Projet de recherche scientifique

Compensation de la diffusion par traitement d'image

Lycée André Theuriet
Civray 86 400

Alexis Bossard
Alexandre Tunstall
Allan Gwozdz
Anaïs Restoux
Benjamin Turner
Florent Baubet
Frorine Ballon
Luc Baudinaud

Résumé

Notre projet de recherche consiste à concevoir des lunettes actives pour permettre à des personnes atteintes de dystrophie de la cornée, de recouvrer la vue.
Il s'agit de trouver un moyen de compenser la diffusion provoquée par une multitude de taches blanches sur la cornée.

Si le problème de la compensation de la diffusion est un problème abondamment traité dans la littérature, celui de la compensation de la diffusion en amont a été très peu traité[1].

Nous abordons ici le sujet en lumière incohérente. Au niveau expérimental, le système est plus simple et permet donc d'envisager facilement une transposition technique à l'aide d'écrans usuels.
Cependant, en lumière incohérente, le problème présente l'inconvénient a priori majeur de ne pas être inversible dans le cas général.

Nous avons cependant fait le pari de trouver des stratégies pour trouver des solutions approchées qui permettent de retrouver la vue, moyennant une solution techniquement réalisable simplement...

[1]En lumière cohérente, des travaux ont été menés par diverses équipes dont l'ESPCI [1], basés sur le retournement temporel.

Sommaire

I. Présentation du projet

II. Principe

1. Description du phénomène

2. Principe du traitement de compensation par anticipation

3. Position du problème

III. Une stratégie générale : la solution d'optimisation

1. Théorie et simulation

2. Test expérimental

3. Compensation numérique des écarts

IV. Une stratégie de traitement rapide

1. Position du problème

2. Principe du découplage diffusion homogène / inhomogène

3. Procédure de traitement rapide

V. Perspectives et travaux en cours

1. Transposition du protocole en ophtalmologie

2. Prototype

Conclusion

Remerciements

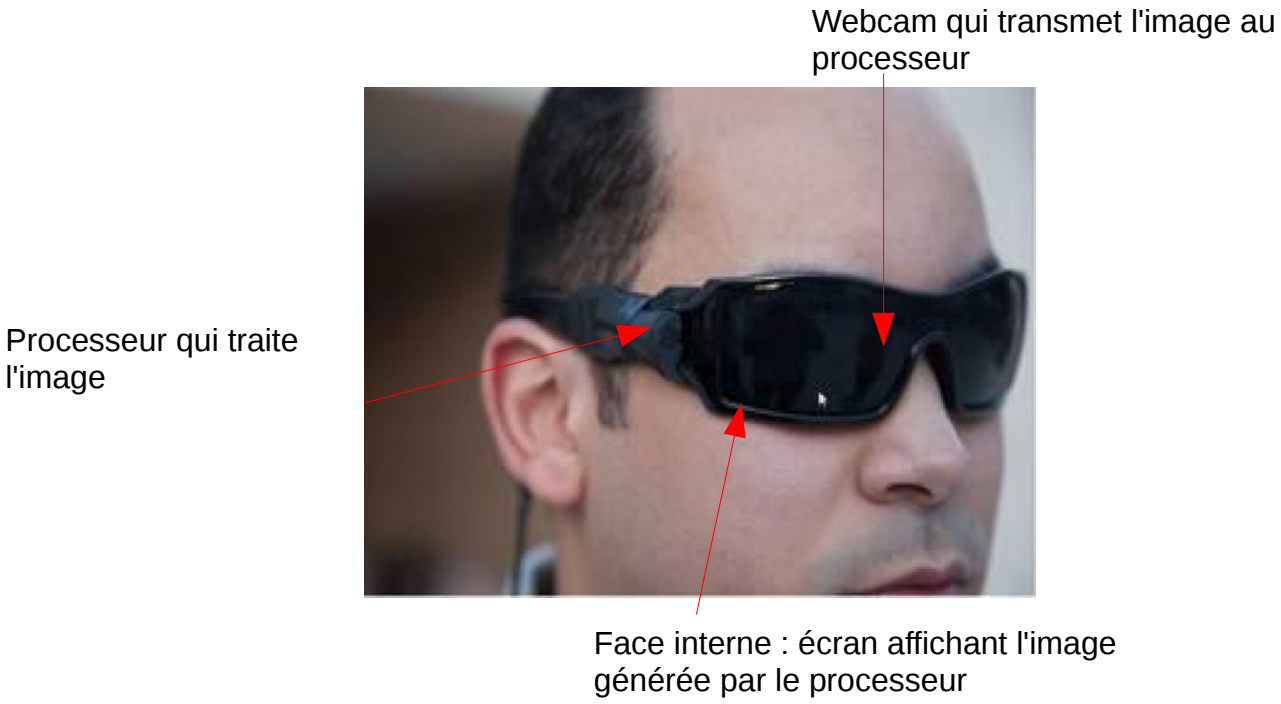
Bibliographie

I. Présentation du projet

Le projet a vu le jour en juin 2014 avec la création d'un club scientifique composé de 3 élèves de première et 3 élèves de terminale encadrés par leur professeur de physique. Aujourd'hui, le projet est porté par un groupe de 9 élèves. Il se distingue par son caractère ambitieux et nouveau.

Il est fondé sur un problème médical qui est l'opacification de la cornée. Les personnes souffrant de cette pathologie ont une cornée qui diffuse. Cette maladie étant évolutive, les personnes sont condamnées à terme à voir une image entièrement blanche[2].

L'idée serait de concevoir des lunettes actives qui permettraient de voir à des personnes aveuglées par la diffusion de leur cornée.



Notre problématique est de vérifier la faisabilité du principe :

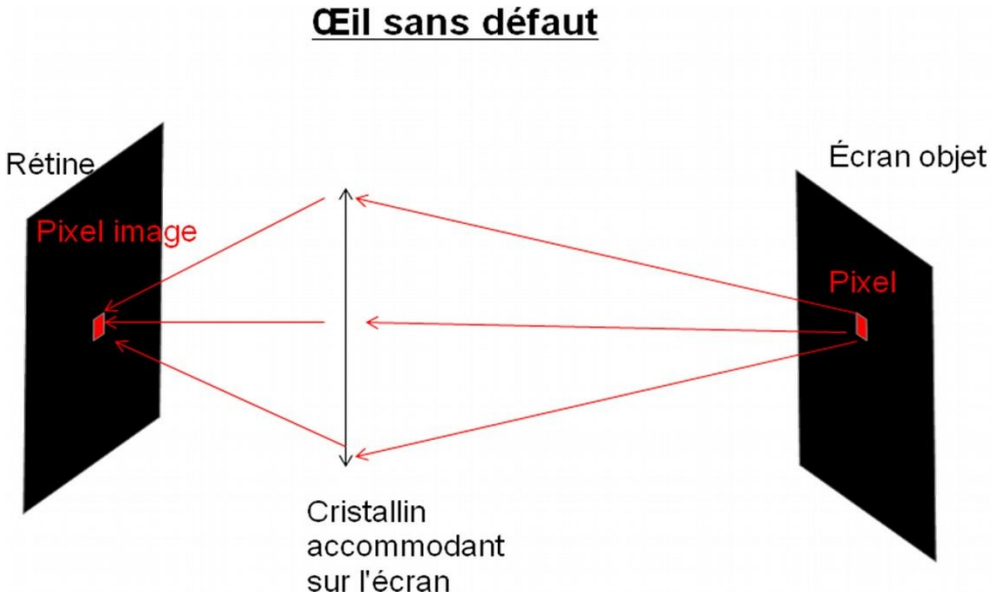
Peut-on compenser la diffusion par anticipation par traitement d'image ?

[2]Le seul remède connu est la greffe de cornée qui est rejetée entre 6 mois et 20 ans.

