



Projet de recherche scientifique

Compensation de la diffusion par traitement d'image



Lycée André Theuriet
Civray 86 400

- Florine Ballon
- Florent Baubet
- Luc Baudinaud
- Pierre Beaufort
- Alexis Bossard
- Allan Gwozdz
- Anaïs Restoux
- Alexandre Tunstall

Résumé

La compensation de la diffusion dans le traitement d'image est un problème ancien et très étudié.

Nous traitons ici d'un cas particulier où nous ne traitons pas l'image après diffusion, mais nous traitons l'image-objet avant diffusion afin qu'elle compense par anticipation la diffusion à venir. L'objectif à long terme est de créer des lunettes permettant à des personnes ayant une cornée diffusante, de voir.

Notre travail a consisté à mettre en place des stratégies de traitement mathématique et à démontrer leur efficacité.

Nous avons ainsi prouvé qu'il était possible de traiter une image afin qu'elle puisse être vue au travers d'une plaque diffusante, à la fois d'un point de vue numérique et tout récemment, d'un point de vue expérimental.

Remarque préalable

Notre travail portant sur du traitement d'image, il est probable que certaines images-résultats importantes ne soient pas correctement rendues lors de l'impression, ce qui gênerait le lecteur dans la compréhension de l'analyse. Il est donc préférable de lire ce rapport sur écran.

Sommaire

I. Présentation du projet

II. Principe

[1. Description du phénomène](#)

[2. Principe du traitement de compensation par anticipation](#)

III. Modélisation numérique

[1. Position du problème](#)

[2. Stratégie n°1 : prétraitement \(faibles diffusions\)](#)

[3. Stratégie n°2 : la solution d'optimisation \(fortes diffusions\)](#)

IV. Modèle expérimental

[1. Acquisition de la matrice de transfert](#)

[2. Démonstration expérimentale](#)

V. Discussion

VI. Perspectives

[1. Pistes de diminution des écarts simulation/expérience](#)

[2. Amélioration de la stratégie de traitement numérique](#)

[3. Transposition en ophtalmologie](#)

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 8 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 blanche¹.

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

Webcam qui transmet l'image au processeur

Processeur qui traite l'image



Face interne : écran affichant l'image générée par le processeur

Notre problématique est de vérifier la faisabilité du principe :

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

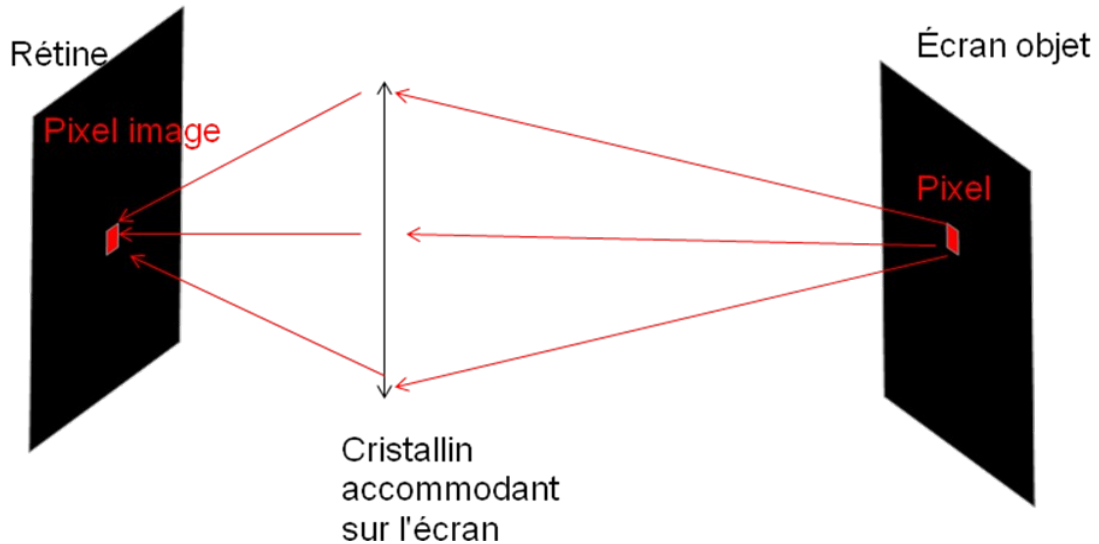
¹Le seul remède connu est la greffe de cornée qui est rejetée entre 6 mois et 20 ans.

II. Principe

1. Description du phénomène

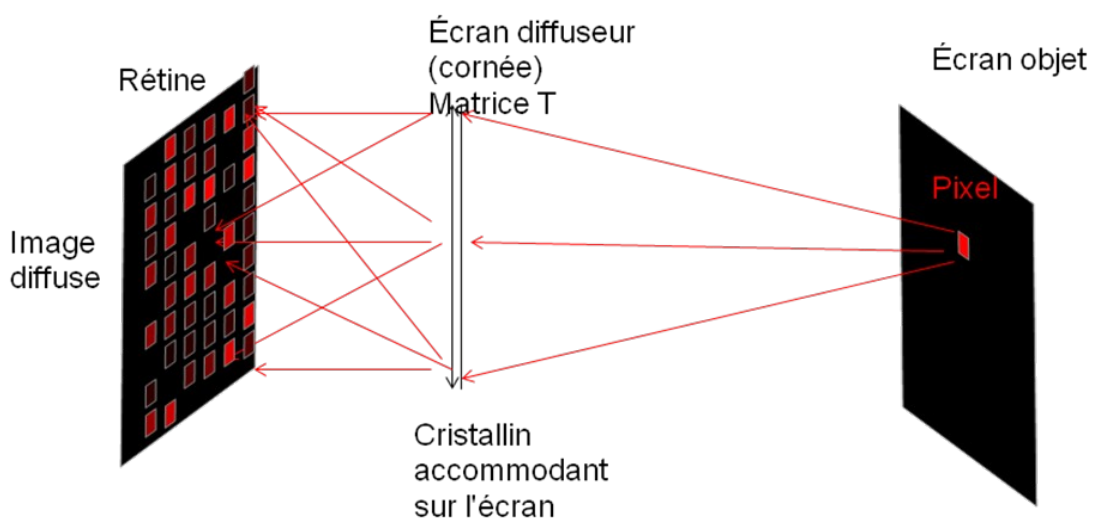
Prenons l'exemple d'un pixel affiché sur un écran. Pour un oeil sans diffusion, si le cristallin accommode sur l'écran, il se forme un pixel sur la rétine.

