



Centre de recherche  
informatique de Montréal

550, rue Sherbrooke Ouest, bureau 100  
Montréal (Québec) H3A 1B9  
Téléphone : (514) 840-1234  
Télécopieur : (514) 840-1244  
<http://www.crim.ca>

---

CRIM - Documentation/Communications

**Algorithme de détection de la macula  
sur les images de la bande verte de la rétine  
à l'aide de la technique des ondelettes pyramidales**

Deuxième version

**CRIM-2000-07-05**

Mario Beaulieu  
Agent de recherche  
Unité Reco

**1<sup>er</sup> juillet 2000**

Collection scientifique et technique

**ISBN 2-89522-004-2**

Pour tout renseignement, communiquer avec:  
CRIM Centre de documentation  
Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM)  
550, rue Sherbrooke Ouest, bureau 100  
Montréal (Québec) H3A 1B9

Téléphone : (514) 840-1234  
Télécopieur : (514) 840-1244

Tous droits réservés © 2000 CRIM  
Bibliothèque nationale du Québec  
Bibliothèque nationale du Canada  
ISBN 2-89522-004-2

## TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>6</b>
<b>1. FORMULATION DU PROBLÈME .....</b>	<b>6</b>
<b>2. SOLUTION.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Séquence des opérations .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Initialisation .....	9
2.1.2 Application de la transformée par ondelette.....	9
2.1.3 Recherche du pixel papille (image transformée).....	10
2.1.4 Recherche du pixel macula (image transformée).....	10
2.1.5 Conversion des coordonnées (image d'origine).....	11
2.1.6 Recherche du centre de la macula (image d'origine).....	11
2.1.7 Sauvegarde.....	11
<b>3. RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>12</b>
<b>4. CONCLUSION.....</b>	<b>14</b>
<b>ANNEXE I .....</b>	<b>15</b>
<b>LES RÉSULTATS .....</b>	<b>15</b>

## LISTE DES TABLEAUX

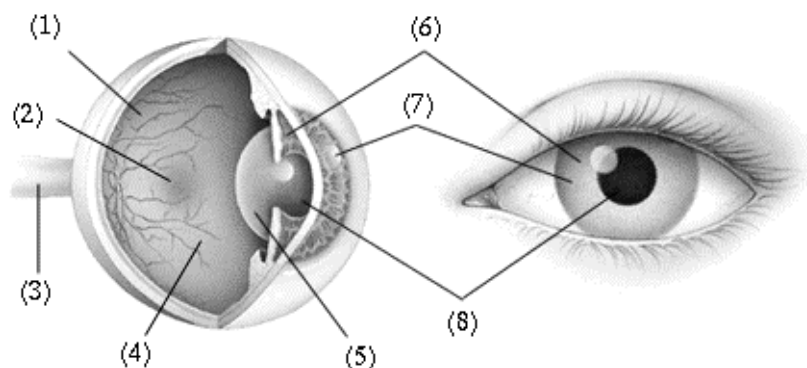
Tab. 1 – Statistiques des paramètres calculés à partir de la bande verte des images testes (voir Tab. 3 – annexe I).....	9
Tab. 2 – Différence moyenne en x et y et écart quadratique moyen entre l'interprétation visuelle et les résultats de l'algorithme. ....	13
Tab. 3 – Position de la macula $(X_{mac}, Y_{mac})$ , position de la papille $(X_{pap}, Y_{pap})$ , distance entre la papille et la macula $(D_{pm})$ , et angle entre la papille et la macula $(\Theta_{pm})$ . <u>Mesures faites par un interprète sur les images verte du projets</u> .....	16
Tab. 4 – Position de la macula $(X'_{mac}, Y'_{mac})$ , position de la papille $(X'_{pap}, Y'_{pap})$ , distance entre la papille et la macula $(D'_{pm})$ , et angle entre la papille et la macula $(\Theta'_{pm})$ . <u>Résultat de l'algorithme</u> .....	17
Tab. 5 – Statistiques des paramètres calculés à partir de la bande verte des images testes (voir Tab. 3 – annexe I).....	18
Tab. 6 – Statistiques des paramètres calculés à partir de la bande verte de images traitées par algo 1 (voir Tab. 4 – annexe I).....	18
Tab. 7 – Différence entre les valeurs mesurées sur les images testes et les images traitées par algo 1.....	18
Tab. 8 – Calcul des différences de localisation du centre de la macula entrent les mesures de référence et les résultats obtenus par <i>algo 1</i> .....	19

