniques intégrées dans un seul appareil](#)
 - [scanner 3D – détection de formes](#)
 - [shearographie – détection de \(micro-\)défauts \(cachés\)](#)



© Yvon RENOTTE - émulation Liège (18 novembre 2015)

125

Les applications évoquées ont donné lieu

- 3 brevets
- 3 livrables
- plusieurs publications scientifiques et techniques
- plusieurs présentations dans des congrès internationaux
- de nombreux travaux de fin d'études (sci. phys. et ingénieurs)

ont permis de subventionner

- 5 doctorants sur une période de 12 ans
- 5 ingénieurs R&D
- 4 informaticiens et techniciens (optique, électronique, ...)
- 5 projets de recherche(s)

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

126

De la lumière pour tous

Hologramme de transmission



HeNe : $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

Hologramme de réflexion



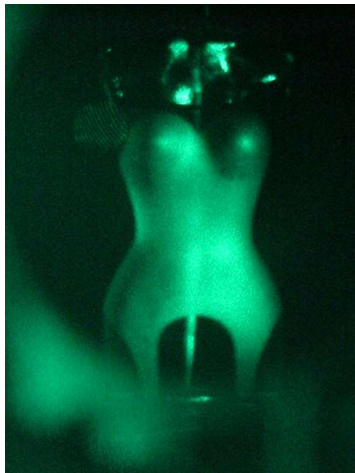
**Lumière blanche: AgBr
émulsion argentique**

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

127

De la lumière pour tous

Hologramme de transmission



Ar⁺ : $\lambda = 514,5 \text{ nm}$

Hologramme de réflexion



**Lumière blanche: DCG
gélatine bichromatée**

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

128

De la lumière pour tous

La présentation est largement inspirée de l'article

'Holographie, Hologrammes et (quelques) Applications'

Yvon Renotte

paru in 'Lumière, réflexion, application, émotion' (ouvrage collectif), pp.64-77
éd. Embarcadère du Savoir, Maison de la Science – Liège, juin 2015

22, quai van Beneden – 4020 Liège

Merci pour votre attention

merci aux

- **Dr Martine Jaminon**, directrice, et **Mme Carole Spitz**, infographiste, Musée de la Science de Liège
- **Pr Hans I. Bjelkhagen**, Dyserth, North Wales, UK
- **Dr Christiane Carré**, chargée de recherche au CNRS - laboratoire Foton, Université de Rennes 1-Lannion, France
- **M. Eric Delloye**, General Manager Lucimed s.a., Villers-le-Bouillet, Belgique
- **M. Yves Gentet**, ingénieur physicien, The Ultimate Holography, France
- **Dr Jean Sauvage-Vincent**, Ing. R&D Hologram Industries, Bussy St Georges, France
- **Pr Paul Smigielski**, Président du club CMOI/SFO, Mulhouse, France
- **Dr Stanislovas Zacharovas**, executive director Geola Digital UAB, Vilnius, Lithuania

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

129

URL disponibles sur ORBI – ULiege – Yvon Renotte

Présentations

12 octobre 2010 : "Au croisement de l'Optique et de la Photothérapie : La Luminette TM"

<https://hdl.handle.net/2268/302979>

15 janvier 2013 : "De OSIRIS à MINT" ou "De Karnak (Haute Egypte) à CMI Group (Seraing)

<https://hdl.handle.net/2268/302979>

Documents

- *Holographie, Hologrammes et (quelques) Applications*, in 'Lumière, réflexion, application, émotion' (ouvrage collectif), pp.64-77, éd. Embarcadère du Savoir, Maison de la Science – Liège, juin 2015
<http://hdl.handle.net/2268/258674>
- *Vous avez dit « Hologrammes » ? ...*, Sciences et Culture, 477 (janvier – février 2019), 16 – 23,
<http://hdl.handle.net/2268/258667>
- *Et les « vrais hologrammes », c'est quoi au juste ?*, Sciences et Culture, 477 (janvier – février 2019), 24 – 31,
<http://hdl.handle.net/2268/258668>
- *Non, les hologrammes ne se produisent pas sur scène*, Dailyscience.be, 13 janvier 2020, interview,
<http://hdl.handle.net/2268/258699>
- « *En solo mais pas seul* » ... *Il chante avec son « double holographique »*, Contact (Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège), 2020/2 (mars – avril 2020), 28 – 29,
<http://hdl.handle.net/2268/258847>
- *Hologrammes vs Ectoplasmes*, Contact (Bulletin de l'université du 3^e âge de Liège), 2021/5 (novembre – décembre 2021), 21 – 23,
<http://hdl.handle.net/2268/264862>
- *ABBA propose un nouvel album et un spectacle « holographique »*, Science et Culture, 487 (avril 2022), 28 – 29,
<https://hdl.handle.net/2268/289846>
- *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques, ce que l'on ne vous a pas dit . . .*, (01-03-2023), 66 pages,
<https://hdl.handle.net/2268/300493>
- *Holographie, Hologrammes, Avatars électroniques - 2e partie*, (19-04-2023), 20 pages,
<https://hdl.handle.net/2268/301852>

© Yvon RENOTTE - (25 mai 2023)

130