

TPE – Œil bionique

Année : 2015-2016

Groupe : BROUGUI Imran, CROMPIN Simon, MURA Loïc

Établissement : Lycée De La Salle, Metz

Classe : 1^{ère} SB

Thème : Structure

Sujet : L'Homme augmenté

Problématique : Comment rendre la vue à un aveugle ?

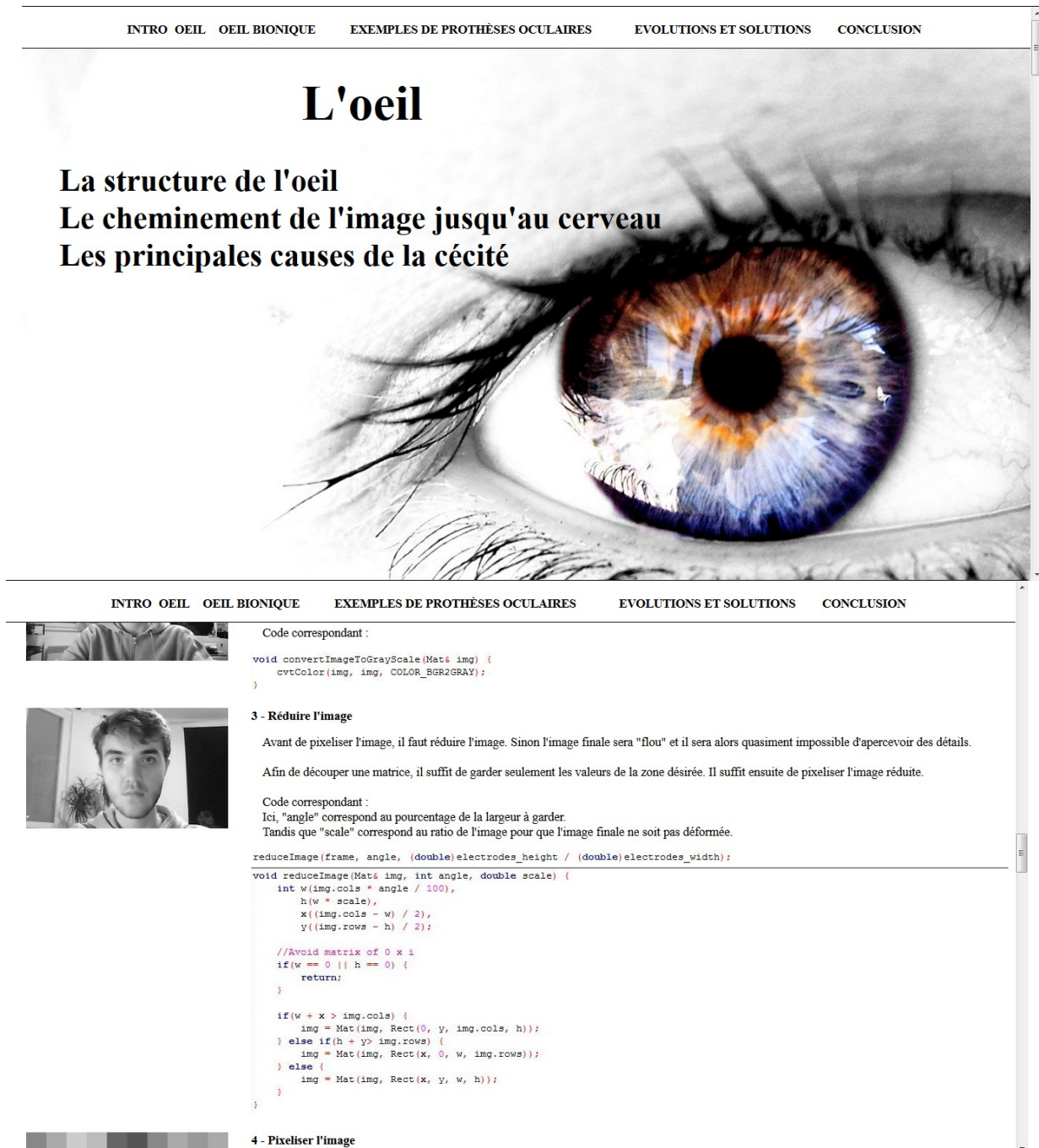
Matières : SVT et mathématiques



Le rendu final de ce TPE a d'abord été réalisé sous forme de site web. Il a été ensuite adapté afin de pouvoir être imprimé sous forme de dossier. Le site web est disponible à l'adresse suivante :

<http://loicmura.github.io/tpe-bionic-eye/>

Voici, quelques captures d'écrans :



Dès l'Antiquité, des philosophes ont étudié les troubles de la vision. C'est, par exemple, Aristote qui, le premier, décrit la myopie et la presbytie. Les premiers outils permettant de corriger des déficiences visuelles n'apparaissent qu'au premier siècle. C'était alors de simples morceaux de verre taillés agrandissant des textes ou des paysages. Puis des techniques corrigeant de plus en plus de troubles de la vue ont vu le jour. C'est notamment le cas des lunettes, des lentilles ou encore de l'opération de la cataracte.

De nos jours, les chercheurs veulent aller encore plus loin en rendant la vue aux personnes souffrant d'une cécité provenant d'un problème de la rétine, un organe fragile et difficilement transplantable. Ce qui nous amène à la problématique suivante :

Comment rendre la vue à un aveugle ?

Sommaire :

I – Œil

- 1 – La structure de l'œil
- 2 – Le cheminement de l'image jusqu'au cerveau
- 3 – Les principales causes de la cécité

II – Œil bionique

- 1 – Définitions
- 2 – Histoire
- 3 – Types

III – Exemples de prothèses oculaires

- 1 – Argus 2, Second Sight
 - A – Présentation
 - B – Composants
 - C – Fonctionnement
 - D – Expérience
 - E – Inconvénients / Avantages
 - F – Applications futures possibles
- 2 – Alpha IMS, Retina Implant AG
 - A – Présentation
 - B – Composants
 - C – Fonctionnement
 - D – Avantages / Inconvénients

IV – Evolutions et solutions

- A – Dispositifs médicaux
- B – Traitements naturels

I – Œil

1 – La structure de l'œil

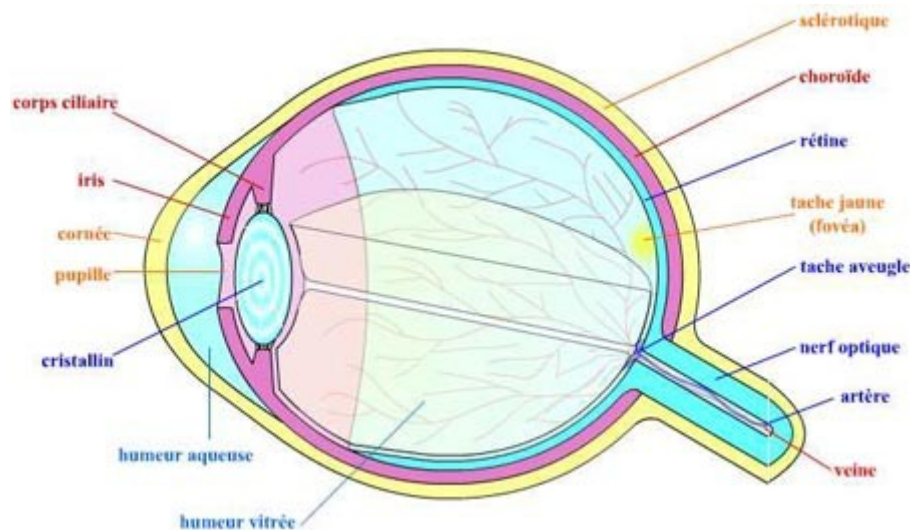


Schéma de la structure de l'oeil

De façon générale, l'œil est composé de milieux transparents et d'une membrane.

De gauche à droite :

- La cornée, située à l'avant de l'œil, est une membrane transparente de plusieurs couches de cellules.
- L'iris joue le rôle de diaphragme en régulant le niveau de luminosité entrant dans l'œil en faisant varier le diamètre de la pupille.
- Le cristallin est situé derrière l'iris entre l'humeur aqueuse et l'humeur vitrée (2 liquides transparents constitués essentiellement d'eau). Il s'apparente à une lentille convergente convexe élastique.

La transparence du cristallin est permise par l'absence de vaisseaux sanguins (vascularisation), la présence de protéines solubilisées dans le cytoplasme des cellules du cristallin (cristallines) mais également par l'absence d'espace entre les cellules qui le constituent.

Il est accommodable grâce aux ligaments suspenseurs, aux muscles ciliaires et aux procès ciliaires, permettant de faire diverger et converger les rayons lumineux sur la rétine afin de donner une image nette et précise.

L'œil est enveloppé par trois couches qui le recouvrent à partir des extrémités de la cornée (sauf le nerf optique). Ces trois couches sont la sclérotique, la choroïde et enfin la rétine.

La rétine est le siège principal de la vision. C'est elle qui tapisse le fond du globe oculaire avec 3 couches cellulaires.

- Les photorécepteurs, récepteurs sensoriels de la vision : les cônes et les bâtonnets.
 - Les cônes (~5 millions) sont regroupés au niveau de la fovéa. Ils sont sensibles à une couleur primaire. Il en existe donc 3 types : ceux sensibles au rouge, ceux au vert et ceux bleu.
 - Les bâtonnets (~120 millions) sont très sensibles à l'intensité lumineuse mais peu à la couleur. Ils se situent en grande quantité à la périphérie de la rétine.
- Les cellules bipolaires regroupent les informations d'un ou plusieurs photorécepteurs et en créent un influx nerveux.
- Les cellules ganglionnaires composent le nerf optique. Il en existe différents types.
 - Celles de grandes tailles détectent les changements de contraste donc aussi les mouvements.
 - Celles de petites tailles soit analysent la forme et le détail, soit mesurent un contraste chromatique.
- Il existe aussi un point aveugle, appelé papille, dénué de photorécepteurs au niveau du nerf optique.