## LISTE DES FIGURES

Fig. 1 – Coupe tridimensionnelle de l'œil humain : (1) la rétine, (2) la macula, (3) le nerf optique, (4) le corps vitré, (5) le cristallin, (6) l'iris, (7) la cornée, (8) la pupille.....	6
Fig. 2 – Bande verte de l'image 278_1 (œil gauche sain) : (1) la papille, (2) la macula, (3) une veine.....	7
Fig. 3 – Histogramme des fréquences des valeurs digitales de la bande verte de l'image 278_1_G.pgm.....	7
Fig. 4 – Résultat obtenu par algo 1. Bande verte de l'image 278_1 : (1) centre de l'image, (2) coordonnée centrale du pixel de la transformée par ondelette de la macula, (3) coordonnée centrale du pixel de la transformée par ondelette de la papille. Le centre des deux cercles correspondent au centre de la macula et de la papille après l'étape 2.1.6.....	12
Fig. 5 – Graphe des différence de localisation en x et y entre l'interprétation visuelle et les résultats de l'algorithme.....	13

## Introduction

Le système visuel est composé d'un organe périphérique, l'œil, responsable de la formation de l'image et de la transduction sous forme de signaux transmissibles le long des nerfs optiques. La figure 1 présente, en résumé, l'anatomie de l'œil. La formation de l'image sur le fond de la cavité est faite par la première partie de l'œil, composée des tissus transparents (la cornée et le cristallin séparés par les humeurs aqueuses). La seconde partie, celle qui nous intéresse, est responsable de la conversion en signaux électriques des photons par la rétine.



**Fig. 1 – Coupe tridimensionnelle de l'œil humain : (1) la rétine, (2) la macula, (3) le nerf optique, (4) le corps vitré, (5) le cristallin, (6) l'iris, (7) la cornée, (8) la pupille**

La rétine est un tissu neuronal très fins (0.1 à 0.5 mm d'épaisseur) dont la destruction par maladie ou traumatisme seront probablement définitives, car les neurones ne sont pas des cellules qui peuvent se régénérer au cours de la vie. La partie la plus sensible de la rétine est la macula, où se fait le *focus*. Cette région est responsable de la vision centrale et de la résolution des fins détails.

L'objectif de l'algorithme *algol* développé dans le cadre du projet patrimoine *RETSOFT* est de déterminer le centre de la macula, à fin de la localiser rapidement sur les images digitalisées. Ce rapport traite de la version 1.8 de l'algorithme.

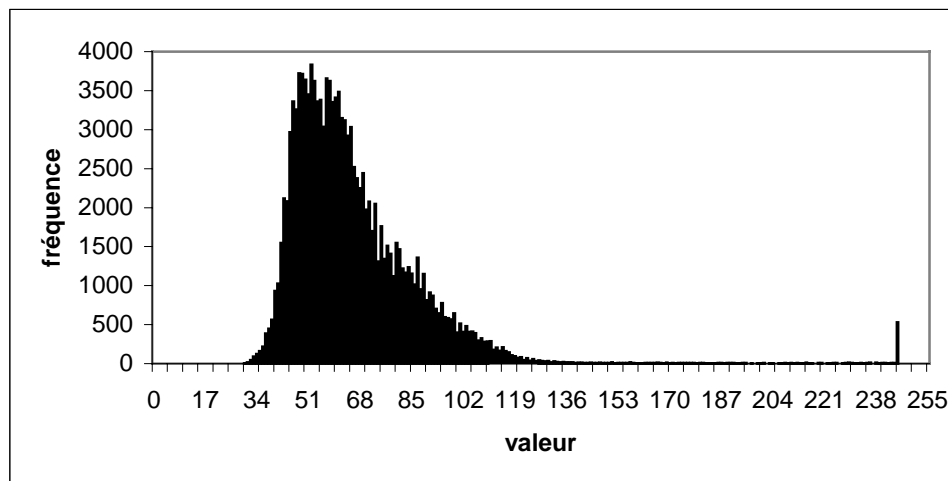
## 1. Formulation du problème

Du point de vue de la photographie ophtalmique, la macula apparaît comme une tâche sombre sans frontière apparente. Le centre de la macula est définie comme la zone la plus sombre du tissu rétinien (*c.f. Fig. 2*). On remarque aussi très facilement la papille de l'oeil (l'embouchure du nerf optique) représentée par la structure circulaire d'où sortent aussi les vaisseaux sanguins. De façon générale, la papille semble être la structure la plus claire