Œil sans défaut



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

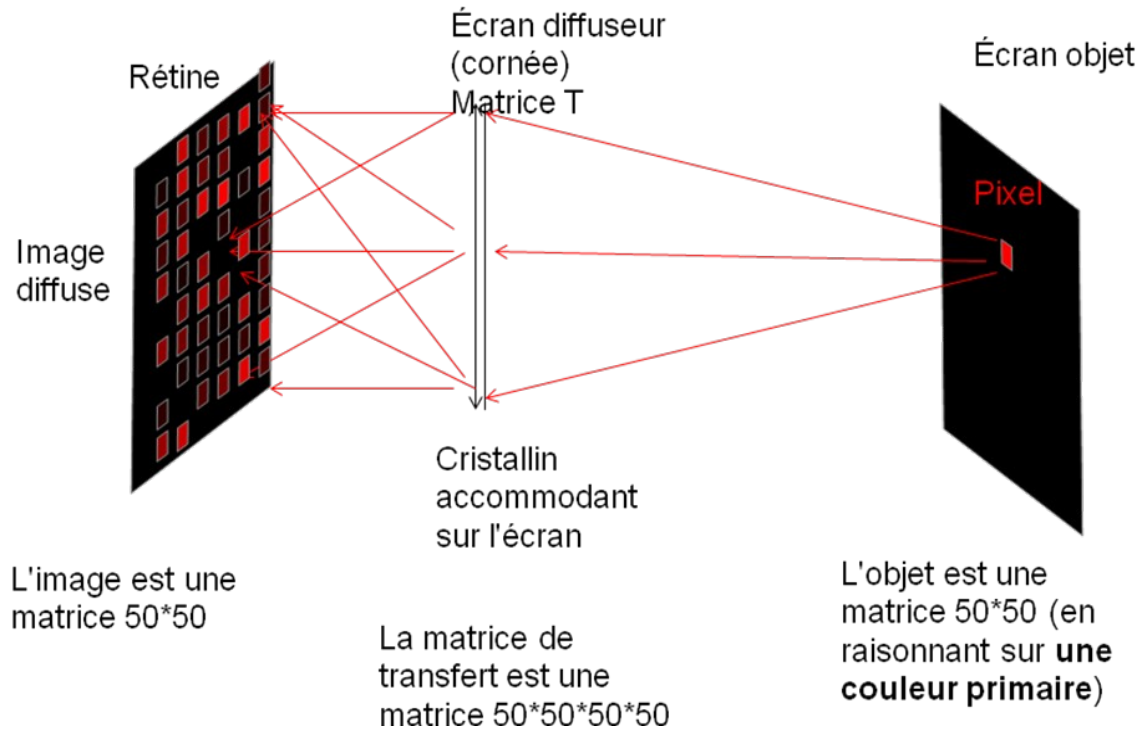
Œil avec cornée diffusante



2. Principe du traitement de compensation par anticipation

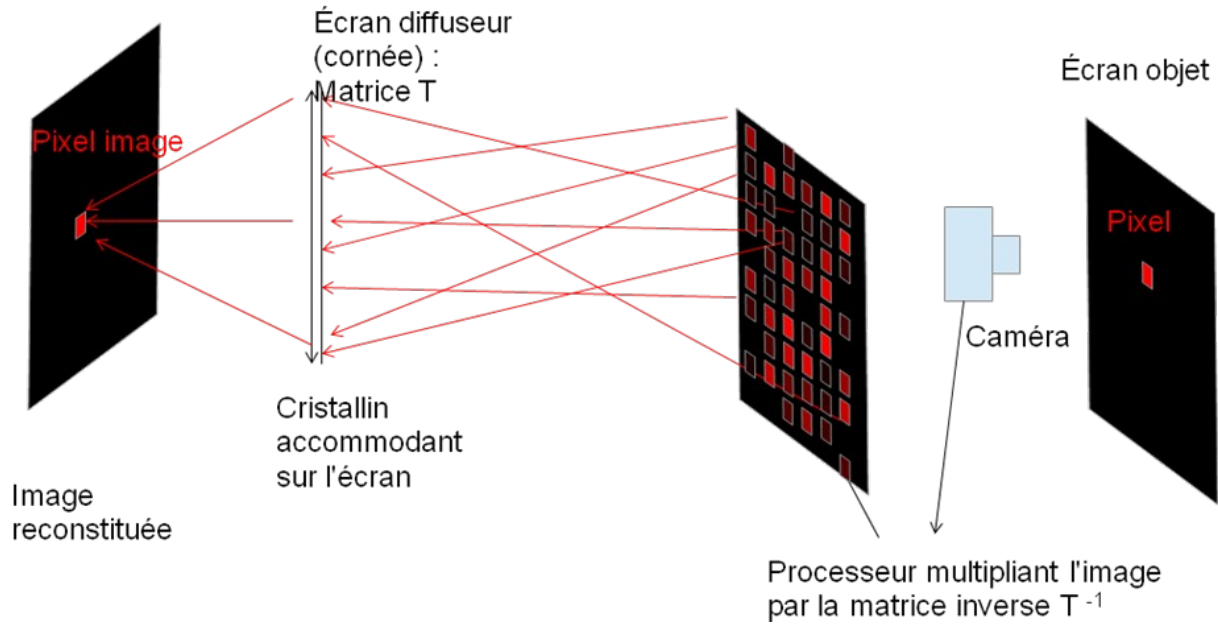
L'écran objet peut être modélisé par une matrice bidimensionnelle, 50×50 par exemple, en raisonnant en monochrome. L'image formée sur la rétine est alors une matrice bidimensionnelle de même ordre (50×50). L'écran diffuseur peut donc être caractérisé par une matrice de transfert $50 \times 50 \times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

