Analyse morphologique des filets de tricoptères: un problème d'écotoxicologie et de géométrie discrète

A. Chalifour, S. Beauchemin, P. Bose, F. Nouboud

Laboratoire de Recherche Interdisciplinaire en Imagerie et en Calcul Scientifique
Département de mathématiques et d'informatique
Université du Québec à Trois-Rivières
C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7
e-mail: alain_chalifour@uqtr.uquebec.ca

and

L. B.-M. Vought
Limnology, Department of Ecology
University of Lund, Ecology Building
S-2223 62 Lund, Sweden

Abstract

L'effet de certains polluants dans les cours d'eau sur les larves d'*Hydropsyche* de la famille des tricoptères se traduit par l'apparition d'anomalies dans la géométrie des filets de capture des larves que l'on retrouve dans les eaux courantes. Afin d'étudier ces anomalies morphologiques, nous proposons différents algorithmes qui nous permettrons ultérieurement de vecteuriser les filets et calculer différents paramètres usuellement utilisés par les biologistes. Dans une première étape les images saisies à l'aide d'une caméra vidéo CCD couplée à un microscope sont filtrées, binarisées et purifiées manuellement des artéfacts dus à la manipulation des filets ou à la présence de débris organiques. Par la suite, une analyse de contour est effectuée afin d'isoler chacune des cellules intérieures du filet qui seront approchées par un polygone dont les sommets correspondent à des variations brusques de la courbure du contour. Nous obtenons une représentation polygonale du filet de capture à partir de laquelle il sera possible de regrouper, sous certaines hypothèses, les sommets qui constitueront une approximation des intersections de la maille vecteurisée. Un objectif à moyen terme est d'obtenir une représentation vectoriel d'un filet de capture qui permettra le calcul simple de paramètres morphologiques (orientations des mailles du filet, distribution des aires des cellules intérieures, etc.), et l'identification des anomalies. Dans le cadre de ces travaux, les auteurs ont développé une nouvelle formule de Green discrète qui est exacte pour le calcul de l'aire d'un domaine binaire connecté à 4 voisins. Le calcul de l'aire est effectué à l'aide des pixels du contour orienté positivivement obtenu à l'aide d'un algorithme développé dans le cadre de cette recherche.

1 Introduction.

Les larves d'*Hydropsyche* de la famille des tricoptères abondent dans le benthos des rivières des pays tempérés et nordiques. Or, ces larves tissent des filets, sous certaines conditions de température et de vitesses de courant, afin de capturer le matériel biologique en suspension dans l'eau afin de se nourrir. Or, il apparaît que ces filets ont une structure régulière, ou encore une signature caractéristique. Ces structures ont été largement étudiées et sont bien connus [?]. Certains auteurs [?] ont observés des anomalies dans la construction des filets sous l'influence de faibles quantités de polluants. Parmi les déformations morphologiques observées on trouve: l'ajout de mailles transversales irrégulières superposées à la trame de fond, l'épaississement des mailles, la déformation de la ligne médiane du filet (ligne centrale de raccord des mailles). Ces anomalies pouvent être associés à la présence de produits toxiques spécifiques. Or, la saisie de données morphologique, en l'occurence le calcul des angles des polygones entre les mailles (que nous appellerons cellules) le long de la ligne médiane ou encore la dimension des cellules, est fastidieuse puisque les filets mesurent moins de 1 centimètres carrés et peuvent contenir plus d'une centaine de cellules.

Notre objectif à long terme est le développement d'algorithmes performants qui permettront le calcul de ces paramètres morphologiques et la reconnaissance automatique des anomalies, en plus d'offrir l'accès à de nouveaux paramètres dans le cadre de ces études en écotoxicologie. Un tel système permettra l'analyse rapide de plusieurs centaines de filets et le développement d'outils statistiques visant l'analyse des filets. Finalement, plusieurs problématiques similaires peuvent être traitées à l'aide d'une telle approche.