de l'image, tandis que la macula paraît être la structure la plus sombre avec les veines. Ce que reflète l'histogramme des tons de gris (*c.f. Fig. 3*). La partie supérieure de l'histogramme (*valeur > 120*) est occupée par les pixels de la papille, et la partie inférieure (*valeur < 50*) par les pixels de la macula. Sur cette relation des valeurs digitales, on est porté à croire qu'il serait possible de pointer ces deux structures seulement en localisant les optimum des valeurs digitales. Ce qui n'est pas aussi évident, à cause de la variabilité des données.



**Fig. 2 – Bande verte de l'image 278\_1 (œil gauche sain) : (1) la papille, (2) la macula, (3) une veine.**



**Fig. 3 – Histogramme des fréquences des valeurs digitales de la bande verte de l'image 278\_1\_G.pgm..**

Pour contourner ce problème, l'emploi des méthodes multi-échelles (ondelettes complexes symétriques, convolutions gaussiennes) ont été testées. Les tests préliminaires faits à partir d'images dégradées par des convolutions gaussiennes ont montré que la papille et la macula étaient des structures qui persistaient en augmentant les valeurs de  $\sigma$ . Tandis que les autres structures (veines, exudats, etc..) se fondaient de plus en plus avec la moyenne du fond de la rétine jusqu'à disparaître. En appliquant un seuillage d'histogramme, on pouvait localiser les zones représentatives de la papille et de la macula. En vertu de ces résultats, les possibilités des ondelettes complexes symétriques ont été exploitées afin d'optimiser la vitesse de l'algorithme. Cette technique permet d'extraire, beaucoup plus rapidement que les convolutions gaussiennes, une version dégradée de l'image. En formulant l'hypothèse que la valeur maximale équivaut à la papille et la valeur minimale équivaut à la macula à une échelle donnée. On espère pointer automatiquement la papille et la macula sur la rétine. Les résultats obtenus ont été positifs sur plusieurs images, mais la recherche des optimum ont donné aussi des erreurs de localisation.

À noter que la papille est beaucoup plus facilement localisable sur les images et les résultats préliminaires par les méthodes des ondelettes ont été de loin supérieurs à ceux de la macula. La connaissance de la position de la papille a permis de resserrer le critère de recherche de la macula (valeur minimale). Les conditions géométriques et les connaissances a priori sur l'acquisition des images ont été ajoutées pour restreindre la zone de recherche :

- l'image est celle d'un œil gauche (papille à gauche, macula au centre) ou d'un œil droit (papille à droite, macula au centre);
- la macula se trouve à l'extrémité gauche (œil gauche) ou droite (œil droit), dans le cas des images avec papille au centre de l'image;
- la macula et la papille sont séparées par une distance de l'ordre de deux à trois papille;
- la macula fait un certain angle avec la papille de l'œil;
- la macula est située près de l'axe horizontal passant par le centre de l'image;
- la macula est entourée de chaque côté par le système vasculaire (veines principales et capillaires) qui nourrissent le tissu, par contre la macula est libre de toute veine, afin de ne pas obstruer la vision. (Cette condition n'a pas été appliquée dans cette version de l'algorithme, mais pourrait être intégrée dans les versions prochaines.);

À partir de ces observations empiriques faites sur des images en bande verte du projet (*c.f. Tab. 4 – annexe I*), nous avons tiré des mesures statistiques qui permettent de quantifier et vérifier l'existence d'une constance dans la valeur de certains paramètres géométriques (*c.f. Tab. 1*). Ces résultats ont été utilisés dans l'élaboration de l'algorithme.

$\langle D_{pm} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{D_{pm}}$ (pixels)	$\langle \Theta_{pm} \rangle$ (deg.)	$\sigma_{\Theta_{pm}}$ (deg.)
164.21	$\pm 11.67$	2.72	$\pm 7.36$

**Tab. 1 – Statistiques des paramètres calculés à partir de la bande verte des images testes (voir Tab. 3 – annexe I)**

## 2. Solution

L'algorithme de recherche du centre de la macula est intrinsèquement lié à la position de la papille. Si cette structure est mal pointée, le résultat obtenu pourrait être insignifiant. Il est donc nécessaire que les images traitées contiennent la papille. Et la papille doit être un des objets les plus claires de la région de recherche. (L'algorithme tient compte aussi de certains facteurs géométriques dans sa localisation.)