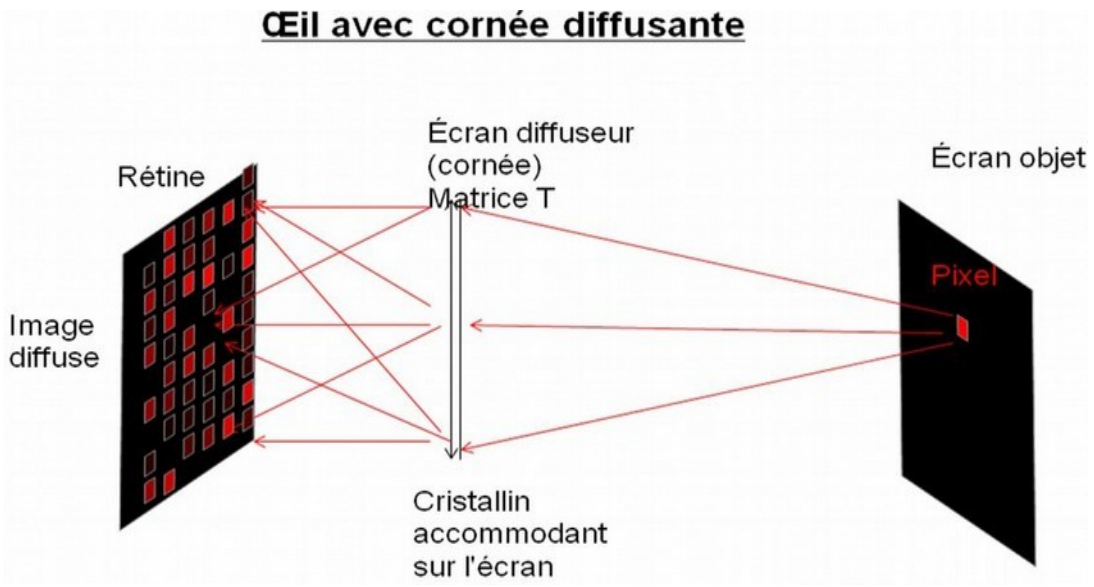
II. Principe

1. Description du phénomène

Prenons l'exemple d'un pixel affiché sur un écran. Pour un oeil sans diffusion, si le cristallin accommode sur l'écran, il se forme un pixel sur la rétine.



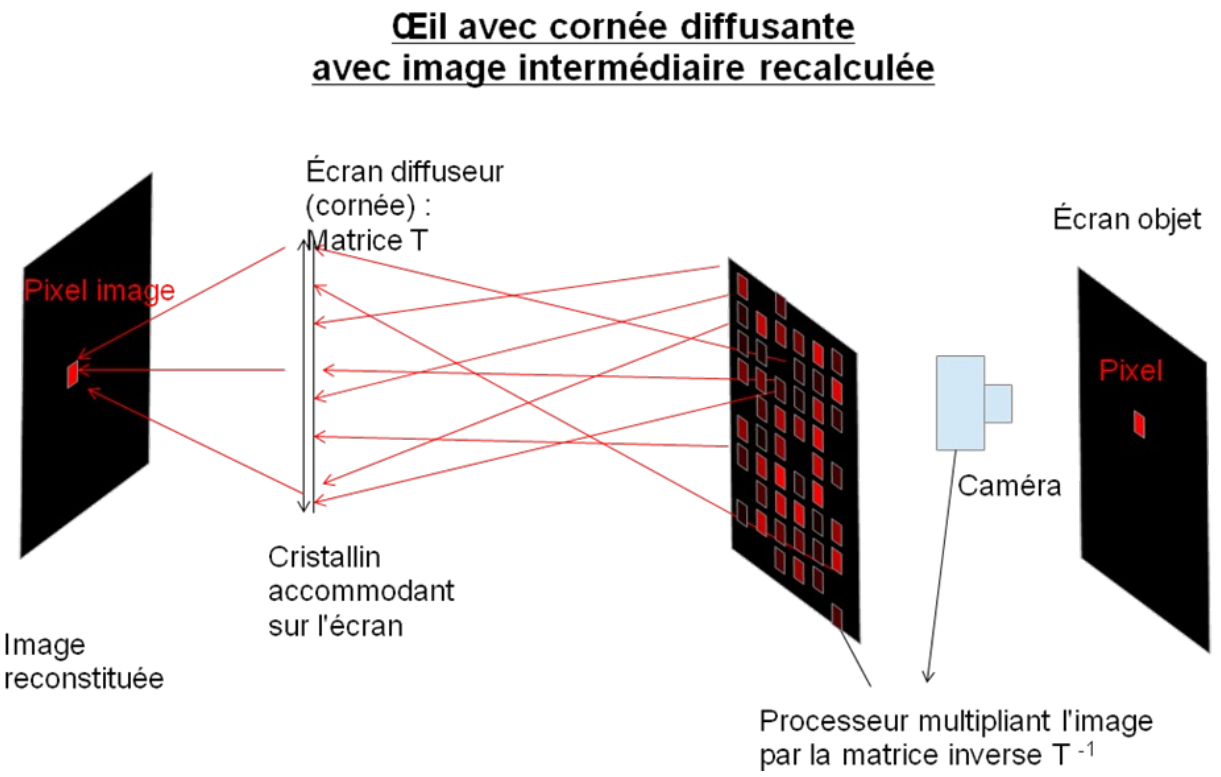
Par contre, si la cornée est diffusante, au lieu d'un pixel image, on obtient un ensemble de pixels d'intensité variable.



2. Principe du traitement de compensation par anticipation

L'écran objet peut être modélisé par une matrice bidimensionnelle, 50×50 par exemple, en raisonnant en monochrome. L'image formée sur la rétine est alors une matrice bidimensionnelle de même ordre (50×50). L'écran diffuseur peut donc être caractérisé par une matrice de transfert 50x50x50x50.

Notre idée est de multiplier l'image fournie par une webcam par l'inverse de la matrice de transfert de la cornée diffusante et d'afficher l'image résultante sur un écran devant l'oeil.



L'image se reforme nette sur la rétine.

3. Position du problème

Nous devons donc trouver l'image X telle que

$$T \times X = A$$

T est la matrice de transfert ; A est l'image d'origine.

C'est un problème inverse, mais qui a certaines spécificités.

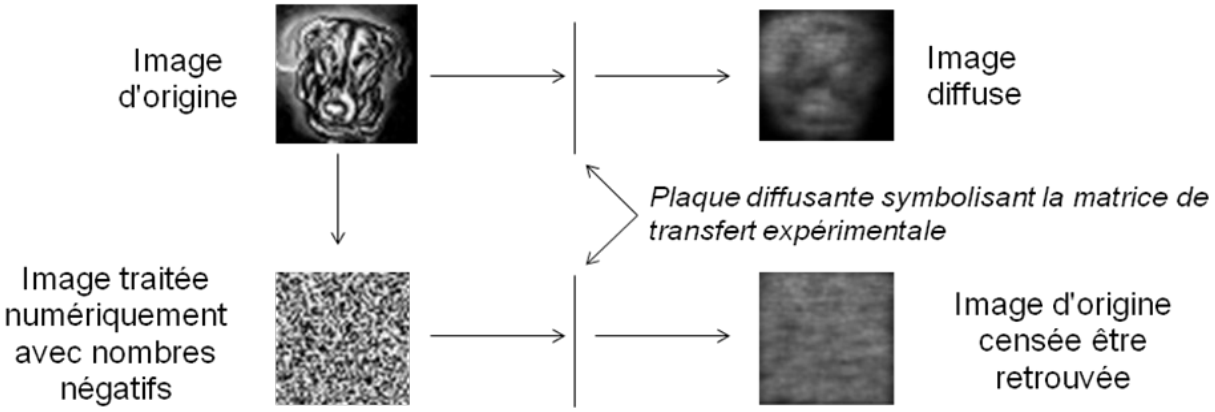
a. Modélisation numérique de la diffusion

Une faible diffusion est modélisée par une matrice de transfert T tri-diagonale, proche de la matrice identité.
Une forte diffusion est modélisée par une matrice où l'on s'écarte plus de la matrice identité (annexes, document 1).

b. La solution n'est pas physiquement acceptable...