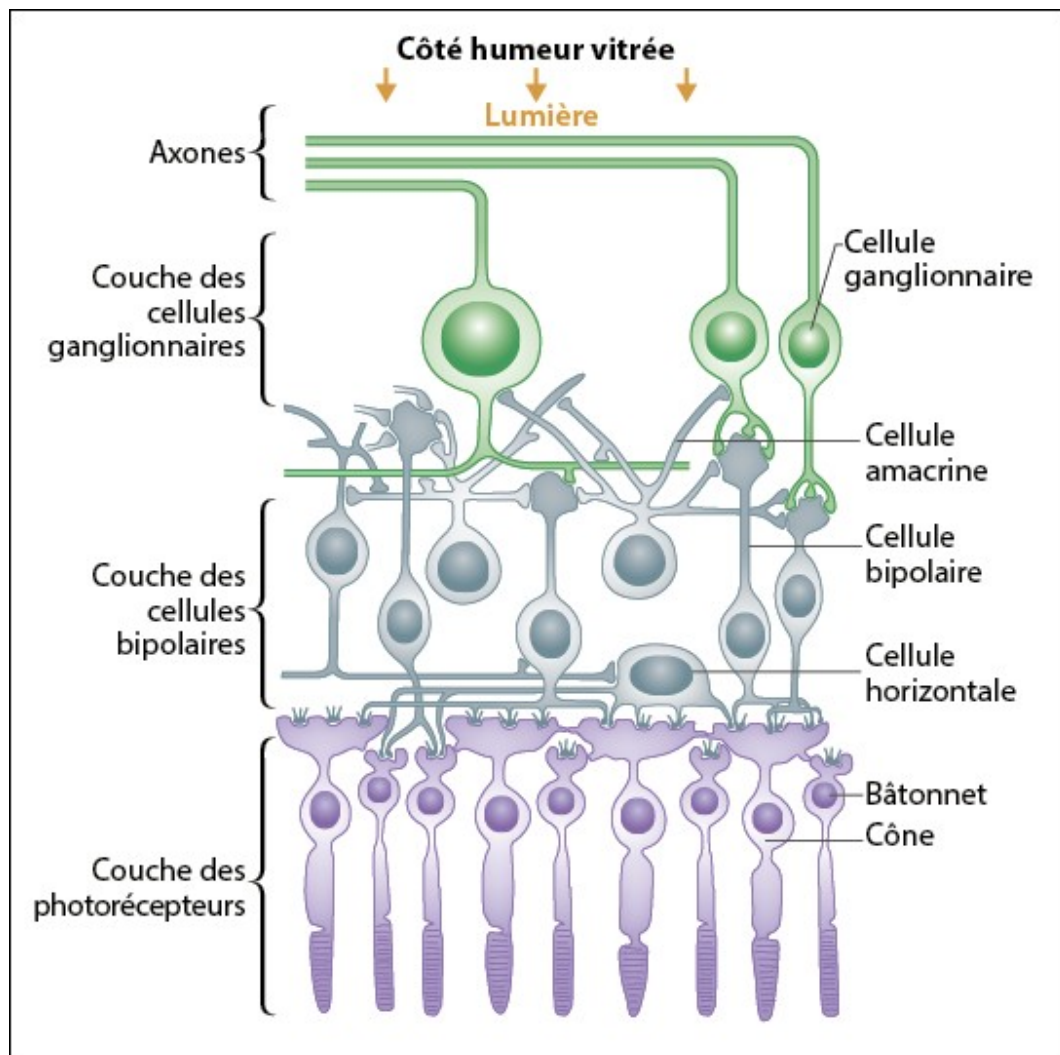


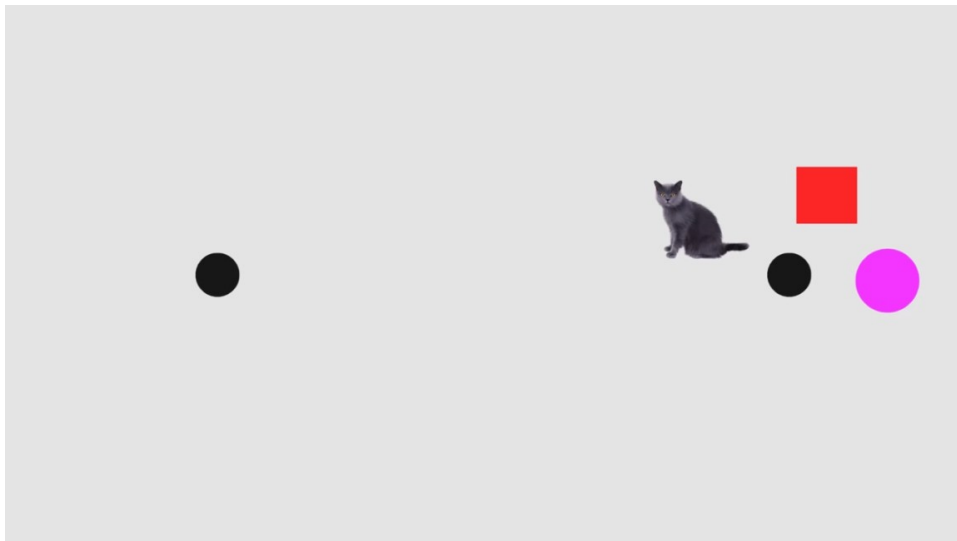
Schéma des différentes couches cellulaires de la rétine

Fermez votre œil gauche et fixez bien le rond de gauche, et uniquement le rond de gauche, approchez-vous à environ 30 cm de l'image, vous ne verrez plus le rond droit. Si vous le voyez toujours, rapprochez-vous ou éloignez-vous de l'image, il y aura un endroit précis où vous ne le verrez plus.

De même, avec l'œil droit et le point de gauche.

Ce qui est étonnant c'est que si l'on rajoute un chat noir, un carré rouge ou un rond rose.

Nous pouvons très bien les apercevoir. Pourtant le point noir reste invisible.



2 – Le cheminement de l'image jusqu'au cerveau

Le cristallin permet de diriger les rayons lumineux vers les photorécepteurs en agissant comme une lentille convergente. Son rôle est essentiel car c'est grâce lui que nous voyons ce qui nous entoure nettement.

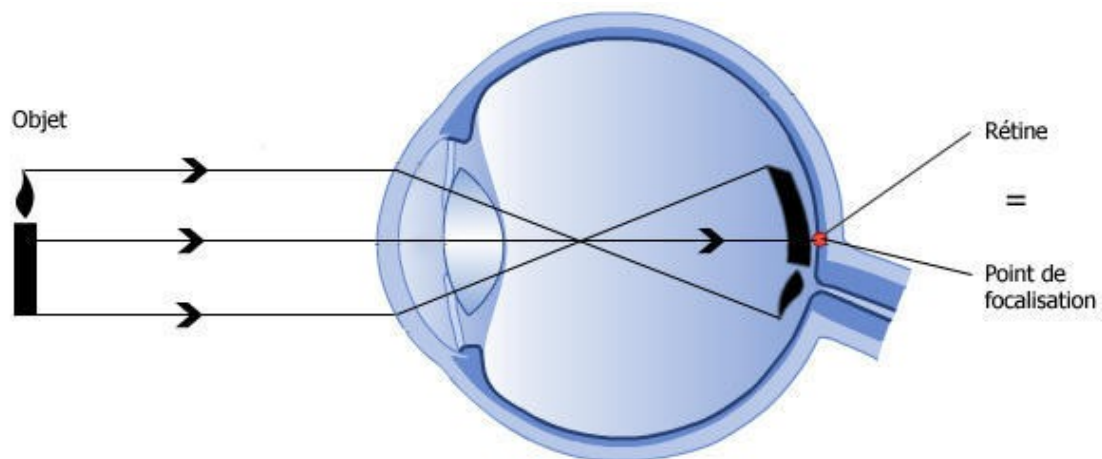


Schéma de la formation d'une image sur la rétine

Les photorécepteurs, seules cellules pouvant convertir la lumière en influx nerveux de la rétine, réagissent aux rayons de lumière qu'ils reçoivent.

L'influx nerveux produit est transmis aux cellules bipolaires, puis aux neurones ganglionnaires. Les neurones bipolaires regroupent l'information de plusieurs

photorécepteurs, sauf au niveau de la fovéa où elles ne sont reliés qu'à un seul photorécepteur.

Ces cellules possèdent des prolongements cytoplasmiques qui les relient entre elles. Ceux sont uniquement les axones de ces neurones ganglionnaires qui vont sortir de l'œil pour former les nerfs optiques et rejoindre le premier relais visuel dans le cerveau.

Les nerfs optiques quittent donc les deux yeux et se réunissent pour former le chiasma optique. Celui-ci permet la décussation d'un certain nombre d'axones en provenance de la rétine, c'est-à-dire leur changement de côté pour assurer le traitement croisé de l'information visuelle.

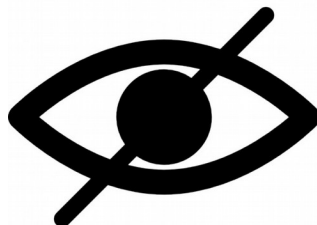
Du chiasma partent les bandelettes optiques qui contiennent des fibres qui rejoignent les corps genouillés latéraux externes.

Desquels, des radiations optiques gagnent le cortex visuel (partie du cerveau traitant les informations visuelles) situés sur la surface interne du lobe occipital. Ainsi des données électriques arrivent au cerveau qui les traite et les interprète en images.

3- Les principales causes de la cécité

La cécité désigne le fait d'être dépourvu d'une acuité visuelle suffisante pour distinguer autre chose que des ombres. Les personnes souffrant de cécité peuvent être privées du sens de la vue partiellement (cécité partielle) ou totalement (cécité totale).

La cécité peut être due à une destruction des zones visuelles du cerveau ou d'une partie de l'œil. Certaines pathologies peuvent aussi en être la cause, comme le diabète, la sclérose en plaque ou la rubéole par exemple. Cependant la cataracte ou la trachome peuvent être traitées par opération chirurgicale.

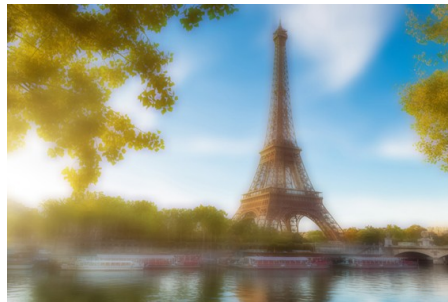


La cataracte

Celle-ci est la première cause de cécité dans le monde, à l'origine de 40 % des cas. La cataracte est un trouble de la vision qui survient lorsque le cristallin perd de sa transparence.

Lorsque le cristallin s'opacifie, les rayons lumineux parviennent moins bien à la rétine, ce qui explique que la vision s'embrouille.

Le traitement est chirurgical (extraction du cristallin et implantation d'une lentille intraoculaire), il est courant dans les pays développés avec plus d'un million d'interventions réalisées chaque année aux États-Unis.



Vue des personnes souffrant de cataracte

Le glaucome

Le glaucome est une maladie oculaire qui touche surtout les personnes de plus de 45 ans. Il est dû à une montée de la pression oculaire entraînant une atteinte du nerf optique et du champ visuel. Cette augmentation de la pression est le résultat d'une obstruction du filtre d'évacuation du liquide intraoculaire (ou humeur aqueuse).

L'augmentation de la pression oculaire conduit à une destruction progressive des fibres nerveuses de la tête du nerf optique. Les personnes souffrant de glaucome subissent un rétrécissement du champ de vision (~ vision tubulaire).

Le traitement est à la fois médical et chirurgical. La prévention du glaucome repose sur un dépistage systématique, rendu difficile car les premiers signes passent généralement inaperçus. Le glaucome est la troisième cause de cécité mondiale.



La DMLA

La dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est la première cause de cécité dans les pays industrialisés.

C'est une maladie dégénérative de la rétine qui débute après l'âge de 50 ans.