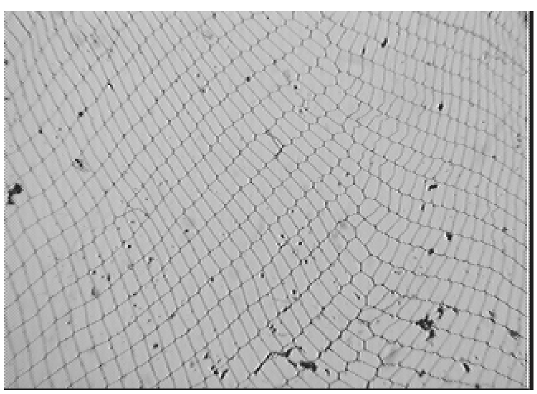

Figure.1
Filet normal d'hydropsyche.

2 Contours des mailles.

2.1 Hypothèses et définitions.

Considérons, après filtrage, une image binaire où chaque pixel noir est indicé par la valeur 1 et chaque pixel blanc par la valeur 0. Notre objectif est de construire, pour chaque domaine connexe (cellule) de l'image, constitué de pixels blancs, un contour formé de pixels noirs. A partir de ce contour nous calculerons l'aire de chacune des cellules et nous approcherons ce contour à l'aide d'un polygone. Le *contour* d'une cellule, est un chemin simple ou faiblement simple (voir plus loin), fermé et orienté positivement (antihoraire) et d'épaisseur égale à un pixel. De plus, le contour d'une cellule est une chaîne de longueur minimale au sens de la connectivité à 8 voisins. Nous utilisons comme orientation et représentation matricielle d'une imag, celles qui sont généralement utilisées, soit un axe des x positif orienté de haut en bas et un axe des y orienté positivement de gauche à droite de l'image.

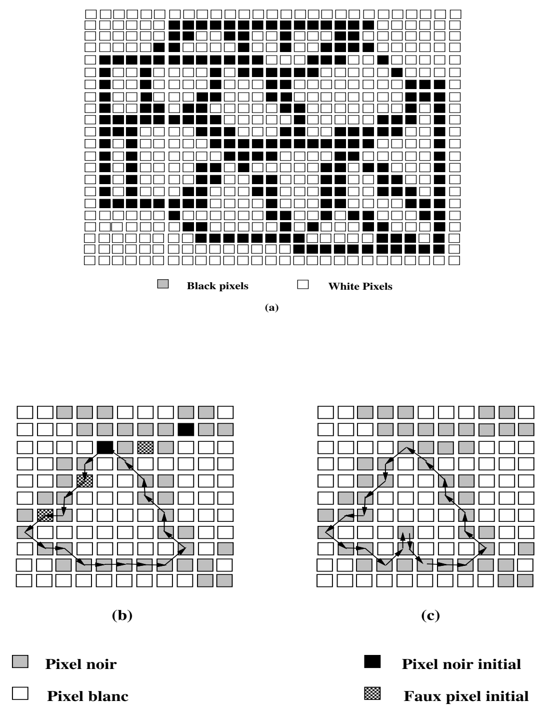

Figure 2
(a) Filet binaire
(b) Contour simple (c) Contour faiblement simple

Pour chaque cellule, domaine connexe, D_K de l'image on définit son contour C_K à l'aide d'une chaîne de pixels noirs,

$$\left[P_1, P_2, \ldots, P_i, P_{i+1}, \ldots, P_{L(K)}, P_{L(K)+1} = P_1\right],$$

où $L(K)$ est la longueur de la chaîne et P_i est le i-ième pixel de coordonnées entières (x_i, y_i). Le pixel P_1 est appelé le pixel de départ du contour C_K. Un contour est dit *simple* si tous les pixels de la chaîne sont différents à l'exception des deux extrémités et un contour est dit *faiblement simple* s'il possède une ou plusieurs *adhérences simples* ou *composées.* Une *adhérence simple* est définie comme étant un chemin non simple de largeur de un pixel, c'est-à-dire qu'il n'entoure aucun domaine connexe constitué de pixels blancs. De plus, chacun des pixels d'une adhérence simple est parcouru deux fois dans la chaîne (aller-retour), sauf l'extrémité terminale. La longueur d'une adhérence est nécessairement de longueur impaire. On a la représentation suivante d'une adhérence simple;

$$[P_k, P_{k+1}, \ldots, P_t, \ldots, P_{m-1}, P_m]$$

où

$$P_{t-i} = P_{t+i}, \qquad 1 \leq i \leq m-t$$

avec $t-k=m-t$ et P_t est le pixel terminal de l'adhérence simple. Une *adhérence composée* est la juxtaposition d'adhérences simples connectées entre elles à des pixels terminaux.