Le programme algo1 se sépare la recherche de la *macula* en deux parties : 1) une recherche rapide des pixels contenant la papille et la macula au niveau de l'image dégradée (2.1.2, 2.1.3 et 2.1.4), et 2) une recherche plus approfondie dans la zone correspondante des pixels dégradés dans l'image d'origine (2.1.5 et 2.1.6). La première étape permet de raccourcir la recherche dans l'image d'origine en localisant des zones d'intérêts, au lieu d'effectuer une recherche intensive au niveau de l'image entière. On limite aussi la recherche à l'intérieur d'une portion déterminée de l'image à l'aide d'un masque (2.1.1). À la toute fin une image de la rétine avec la région de la macula et de la papille encerclée est produite (2.1.7).

### 2.1 Séquence des opérations

#### 2.1.1 Initialisation

Cette étape comporte : 1) la vérification des paramètres d'entrée, 2) l'initialisation des paramètres pour les routines des ondelettes, 3) la lecture de l'image et du masque, 4) le calcul des statistiques descriptives (moyenne, écart-type) qui serviront plus tard (2.1.6). Après cette séquence, la portion centrale  $512 \times 256$  est extraite. Les traitements futurs se font sur cette image accompagnée de son masque.

#### 2.1.2 Application de la transformée par ondelette

La transformée par ondelette complexe symétrique est appliquée à l'image et au masque. Le niveau de décomposition choisi est de ( $numlevel = 5$ ) et les coefficients des filtres sont ceux de Harr (*JOcs1*). Le niveau de décomposition a été choisi d'après des tests préliminaires montrant que la macula se résumait à un seul pixel dans l'image transformée. On

extrait les basses fréquences de la décomposition. C'est à partir de cette sous-image de  $16 \times 8$  (128 pixels) que ce fait la recherche du minimum et du maximum des valeurs digitales dans un premier temps.

Afin de diminuer la zone de recherche, on effectue les opérations des étapes (2.1.3) et (2.1.4) seulement sous le masque réduit de son contour. Ce qui permet d'augmenter la rapidité de l'algorithme. Le nombre de pixels en est réduit de plus de la moitié (~60 pixels).

### 2.1.3 Recherche du pixel papille (image transformée)

Cette étape est simplement la recherche de la coordonnée du pixel dont la valeur digitale est maximale. Cette recherche est limitée par les facteurs géométriques suivants :

- *le type d'image*. Le type d'image est défini par la position de la papille par rapport à la visée centrale de la caméra : 1)  $L$  = œil gauche (papille à la gauche et macula centrée), 2)  $R$  = œil droit (papille à la droite et macula centrée), 3)  $CL$  = œil gauche (papille centrée et macula à gauche), et 4)  $CR$  = œil droit (papille centrée et macula à droite). Selon le type, le pixel maximal devra observer la condition :

$$\text{pixel accepté} \Leftrightarrow \begin{cases} L: X_{pap} < X_{centre} - 2 \text{ pixels} \\ CL \text{ et } CR: X_{centre} - 2 \text{ pixels} \geq X_{pap} \geq X_{centre} + 2 \text{ pixels} \\ R: X_{pap} > X_{centre} + 2 \text{ pixels} \end{cases} \quad (2.1)$$

- *l'angle entre la papille et le centre de l'image*. Le pixel maximal devra se plier à la seconde condition :

$$\text{pixel accepté} \Leftrightarrow \begin{cases} L: -25.0^\circ > \Theta_{pap} > 25.0^\circ \\ CL \text{ et } CR: \text{aucune restriction} \\ R: -25.0^\circ > \Theta_{pap} > 25.0^\circ \end{cases} \quad (2.2)$$

### 2.1.4 Recherche du pixel macula (image transformée)

La recherche de la macula est faite par rapport à la position de la papille. On recherche le pixel dont la valeur est minimale avec les restrictions sur :

- *la distance entre la papille et la macula*.

$$\text{pixel accepté} \Leftrightarrow 4.0 \text{ pixels} \geq D_{pm} \geq 5.5 \text{ pixels} \quad (2.3)$$

- *l'angle entre la papille et la macula.*

$$\text{pixel accepté} \Leftrightarrow -25.0^\circ > \Theta_{pap} > 25.0^\circ \quad (2.4)$$

- *la distance entre le centre de l'image et la macula.* Dans le cas des images *R* et *L*, la macula se trouve naturellement près du centre. On sélectionne le pixel le plus près du centre. Dans le cas des images *CR* et *CL*, on ajuste la position du centre pour conserver le même critère de sélection.