Elle touche sélectivement la région maculaire, c'est à dire la zone centrale de la rétine, entraînant une perte progressive de la vision centrale. Elle laisse habituellement intacte la vision périphérique ou latérale.

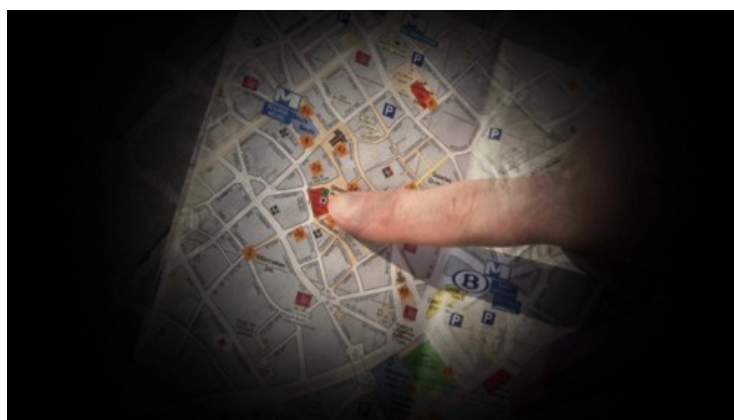
Sa fréquence s'accroît avec l'âge, et elle atteint 25 % des personnes à partir de 80 ans.



Vision d'une personne souffrant de DMLA

La rétinite pigmentaire

Dégénérescence progressive, d'origine génétique, des bâtonnets (vision nocturne, détection des mouvements) puis des cônes (vision centrale et de jour), qui vont donc cesser de transformer la lumière en influx nerveux. Une partie de ces photorécepteurs rétiniens reste longtemps fonctionnelle (même en cas de cécité).



Vue d'une personne souffrant de rétinite pigmentaire

II – Œil bionique

1 – Définition

L'œil bionique est une prothèse servant à remplacer un organe visuel déficient. Il n'existe que 3 principes d'œil bionique. La recherche d'implant visuel appartient au domaine de la biomimétique, à la recherche sur les hybrides vivants-artificiels.

La bionique est une science visant à créer ou améliorer des technologies en s'inspirant de processus biologiques présents chez certains êtres vivants. Ce terme vient de la contraction de biologie et technique. La bionique comprend autant l'imitation du vivant que l'intégration d'artificiel dans du vivant.



L'aérodynamisme de ce TGV est inspiré du martin-pêcheur

2 – Histoire

Depuis quelques années, le développement des NBIC (Nanotechnologies, Biotechnologies, Informatique et science Cognitive) permet de faire des avancées de plus en plus importantes, particulièrement avec les implants bioniques et les neuroprothèses.

En 2010, deux douzaines d'équipes travaillent sur des projets d'œil bionique, aux États-Unis, en Europe, au Japon, mais aussi en Corée du Sud, en Chine, et même en Australie. Les progrès les plus spectaculaires ont été accomplis par l'Artificial Retina Project (cf. Système Argus 2). Actuellement, le marché de l'œil bionique offre principalement 2 possibilités : le système Argus 2 de Second Sight et l'implant Alpha IMS.



Le premier prototype de la société Second Sight, Argus I, greffé entre 2002 et 2004, comportait seize électrodes, et les six patients qui l'ont testé ont donc vu et voient toujours pour cinq d'entre eux, le monde à travers seize pixels. En 2007, un deuxième prototype a vu le jour comportant soixante électrodes, soit soixante pixels, en noir et blanc. Un œil sain, lui, comporte des millions de photorécepteurs, on est encore très loin du compte mais pour les aveugles, cela représente une vie plus facile. En 2008, 31 patients aveugles provenant de 5 pays différents ont pu bénéficier du second prototype de Second Sight dans le cadre d'un essai clinique.

Un retraité britannique âgé de 80 ans est devenu le premier homme à bénéficier de l'implantation réussie d'un « œil bionique » posé à même la rétine. Cette greffe devrait redonner de l'espoir à toutes les personnes atteintes d'une dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA).

Ray Flinn, un Anglais atteint de DMLA a retrouvé la perception au niveau de sa vision centrale perdue depuis de nombreuses années. Il peut désormais voir les contours des personnes et des objets. Cette nette amélioration de sa vue est un vrai exploit, qui a été rendu possible par la greffe d'un système bionique appelée Argus II. L'opération qui a duré 4 heures a eu lieu à Manchester, au Royal Eye Hospital.

Grâce à cette greffe, Ray Flinn a pu retrouver une vie presque normale. Il peut notamment faire du jardinage, une activité qu'il affectionne tout particulièrement. Quatre autres patients attendent eux aussi de recevoir un œil bionique. Ils seront suivis pendant 3 ans afin de déterminer si l'œil bionique peut devenir un traitement reconnu et avéré de la DMLA.



Ray Flinn disposant du système Argus 2

3 – Types

Les implants rétinaux

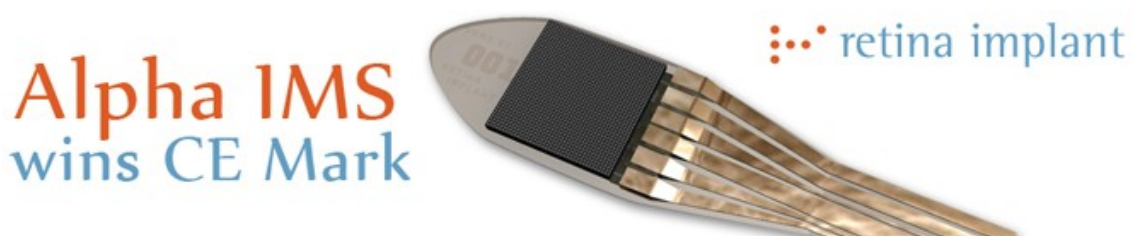
Les implants rétinaux sont directement implantés sur la rétine (épi-rétinien) ou derrière celle-ci (sub-rétinien). La rétine artificielle peut, actuellement, être composée de 1 500 électrodes au maximum dans le cas de l'Alpha IMS. Les électrodes provoquent une stimulation des neurones aux alentours. Les implants rétinaux nécessitent donc que le nerf optique soit toujours opérationnel afin que l'information soit transmise correctement au cerveau.

Pour implanter le dispositif derrière la rétine (l'implant subrétinal), il existe 2 méthodes :

- Tout d'abord l'implant interne consiste à ouvrir le globe oculaire pour qu'on puisse introduire les instruments chirurgicaux en enlevant le corps vitré.
- Ensuite l'implant externe qui permet d'accéder à cet espace subrétinal sans endommager les structures internes de l'œil. Pour cela, on fait entrer une tige flexible directement dans cet espace sans diviser et donc sans enlever le corps vitré.

L'implant épi-rétinien interagit directement avec le nerf optique. Le patient doit donc réapprendre à voir. De plus, cet implant nécessite un traitement externe. Un exemple d'implant épi-rétinien est le système Argus 2.

L'implant sub-rétinien remplace les photorécepteurs au sens propre. Une photodiode transforme des radiations du domaine visible en électricité qui est transmise via une électrode aux neurones bipolaires, exactement comme les photorécepteurs. Le patient n'a donc pas besoin de réapprendre à voir, il doit juste s'adapter à sa nouvelle vision. Un exemple d'implant sub-rétinien est l'implant Alpha IMS.

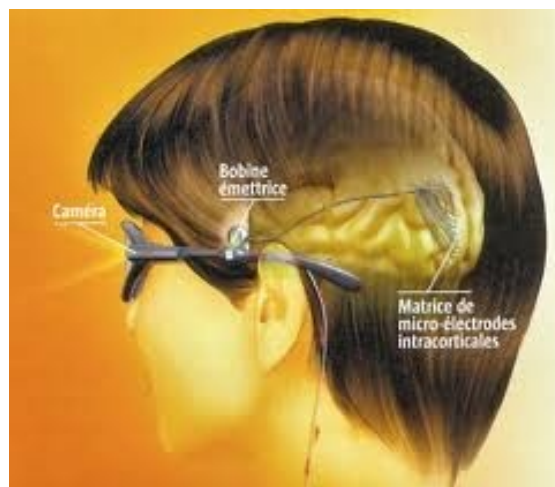


L'implant cortical

L'implant cortical est le dernier type d'implant bionique. Dans ce cas de figure, le nerf optique ne fonctionne plus. Il est donc impossible de placer des électrodes sur la rétine, car les informations ne pourraient être convoyés via le nerf optique jusqu'au cerveau.

On contourne donc le problème en transmettant les images directement au cerveau par le biais d'un câble branché au cortex visuel. Cela oblige donc à ouvrir la boîte crânienne pour introduire les électrodes sur le cerveau, qui est extrêmement sensible.

L'opération est donc risquée. Mais outre la difficulté de l'opération, le principal inconvénient de cette technique est que le cerveau rejette le dispositif, car il l'identifie comme un corps étranger au bout de 3 mois. Cette durée ne vaut pas la peine de proposer dès maintenant le dispositif au grand public. Les chercheurs tentent de l'améliorer en reproduisant l'expérience avec des matériaux que l'organisme peut plus facilement supporter, comme le diamant.



Implant cortical

III – Exemple d’implants oculaires bioniques

1 - Argus 2

A - Présentation

Le système de prothèse Argus 2, développée par la société américaine Second Sight, est un implant épirétinien (placé sur la rétine par opposition aux implants subrétinien).

Cette prothèse est la première à avoir reçu l'homologation de la FDA (États-Unis) et de l'Espace Économique Européen (marquage CE). En effet, ce dispositif permet de restaurer une vision fonctionnelle chez les personnes souffrant de certaines maladies de dégénérescence de la rétine, comme la rétinite pigmentaire par exemple. Ce système est même remboursable aux États-Unis par Medicare (assurance-santé des personnes de plus de 65 ans) et aussi en France, grâce au "forfait innovation". Cette prothèse est disponible en France dans 3 centres médicaux : Paris, Strasbourg et Bordeaux.

Cet implant est l'implant rétinienn le plus évolué actuellement. En effet, il a subi de nombreux tests cliniques, ce qui lui permet d'avoir une expérience importante vis-à-vis du développement de prothèse rétinienne.

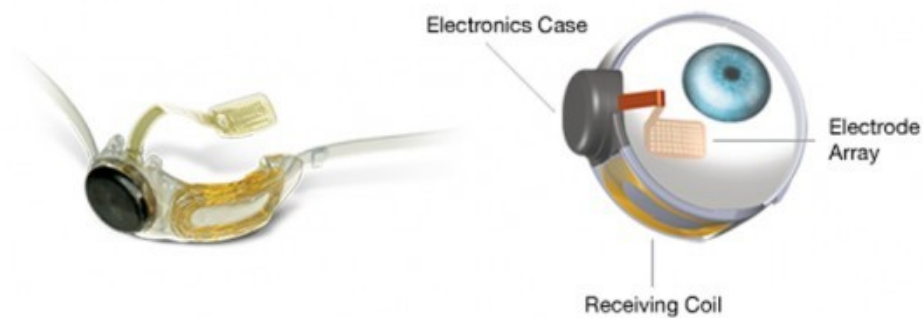


Logo de la société américaine Second Sight

B - Composants

Le système Argus 2 est composé de plusieurs composants qui peuvent être classés en 2 types.