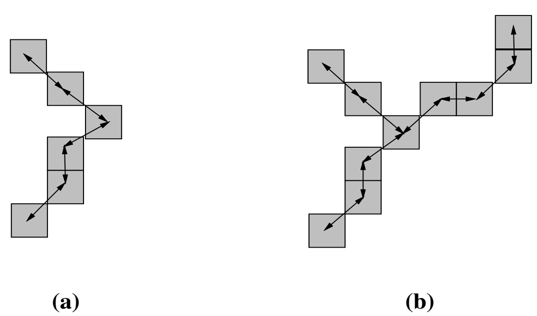

Figure 3

(a) Adhérence simple, (b) Adhérence composée

On définiera comme les *extrémités de départ potentiels* des contours des domaines $\{D_K, 1 \leq K \leq N\}$, formant les cellules d'un filet, les pixels noirs de coordonnées (i,j) tels que le pixel de coordonnées $(i+1, j-1)$ est un pixel noir et le pixel $(i+1,j)$ est blanc (voir fig. 1 (b)). Le déplacement de (i,j) à $(i+1,j)$ est d'indice de Freeman égal à 5. Notons R_1 l'ensemble initial de ces extrémités et R_K l'ensemble des pixels potentiels de départ à l'étape K de la recherche du contour du $K-$ième domaine de l'image. Les coordonnées (i_K, j_K) du pixel de départ du contour de la cellule K doivent vérifier;

$$\min_j \left\{ \min_i \{\ (i,j) \in R_K\} \right\}.$$

Lors de la construction d'une chaîne définissant le contour d'une celluleD_K, les extrémités potentiels de départ rencontrés lors de la construction du contour de D_K seront éliminés de la liste.

2.2 Algorithme de contour.

Soit D_K une cellule quelconque de l'image et notons $P_1=(x_1,y_1)$ les coordonnées discrètes du premier pixel de départ potentiel du contour C_K, alors par construction le second pixel du contour orienté est le pixel noir de coordonnées $P_2=(x_2,y_2)=(x_1+1, y_1-1)$. On peut associer au premier arc du contour, que l'on note $a_1=[P_1P_2]$, l'indice de Freeman $\alpha_1=5$.

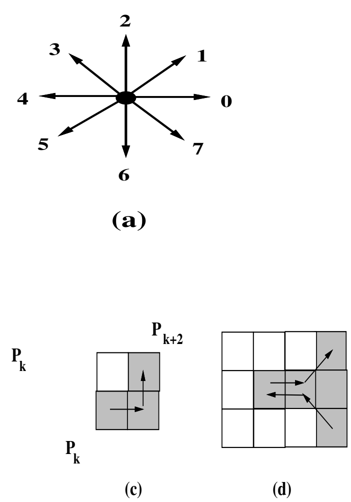

Figure 4

(a) Directions au sens de Freeman

(b) Paires admissibles (c) Paires non adimissibles

(d) Paires admissibles

À partir de ce premier déplacement, il est possible de construire successivement et de façon univoque les arcs du contour de longueur minimale d'une cellule puisque chaque arc $a_k=[P_k, P_{k+1}], (k \geq 2)$ construit à partir de l'arc a_{k-1} doit respecter les deux principes ou hypothèses suivantes:

- H_1 - L'arc $a_k=[P_k, P_{k+1}]$ d'indice de Freeman α_k minimise la longueur du contour dans le sens de la connectivité à 8 voisins;
- H_2 - La chaîne construite est antihoraire ou de façon équivalente, les extrémités de chaque arc sont des pixels noirs et les pixels à gauche de l'arc, par rapport au déplacement orienté, sont blancs.

Avec ces hypothèses on a, qu'étant donné un arc $a_{k-1}, k \geq 2$, il existe un et un seul arc orienté réalisant simultanément les hypothèses H_1 et H_2. Le choix du pixel P_{k+2} s'effectue en fonction des indices des pixels dans un voisinage du pixel $P_k = (x_{k+1}, y_{k+1})$. Si on utilise les indices de Freeman pour indiquer les directions de chaque arc, les seules paires (i, j) de déplacements succesifs et admissibles sont présentées dans le tableau ci-dessous où le premier indice i (ligne) indique la direction d'un arc a_k et l'indice j (colonne) indique la direction admissible de l'arc suivant a_{k+1} minimisant la longueur de la chaîne de contour.