Le système est inversible et nous obtenons une matrice solution X.
Ensuite, nous devons afficher sur un écran cette matrice solution X.

Cependant, on observe que cette matrice X possède des nombres négatifs. On ne peut donc pas retranscrire ces valeurs dans une image, dont les pixels ne peuvent avoir que des valeurs positives. Si l'on fait cela voici ce qui se produit :



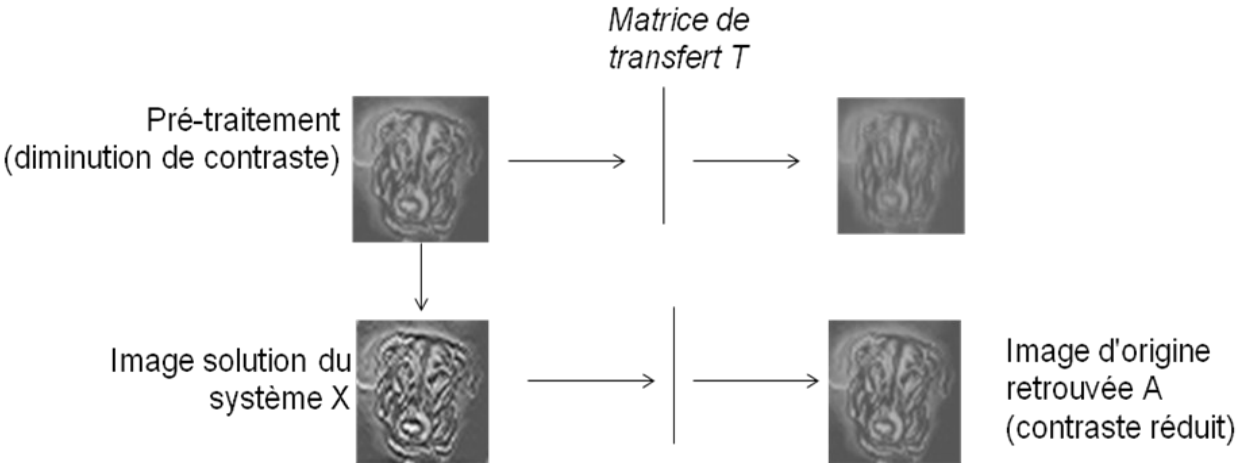
A cause des nombres négatifs, on ne retrouve pas l'image d'origine après passage à travers la plaque.

Cette problématique est nouvelle et spécifique au fait que l'on cherche à compenser la diffusion par anticipation et non a posteriori comme dans la littérature scientifique.

c. … sauf exceptions.

En 2015, nous avions trouvé une stratégie pour résoudre ce problème, par un prétraitement d'image : la diminution du contraste de l'image A permet de ne pas obtenir de nombres négatifs dans la matrice solution X.

On retrouve l'image de départ sans bruits, avec seulement un contraste réduit.



La diminution du contraste en prétraitement est donc une stratégie qui fonctionne parfaitement, mais uniquement si la diffusion est faible.

Notre travail de cette année a été de résoudre le problème dans les cas général de diffusions fortes.

III. Une stratégie générale : la solution d'optimisation

1. Théorie et simulation

a. Principe théorique

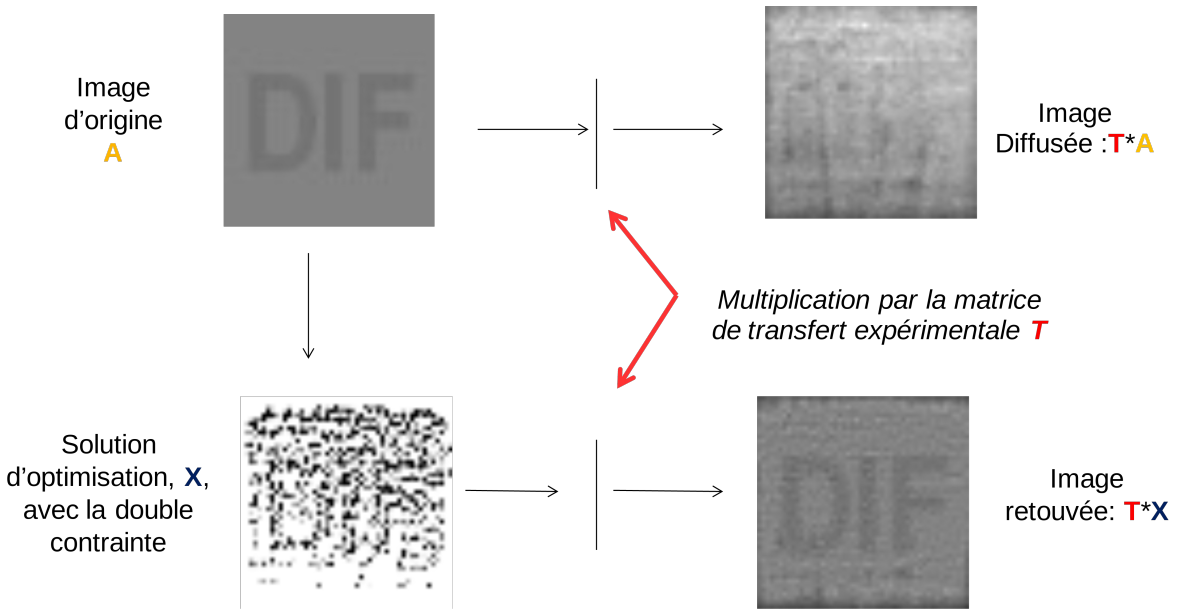
La stratégie que nous avons adoptée dans le cadre des fortes diffusions est de chercher une solution partielle sous contraintes.

La formalisation de cette méthode nous a été fournie par un professeur de mathématiques de l'école Centrale de Lyon, Gregory Vial ; il s'agit d'une optimisation :

$$\min\{\|TX - A\|; 0 \leq X \leq 255\}$$

Pour ce faire nous utilisons une fonction de minimisation par moindres carrés fournie par Matlab, appelée « lsqlin » dans laquelle on résout le même système matriciel expliqué précédemment mais où on impose deux contraintes : que les nombres de la matrice solution soient compris entre 0 et 255.

b. Résultats par simulation dans les cas de fortes diffusions



On voit ici que la diffusion est tellement forte que le texte disparaît (image en haut à droite)

On résout le système matriciel à doubles contraintes et on obtient une image X. Lorsqu'on multiplie cette image X avec la matrice de transfert, on peut observer que l'on retrouve le texte. On ne retrouve évidemment pas la totalité de l'information (granulosité) car X est une solution partielle.

Pour les fortes diffusions, une stratégie d'optimisation permet de récupérer l'information.