### 2.1.5 Conversion des coordonnées (image d'origine)

À la fin de (2.1.4) on obtient les coordonnées  $(X_{mac}, Y_{mac})$  du pixel de la macula de l'image transformée. Il s'agit de retrouver cette coordonnée dans l'image originale. Elle correspond au centre d'un carré de  $32 \times 32$  pixels représentant le pixel de l'image transformée. Les coordonnées du centre de ce carré sont calculées par les équations suivantes :

$$x_{mac} = 2^{numlevel} \cdot X_{mac} + X_{offset} \quad (2.5a)$$

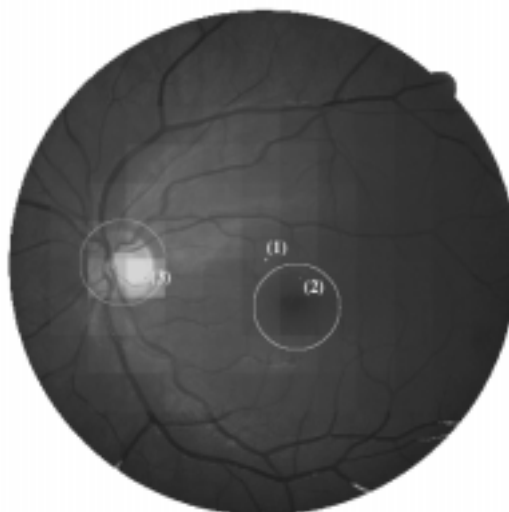
$$y_{mac} = 2^{numlevel} \cdot Y_{mac} + Y_{offset} \quad (2.5b)$$

### 2.1.6 Recherche du centre de la macula (image d'origine)

Cette étape raffine la recherche du centre de la macula. On recherche dans la région avoisinante à  $(x_{mac}, y_{mac})$  la valeur digitale minimale. À fin de réduire la variabilité des données, un filtre de la moyenne est appliqué et seulement les valeurs plus petites que la moyenne de l'image sont considérées durant cette opération. Ce qui permet d'éliminer les grandes valeurs dans le cas où la macula est encombrée par des exudats ou d'autres structures plus brillantes. (La même opération est effectuée pour la papille, mais en recherchant la valeur maximale et en rejetant les pixels dont la valeur est plus petite que la moyenne de l'image. Cette recherche est faite qu'à titre d'information sur la papille.)

### 2.1.7 Sauvegarde

Finalement, un cercle de l'ordre de la papille est tracé autour du centre de la macula, et l'image est sauvegardée. La figure 4 montre le résultat de l'algorithme appliquée sur 278\_1\_G.pgm. Sur cette image, on a surimposée l'imagette résultante de (2.1.2).



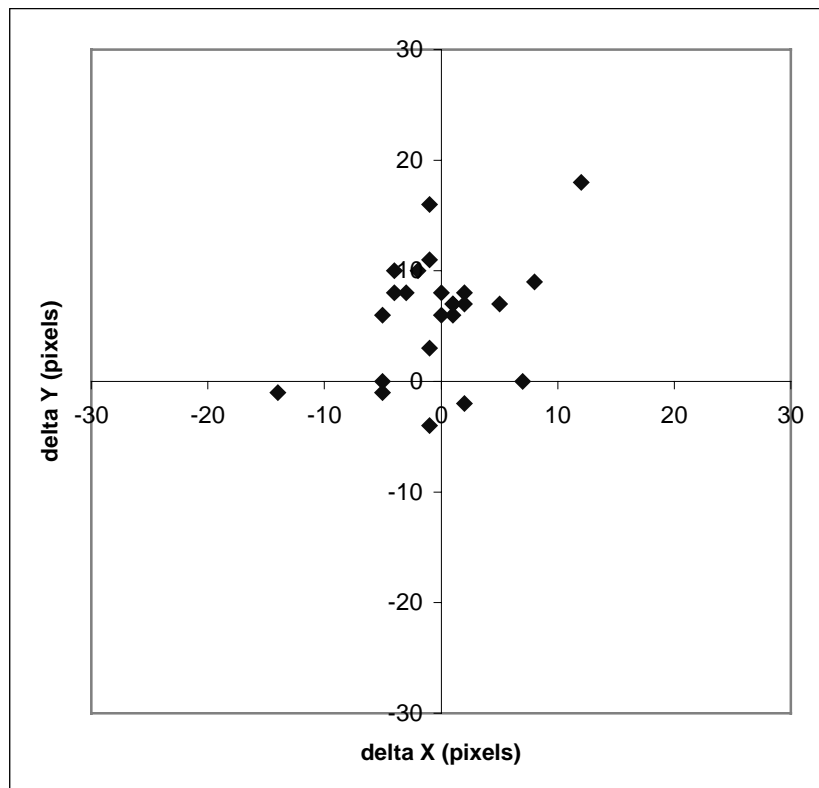
**Fig. 4 – Résultat obtenu par algo 1. Bande verte de l'image 278\_1 : (1) centre de l'image, (2) coordonnée centrale du pixel de la transformée par ondelette de la macula, (3) coordonnée centrale du pixel de la transformée par ondelette de la papille. Le centre des deux cercles correspondent au centre de la macula et de la papille après l'étape 2.1.6**