$\frac{j}{i}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	X	X			X	X	X	X
1	X	X	X	X		X	X	X
2	X	X	X	X			X	X
3	X	X	X	X	X	X		X
4	X	X	X	X	X	X		
5		X	X	X	X	X	X	X
6			X	X	X	X	X	X
7	X	X		X	X	X	X	X

Tableau 1. Paires de directions admissibles.

Pour une direction donnée de l'arc a_k, on note qu'il existe au plus 7 directions adjacentes possibles de l'arc a_{k+1}. De plus, certaines configurations représentent deux directions successives opposées. En effet, la prise en compte de ces configurations permettra la construction de chemins faiblement simples. Comme conséquence de cette construction nous obtenons pour chaque domaine $D(K)$ un contour C_K de longueur $L(K)$ défini par une suite de pixels;

$$P_1, P_2, \ldots, P_k, P_{k+1}, \ldots, P_{L(K)}, P_{L(K)+1} = P_1,$$

où l'arc $[P_1, P_2]$ est obligatoirement d'indice égal à 5 et P_1 est le premier pixel de départ potentiel rencontré dans la liste R_K. De plus, chaque paire de pixels successifs définie un arc ayant une direction au sens de Freeman et on associe au contour une suite de directions,

$$\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_k, \ldots, \alpha_{L(K)},$$

où α_k est la direction de l'arc $[P_k, P_{k+1}]$ pour $k = 1, \ldots, L(K)$. Cette suite de pixels et de directions nous permettra de calculer l'aire exacte d'un domaine exprimée en nombre de pixels d'intensité 0 (blancs). Si à une étape k l'indice de la direction est $\alpha_k = 5$ alors le pixel P_k est éliminé de la liste R_K des pixels de départ potentiels du contour d'un domaine et on pose $R_{K+1} = R_K - P_K$.

3 Calcul de l'aire des cellules.

Une formule classique de l'analyse vectorielle permettant le calcul de l'aire d'un domaine Ω dans le plan de frontière Γ constituée d'une courbe simple orientée positivement, fermée et lisse, est celle obtenue comme corollaire du théorème de Green et qui stipule que;

$$S = \int\int_\Omega 1 \; dxdy = \frac{1}{2}\int_\Gamma x \; dy - y \; dx.$$

Or, une discrétisation de cette formule couramment utilisée en analyse d'images [?] stipule que si D_K est un domaine de contour C_K de longueur $L(K)$ alors l'aire $A(D_K)$ du domaine est donnée par;

$$A(D_K) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L(K)} [x_k \; y_{k+1} - y_k \; x_{k+1}] \qquad .$$

L'aire calculée à l'aide de cette formule correspond à celle comprise à l'intérieur de la ligne polygonale dont les sommets sont au centre de chacun des pixels définissant le contour du domaine. Dans le cas d'un domaine discret, on obtient le nombre de pixels blancs à l'intérieur du domaine auquel on ajoute l'aire des portions de pixels noirs à gauche de la *ligne* polygonale du contour. On a donc une surévaluation de l'aire d'un domaine. Cependant, il est possible de modifier cette formule afin d'obtenir le nombre exact de pixels blancs à l'intérieur d'un domaine dont le contour est simple ou faiblement simple sans avoir à utiliser le théorème de Pick [?].

En effet, pour un domaine D_K de contour C_K, on associe à chaque paire de déplacements successifs $[\alpha_k, \alpha_{k+1}], 1 \leq k \leq L(K)$ une pénalité $p(\alpha_k, \alpha_{k+1})$ définie en fonction des indices de Freeman. Cette pénalité correspondra à une portion de la surface des pixels à gauche des arêtes a_k et a_{k+1}. Le principe du calcul de ces pénalités pour toutes les paires de déplacements successives et admissibles est le suivant. Soit α_k et α_{k+1} les directions de deux déplacements successifs admissibles du contour d'un domaine et P_k, P_{k+1},P_{k+2} les pi-xels définissant les extrémités des arcs a_k et a_{k+1}. Si on fait correspondre les coordonnées d'un pixel de surface unitaire au centre géométrique de celui-ci alors on notera $\bar{P}_k$, $\bar{P}_{k+1}$ et $\bar{P}_{k+2}$ les *projections* de ces centres. La *projection* du centre d'un pixel P_{k+1} sur une arête consiste à le projeter perpendiculairement sur l'arête du pixel adjacent à un pixel blanc intérieur au domaine et tel que l'angle formé par les vecteurs a_k et $[P_{k+1}, \bar{P}_{k+1}]$ est aigu. La *pénalité* associée à deux déplacements successifs, de directions α_k et α_{k+1}, sera définie comme étant l'aire des pixels de centres P_{k+1} et P_{k+2} à gauche de la ligne polygonale définie par les projections et les centres de pixels suivants :