2. Test expérimental

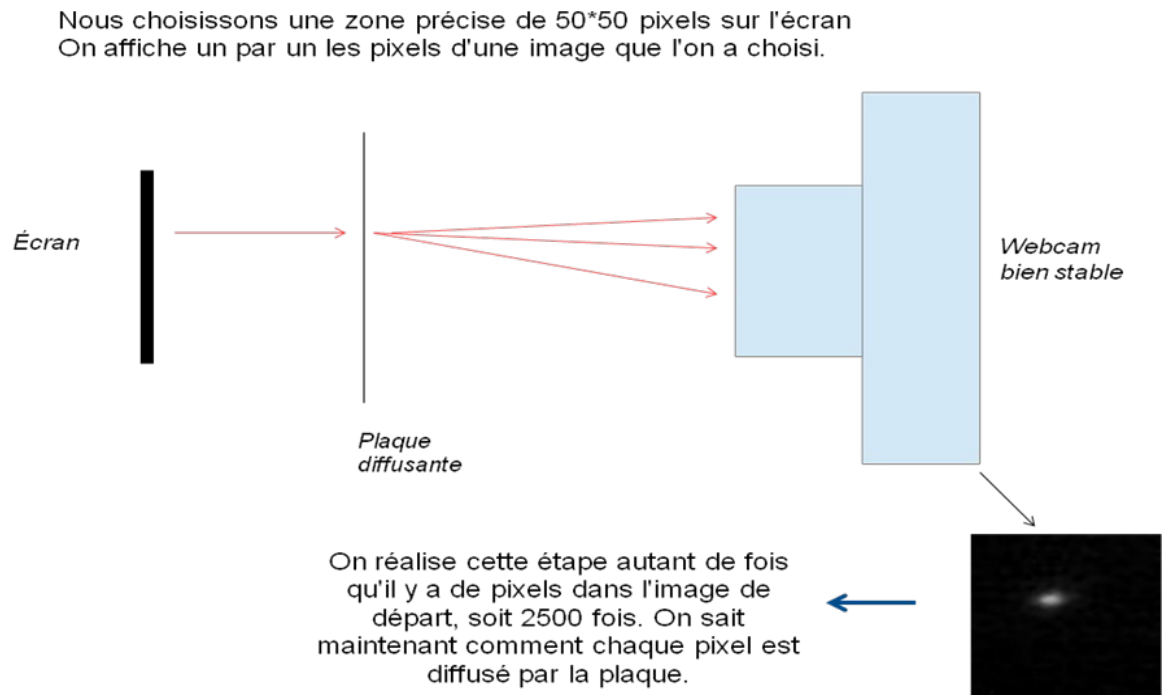
Pour répondre à notre problématique il s'agit aussi de savoir s'il est possible de déterminer expérimentalement une telle matrice de transfert.

Pour ce faire, nous avons mis en place un dispositif expérimental (annexe, document 2) composé d'un écran, d'une plaque de plexiglas, qui va servir de milieu diffusant (qui représente la cornée opacifiée) et d'une caméra.

a. Acquisition de la matrice de transfert

α Matrice de transfert brute

On sélectionne une zone de l'écran de 50x50. On va chercher à savoir comment chaque pixel de cette zone est diffusé par la plaque. Pour cela, on allume chaque pixel un à un, et on prend une photo du résultat vu au travers de la plaque de Plexiglas. On voit alors un petit ensemble de pixels allumés, ce qui décrit bien le devenir de ce pixel.



Ceci est automatisé au moyen d'un programme réalisé sur Matlab. On obtient donc 2500 images de 50x50 pixels correspondant aux images de chacun des 2500 pixels. C'est notre matrice de transfert expérimentale (annexe, document 3a).

β. Bidimensionnalisation

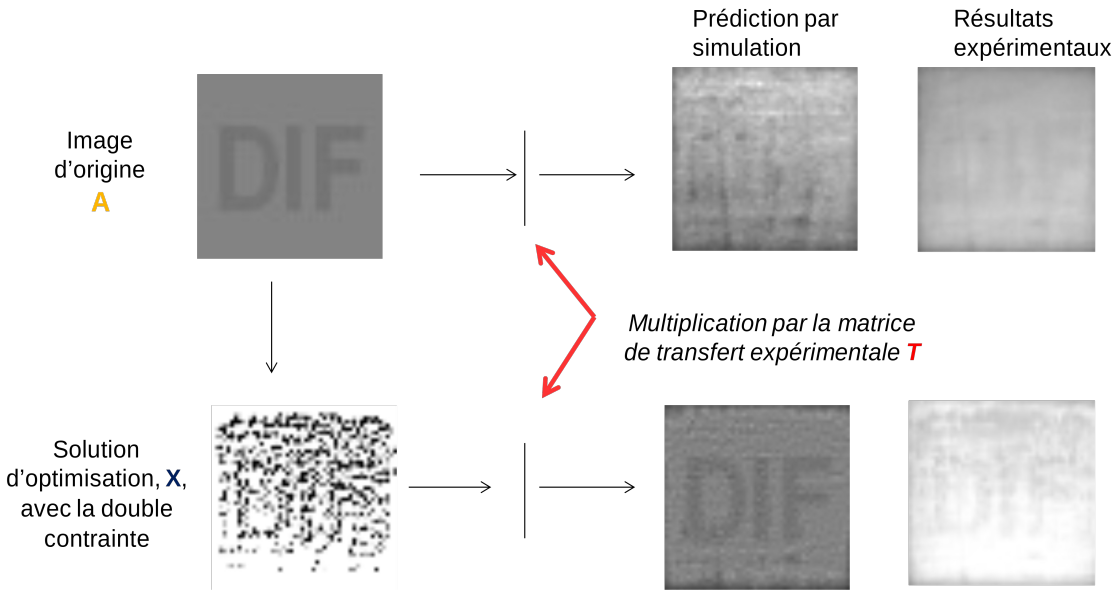
Cette matrice de transfert est à 4 dimensions et ses dimensions sont 50x50x50x50. Pour profiter des fonctions de calcul qui existent sur les matrices bidimensionnelles, on va, dans une étape intermédiaire, transformer cette matrice 4D en matrice 2D. Pour cela, avec un programme rédigé sur Matlab, on transforme chaque photo de 50x50 pixels en une colonne de 1x2500 pixels. Puis, on concatène ces colonnes ensemble et on obtient une matrice bidimensionnelle de toutes les photos.

On a donc une matrice de transfert expérimentale de 2500x2500 sur laquelle nous pouvons réaliser nos calculs (annexe, document 3b).

b. Affichage de la solution calculée.

Nous avons montré par simulation que nous avons une amélioration de la vision du texte grâce à notre traitement numérique.

Nous avons affiché sur l'écran derrière la plaque l'image d'origine **A** puis l'image solution d'optimisation **X**. Voici ce que nous obtenons.



L'amélioration de l'image au niveau expérimental est visible mais moins spectaculaire que dans la simulation.

Les résultats expérimentaux présentent des écarts par rapport aux prédictions par simulation.

Nous observons que l'image diffuse expérimentalement est différente de l'image prédite théoriquement **T***A**.**
Nous avons calculé la corrélation entre ces deux images et avons obtenu 5 %

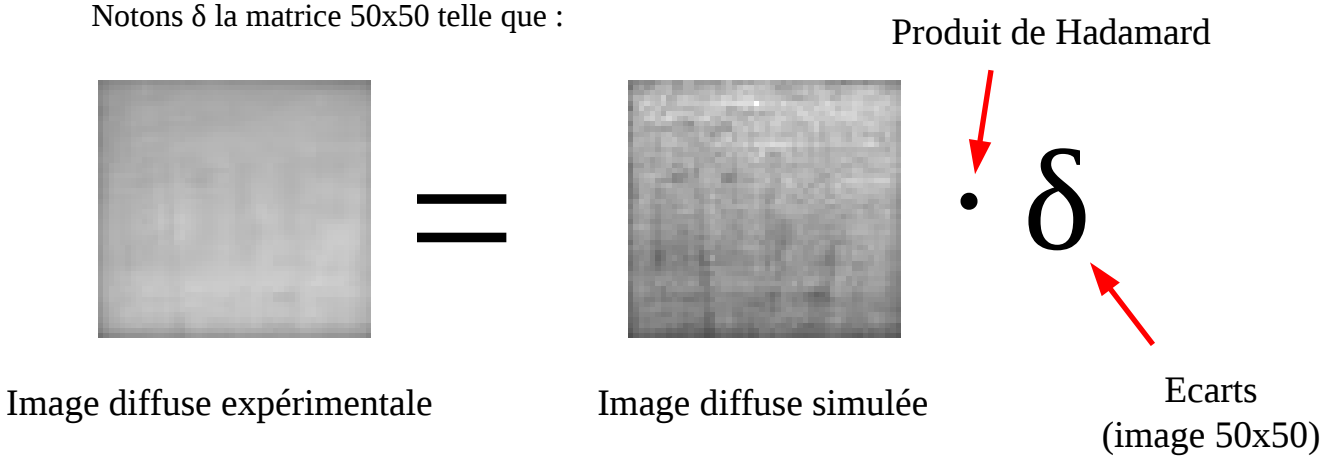
Nous en concluons que notre matrice de transfert expérimentale transcrit imparfaitement le processus diffusif réel.
Les sources de cet écart peuvent être diverses : bruit de capteur (webcam), bruit de fond de l'écran (rétroéclairage), bruit de quantification (codage des valeurs de X sur 8 bits lors de la transformation en image), variations du gain du capteur (webcam).