Œil avec cornée diffusante



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.

Œil avec cornée diffusante avec image intermédiaire recalculée



L'image se reforme nette sur la rétine.

III. Modélisation numérique

Nous devons trouver l'image X telle que

$$T \times X = A$$

T est la matrice de transfert

A est l'image d'origine.

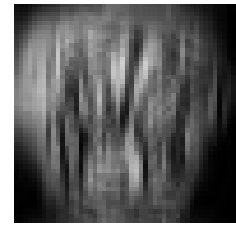
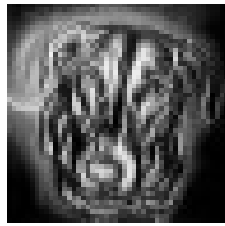
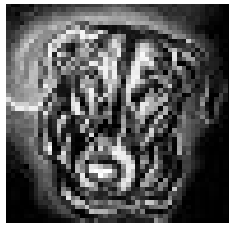
C'est un problème inverse, mais qui a certaines spécificités.

1. Position du problème

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.



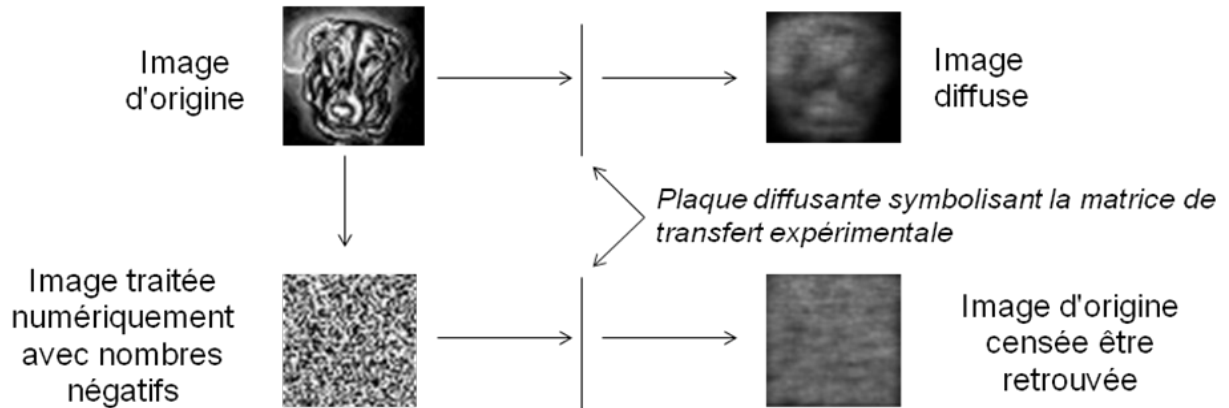
Images multipliées par des matrices de transfert simulant de la diffusion faible à forte.

b. Résolution du système

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.

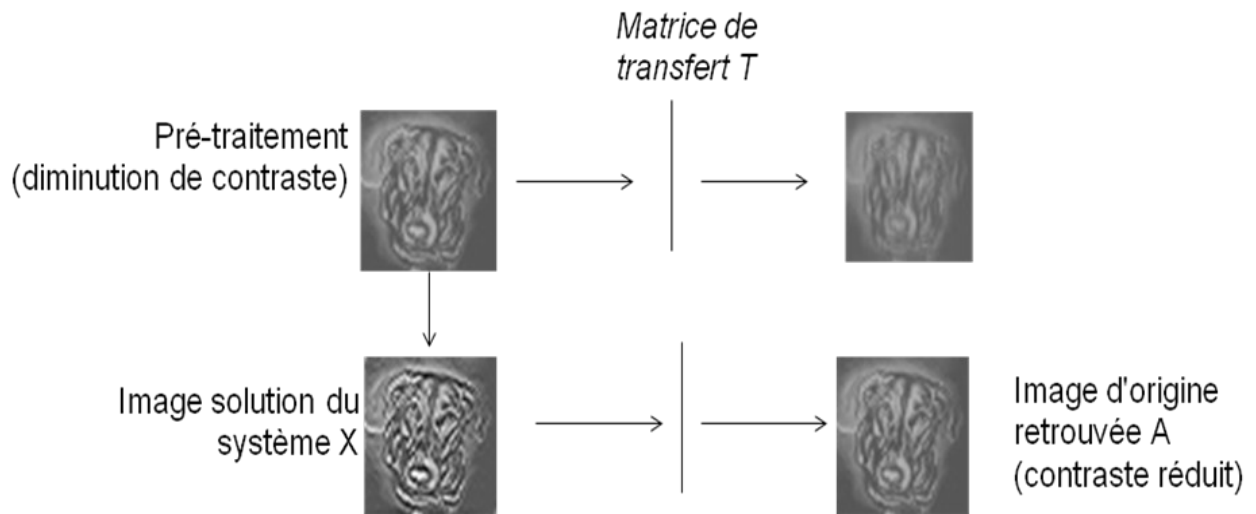
Pour résoudre ce problème nous avons testé de nombreuses stratégies.