Tout d'abord, il y a l'implant à proprement parler. Il est composé d'une antenne, d'un boîtier électronique et d'un faisceau de 60 électrodes. Il s'agit d'un implant épirétinien, le faisceau d'électrodes est donc placé devant la rétine par voie chirurgicale au niveau de la macula (zone la plus sensible de la rétine). Tandis que le boîtier et l'antenne sont placés autour de l'œil.



Composants internes du système Argus 2 et leur positionnement sur l'oeil

Le boîtier électronique permet de transformer les informations qu'il reçoit par le biais de l'antenne en intensités électriques transmises alors aux électrodes.

Le faisceau d'électrodes sert de liaison entre le nerf optique, donc le cerveau en bout de course, et la caméra. Les électrodes remplacent les photorécepteurs et les cellules bipolaires dans le rôle de transmettre une information électrique au nerf optique. Ceux-ci stimulent directement les cellules ganglionnaires de la rétine sans passer par les cellules bipolaires. Le patient va donc recevoir des informations qu'il n'avait jamais reçu encore. Il faudra donc qu'il réapprenne à voir.

Ensuite il y a l'équipement externe qui comprend une paire de lunettes et une unité de traitement vidéo (VPU). Une antenne et une caméra digitale miniature sont également disposées sur les lunettes.



Composants externes du système Argus 2

La paire de lunettes n'a pas qu'un but esthétique, elle sert de support à la caméra digitale et à l'antenne. En effet, l'antenne a besoin d'être située près de l'antenne réceptrice, afin d'éviter au maximum les interférences. De plus, cela permet de placer la caméra au niveau des yeux afin d'obtenir le même champ de vision que des yeux sains.

Etant donné que le VPU est un dispositif externe, il peut facilement disposer des dernières versions du logiciel qui peuvent comprendre des corrections de bugs ou de nouvelles innovations. De plus, celui-ci est paramétrable par l'utilisateur. En effet, le patient peut configurer l'amplificateur de contraste et de contour, afin de configurer ce qu'il perçoit.

La paire de lunettes et le VPU sont reliés par un câble.

C - Fonctionnement

Les cônes et les bâtonnets se chargent de mesurer l'intensité lumineuse ou d'une couleur, puis de l'interpréter, avant de la transmettre aux cellules bipolaires sous forme de message nerveux (donc électrique). Cependant ces 3 rôles sont répartis chez les différents composants du système de l'Argus 2. En effet, la caméra se charge de récupérer des informations de l'environnement. Puis le vidéo processeur s'occupe d'interpréter les informations récupérées par la caméra. Enfin les électrodes se chargent de transmettre le message nerveux sous forme de signal électrique.

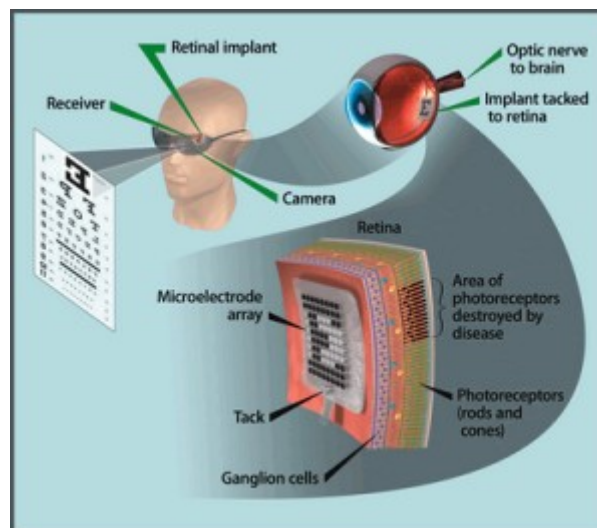


Schéma du fonctionnement des système similaires à l'Argus 2

La caméra digitale permet d'obtenir des images sous forme de matrices ou tableaux de pixels à l'aide de l'unité de traitement vidéo. Cette image est alors modifiée par des traitements informatiques (amélioration des contrastes, lissage, mise en niveau de gris) effectués par le

processeur vidéo. Puis cette image est réduite à une image de 10 x 6 (nombre d'électrodes). Elle est ensuite transmise par ondes radios au boîtier présent dans l'implant. Celui-ci se charge de transformer cet ensemble de pixels en différentes intensités électriques qui seront alors transmises aux électrodes correspondants. Les électrodes stimulent ensuite électriquement les cellules ganglionnaires qui s'occupent de transmettre le message au cerveau par le biais du nerf optique en bypassant les cellules bipolaires. Le patient perçoit alors des phosphènes (sensation de voir une lumière). C'est cet ensemble de phosphènes qui lui permet de distinguer des formes, etc. Cependant il faut qu'il apprenne à interpréter ces phosphènes.

Ceci est une hypothèse de comment le système Argus 2 fonctionne. Celui-ci n'étant pas open-source, il est difficile de savoir ce qu'il se passe précisément entre le moment où la caméra filme des images et le moment où les électrodes transmettent de l'électricité aux neurones.

D – Expérience

Dans le système Argus 2 et les autres systèmes similaires, les informations récupérées par la caméra ne sont pas les mêmes que celles transmises par le biais des électrodes. En effet, celles-ci subissent un traitement lors du passage dans le vidéo processeur. Traitement que nous allons essayer d'analyser.

Que se passe-t-il dans le vidéo processeur (VPU) ?

Image issue de la caméra



Unité de traitement vidéo
(VPU)
Quels traitements ?



Image perçue par le patient



Tout d'abord, voyons quel type d'information transmettent la caméra et les électrodes.

Une caméra permet de récupérer un flux d'images en couleurs. Une image est elle-même composée de plusieurs milliers de pixels. Un pixel est composé, lui, de 3 valeurs : une intensité de rouge, une de bleu et une de vert.

Une caméra permet donc de récupérer un tableau de pixels ou 3 tableaux contenant chacun les différentes intensités propres à une couleur. Les tableaux se traduisent mathématiquement par des matrices.

Maintenant les électrodes permettent de transmettre un signal électrique au nerf optique via les neurones de la rétine.

Les neurones permettent de transporter des messages nerveux. Ces messages nerveux ne sont rien d'autre qu'une suite d'impulsions électriques, ce sont les fréquences de ses impulsions qui déterminent l'information transmise. Les électrodes doivent donc transmettre des impulsions électriques, afin de produire un message nerveux interprétable par le cerveau.

Mais comment passer de 3 matrices (une pour chaque couleur) à une fréquence ?

Tout d'abord, il va falloir réduire le nombre d'informations transmises. En effet, une électrode stimule plusieurs neurones mais il est impossible de savoir lesquels précisément. Il sera donc difficile de transmettre des informations concernant la quantité de bleu, de rouge et de vert. On peut donc déjà transposer notre image couleur en une image noir et blanc (nuances de gris).

Pour se faire, il suffit simplement de faire la moyenne de la quantité de bleu, noir et rouge pour chaque pixel.

Nous ne disposons plus que d'une seule matrice.

Le système Argus 2 dispose d'un faisceau de 60 électrodes qui peut donc être associé à une matrice de 10 par 6 ($10 \times 6 = 60$).

Il faut donc pixeliser notre image en noir et blanc à une image de 10×6 .

Pour ce faire, nous allons "couper" notre matrice en 60 zones égales et faire la moyenne des valeurs présentes dans ces zones.

Cependant pixeliser une si grande image à une image aussi petite n'est pas ce qu'il y a de plus précis. Il faudrait peut-être réduire la partie à transposer. Afin de découper une matrice, il suffit de garder seulement les valeurs de la zone désirée. Il suffit ensuite de pixeliser l'image réduite.

Nous disposons maintenant d'une matrice de 10×6 .

Cependant il reste encore 2 étapes. En effet une rétine saine perçoit une image renversée, comme quand on regarde dans une cuillère. Il suffit donc de retourner notre matrice afin que

le patient ne perçoive pas le monde à l'envers. Le pixel en haut à gauche vient à la place de celui en bas à droite et vice versa.

Ensuite la dernière étape consiste à transformer notre matrice qui représente une image en noir et blanc en fréquences.

Un pixel est en général composé de 3 entiers (un pour chaque couleur) codés sur 8 bits. Ces entiers sont donc compris entre 0 et 255 (2^8 possibilités = 256). Dans le cas d'une image en échelle de gris, ces 3 entiers sont égaux, il suffit donc d'en choisir un.

Notre matrice de $10 * 6$ est composée de 60 nombres entiers compris entre 0 et 255. Il suffit donc d'utiliser un tableau de proportionnalité pour passer de ce nombre entier à une fréquence.

Dans la représentation des images en noir et blanc, une valeur de 0 correspond au noir et 255 à du blanc, par extension 0 correspond à fréquence faible et 255 à une fréquence élevée.

J'ai décidé de réaliser un programme en C++ reproduisant ces différentes étapes afin de voir ce que le patient devrait "percevoir". Pour ce faire, j'ai utilisé la bibliothèque OpenCV. Ce programme de simulation permet d'effectuer ces différents traitements sur le flux d'une webcam et de l'afficher. De plus, on peut modifier le nombre d'électrodes en largeur (10 par défaut) et en hauteur (6 par défaut), donc par extension la définition de l'image que percevra le patient. On peut également réaliser ces mêmes traitements pour un fichier image présent sur le disque dur.

Le code source est disponible sur Github à cette adresse :

<https://github.com/LoicMura/bionic-eye-simulator>

Récapitulatif des étapes (images et codes correspondant) :**1 - Récupérer une image**

```
webcam.read(frame);
```

2 - La mettre en noir et blanc

```
void convertImageToGrayScale(Mat& img) {
    cvtColor(img, img, COLOR_BGR2GRAY);
}
```

2^{bis} - Effectuer des traitements supplémentaires (changement de contraste, amélioration des contours)**3 - Réduire l'image**

```
reduceImage(frame, angle, (double)electrodes_height / (double)electrodes_width);
```



```
void reduceImage(Mat& img, int angle, double scale) {
    int w(img.cols * angle / 100),
        h(w * scale),
        x((img.cols - w) / 2),
        y((img.rows - h) / 2);

    //Avoid matrix of 0 x i
    if(w == 0 || h == 0) {
        return;
    }

    if(w + x > img.cols) {
        img = Mat(img, Rect(0, y, img.cols, h));
    } else if(h + y > img.rows) {
        img = Mat(img, Rect(x, 0, w, img.rows));
    } else {
        img = Mat(img, Rect(x, y, w, h));
    }
}
```

Ici, "angle" correspond au pourcentage de la largeur à garder.

Tandis que "scale" correspond au ratio de l'image pour que l'image finale ne soit pas déformée.