$$[\bar{P}_{k+1}, P_{k+1}, P_{k+2}, \bar{P}_{k+2}].$$

$\frac{j}{i}$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	.5	.25			1.0	.75	.75	.5
1	.75	.5	.5	.25		1.0	1.0	.75
2	.75	.5	.5	.25			1.0	.75
3	1.0	.75	.75	.5	.5	.25		1.0
4	1.0	.75	.75	.5	.5	.25		
5		1.0	1.0	.75	.75	.5	.5	.25
6			1.0	.75	.75	.5	.5	.25
7	.5	.25		1.0	1.0	.75	.75	.5

Tableau 2

Pénalités pour chaque paire de directions admissibles.

A partir des définitions et des principes de calculs énoncés précédemment, on peut démontrer [?] les propositions et théorèmes suivants.

Théorème 1.

Soit D un domaine connecté à 4 voisins et C son contour de longueur minimale au sens sens de la connectivité à 8 voisins, orienté positivement, fermé, simple et de longueur $L+1$. Supposons que C est défini par la chaîne de pixels;

$$C = [P_1, P_2, \ldots, P_{k-1}, P_k, \ldots, P_L, P_{L+1} = P_1],$$

alors, l'aire discrète de D est donnée par la formule de Green penalisée suivante,

$$A(D) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L}[x_k\ y_{k+1} - y_k\ x_{k+1}] - \sum_{k=1}^{L} p(\alpha_k, \alpha_{k+1}),$$

où $p(\alpha_k, \alpha_{k+1})$ est la pénalité associée aux déplacements successifs de directions de Freeman α_k et α_{k+1} du contour.

Un chemin faiblement simple Γ possédant N adhérences simples et/ou adhérences composées peut s'écrire symboliquement sous la forme suivante;

$$[P_1, \ldots, \{P_{k_1}, \ldots, P_{m_1}\}, P_{m_1+1}, \ldots, \{P_{k_2}, \ldots, P_{m_2}\},$$
$$P_{m_2+1}, \ldots, \{P_{k_N}, \ldots, P_{m_N}\}, P_{N_1+1}, \ldots, P_L, P_{L+1}].$$

où $P_{L+1} = P_1$. Les pixels P_{k_i}, $1 \leq i \leq N$, sont appelés les *pixels de raccordement* des N adhérences

$$\{P_{k_i}, \ldots, P_{m_i} = P_{k_i}\}, \quad i = 1, \ldots, N$$

à la sous-chaîne simple Γ_S du contour, que nous appelerons chaîne enveloppante du domaine;

$$\begin{aligned}\Gamma_S \quad = \quad & [P_1, \ldots, P_{k_1}, P_{m_1+1}, \ldots, P_{k_2}, P_{m_2+1}, \ldots, \\ & P_{k_N}, \ldots, P_L, P_{L+1} = P_1].\end{aligned}$$

Il est à noter qu'un pixel terminal d'une adhérence simple peut être un pixel de raccordement d'une adhérence simple à la chaîne définissant une adhérence composée. En considérant ces définitions, il nous suffit donc de démontrer le résultat suivant pour les adhérences simples afin d'obtenir une version du théorème 1 pour les contours faiblement simples.

Proposition 1.