Nous présentons ci-dessous celles qui ont d'ores et déjà abouti aux résultats espérés.

2. Stratégie n°1 : prétraitement (faibles diffusions)

Pour résoudre ce problème, nous avons étudié une stratégie de 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.

Cependant, dans le cas fortement diffusant, la diminution du contraste nécessaire est telle que l'on ne voit plus l'image. Nous avons donc cherché une autre stratégie pour les cas plus diffusants.

3. Stratégie n°2 : la solution d'optimisation (fortes diffusions)

a. Principe

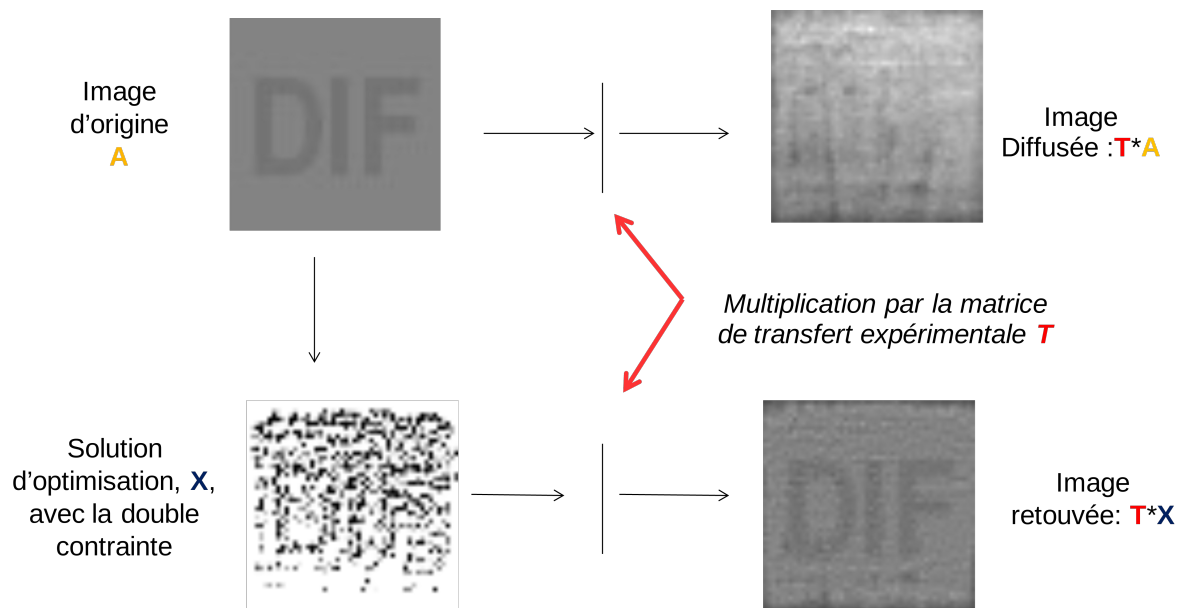
La stratégie que nous avons adoptée dans le cadre des fortes diffusions est de chercher une solution partielle sous contraintes.

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 « lsqin » 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 dans les cas de forte diffusion