4 - La pixeliser

```

void pixeliseImage(Mat& img, int electrodes_w, int electrodes_h) {
    //To avoid errors
    if(img.channels() != 1) {
        cout << "Too many channels. Channel expected 1." << endl;
        return;
    }

    if(electrodes_w == 0) {
        electrodes_w = 1;
    } else if(electrodes_w > img.cols) {
        electrodes_w = img.cols;
    }
    if(electrodes_h == 0) {
        electrodes_h = 1;
    } else if(electrodes_h > img.rows) {
        electrodes_h = img.rows;
    }

    Mat finalImg(electrodes_h, electrodes_w, CV_8UC1);
    int blockW(img.cols / electrodes_w),
        blockH(img.rows / electrodes_h);

    //Need to cut the big picture in several small pictures
    for(int x(0); x < electrodes_w; ++x) {
        for(int y(0); y < electrodes_h; ++y) {

            //Now let's do the average of gray of the target part
            Mat target(img, Rect(blockW * x, blockH * y, blockW, blockH));

            int nRows(target.rows),
                nCols(target.cols * target.channels()),
                sum(0);

            if(target.isContinuous()) {
                nCols *= nRows;
                nRows = 1;
            }

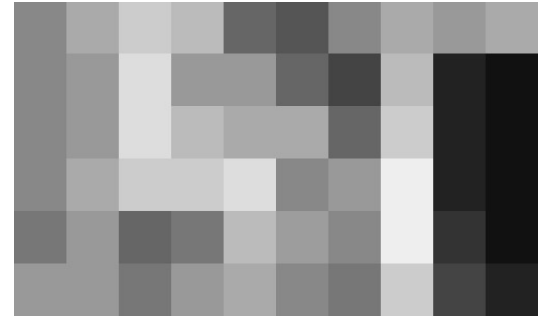
            uchar* p(nullptr);
            for(int i(0); i < nRows; ++i) {
                p = target.ptr<uchar>(i);
                for(int j(0); j < nCols; ++j) {
                    sum += p[j];
                }
            }

            uchar average(sum / (blockH * blockW));

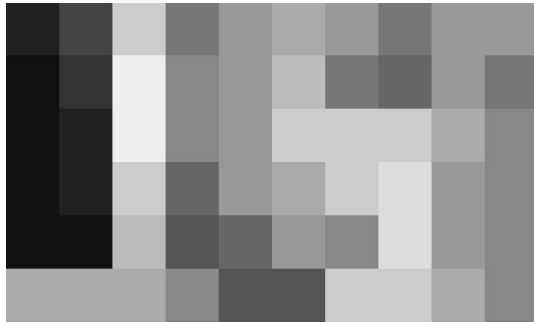
            //Put this color in the target picture !
            finalImg.ptr<uchar>(y)[x] = average;
        }
    }

    img = finalImg;
}

```



5 - Retourner la matrice



```
//Reverse the mat send in argument (like if you look in a spoon)
void reverseImage(Mat& img) {
    //Temporary matrix
    Mat finalImg(img.rows, img.cols, CV_8UC1);

    //The top-left corner pixel go the right-bottom corner
    for(int y(0); y < img.rows; ++y) {
        uchar* p = img.ptr<uchar>(y);
        for(int x(0); x < img.cols; ++x) {
            finalImg.ptr<uchar>(img.rows - y - 1)[img.cols - x - 1] = p[x];
        }
    }

    img = finalImg;
}
```

6 - Traduire cette matrice d'entier en fréquence (tableau de proportionnalité)

Toutes ces étapes sont répétées plusieurs fois par seconde, afin que le patient ait une vue fluide. On peut, ici, faire un lien avec les jeux vidéos ou les vidéos en général. En effet, la fluidité d'un jeu, d'une vidéo ou de la vue d'un patient disposant d'un système Argus 2 dépend du nombre d'images par seconde. Afin que les mouvements paraissent fluide, il faut au moins une vingtaine d'images par seconde. Cependant celui-ci dépend du temps de traitements de chaque image.

Pour en revenir au système Argus 2, le temps de traitements de chaque image est le temps que l'ordinateur met pour répéter les étapes 1 à 6. Or ce temps dépend directement du nombre d'électrodes de l'implant.

Voici l'évolution du temps de traitement en fonction du nombre d'électrodes.

(Graphique à venir..)

Conclusion sur la réalisation du logiciel de simulation

La réalisation de ce programme ne s'est pas faite sans difficulté. Tout d'abord, il a fallu compiler la bibliothèque OpenCV afin de pouvoir l'utiliser. J'ai donc découvert l'utilisation de CMake et après plusieurs tentatives, je pouvais enfin commencer à programmer. Une autre difficulté que j'ai rencontré fut la manipulation des matrices, plusieurs possibilités afin d'accéder aux éléments des matrices. Ensuite une fois tous les traitements effectués, l'image finale manquait de couleur, impossible d'obtenir du noir par exemple. C'était seulement les canaux des matrices qui variaient d'une matrice à l'autre et qui donc modifiaient les couleurs de celles-ci car elle passait d'une image en noir et blanc à une image en couleur (RGB).

BROUGUI Imran, CROMPIN Simon, MURA Loïc

TPE, 2015 -2016



4 – Pixelisée (6x10)

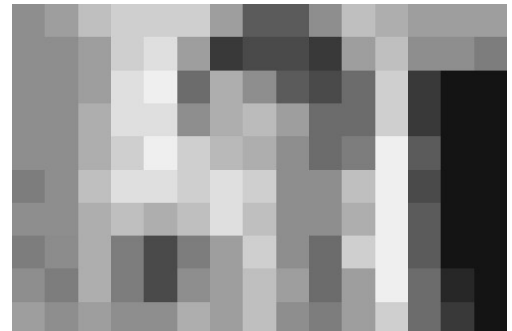
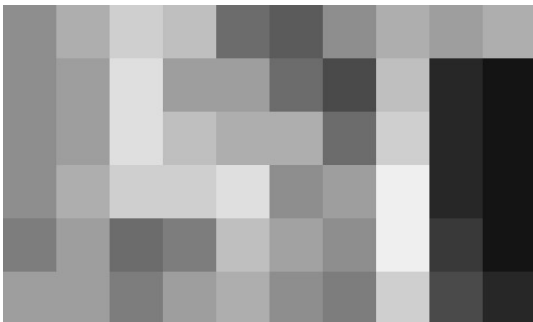
1 - Image originale (640x480)

3 – Réduite (448x268)



4 – Pixelisée (15x10)

2 – Noir et blanc (640x480)



4 – Pixelisée (50x30)

4 – Pixelisée (50x30)

4 – Pixelisée (43x25)

Conclusion de l'expérience

On peut constater qu'il est difficile de reconnaître des détails, comme un visage par exemple, avec une image de seulement 60 pixels. Cependant lorsqu'on augmente la définition de l'image, il devient tout de suite plus facile d'apercevoir ces détails. Mais lorsqu'on augmente la définition de l'image finale, le temps de traitement des images augmente énormément, ce qui peut entraîner des retards entre ce que le patient verra et la réalité. Afin de toujours traiter les images en temps réel, il y a différentes solutions : optimiser les traitements ou disposer d'un vidéo processeur plus puissant. Cependant les algorithmes ne peuvent pas être optimisés indéfiniment et une unité de traitement plus puissante consommerait plus et nécessiterait donc une batterie plus grande et donc plus lourde.



E - Inconvénients / Avantages

Afin que le cerveau perçoive les informations transmises par les électrodes, il faut que les cellules nerveuses de la rétine et le nerf optique fonctionnent toujours. Un aveugle de naissance ou une personne souffrant de la glaucome, par exemple, n'ayant donc pas de nerf optique fonctionnel ne peut donc pas disposer du système Argus 2. De plus, la qualité de la vision perçue grâce à l'implant dépend énormément de l'état des neurones de la rétine et du nerf optique.

Ensuite la "résolution" proposée par le système Argus 2 n'est que l'équivalent de 60 pixels. Ce n'est pas assez pour lire. D'après des études, il faudrait une résolution d'au moins 600 pixels pour réussir à lire. Mais une alternative à cette prothèse pourrait être le système français IRIS qui dispose de 150 électrodes, donc d'une résolution de 150 pixels. Ce système a un fonctionnement similaire à celui de Second Sight et est développée par la société Pixium Vision. De plus, ce système est explantable, contrairement à l'équivalent américain. Il peut donc être retiré sans causer de dégât à la rétine.

D'autres inconvénients du système Argus 2 sont les batteries qui durent moins de 7h ou encore le poids de l'équipement externe. De plus quand le dispositif est branché, le cerveau du patient ne dispose pas de repos car celui-ci "voit" tout le temps. En effet, le patient ne peut pas cligner des yeux.

Enfin ce système coûte très cher, plus 70 000€. Bien qu'il dispose maintenant du forfait innovation, ce qui permet de diminuer énormément son prix puisqu'il est pris en charge par

différents organismes. Il est par exemple remboursé en France et aux États-Unis par les services d'assurance-santé.

Heureusement le système Argus 2 n'a pas que des inconvénients ! Tout d'abord, il permet à des personnes devenues aveugles suite à une dégénérescence des photorécepteurs de la rétine de retrouver la vue, ce qui est un avantage incontestable. Certes cette vue n'est pas celle qu'ils possédaient avant mais elle leur permet de se déplacer seul plus facilement. Les patients opérés disposent ainsi d'un champ de vision d'environ 20°, l'équivalent d'une règle de 30cm tendue à bout de bras. Certains arrivent même à lire des mots en gros caractères blancs sur fond noir. Le système Argus 2 est actuellement l'implant épirétinien le plus évolué disponible sur le marché.

Bien sûr, cet implant n'égale pas encore l'œil humain, loin de là. Mais il permet à des personnes aveugles suite à certaines maladies de retrouver une certaine vision et donc une certaine autonomie. Des pistes de recherche sont l'amélioration de la capacité de traitement du vidéo processeur et de la durée des batteries. Une autre piste de recherche indispensable est le nombre d'électrodes afin d'améliorer la vision du patient.



Personnes s'étant faites implantées le système Argus 2

F - Applications futures possibles

Lorsque le système de la société Second Sight se sera amélioré. En plus de pouvoir disposer d'une acuité visuelle supérieure à la normale peut-être que les porteurs de ce système pourront disposer d'applications supplémentaires. En effet puisque les informations issues de la caméra sont traitées par le VPU avant d'être transmises aux électrodes. Le VPU pourrait afficher des informations supplémentaires sur l'environnement, un peu comme le principe des Google Glass. En effet,



imaginer des premiers secours capablent de repérer plus rapidement les survivants suite à une catastrophe en repérant les personnes dont le cœur bat encore, ou des chirurgiens ayant des indications sur leur opération directement dans leur champ de vision, etc. Les applications possibles sont multiples ! Une autre possibilité serait de pouvoir visualiser directement le cyberspace en proposant une autre interface qu'un écran. Mais ceci pose une question d'éthique : qui en aura accès ? a-t-on le droit de modifier l'Homme comme ceci ? Autant de questions auxquelles les transhumanistes tentent de répondre et d'ouvrir le débat.