Soit une adhérence simple définie par une chaîne de pixels que nous écrirons pour des raisons de simplification comme suit;

$$[P_0, P_1, \ldots, P_{t-1}, P_t, P_{t+1}, \ldots, P_{2t-1}, P_{2t}],$$

où $P_{2t} = P_0$ est le pixel de raccordement de la chaîne enveloppante du contour. Alors

$$\frac{1}{2}\sum_{j=0}^{2t-1}[x_j\ y_{j+1} - y_j\ x_{j+1}] = 0$$

et,

$$\sum_{j=0}^{2t-1} p(\alpha_j, \alpha_{j+1}) = t,$$

où t est le nombre de pixels distincts constituant l'adhérence, excluant le pixel de raccordement. On conclue donc que pour une adhérence, les sommes apparaissant dans la formule du calcul d'aire de Green et qui font intervenir les pixels d'une adhérence, correspondent au nombre de pixels (avec un moins) à l'exception du point de raccordement de l'adhérence simple.

On peut facilement étendre ce résultat aux adhérences composites.

Proposition 2.

Soit une adhérence composite définie par une chaîne de pixels obtenue en juxtaposant des adhérences simples à partir d'un pixel de raccordement sur la chaîne enveloppante du domaine. Alors, les sommes dans la formule de Green pénalisée correspondent, à un signe près, au nombre de pixels de l'adhérence à l'exception point de raccordement principal. Finalement, nous avons le résultat suivant.

Théorème 2.

Soit le contour C de longueur minimale dans le sens de connectivité à 8 voisins, orientée positif, fermé, faiblement simple et de longueur $L+1$, délimitant un domaine connexe D, donné par la chaîne de pixels contenant des adhérences;

$$[P_1, \ldots, \{P_{k_1}, \ldots, P_{m_1} = P_{k_1}\}, P_{m_1+1}, \ldots, \\ \{P_{k_2}, \ldots, P_{m_2} = P_{k_2}\}, P_{m_2+1}, \ldots, \\ \{P_{k_N}, \ldots, P_{m_N} = P_{k_N}\}, P_{N_1+1}, \ldots, P_L, P_{L+1} = P_1].$$

où,

$$\{P_{k_i}, \ldots, P_{m_i} = P_{k_i}\}; i = 1, \ldots, N$$

sont des adhérences simples ou composites. Alors, l'aire discrète de D est donnée par la formule de Green penalisée suivante,

$$A(D) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L}[x_k\ y_{k+1} - y_k\ x_{k+1}] - \sum_{k=1}^{L} p(\alpha_k, \alpha_{k+1}).$$

4 Exemples de calculs.

Deux cas extrêmes ont été testés afin de valider les résultats présentés à la section précédente. Le premier domaine présenté à la figure (5) possède un contour simple tandis que le domaine à la figure (6) possède un contour faiblement simple.

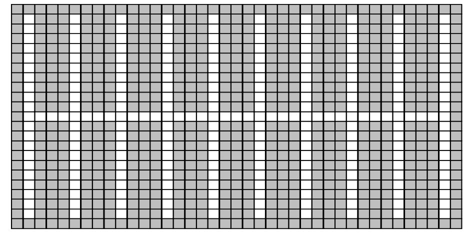

Figure 5

Domaine avec contour simple.

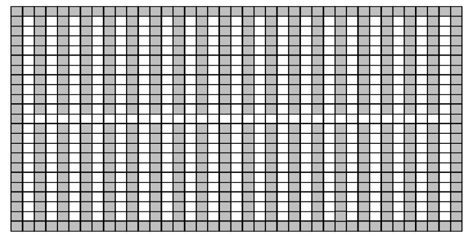

Figure 6

Domaine avec contour faiblement simple.

Pour le premier domaine, la formule de Green pénalisée calcule exactement l'aire couverte par les pixels blancs, soit 237 unités, tandis que la formule classique calcule l'aire comprise à l'intérieur de la ligne polygonale de contour, soit 456 pixels. Pour le second domaine, l'aire exacte calculée par la formule proposée est de 415 pixels tandis que la formule classique donne une aire de 798 unités.

5 Approximation polygonale des cellules.

Dans cette section nous présentons un algorithme qui permettra, à partir des contours discrets des cellules, de construire un polygone d'approximation du contour de chaque cellule de la maille. Les sommets de ce polygone seront des pixels du contour qui seront des points de forte variation de la dérivée discrète de l'angle défini par les directions normales associées à chaque pixel du contour. Soit $[P_1, P_2, \ldots, P_{i-1}, P_i, P_{i+1} \ldots, P_L, P_{L+1} = P_1]$ un contour orienté positif d'une cellule quelconque de la maille, alors à chaque pixel P_i d'une paire de déplacements successifs admissibles $[P_{i-1}, P_i, P_{i+1}]$ $(i = 1, \ldots, L)$, on associe la valeur moyenne θ_i des angles en radians que font les normales extérieures des deux déplacements adjacents au pixel. Pour les déplacements admissibles présentés au *Tableau 1*, les seuls angles possibles sont les suivants;