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

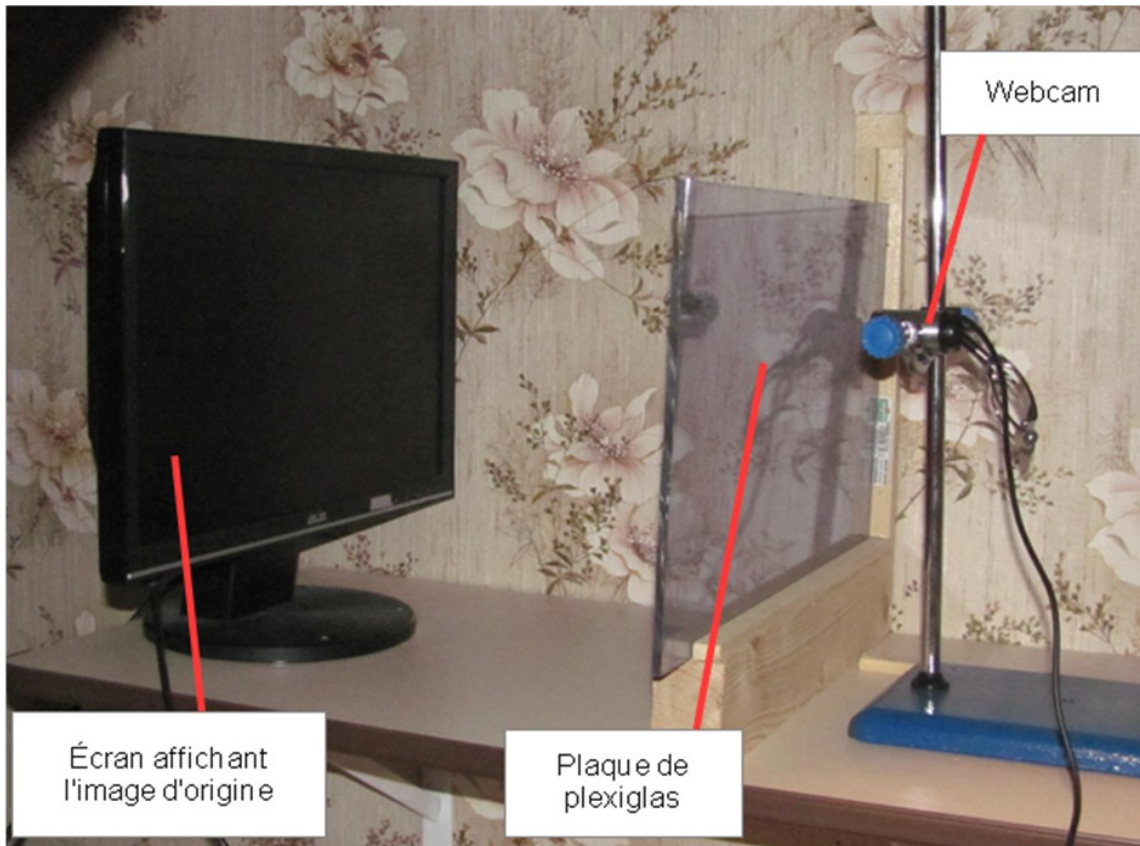
On résout le système matriciel à doubles contraintes et on obtient une image X. Lorsqu'on multiplie cette image X avec la matrice de transfert, on peut observer que l'on retrouve le texte. On ne retrouve évidemment pas la totalité de l'information (granulosité) car X est une solution partielle.

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

IV. Modèle 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 le dispositif expérimental ci-dessous composé d'un écran, d'une plaque de plexiglas, qui va servir de milieu diffusant (qui représente la cornée opacifiée) et d'une caméra.



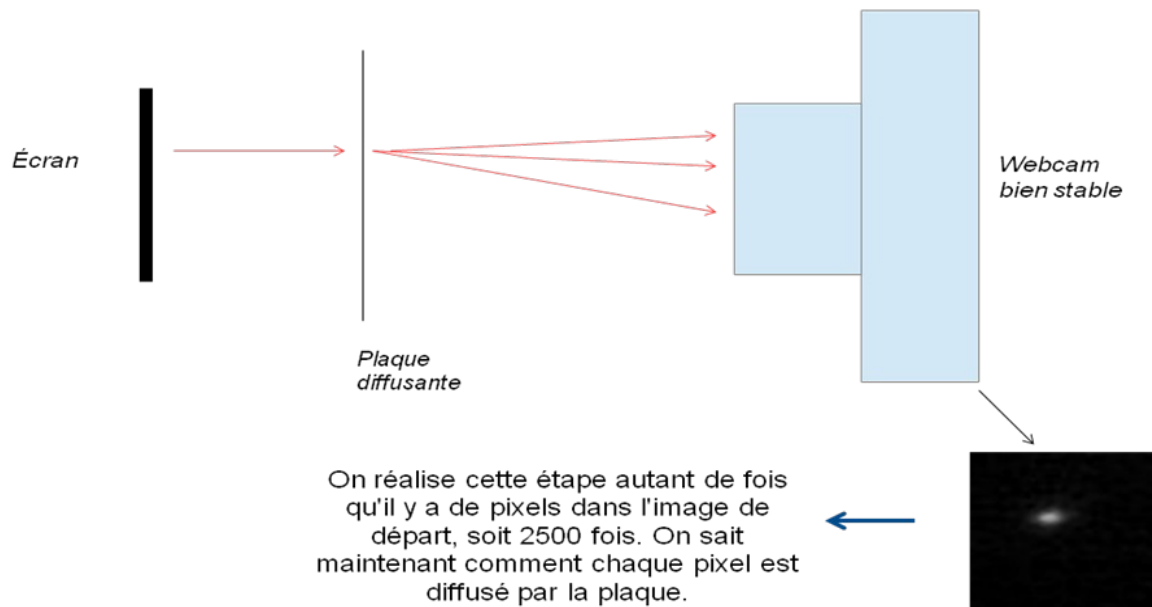
Dans une première partie, nous montrons comment nous déterminons expérimentalement la matrice de transfert de la zone de la plaque étudiée, puis dans une deuxième partie nous montrons nos résultats expérimentaux.