### 3. Résultats et discussion

Les tableaux 3 et 4 en annexe présentent les coordonnées des centres respectifs de la macula et de la papille, ainsi que la distance entre la macula et la papille et l'angle entre la papille et la macula. Les valeurs du tableau 3 sont tirées d'observations visuelles faites par un interprète, tandis que les valeurs du tableau 4 sont des résultats de l'algorithme.

Les images testes ont été sélectionnées sur le lot disponible en ne considérant celles facilement interprétables. Ceci dans le but de s'assurer de la validité de la comparaison entre les résultats. Ce qui ne signifie pas pour autant que l'on devrait considérer les mesures du tableau 3 (annexe 1) comme vraies et sûres à 100%. Elles sont susceptibles de contenir des erreurs d'approximation faites par l'interprète. Deux interprètes n'obtiendraient probablement pas les mêmes mesures, par contre elles ne devraient pas être significativement différentes au point d'amener des divergences de localisation. Et ces images ont été choisies aussi parce qu'elles ne comportent pas trop de difficultés pour l'algorithme.

La figure 5 et le tableau 2 montrent que de manière générale que la différence de localisation de la macula entre l'interprétation et l'algorithme sont petits. En fait, on peut difficilement faire la différence à l'œil. Seul deux images (*c.f. Tab. 8 – annexe I*) ont des différences supérieures à 16 pixels (la moitié de la superficie supposée de la macula). Ces images sont aussi plus difficiles à interpréter visuellement.



**Fig. 5 – Graphe des différence de localisation en x et y entre l’interprétation visuelle et les résultats de l’algorithme.**

$\langle \delta X_{mac} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{\delta X_{mac}}$ (pixels)	$\langle \delta Y_{mac} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{\delta Y_{mac}}$ (pixels)	$\langle \delta R_{mac} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{\delta R_{mac}}$ (pixels)
-0.21	$\pm 5.18$	6.13	$\pm 5.41$	6.08	$\pm 4.23$

**Tab. 2 – Différence moyenne en x et y et écart quadratique moyen entre l’interprétation visuelle et les résultats de l’algorithme.**

Il est nécessaire de faire remarquer que l’algorithme ne donne pas nécessairement la position du pixel le plus sombre de la macula lors de l’étape 2.1.4. C’est ce que montre la figure 5. Le pixel pointé par (2) ne montre pas la macula mais une région adjacente. Ce problème de localisation vient de la troisième condition de la section 2.1.4, qui empêche la recherche au-delà d’une certaine distance du centre. Mais l’algorithme a réussi, malgré tout, a retrouvé le bon centre. Parce que la recherche du centre de la macula (2.1.6) se fait à l’intérieure d’une zone plus grande que 32 pixels carrés.

Une amélioration majeure du code serait de faire la recherche du centre de la papille avec d'autres méthodes. Car l'algorithme ne donne pas le centre exacte, mais la localisation du pixel le plus brillant de la papille. On pourrait se servir de la localisation de ce pixel comme point de départ, et la région voisine comme zone de recherche aux algorithmes de reconnaissance de forme afin de trouver le centre géométrique de la papille. Ce qui donnerait des mesures moins aléatoires pour la recherche de la macula.