$$\theta \in \left\{0, arctan(.5), \frac{\pi}{4}, arctan(2)\right\},$$

et leurs rotations;

$$\theta + k\left(\frac{\pi}{2}\right),\ k = 0, 1, 2, 3.$$

Dans le calcul des premières différences de deux angles successifs, que l'on notera $(\Delta\theta)$, on note que le plus petit écart est donné par l'angle,

$$(\Delta\theta)_{min} = arctan(.5) = \epsilon_\theta.$$

Notons comme suit la suite des directions normales associées aux pixels du contour;

$$\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_{i-1}, \theta_i, \theta_{i+1}, \ldots, \theta_L, \theta_{L+1} = \theta_1.$$

A partir de ces valeurs d'angles, on calcule la différence centrée des directions normales en chaque pixel du contour en introduisant à chaque étape de calcul un seuillage *naturel*, en posant égale à zéro une différence d'angle de valeur ϵ_0. Comme résultat on obtiendra une fonction discrète de la dérivée centrée en fonction de la position des pixels dans la chaîne du contour. Cette fonction possède un nombre fini de maximums qui seront associés aux sommets d'un polynôme d'approximation. Ce polygone, calculé pour chaque cellule, aura comme orientation, celle donnée par les pixels du contour. Nous présentons ci-dessous un exemple de fonction (périodique) exprimant la dérivée de la normale en fonction des positions des pixels du contour d'une cellule d'un filet obtenue à l'aide de l'algorithme présenté ci-dessous.

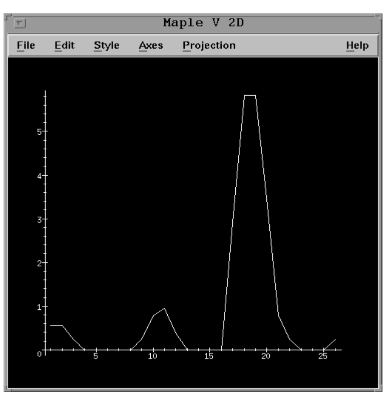

Figure 7

Dérivée de la normale en fonction des pixels de contour

Algorithme de polygonarisation.

• Calcul des angles des normales extérieures θ_i à chaque pixel P_i, $i = 2, \ldots, L+1$.

• Calcul des premières différences modulo 2π:

$$\Delta_1\theta_i = |\theta_i - \theta_{i-1}|, i = 2, \ldots, L+1$$

• Si $\Delta_1\theta_i = \epsilon_\theta$ on pose $\Delta_1\theta_i = 0$.

• Calcul des différences centrées modulo 2π:

$$\Delta_2\theta_i = \frac{1}{2}|\Delta_1\theta_{i+1} - \Delta_1\theta_i|, i = 1, \ldots, L$$

• Si $\Delta_2\theta_i = \epsilon_\theta$ on pose $\Delta_2\theta_i = 0$.

• Sélectionner les n sous-ensembles de pixels

$$\begin{aligned} Q_1 &= \{P_{1,1}, \ldots, P_{1,k_1}\}, \ldots, Q_l = \{P_{l,1}, \ldots, P_{l,k_l}\}, \\ & \ldots, Q_n = \{P_{n,1}, \ldots, P_{n,k_n}\} \end{aligned}$$

de telle façon que les indices des pixels des sous-ensembles discriminants vérifient;

$$\begin{aligned} &a) \quad \{l,j\} \in \{1, 2, \ldots, L+1\},\ l = 1, \ldots, n,\ j = 1, \ldots, k_l; \\ &b) \quad \{l,1\} \le \{l,k_l\},\ l = 1, \ldots, n; \\ &c) \quad \{l,k_l\} < \{l+1,1\},\ l = 1, \ldots, (n-1); \end{aligned}$$

et,

$$\Delta_2\theta_{l,j} \neq 0,\ l = 1, \ldots, n,\ j = 1, \ldots, k_l.$$

• Puisque la fonction $\Delta_2\theta$ est périodique sur l'ensemble des indices des pixels ordonnés du contour et de période égale à L alors si