1 - Alpha IMS

A - Présentation

La société Retina Implant AG, fondée en 2003, a commencé à poser des implants sur des patients humains dès 2005. Puis celle-ci a commencé un deuxième essai clinique en 2010 qui s'est terminé avec l'autorisation d'étendre son essai clinique à travers l'Europe.



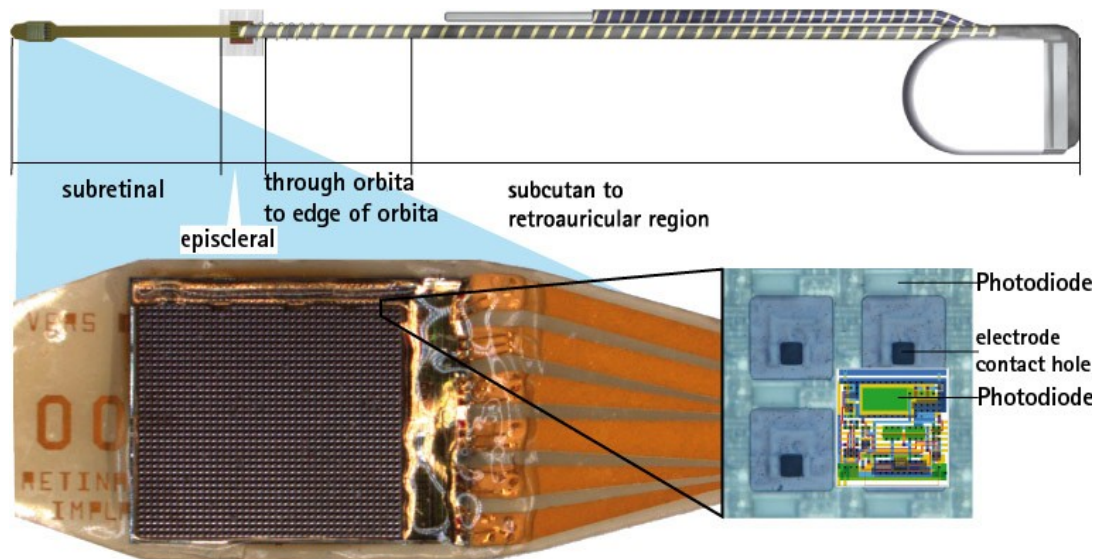
Cette société développe l'implant sous-rétinien sans fil Alpha IMS. Cet implant est le fruit de nombreuses recherches. Il utilise par ailleurs un principe différent du système Argus 2 ce qui offre des possibilités supplémentaires pour les personnes malvoyantes ou aveugles. Il est principalement destiné aux patients souffrant de rétinite pigmentaire. De plus l'implant Alpha IMS a obtenu le marquage CE en 2013. Celui-ci est remboursable dans quelques pays grâce aux partenariats conclus par l'entreprise. Il est principalement disponible en Allemagne et en Angleterre.

B - Composants

L'implant Alpha IMS est composé de 3 parties.

La partie implantée sous la rétine est composée d'un circuit imprimé en polyimide (polymère d'imide) car ce matériaux est très flexible et thermostable. Ce circuit imprimé mesure environ 3 x 3 mm. Sur celui-ci sont placées 1500 puces analogiques. Ces puces sont composées d'une photodiode, d'un amplificateur différentiel logarithmique et d'une électrode de 50 x 50 µm en iridium. Cette puce analogique possède une consommation électrique très faible : maximum 10 mW, donc $1500 * 10 = 15\,000 \text{ mW} = 15 \text{ W}$ pour l'ensemble des puces. De plus, cette puce n'émet que très peu de chaleur ($\sim 0.5 \text{ K}$), elle n'abîme donc pas la rétine. Les électrodes de cette puce ont été conçues afin d'être les plus petites possibles mais assez grandes pour être sûr d'avoir un bon contact avec les neurones

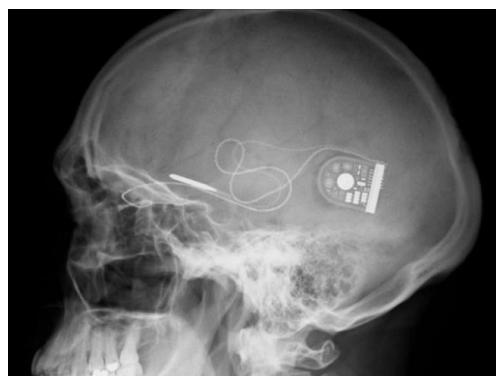
de la rétine. Elles fonctionnent de manière optimale pour une fréquence entre 5 et 7 Hz, ce qui est parfait puisqu'une fréquence plus élevée provoquerait une sur-stimulation de la rétine et la perception du patient vacillerait quelque peu. Chaque puce envoie des pulsations électriques toutes les microsecondes avec une charge électrique entre 2 et 5 nC.



Faisceau de 1500 puces de l'implant Alpha IMS

La bande de polyimide est alimentée par un câble enroulé. Ce câble passe de l'orbite à la tempe en traversant l'os, et de là jusqu'à derrière l'oreille où est situé l'alimentation de l'implant.

Cette alimentation électrique interne est située dans une housse en céramique. L'électricité lui est transmise par induction électromagnétique. Une bobine émettrice placée sur la peau est branchée à une alimentation électrique et va produire un champ magnétique qui va varier. Une bobine réceptrice branchée à l'alimentation interne va être sensible à ce champ magnétique et va en produire de l'électricité. Les bobines restent suffisamment proches grâce à 2 aimants.



Radiographie aux rayons X d'une personne disposant de l'implant Alpha IMS

Enfin tous ces éléments doivent être biocompatible afin de ne pas être rejetés après l'opération. Mais ils doivent aussi avoir une durée de vie assez longue afin de ne pas se détériorer trop vite dans le corps humain. Cela a nécessité l'utilisation de nouveaux matériaux comme le polyimide ou encore la céramique. Tous les composants doivent être présent dans une couche hermétique protectrice afin d'éviter au maximum les contacts avec les tissus. De plus, la présence d'électricité dans les composants accélèrent grandement le processus de corrosion.

C - Fonctionnement

L'implant Alpha IMS vient directement remplacé les photorécepteurs défectueux. Comme le système Argus 2, il est placé au niveau de la macula. Mais contrairement à celui-ci, l'Alpha IMS est placé sous la rétine à la place des photorécepteurs.

C'est dans les puces analogiques que s'effectuent toute la "logique", bien qu'ici aucun traitement ne soit effectué. En effet, les puces ne font que jouer le rôle des bâtonnets. En effet les photodiodes réagissent à la lumière en produisant un signal électrique proportionnel à l'intensité lumineuse captée. Puis l'amplificateur différentiel amplifie ce signal. Le signal qui ressort est proportionnel aux 2 signaux passés en entrée : la photodiode et l'alimentation. Enfin l'information est transmise par le biais des électrodes aux cellules ganglionnaires et bipolaires.

Grâce à cet implant, le patient peut tourner son œil et cligner des yeux comme avant qu'il perde le sens de la vision.