1. Acquisition de la matrice de transfert

a. Matrice de transfert brute

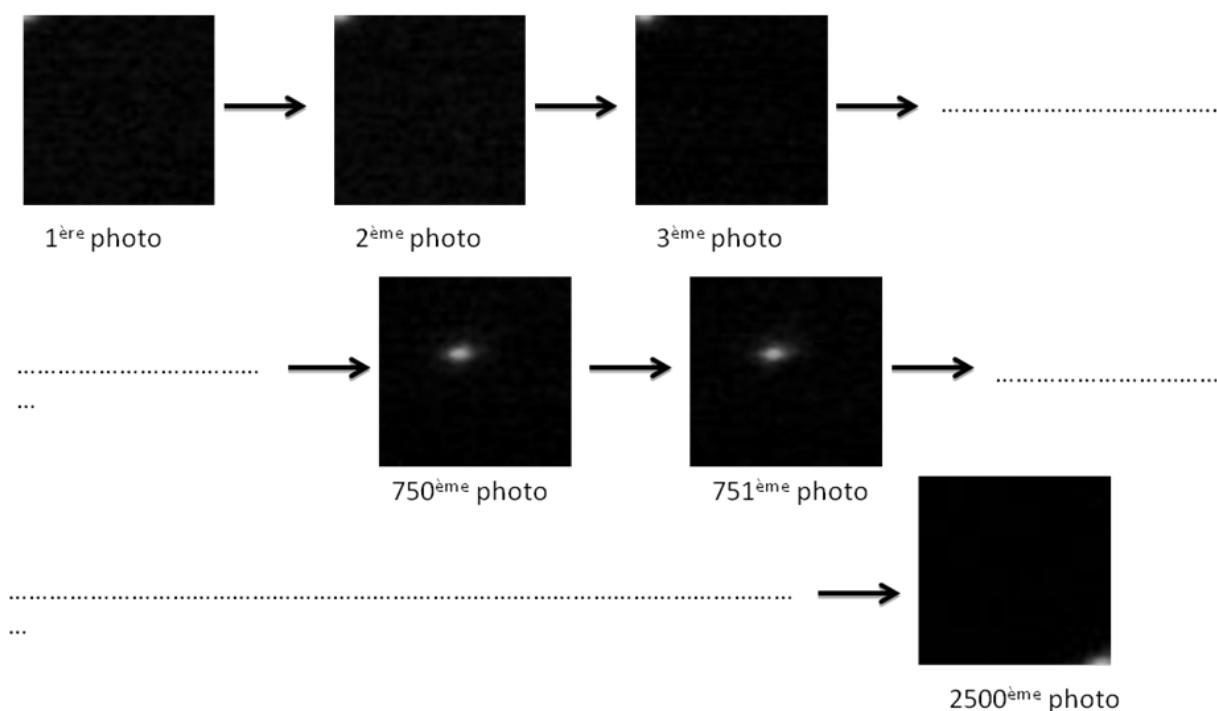
On sélectionne une zone de l'écran de 50x50. On va chercher à savoir comment chaque pixel de cette zone est diffusé par la plaque. Pour cela, on allume chaque pixel un à un, et on prend une photo du résultat vu au travers de la plaque de Plexiglas. On voit alors un petit ensemble de pixels allumés, ce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

Nous choisissons une zone précise de 50*50 pixels sur l'écran
On affiche un par un les pixels d'une image que l'on a choisi.



On réalise cette étape autant de fois qu'il y a de pixels dans l'image de départ, soit 2500 fois. On sait maintenant comment chaque pixel est diffusé par la plaque.

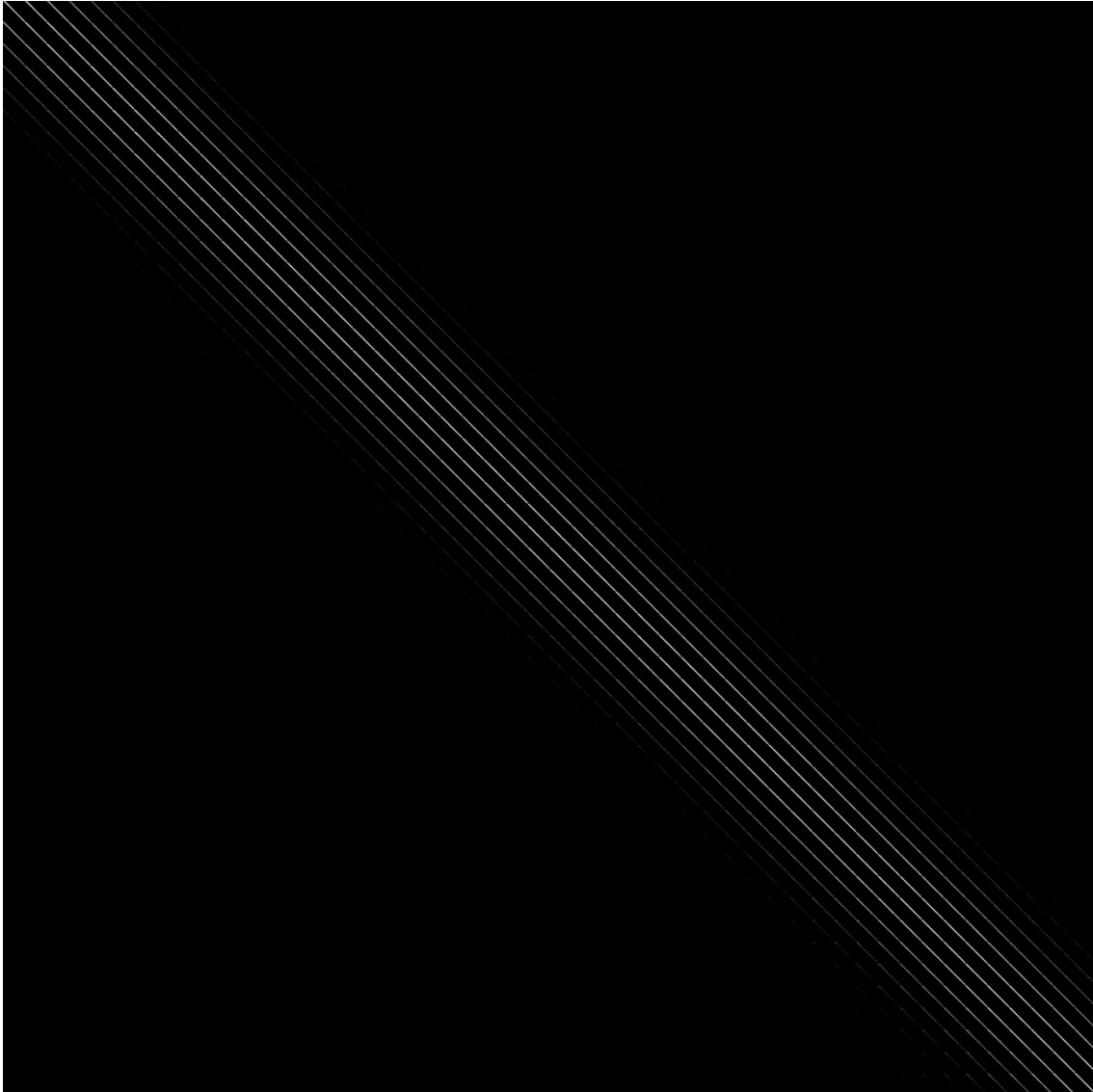
Ceci est automatisé au moyen d'un programme réalisé sur le logiciel Processing (version simplifiée de Java). On obtient donc 2500 images de 50x50 pixels correspondant aux images de chacun des 2500 pixels. C'est notre matrice de transfert expérimentale.