3. Compensation numérique des écarts

a. Principe

Si les écarts peuvent être réduits à la source, ce qui représente un long travail et des investissements non négligeables en matériel et en temps (en cours), nous allons montrer que nous avons réussi à mesurer ces écarts pour les compenser numériquement.

Notons δ la matrice 50x50 telle que :



Notons T_p la matrice de transfert parfaite telle que : $T_p \times A = D_{\text{expérimentale}}$ où **A** est l'image d'origine et $D_{\text{expérimentale}}$ est l'image d'origine diffuse expérimentalement.

Notons T notre matrice de transfert imparfaite, telle que :
$T \times A = D_{simulation}\, avec\, D_{simulation} \neq D_{\text{expérimentale}}$

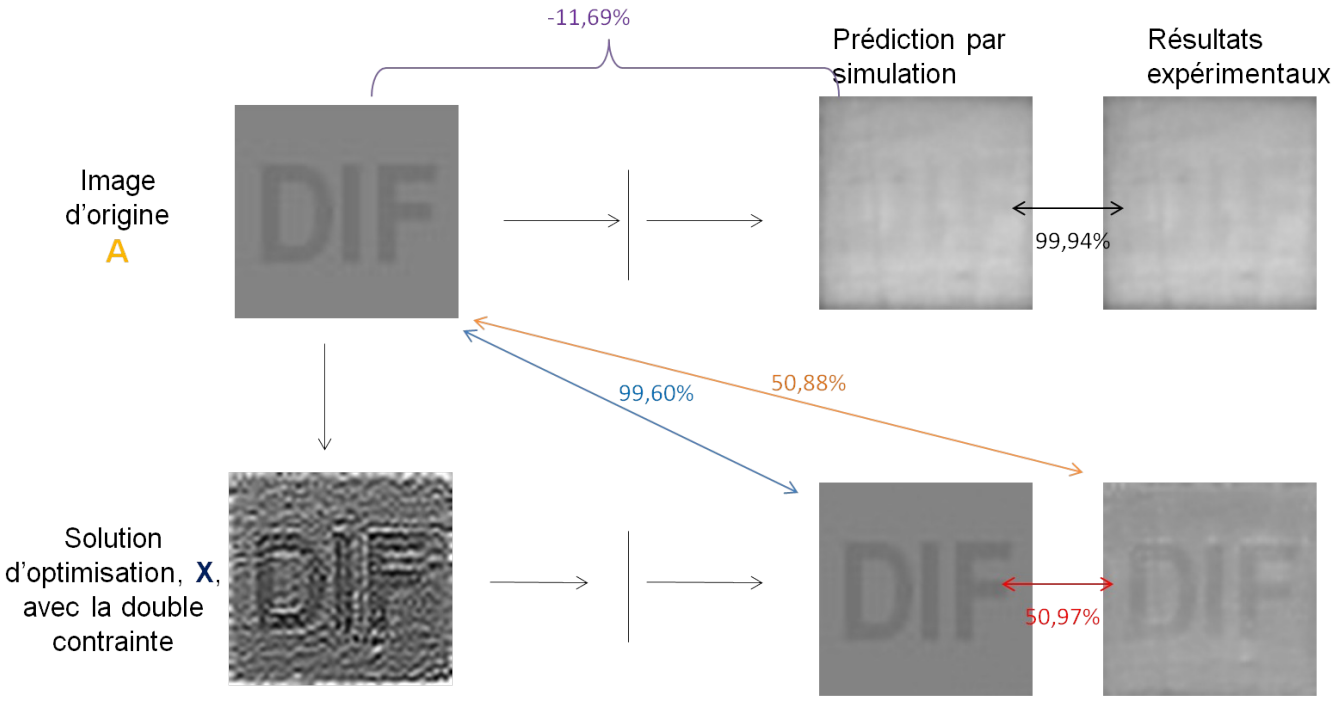
Nous pouvons écrire que: $T_p \times A = (T \times A).\delta$

Par commutation, on peut simplifier l'écriture et ainsi obtenir : $T_p = T.\delta$ (2)

Nous avons ainsi calculé T_p avec l'équation (2).

b. Test expérimental

Avec cette nouvelle procédure mathématique, nous avons obtenu les résultats suivant :



Résultats avec matrice de transfert parfaite

<u>Grâce à la compensation numérique des écarts, nous obtenons une amélioration visible et quantitative pour retrouver avec une corrélation de 50,88 % l'image d'origine expérimentalement.</u>

IV. Une stratégie de traitement rapide

1. Position du problème

Le temps de calcul de la solution d'optimisation est important :

Cela posera des difficultés si l'on veut faire du traitement d'image en temps réel, dans la perspective des lunettes. Nous avons donc cherché une approche plus rapide.

2. Principe du découplage diffusion homogène / inhomogène

a. Principe

On a souhaité tirer profit de l'aspect fortement isotrope de la diffusion qui transparaît dans la matrice de transfert par son côté très symétrique.

Notre idée est dans un premier temps de modéliser la matrice de transfert par une diffusion homogène dans tous les points de l'image, puis de modifier celle-ci pour prendre en compte les inhomogénéités par le calcul du δ.

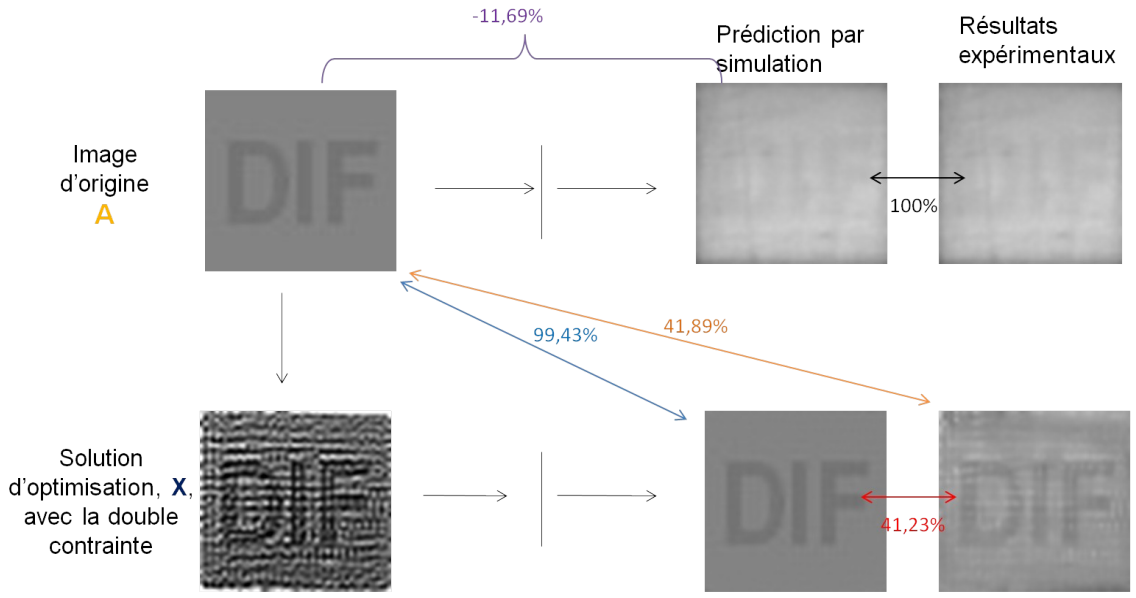
b. Vérification expérimentale du principe de découplage

Nous avons pris l'image N du pixel qui se trouve au coordonnées (25,25) de l'image 50x50 (annexe, document 4)

Nous transformons cette image en un vecteur de 2500x1, puis nous le plaçons dans une matrice vide de 2500x2500. Nous le translatons ensuite, pour créer les vecteurs correspondant aux autres pixels et ainsi retrouver une matrice de transfert ayant l'allure de celle en annexe, document 3b.