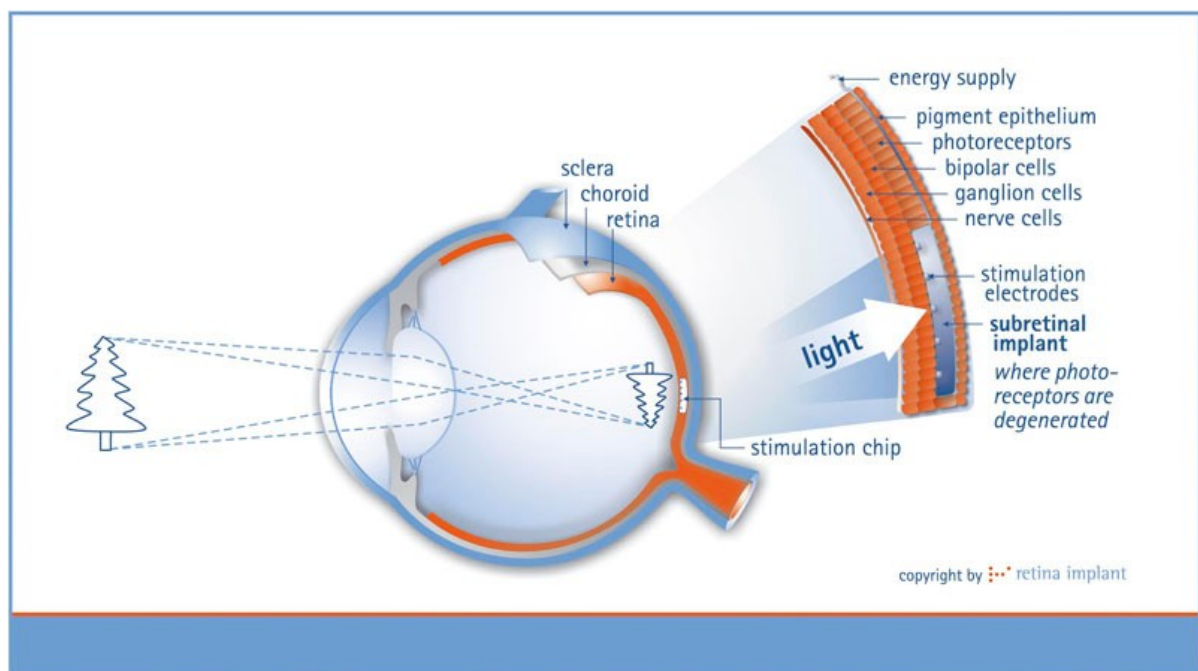


Schéma du fonctionnement de l'implant Alpha IMS

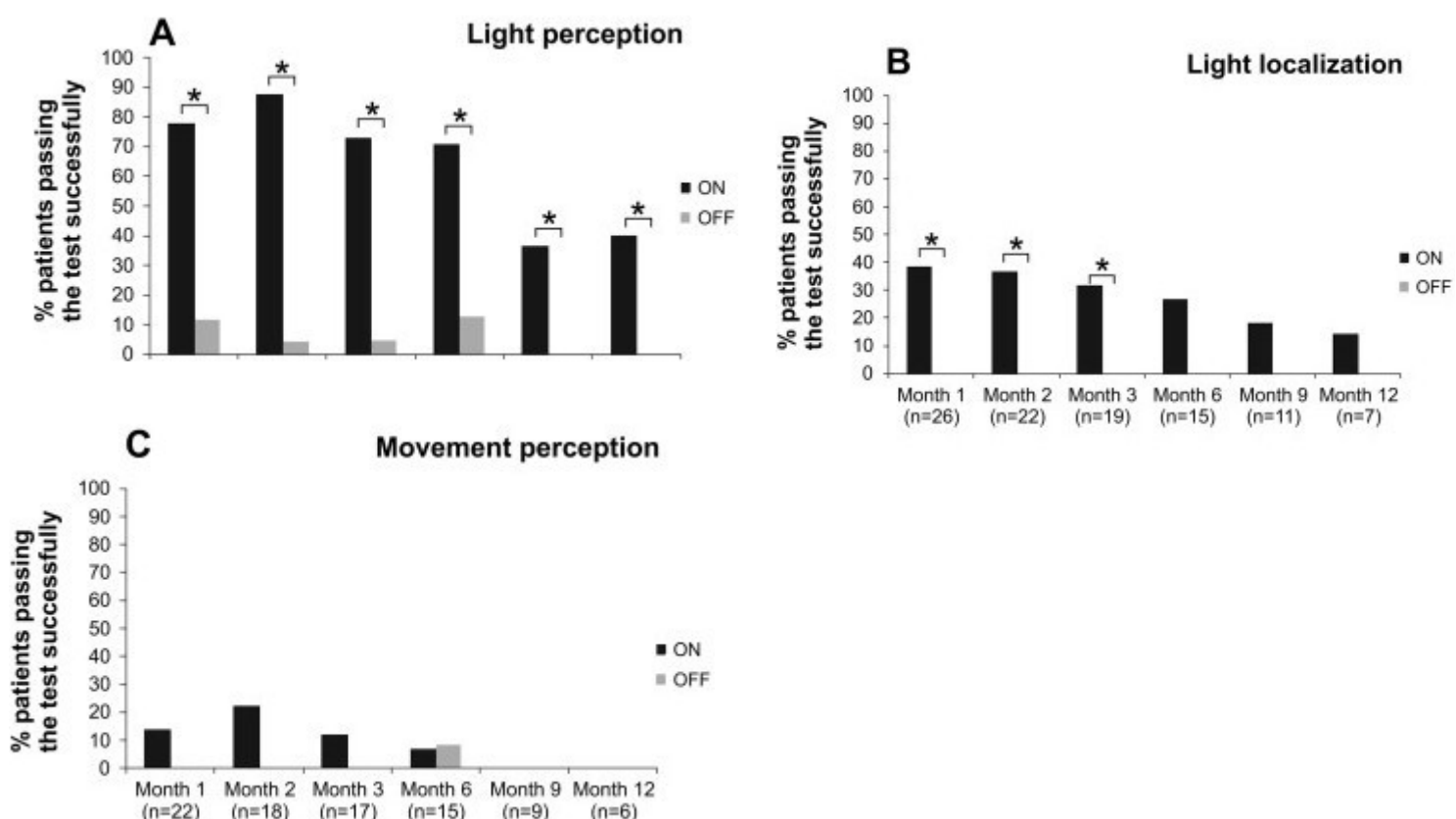
D - Avantages / Inconvénients

29 personnes aveugles suite à une rétinite pigmentaire avancée se sont fait opérés afin de recevoir l'implant Alpha IMS. Elles ont été observées durant 12 mois. Les résultats sont très positifs. Environ 21 personnes ont alors vu leur quotidien s'améliorer. En effet, ces patients peuvent maintenant se déplacer la journée plus facilement et effectuer des tâches de reconnaissance. De plus, 25 patients possèdent environ 3,3 pixels par degrés. Au test de Landolt C-rings, ils eurent 20/2000, 20/606 et 20/546. Certains patients réussirent même à avoir une légère vision lorsque l'éclairage était faible.

L'implant de la société Retina Implant AG permet donc à des personnes souffrant d'un stade avancé de rétinite pigmentaire de retrouver une vision fonctionnelle.

Cependant on remarque que les capacités des patients diminuent avec le temps. Ce sont peut-être les composants qui commencent à s'abîmer. Si les patients arrivent à percevoir la lumière, ils ont dû mal à la localiser. Malheureusement ils ont du mal à détecter les mouvements. Cet implant doit donc encore s'améliorer puisqu'il ne permet pas encore aux patients de retrouver leur vue d'antan. De plus, il ne permet pas de disposer de traitements supplémentaires. En effet, à terme, ce système ne pourra qu'égaliser l'œil. Il n'offrira pas aux porteurs de disposer des informations supplémentaires sur ce qui les entoure.

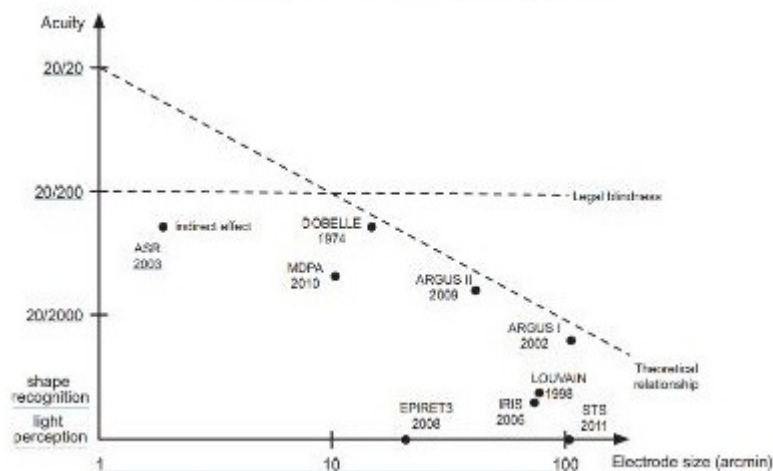
L'échelle de Landolt consiste à afficher un cercle possédant un écart. Cet écart est soit situé à gauche, droite, en haut, en bas ou décalé de 45° par rapport à ces positions. Le patient doit réussir à voir où se situe l'écart. Le cercle devient de plus en plus petit au fur et à mesure.



Graphique montrant les résultats des patients disposant de l'implant Alpha IMS à intervalle régulier depuis leur opération

IV – Evolution et solution

Des chercheurs tentent de trouver des solutions pour rendre toujours plus confortables le port de prothèses oculaires. Rendre la vue à des personnes ayant une cécité est une grande avancée technologique. Aujourd’hui, nous avons trouvé des systèmes qui fonctionnent. Seulement, ceux-ci peuvent être améliorés, par exemple en ajoutant plus d’électrodes sur la rétine pour que le patient puisse avoir une meilleure qualité visuelle et plus précise. Pour pouvoir rendre la vue à un aveugle, il est important que celui-ci ait déjà vu dans sa vie. Cette partie présente des dispositifs médicaux et des traitements naturels pour vaincre la cécité et les déficiences visuelles.



Corrélation entre la taille d'électrode et l'acuité visuelle - H. Lorach et al. (2012), Journal of Physiology

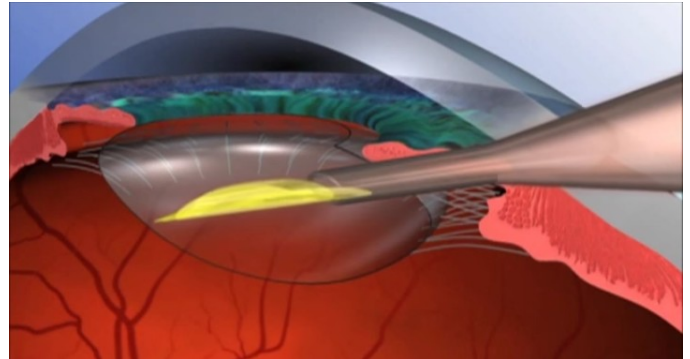
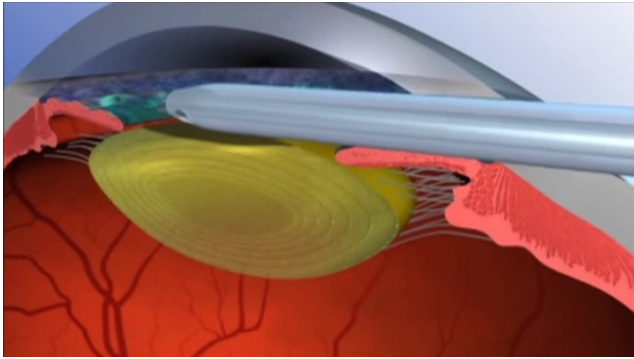
Ce schéma, nous montre les principales caractéristiques (l'acuité et la taille des électrodes) des différentes inventions de 1974 à 2011.

A- Dispositifs médicaux

1– Lentilles de contact bionique

Des prototypes sont élaborés et testé par des cobayes animaux puis humains. Des lentilles de contact ont par exemple été créées par un Canadien nommé Dareth Webb : ces lentilles sont capables de rendre la vue à un patient ou améliorer celle-ci. Cette lentille est implantée dans l'œil. Le Dr. Webb affirme que cette lentille pourra améliorer la vision de n'importe quelle personne, en triplant la portée de leur champ visuel. Dans l'exemple d'une opération de la

cataracte, le cristallin naturel est retiré par une incision de 2mm grâce à un appareil à ultrasons (gauche). Puis il est remplacé par cette lentille (droite), ce qui permettra de diminuer les chances d'apparitions de maladies visuelles.



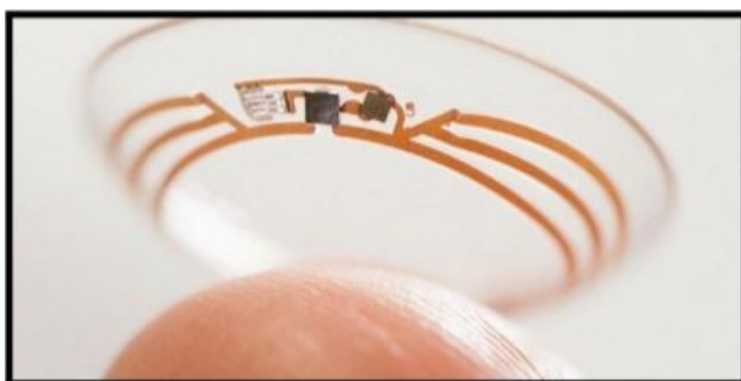
Opération de la cataracte

Les lentilles seront testées sur des animaux, et ensuite sur des aveugles. Celles-ci seront normalement disponibles en 2017 au Canada, et pourront avoir un impact sur la vente des lunettes qui pourraient ne plus être utiles dans le futur.



Lentilles de contacts bioniques

Une image captée par une caméra située sur des lunettes serait transmise par Bluetooth au système électronique de la lentille bionique, qui serait à son tour capable de transformer cet équivalent en sensation tactile réceptionnée par la cornée. La cornée de l'œil contient une densité 600 fois plus grande de récepteurs tactiles du corps humain que sur les doigts. Des personnes en bonne santé ayant testé cette lentille, étaient capable de reconnaître une maison, des formes. Cette lentille n'est pour l'instant qu'en phase expérimentale. Il faudra encore plusieurs années pour réaliser des essais cliniques et aboutir à une commercialisation de ce produit révolutionnaire.