b. Bidimensionnalisation

Cette matrice de transfert est à 4 dimensions et ses dimensions sont $50 \times 50 \times 50 \times 50$. 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 50×50 pixels en une colonne de 1×2500 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 2500×2500 sur lequel nous pouvons réaliser nos calculs.

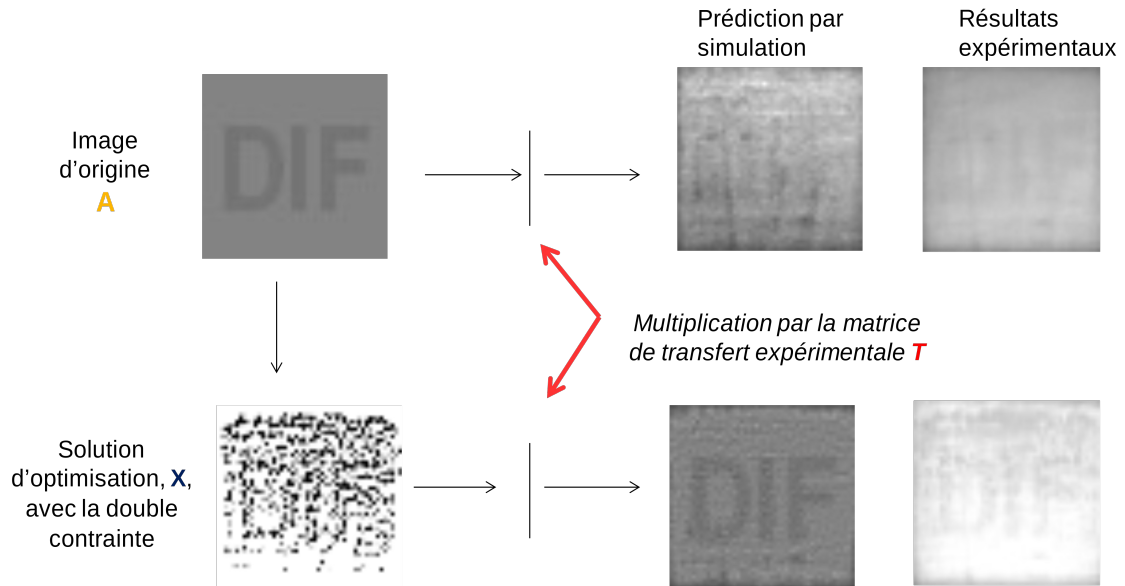


*Matrice de transfert expérimentale de
2500x2500 qui modélise la diffusion de la
plaque de plexialas*

2. Démonstration expérimentale

Nous avons montré par simulation que nous avons une amélioration grâce à notre traitement numérique. Vérifions ces résultats expérimentalement.

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.

V. Discussion

Le procédé théorique fonctionne et cela est confirmé par l'expérience.

Cependant 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 $\mathbf{T}^* \mathbf{A}$.

Nous avons calculé la corrélation entre ces deux images et avons obtenu 5 %

Nous en concluons que notre matrice de transfert transcrit partiellement 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).

Dans la partie qui suit nous présentons nos pistes de travail actuelles pour diminuer ces écarts.

VI. Perspectives

1. Pistes de diminution des écarts simulation/expérience

a. Bruit de l'écran

Pour réduire le bruit issu du rétroéclairage de l'écran , nous avons acheté des écrans à LED.

b. Bruit de quantification

Pour réduire le bruit de quantification, nous étudions la faisabilité d'acheter des écrans codés en 16 bits.

c. Bruit de capteur et contrôle du gain

Pour réduire le bruit de capteur de la webcam et pour pouvoir contrôler l'exposition du capteur, nous venons d'installer des caméras CCD².

d. Compensation numérique des écarts

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 :

$$T \times A = D_{\text{simulation}} \text{ avec } D_{\text{simulation}} \neq D_{\text{expérimentale}}$$

Nous avons calculé le vecteur δ solution de l'équation : $D_{\text{simulation}} \cdot \delta = D_{\text{expérimentale}}$ (1)