Le δ est ensuite calculé comme précédemment, et nous obtenons une matrice de transfert T_p qui nous permet de calculer une image solution X.

Nous avons obtenu des résultats aussi satisfaisants que les précédents :



Donc nous pouvons conclure que **δ contient l'essentiel de l'information relative à l'inhomogénéité** spatiale de la diffusion et que **le reste du processus peut être modélisé par une diffusion homogène.**

Ce résultat nous a permis d'envisager une compression de l'information pour obtenir un traitement plus efficace en termes de temps.

3. Procédure de traitement rapide

a. Principe

Soit $T_{homogène}$ la matrice de transfert créée à partir de l'image de diffusion d'un seul pixel N.

Nous avons $T_{homogène} . \delta \times X = A$, ou : $T_{homogène} \times X = \frac{A}{\delta}$ où la barre de fraction correspond à une division terme à terme.

$T_{homogène} \times X$ n'est rien d'autre qu'une convolution de X par l'image de diffusion d'un seul pixel N.

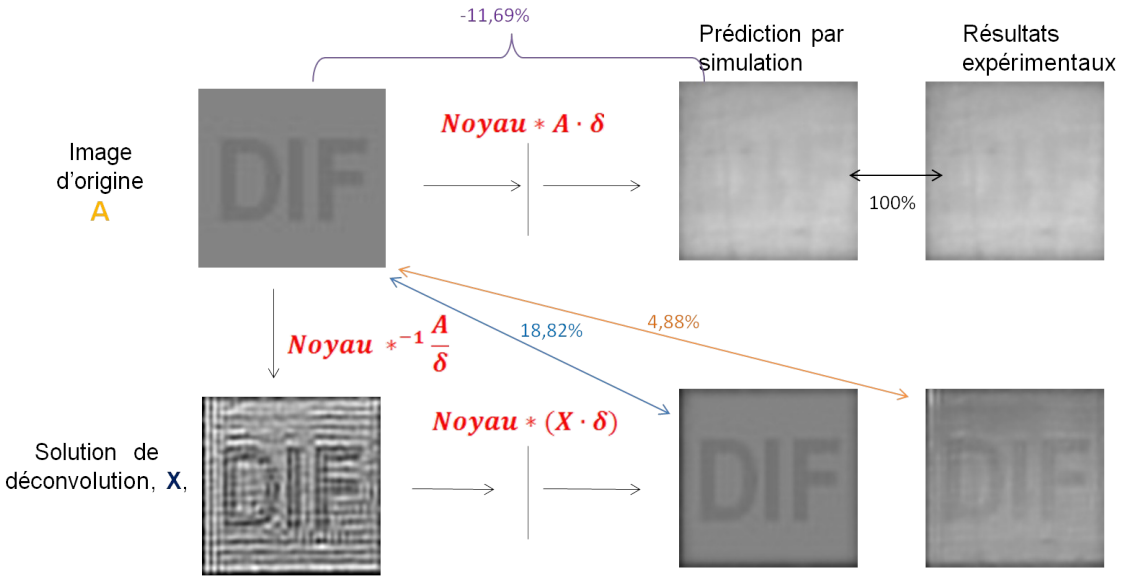
Alors on a : $T_{homogène} \times X = N * X$ où * est le produit de convolution.

Ainsi notre solution peut se calculer comme : $X = N *^{-1} (\frac{A}{\delta})$ où $*^{-1}$ est l'opérateur de déconvolution.

b. Vérification expérimentale

Nous avons cherché différentes tailles pour le noyau (annexe, document 4)

Voici les résultats avec un noyau de 9x9 :



Pour un noyau parfait de convolution de 9x9

Les résultats restent visiblement toujours autant satisfaisants.

Le temps de calcul pour déterminer X a été de 0,009 secondes, alors qu'avec la méthode d'optimisation, le temps était de 256 secondes.

c. Conclusion

Nous avons ainsi résolu 2 problèmes qui se posaient dans la perspective de réalisation des lunettes : le temps de calcul et l'espace mémoire nécessaire pour stocker l'information sur le processus diffusif.

	Procédure d'optimisation	Procédure de déconvolution
Temps	256 secondes	0,009 secondes
Mémoire nécessaire pour stocker l'information	250ko (pour une matrice de transfert creuse à 4%)	81o pour le noyau 2,5ko pour δ

V. Perspectives et travaux en cours

1. Transposition du protocole en ophtalmologie

Ce principe peut-il être transposé en ophtalmologie pour obtenir N et δ ?

Il existe un appareil en ophtalmologie qui affiche un point rouge en face de l'œil et prend une photo en confocal de la rétine pour savoir comment est l'image.

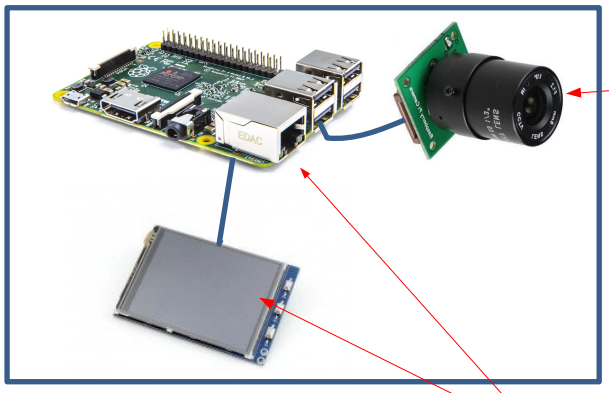
L'objectif de cet appareil est de fournir une information visuelle et qualitative à l'ophtalmologiste.
Cet appareil nous donne directement le N. il nous fournira le δ si au lieu du point rouge, on affiche une image.

2. Prototype

Nous travaillons actuellement à la réalisation d'un prototype à l'aide de 2 Raspberry.

En voici les 2 schémas :

Modèle de l'oeil malade

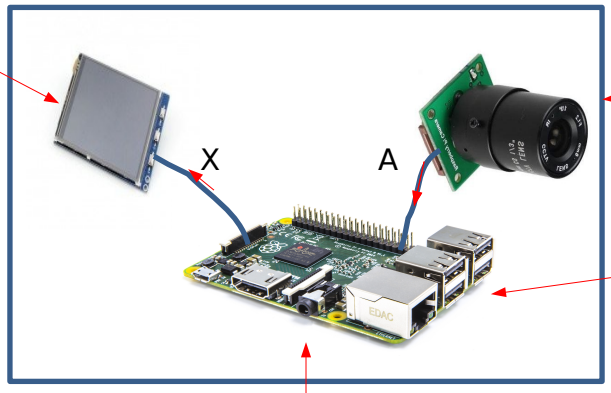


Webcam recouverte de taches blanches sur la lentille

Ecran et processeur permettant :
- d'afficher ce que voit la webcam,
- de mesurer N et δ

Modèle de lunettes

Ecran afficheur



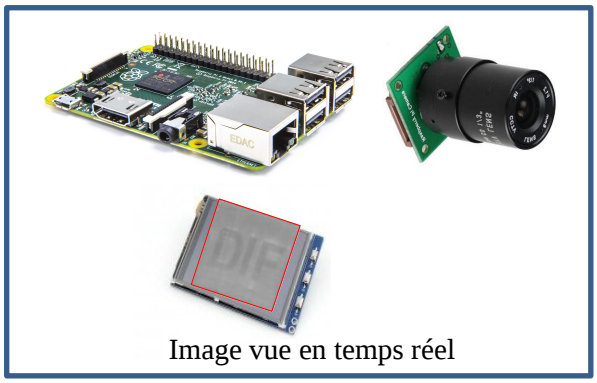
Webcam

Carte sd stockant N et δ

Calculateur : $X = N *^{-1} (\frac{A}{\delta})$

Montage expérimental final

Modèle de l'oeil



Modèle de lunettes

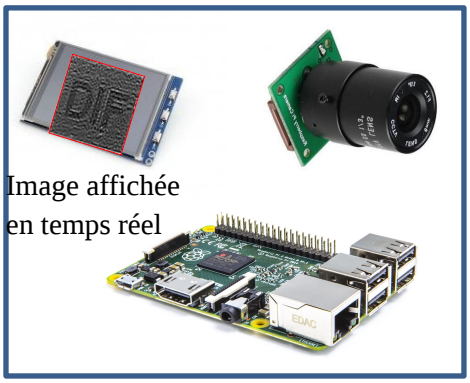


Image réelle

Conclusion

Si le problème de la compensation de la diffusion est un problème abondamment traité dans la littérature, celui de la compensation de la diffusion en amont a été très peu traité.