$$P_{n,k_n} = P_{1,1},$$

alors les ensembles Q_1 et Q_n sont regroupés et les pixels sont réordonnés. Dans ce cas, on pose $n = n-1$ et,

$$Q_1 = \{P_{n,1}, \ldots, P_{n,k_n} = P_{1,1}, \ldots, P_{1,k_1}\}.$$

• Pour $l = 1, \ldots, n$ on pose

$$i_l = \max_{j=\{l,1\},\ldots,\{l,k_l\}} \Delta_2\theta_j.$$

• Le polygone orienté (antihoraire) approchant le contour de la cellule possède comme sommets la suite de pixels;

$$S = \{P_{i_1}, \ldots, P_{i_n}\}.$$

Remarque.

Si le nombre n de sommets du polygone approximant le contour vérifie $n < 3$, on élimine la première étape de seuillage et si à nouveau $n < 3$ alors on élimine la seconde étape de seuillage.

6 Approximation d'un filet d'hydropsyche.

Les algorithmes proposés dans cet article ont été appliqué à un filet d'hydropsyche (vue partielle) saisie à l'aide d'une caméra CCD couplée à un microscope muni d'une lentille de grossissement ($10\times$). L'image résultante a été binarisée et filtrée.

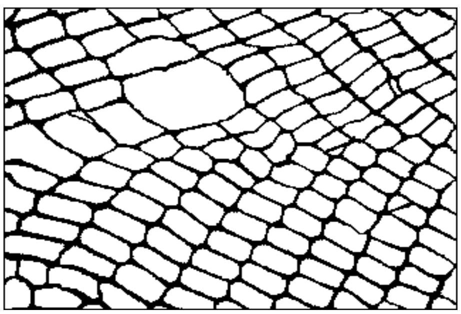

Figure 8

Filet d'hydropsyche binarisé

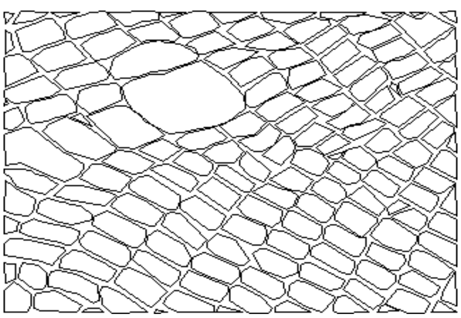

Figure 9

Filet d'hydropsyche polygonarisé

7 Travaux futurs.

La prochaine étape consistera à développer un algorithme de regroupement des sommets significatifs des polygones afin de construire une représentation vectorielle d'un filet à partir de sommets et d'un ensemble d'arêtes les reliant. Une anomalie observée des filets est l'épaisseur anormale des mailles, ce qui peut être mesuré à partir de l'image binaire initiale. Cependant, les autres anomalies telles que les croisements de mailles, l'orientation des mailles, une ligne médiane déformée (centre du filet)pourront être repérées à partir de la représentation vectorielle. Evidemment, un tel outil de reconnaissance automatique permettra l'analyse rapide de centaines de spécimens et l'analyse statistique des paramètres biologiques en regard des conditions environnementales. Finalement, le pré-traitement des images de filets de tricoptères doivent être améliorées afin d'éviter une étape de nettoyage manuel des filets, en l'occurence l'élimination des artéfacts.

References

[1] H. Schumacher. Untersuchungen zur Taxonomic. Biologie und Okologie einiger Köcherfliegenarten der Gattung *Hydropsyche* Pict. (Insecta, Trichoptera), *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, (55): 551–557, 1970.

[2] L. B.-M. Petersen and R. C. Petersen, Jr. Anomalies in hydropsyche capture nets from polluted streams. *Freshwater Biology*, (13): 185–191, 1983.

[3] J. M. Chasserry et A. Montanvert. Géométrie discrète en analyse d'images. *Hermès, Paris, 1991.*

[4] A. Chalifour, P. Bose and S. Beauchemin. Discrete Green's Theorem Revisited. *en preparation.*

Remerciements.

Le premier auteur désire remercier J. Stewart pour son support lors de l'ébauche des premiers résultats sur le théorème de Green. Les auteurs désirent dédié cet article à la mémoire de monsieur Robert Chalifour, décédé le 3 octobre 1997.