Ici ce n'est pas un produit matriciel normal, mais un produit terme à terme appelé produit matriciel de Hadamard. Nous pouvons donc écrire que: $T_p \times A = T \times A \cdot \delta$

On peut simplifier l'écriture et ainsi obtenir : $T_p = T \cdot \delta$ (2)

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

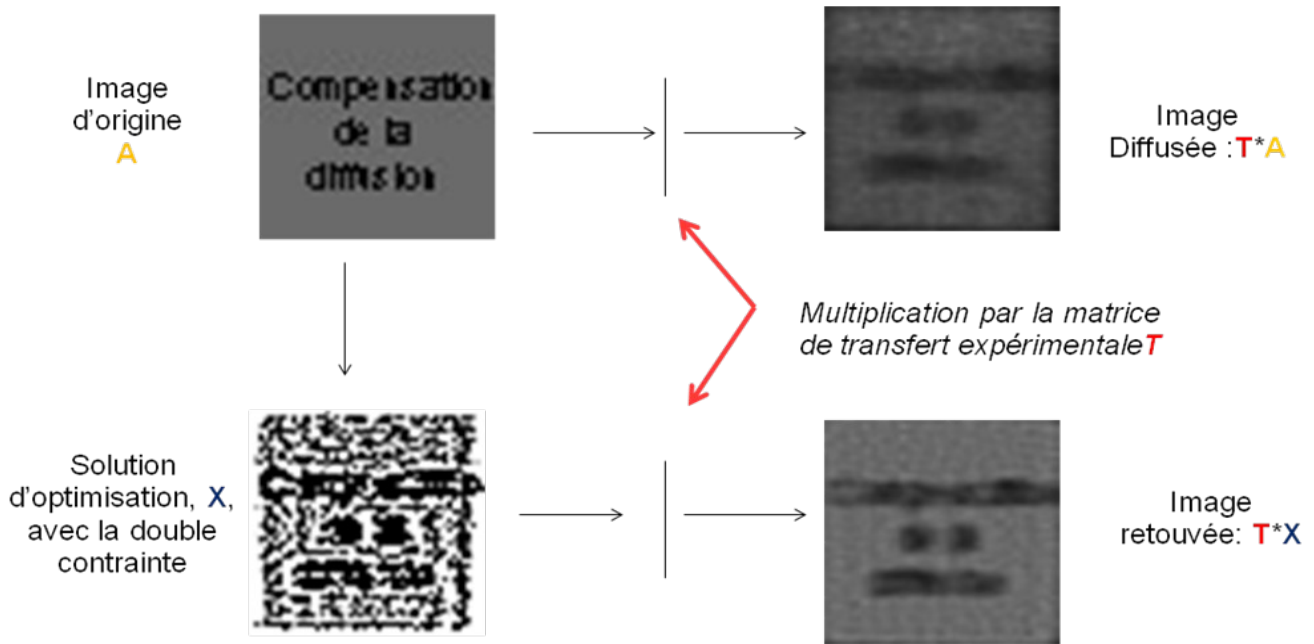
Cette fois-ci la corrélation entre l'image diffuse expérimentale et celle prédite par simulation avec cette matrice de transfert T_p vaut : 99,94%, au lieu des 5% précédents. Nous avons donc trouvé un moyen de corriger numériquement les écarts expérimentaux de notre matrice de transfert.

Nous poursuivons ces travaux en essayant d'évaluer s'il existe un écart systématique indépendant des images d'origine qui se transcrit par un δ moyen qui nous permettrait d'apporter une correction numérique à T .

²Nous remercions chaleureusement le laboratoire CRPP-CNRS pour ce don.

2. Amélioration de la stratégie de traitement numérique

Nous avons également entrepris d'essayer de transformer des images de textes plus petits :



On peut voir que dans l'image retrouvée, on ne distingue pas le texte. On voudrait optimiser le traitement car l'optimisation intervient de manière non ciblée. On voudrait donc cibler l'optimisation dans les hautes fréquences (c'est-à-dire le contour du texte) pour voir le texte net. Pour avoir plus de renseignement sur la faisabilité de ce ciblage, nous avons entamé une collaboration avec des chercheurs dans le traitement de l'image au laboratoire Xlim à Poitiers.

3. Transposition en ophtalmologie

Ce principe peut-il être transposé en ophtalmologie pour obtenir la matrice de transfert d'une cornée malade ?

Il existe un appareil en ophtalmologie qui affiche un point rouge en face de l'oeil 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.

Il suffirait d'automatiser cet appareil pour faire bouger le point rouge et à chaque fois prendre un photo de la rétine pour transposer la méthode ci-dessus.

Conclusion

En 18 mois, nous avons réussi à démontrer qu'il était numériquement possible de traiter une image de manière à ce qu'elle puisse être vue au travers d'un objet diffusant (cornée, vitre diffusante,...), à la fois en simulation, et par l'expérience.

Ceci n'avait jamais été fait³ et c'est un résultat important tant sur le plan fondamental et que dans une perspective de concrétisation.

Ceci a été rendu possible grâce à un investissement colossal de notre petit groupe d'élèves tant sur le plan du travail que sur la communication, la recherche de subventions et sponsors, la logistique.

³En lumière incohérente. En lumière cohérente, des travaux ont été menés par diverses équipes dont l'ESPCI [1], basés sur le retournement temporel, mais très difficiles à transposer au cas de nos lunettes.

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 avoir étudié 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, ophtalmologiste, Poitiers/La Rochelle,...)

Bibliographie

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