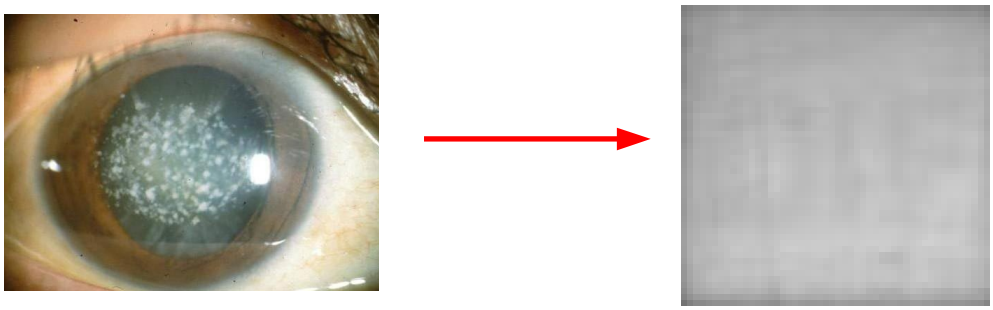
Il a été abordé en lumière cohérente[3] car le problème est inversible théoriquement.
Les chercheurs ont réussi à récupérer l'image avec de bons résultats, avec toutefois une rapport signal sur bruit tellement faible qu'il nécessitait un long moyennage pour obtenir l'image de départ.

Nous abordons ici le sujet en lumière incohérente. Au niveau expérimental, le système est beaucoup plus simple que lorsqu'il s'agit de contrôler la phase d'une image en lumière cohérente et permet donc d'envisager facilement une transposition technique à l'aide d'écrans usuels.
Cependant, en lumière incohérente, le problème présente l'inconvénient a priori majeur de ne pas être inversible dans le cas général.

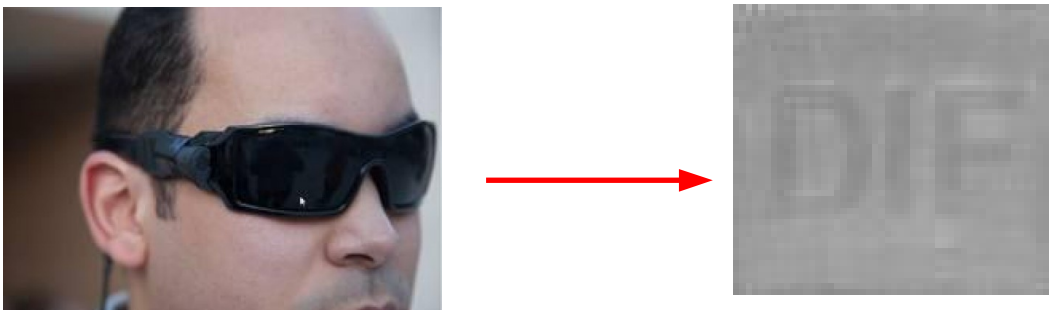
Nous avons cependant fait le pari de trouver des stratégies pour trouver des solutions approchées qui permettent de retrouver la vue, moyennant une solution techniquement réalisable simplement.

Pari gagné.

Avant une personne malade qui voyait ceci :



Désormais elle pourra voir cela :



[3]En lumière cohérente, des travaux ont été menés par diverses équipes dont l'ESPCI [1], basés sur le retournement temporel.

Il 'agit d'une nouveauté au niveau expérimental car nous obtenons des images réelles avec directement un rapport signal sur bruit faible.

D'autre part il s'agit d'une avancée sur le plan fondamental car cette approche du problème (compensation en amont, en lumière incohérente) n'avait jamais été abordée, et nous montrons que différentes pistes de détermination de solutions partielles peuvent répondre au problème posé.

Ces résultats ont été obtenus par une implication sans faille des nombreux élèves du projet :

Alexis Bossard qui a mené tous les calculs sous Scilab puis Matlab et a eu les idées du δ et de l'approche par déconvolution.

Luc Baudinaud qui s'est acharné sur l'expérience pour arriver à synchroniser webcam et écran pour obtenir la matrice de transfert expérimentale.

Florent Baubet qui est notre as en communication.

Alexandre Tunstall et Benjamin Turner qui se sont lancés à bras raccourcis dans la réalisation des prototypes en raspberry.

Florine Ballon, Allan Gwozdz et Anaïs Restoux qui recherchent des sponsors.

Sans oublier les anciens de l'an dernier : Baptiste Lhéraut, Simon Colombel et Blandine Baudon qui continuent à suivre le projet et à le soutenir dès qu'ils en ont un peu le temps, notamment pour le dépôt du brevet.

Remerciements

Notre équipe remercie :

Nos soutiens publics:

- Olympiades de Physique
- Science à l'école et Fondation C Génial
- Université de Poitiers
- Conseil Départemental de la Vienne

Nos sponsors privés :

- Ramé optique, Civray
- RLM Distribution, Civray

Notre établissement, d'un soutien inconditionnel : lycée André Theuriet

Nos partenaires et collaborateurs institutionnels :

- M. Grégory Vial, professeur de Mathématique à l'école Centrale de Lyon pour son aide sur la formulation mathématique de nos intuitions

- M. Frédéric Placin, professeur agrégé de physique au lycée Magenta à Bordeaux, pour son aide sur la programmation en Processing

- Le laboratoire Xlim du Futuroscope de Poitiers, pour son aide sur les sources d'écart sur la matrice de transfert

- le Laboratoire CRPP-CNRS de Pessac (33) pour nous avoir donné plusieurs caméras CCD avec objectifs et cartes d'acquisition.

- le laboratoire de Physique du Trinity College de Dublin pour avoir mis à notre disposition ses calculateurs.

- le département de R&D d'ESSILOR pour étudier la transposition de notre traitement sur des lunettes.

- Et toutes les autres personnes qui nous ont apporté des réponses deci-delà (Abdou Ghermouche, chercheur en informatique au LABRI, Pessac ; Dr. Briat, opthalmologiste, Poitiers/La Rochelle,...)

Bibliographie

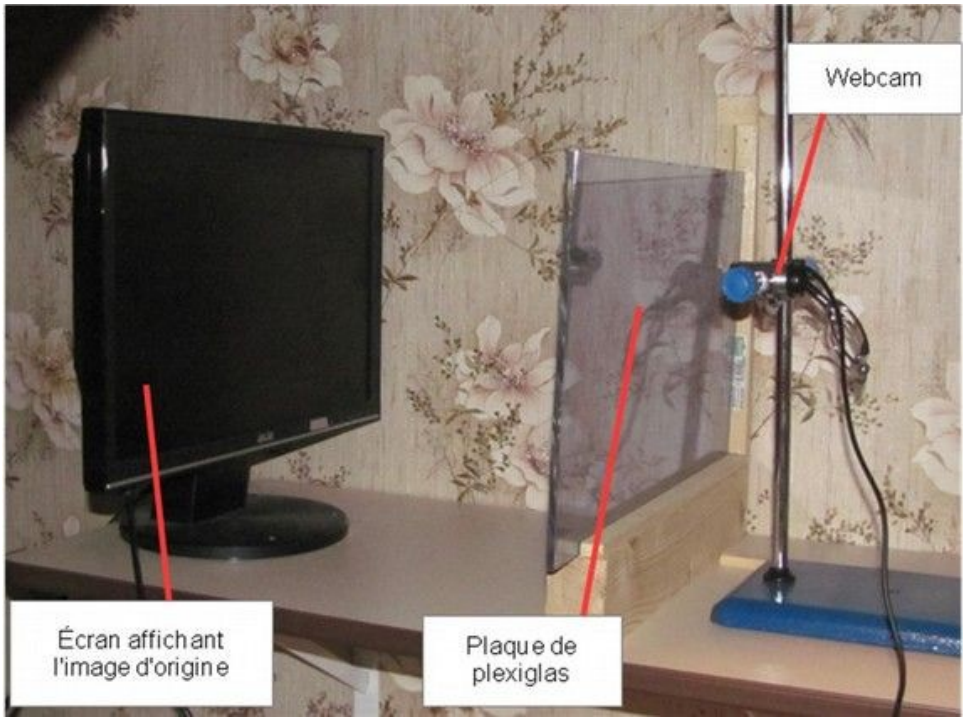
[1] *Image Transmission through an opaque material*, S. Popoff et al, Nature Communications, **1**, 81 (2010)