Un développement futur de l'algorithme serait d'utiliser la restriction posée par le réseau de vaisseaux sanguins. Du point de vue de l'anatomie de la rétine, et au-delà du fait que la macula est la région sombre de l'œil, il semble premièrement que la macula est la région comprise à l'intérieur des branches du réseau de vaisseaux sanguins, sans que celle-ci soit en soi traversée. En appliquant cette condition, il serait pensable de localiser la zone maculaire, indépendamment de sa tonalité et de la détection de papille. Par contre, il incomberait de bien circonscrire les branches des vaisseaux sanguins.

#### **4. Conclusion**

L'algorithme a été testé sur l'ensemble du lot d'images du projet, et à donner des résultats très satisfaisants dans la plupart des cas. Les conditions énumérées à la section 2 forme un tout permettant de localiser la région maculaire même sur des images de pauvres qualité.

# **Annexe I**

## **Les résultats**

Image	$X_{mac}$ (pixels)	$Y_{mac}$ (pixels)	$X_{pap}$ (pixels)	$Y_{pap}$ (pixels)	$D_{pm}$ (pixels)	$\Theta_{pm}$ (deg.)
278_1_G.pgm	366	280	221	243	149.64625	14.314839
478_2_G.pgm	364	243	514	214	152.777616	-10.9421947
478_3_G.pgm	386	266	233	219	160.05624	17.0764247
478_4_G.pgm	408	267	261	212	156.952222	20.5133364
479_2_G.pgm	347	241	502	223	156.041661	-6.62403823
506_1_G.pgm	366	280	502	281	136.003676	0.42128526
511_1_G.pgm	280	266	449	251	169.664375	-5.07213716
511_2_G.pgm	248	259	396	250	148.273396	-3.47992044
511_3_G.pgm	392	266	251	226	146.563979	15.8380134
512_1_G.pgm	332	208	469	205	137.032843	-1.25445268
512_3_G.pgm	321	207	183	187	139.441744	8.24632778
536_3_G.pgm	388	262	234	244	155.04838	6.66666552
541_1_G.pgm	317	263	470	248	153.733536	-5.59934407
541_3_G.pgm	365	236	209	207	158.672619	10.5309367
549_1_G.pgm	321	237	467	226	146.413797	-4.30866856
552_1_G.pgm	314	239	476	238	162.003086	-0.35367346
553_3_G.pgm	336	246	180	219	158.319298	9.81930893
554_4_G.pgm	351	242	178	227	173.649071	4.95545313
557_3_G.pgm	343	241	182	204	165.196852	12.9426352
558_1_G.pgm	307	239	476	219	170.179317	-6.74918049
559_1_G.pgm	329	219	464	211	135.236829	-3.39134228
559_3_G.pgm	339	250	188	217	154.563903	12.3277811
561_2_G.pgm	334	216	204	200	183.27302	3.12780876
564_2_G.pgm	329	216	471	200	142.898565	-6.42875318

**Tab. 3 – Position de la macula ( $X_{mac}, Y_{mac}$ ), position de la papille ( $X_{pap}, Y_{pap}$ ), distance entre la papille et la macula ( $D_{pm}$ ), et angle entre la papille et la macula ( $\Theta_{pm}$ ). Mesures faites par un interprète sur les images verte du projets.**

Image	$X'_{mac}$ (pixels)	$Y'_{mac}$ (pixels)	$X'_{pap}$ (pixels)	$Y'_{pap}$ (pixels)	$D'_{pm}$ (pixels)	$\Theta'_{pm}$ (deg.)
278_1_G.pgm	366	274	218	247	150.44268	10.3389193
478_2_G.pgm	364	235	524	206	162.606888	-10.2733393
478_3_G.pgm	385	259	227	225	161.616831	12.1442883
478_4_G.pgm	411	259	248	223	166.928128	12.4543598
479_2_G.pgm	345	234	510	217	165.873446	-5.88245056
506_1_G.pgm	367	284	505	282	180.313616	-22.1554656
511_1_G.pgm	268	248	458	245	190.023683	-0.9045958
511_2_G.pgm	253	260	406	269	153.264477	3.36646351
511_3_G.pgm	393	250	247	228	147.648231	8.56914912
512_1_G.pgm	325	208	488	188	164.22241	-6.99519821
512_3_G.pgm	313	198	167	175	147.800541	8.9524809
536_3_G.pgm	392	254	221	236	171.944759	6.00901103
541_1_G.pgm	319	253	485	244	166.243797	-3.10336194
541_3_G.pgm	363	238	204	208	161.805439	10.6849214
549_1_G.pgm	326	237	490	213	165.746795	-8.32565736
552_1_G.pgm	319	233	492	231	173.01156	-0.66235001
553_3_G.pgm	340	236	169	221	171.656634	5.01311799
554_4_G.pgm	352	239	168	219	185.083765	6.20345314
557_3_G.pgm	342	234	171	204	173.611636	9.95063509
558_1_G.pgm	308	228	480	217	172.351385	-3.65928461
559_1_G.pgm	327	211	487	202	160.252925	-3.21949762
559_3_G.pgm	334	243	181	213	155.913438	11.0937324
561_2_G.pgm	348	217	181	189	169.331037	9.5179572
564_2_G.pgm	328	210	493	195	165.680415	-5.1944333