Lentille de contact
pour diabétique de
Google

2 – Dispositifs électroniques implantables

Des chercheurs pensent qu'il est possible de miniaturiser encore plus le dispositif mis sur la rétine. C'est-à-dire de passer de 60 électrodes (Argus II) à 240 (Argus III). L'Argus III fonctionne sur le même principe que l'Argus II, seulement le nombre d'électrodes est multiplié par 4. Le principe de fonctionnement d'Argus II est décrit dans la partie précédente. Cette avancée technologique permettra au patient d'avoir une meilleure acuité visuelle. L'Argus III n'est pas prévu pour maintenant.

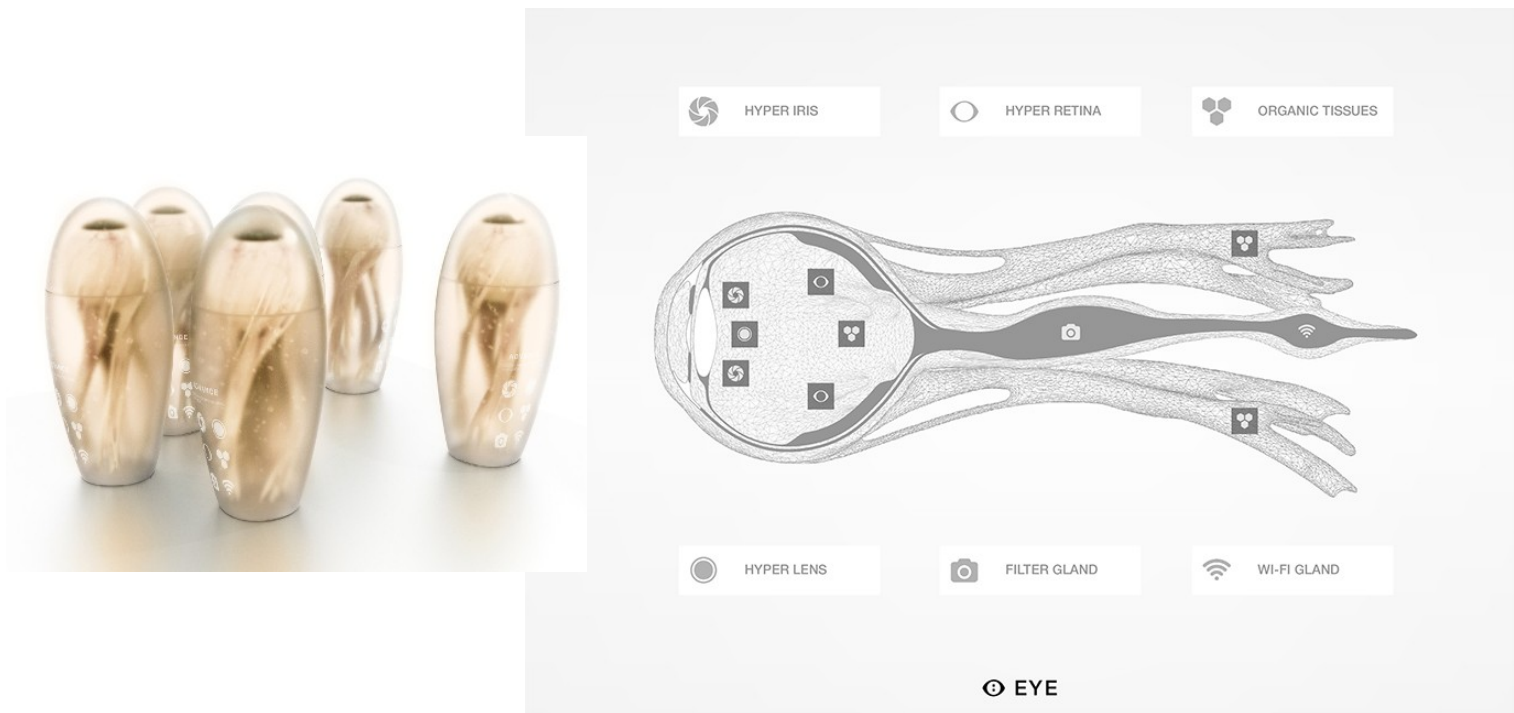


Composants internes du système Argus 2

3 – Œil bionique complet

Remplacer un œil entièrement est une hypothèse de travail qui a été formulée par de nombreux chercheurs. Un projet a été imaginé par la société MHOX qui s'appelle EYE (Enhance Your Eye). Filippo Nasseti est l'un des concepteurs du projet basé sur le concept d'un globe oculaire permettant d'augmenter l'acuité humaine (jusqu'à 15/10) et de remplacer un œil défectueux.

Cet œil bionique permettrait d'avoir une vue en noir et blanc, de zoomer, de voir la nuit et de se connecter au web via une puce wifi fixée sur le nerf optique (artificiel). Ce projet repose sur la reproduction par impression 3D des tissus organiques en prenant comme matériaux de base un ensemble de cellules vivantes, et est prévu pour 2027. Pour pouvoir utiliser cette technologie, il est nécessaire que le nerf optique ne soit pas rompu depuis longtemps, de manière à pouvoir restaurer les connexions nerveuses.



Représentation du projet EYE (Enhance Your Eye)

B - Traitements naturels

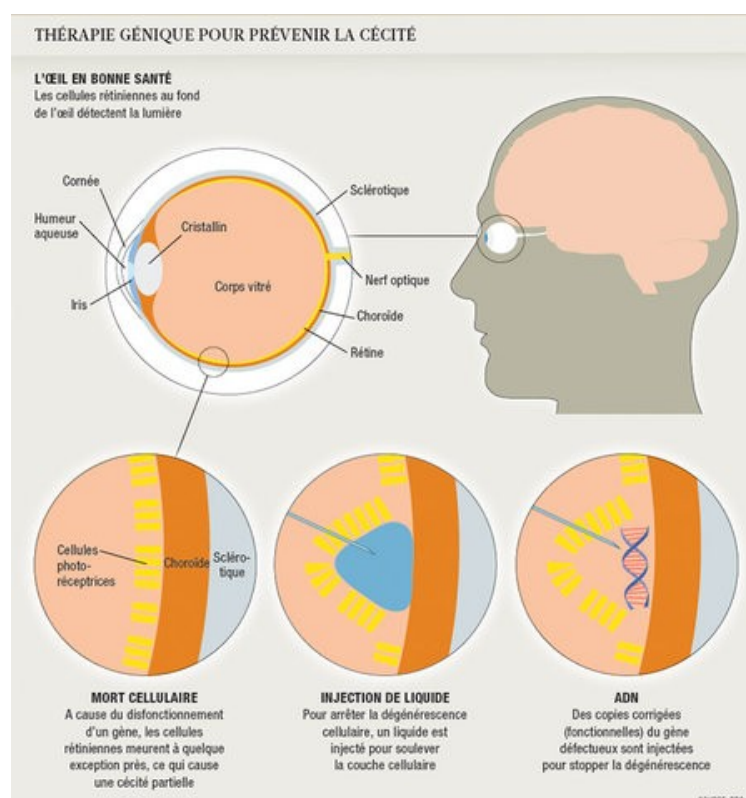
1 - Protéine Channelrhodopsin-2

Les scientifiques ont trouvé un moyen biologique de vaincre la cécité chez l'Homme. Ce remède est une protéine nommée Channelrhodopsin-2. Elle permet de faire réagir des photorécepteurs à la lumière. La protéine injectée convertirait les informations reçues à la place des photorécepteurs endommagés au niveau de la rétine en informations exploitables par le cerveau. Elle remplace en parti les photo-senseurs détériorés qui sont des bâtonnets. Les chercheurs ont testé cette protéine sur des animaux et ont constaté qu'elle modifie le comportement de l'animal en fonction de l'intensité lumineuse qui lui est diffusée. Cette protéine réagit donc à la lumière. Elle pourrait jouer le rôle de traducteur. La protéine pourrait donc redonner la vue à des personnes aveugles à cause de maladies telles que les rétinites pigmentaires. Les chercheurs se sont aussi rendus compte qu'il était possible de choisir quel type d'information la protéine allait laisser passer, une fois activée par la lumière.



B – Thérapie génique

La thérapie génique est une stratégie thérapeutique qui consiste à faire pénétrer des gènes dans les cellules ou les tissus d'un individu pour traiter une maladie. Pour pouvoir utiliser ce traitement, il faut l'utiliser au début, lorsque la maladie apparaît. Si on la découvre trop tard, il faudra utiliser la thérapie cellulaire. Des maladies liées à l'œil sont traitées, telle que la Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age principalement (DMLA). Les chercheurs ont pensé fournir aux cellules un plan correct, sans mutation, c'est-à-dire leur fournir un gène sain, afin que les cellules puissent produire la protéine qui fait défaut : c'est le principe de la thérapie génique. Si un gène est défectueux, alors la protéine qui lui correspond ne joue pas son rôle. Les cellules rétiniennes meurent à cause d'un dysfonctionnement d'un gène. Cela entraîne une cécité partielle. Pour arrêter cette dégénérescence cellulaire, on injecte un liquide pour soulever la couche cellulaire. On corrige les copies du gène défectueux puis on les injecte pour stopper la maladie. Cette thérapie génique permet donc de guérir une maladie liée à l'œil, et améliore l'acuité visuelle. Une des limites de la thérapie génique est que celle-ci ne doit pas conduire à une modification génétique des cellules germinales (spermatozoïdes, ovules).



Thérapie génique pour prévenir la cécité

Tout d'abord, il faut se rappeler que l'œil est une structure complexe et que son fonctionnement l'est tout autant. Cependant grâce au développement des NBIC (nanotechnologie, biotechnologie, informatique et science cognitive) , les techniques progressent de plus en plus rapidement afin de corriger la cécité.

A tel point qu'aujourd'hui, il existe déjà quelques solutions pour que des personnes souffrant de cécité à cause d'un problème de la rétine puissent retrouver la vue. Bien sûr, elles ne leurs permettent pas encore de retrouver leur vue d'antan, mais elles les aident à avoir plus d'autonomie dans leur quotidien.

Ces solutions sont développés, par exemple, par la société américaine Second Sight (projet Argus), ou encore la société allemande Retina Implant AG (implant Alpha IMS). Cependant d'autres projets émergent comme les systèmes IRIS et PRIMA développés par la société française Pixium Vision. Cependant des solutions moins intrusives sont aussi en cours de recherche comme des lentilles stimulant la cornée, ou des solutions définitives comme la thérapie génique.

Tous ces projets n'en sont qu'à leur début, ils leur restent beaucoup de chemin à parcourir avant de restaurer complètement la vision aux personnes aveugles. Cependant, ils ont un avenir radieux devant eux.

Malheureusement, il y aussi des limites à ces projets. Certaines sont actuelles comme le coût, l'ergonomie, etc. D'autres vont apparaître avec le temps lorsque les technologies se seront énormément développées, comme certaines questions d'éthique. En effet qui en aura accès ? Tout le monde ou seulement les plus fortunés ? A-t-on le droit de modifier, voire améliorer le corps humain comme ceci ?

Peut-être que dans un futur plus ou moins proche, nous croiserons des surhommes, des cyborgs dans la rue.

+ Lien avec transhumanisme

+Lien avec les implants sur le reste du corps