Annexes

Document 1 : simulation de la diffusion par des matrices tridiagonales

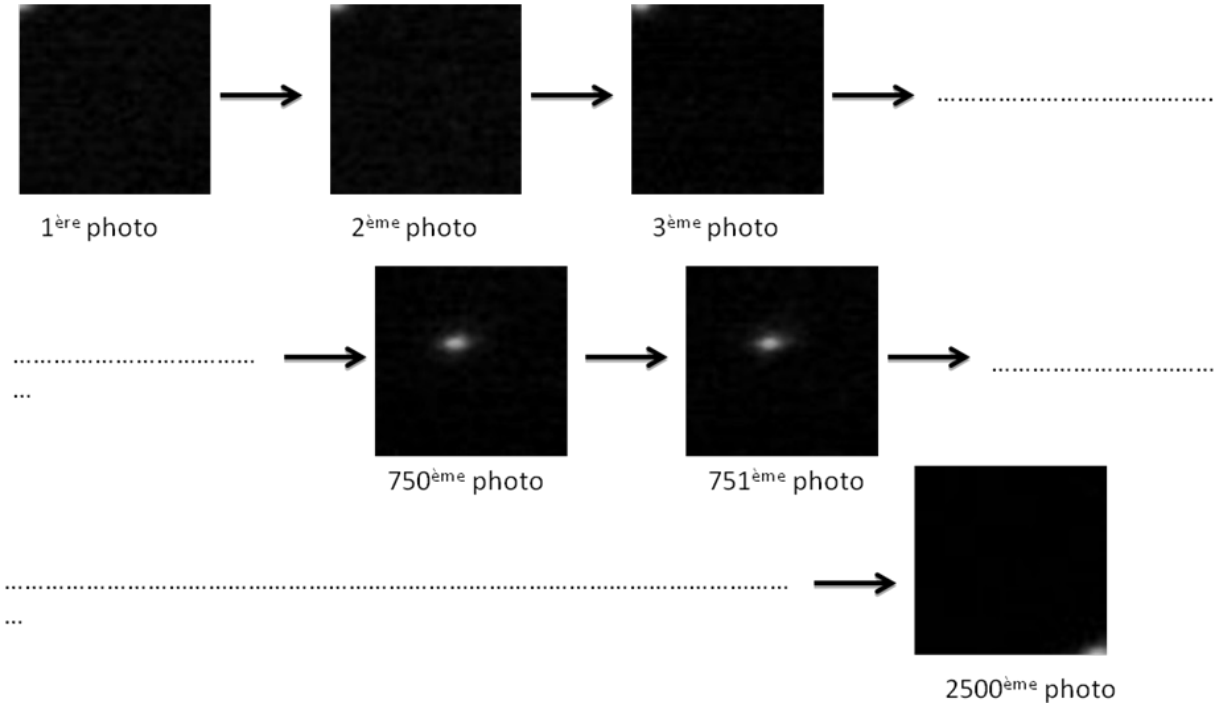
Images multipliées par des matrices de transfert simulant de la diffusion faible à forte.

Document 2 : modèle expérimental

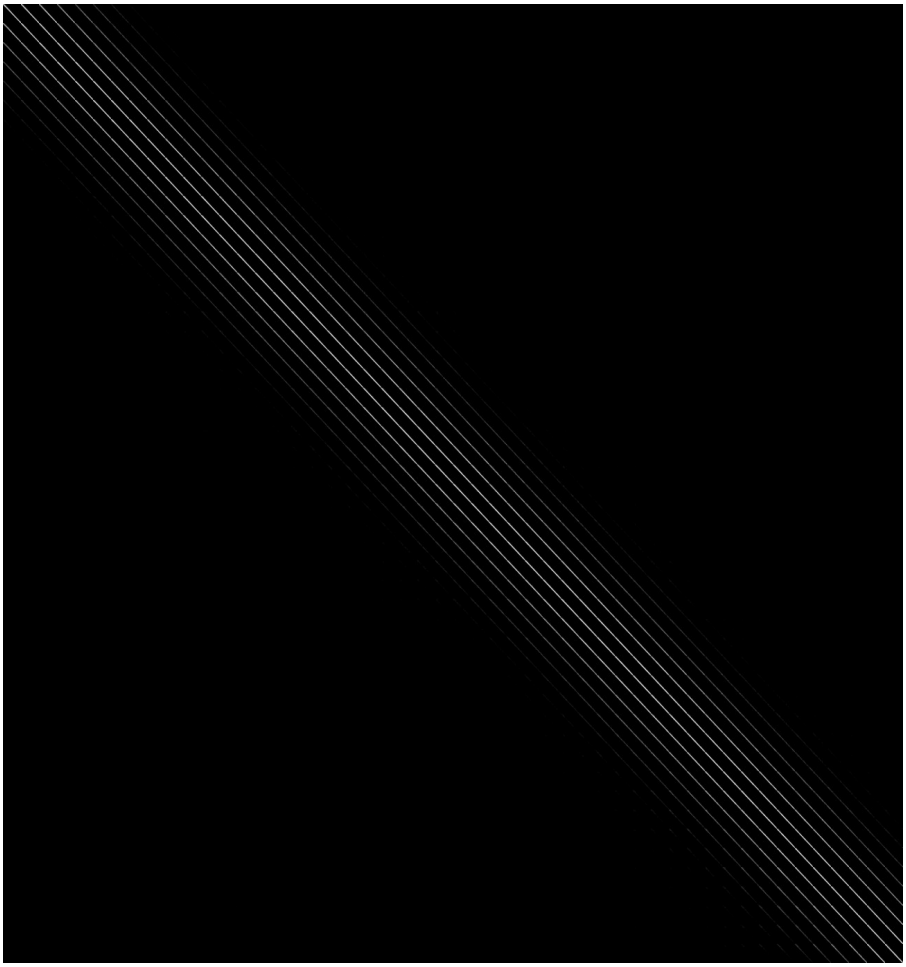


Document 3 : matrice de transfert expérimentale 50x50x50x50 **(a)**, puis dans sa version bidimensionnalisée 2500x2500 **(b)**

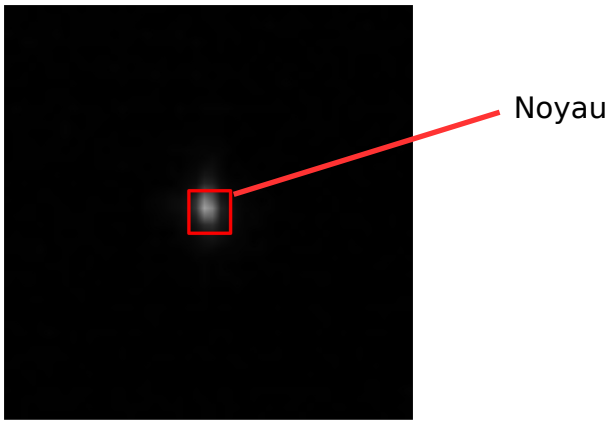
a)



b)



Document 4 : image du pixel central comme noyau de convolution



N :image du pixel central