Tab. 4 – Position de la macula  $(X'_{mac}, Y'_{mac})$ , position de la papille  $(X'_{pap}, Y'_{pap})$ , distance entre la papille et la macula  $(D'_{pm})$ , et angle entre la papille et la macula  $(\Theta'_{pm})$ . Résultat de l'algorithme

$\langle D_{pm} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{D_{pm}}$ (pixels)	$\langle \Theta_{pm} \rangle$ (deg.)	$\sigma_{\Theta_{pm}}$ (deg.)
164.21	$\pm 11.67$	2.72	$\pm 7.36$

**Tab. 5 – Statistiques des paramètres calculés à partir de la bande verte des images testes (voir Tab. 3 – annexe I).**

$\langle D'_{pm} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{D'_{pm}}$ (pixels)	$\langle \Theta'_{pm} \rangle$ (deg.)	$\sigma_{\Theta'_{pm}}$ (deg.)
152.47	$\pm 11.63$	3.60	$\pm 9.14$

**Tab. 6 – Statistiques des paramètres calculés à partir de la bande verte de images traitées par algo 1 (voir Tab. 4 – annexe I).**

$\delta \langle D_{pm} \rangle$ (pixels)	$\sigma_{\delta D_{pm}}$ (pixels)	$\delta \langle \Theta_{pm} \rangle$ (deg.)	$\sigma_{\delta \Theta_{pm}}$ (deg.)
-11.74	$\pm 9.76$	0.88	$\pm 3.70$

**Tab. 7 – Différence entre les valeurs mesurées sur les images testes et les images traitées par algo 1.**

Image	$\delta X_{mac}$ (pixels)	$\delta Y_{mac}$ (pixels)	$\delta R_{mac}$ (pixels)
<b>278_1_G.pgm</b>	0	6	6
<b>478_2_G.pgm</b>	0	8	8
<b>478_3_G.pgm</b>	1	7	7.07106781
<b>478_4_G.pgm</b>	-3	8	8.54400375
<b>479_2_G.pgm</b>	2	7	7.28010989
<b>506_1_G.pgm</b>	-1	-4	4.12310563
<b>511_1_G.pgm</b>	12	18	21.6333077
<b>511_2_G.pgm</b>	-5	-1	5.09901951
<b>511_3_G.pgm</b>	-1	16	16.0312195
<b>512_1_G.pgm</b>	7	0	7
<b>512_3_G.pgm</b>	8	9	12.0415946
<b>536_3_G.pgm</b>	-4	8	8.94427191
<b>541_1_G.pgm</b>	-2	10	10.198039
<b>541_3_G.pgm</b>	2	-2	2.82842712
<b>549_1_G.pgm</b>	-5	0	5
<b>552_1_G.pgm</b>	-5	6	7.81024968
<b>553_3_G.pgm</b>	-4	10	10.7703296
<b>554_4_G.pgm</b>	-1	3	3.16227766
<b>557_3_G.pgm</b>	1	7	7.07106781
<b>558_1_G.pgm</b>	-1	11	11.045361
<b>559_1_G.pgm</b>	2	8	8.24621125
<b>559_3_G.pgm</b>	5	7	8.60232527
<b>561_2_G.pgm</b>	-14	-1	14.0356688
<b>564_2_G.pgm</b>	1	6	6.08276253

**Tab. 8 – Calcul des différences de localisation du centre de la macula entre les mesures de référence et les résultats obtenus par *algo 1***