

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DE DIFFÉRENTS INDICATEURS BIOLOGIQUES CHEZ
L'ESTURGEON JAUNE (*ACIPENSER FULVESCENS*) DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

FRANÇOIS VEILLETTE

MARS 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

Ce travail découle de la nécessité de mieux connaître l'esturgeon jaune du Québec dans un contexte socio-économique où le statut de cette espèce prend de l'importance en tant que richesse naturelle et comme ressource économique. Cette recherche fait suite en partie aux travaux de Colin Rousseaux en 1995 et de Christian Doyon en 1998 et 1999 qui ont exploré diverses caractéristiques histologiques et biochimiques de l'espèce. Le présent travail constitue essentiellement une démarche exploratoire. La majorité des prélèvements et des analyses ainsi que l'ensemble des saisies de données et le traitement statistique furent effectués par l'auteur. La participation de nombreux collaborateurs fut essentielle et grandement appréciée. Je désire remercier les intervenants qui ont contribué au projet, soient : Huguette Massé, Jean Leclerc, Chantal Côté et Rémi Bacon du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), les pêcheurs Danielle Duranseau, Henri Duranseau, Gilbert Desmarais, Jamie Duquette, Gaston Racicot et Omer Leduc, Jean Gauthier, technicien de la faune pour le MRNF, les gens de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) Denis Flippe, Daniel Rivest et Luc Dubé, de l'Université Concordia Silvia Ruby et Catherine Dimacacos pour la formation pratique en histologie, Denis Laliberté du Ministère de l'environnement du Québec (MENV) pour les analyses de contaminants et Colin Rousseaux pour les diagnostics histologiques. Merci à mes codirecteurs Philip Spear de l'UQAM et Pierre Dumont du MRNF, aux membres de mon comité d'évaluation Béatrix Besner et Yves Prairie de l'UQAM ainsi qu'à mes correcteurs Marc Mingelbier du MRNF et André Dallaire du Centre québécois de la santé des animaux sauvages (CQSAS). Merci à mes parents qui m'ont encouragé et soutenu dans ces travaux. Merci à Caroline, Frédéric et Pierre pour leur aide sur le terrain.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
RÉSUMÉ.....	x
INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte de la recherche	1
1.2 Biologie de l'esturgeon jaune.....	2
1.3 Problématique.....	4
1.4 Objectifs et hypothèses.....	6
DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	7
2.1 Choix des stations.....	7
2.2 Collecte des échantillons.....	10
2.3 Indicateurs potentiels d'atteinte à la santé.....	12
2.3.1 Indice de condition.....	13
2.3.2 Indice intégré d'examen de santé	14
2.3.3 Indicateurs issus d'observations histologiques	16
2.3.4 Indicateurs issus d'analyses biochimiques.....	20
2.3.5 Pourcentage de splénocytes à l'état apoptotique.....	23
2.4 Autres analyses et relevés physiologiques	24
2.5 Schéma d'analyse et traitement statistique.....	25

RÉSULTATS	28
3.1 Caractéristiques biologiques des esturgeons échantillonnés.....	28
3.2 Contaminants dans la chair	31
3.3 Indicateurs biologiques	32
3.4 Effets confondants des caractéristiques physiologiques et du délai de traitement sur les différences entre les stations.....	36
3.5 Approche multivariée.....	40
3.5.1 Corrélations générales	40
3.5.2 Analyse discriminante des stations avec les descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé.	41
3.5.3 Examen de l'ensemble des indicateurs biologiques par l'analyse en composantes principales (ACP).	44
DISCUSSION	52
4.1 Variabilité biologique de l'échantillon.....	52
4.2 Pertinence de l'indice intégré d'examen de la santé	54
4.3 Potentiel des indicateurs à représenter la santé	56
4.4 Exploration de l'information par l'analyse multivariée	66
CONCLUSION	70
RÉFÉRENCES.....	71
APPENDICE A DÉTAILS DES MÉTHODOLOGIES HISTOLOGIQUES.....	78
APPENDICE B TEST W DE SHAPIRO-WILK DE LA NORMALITÉ DES DISTRIBUTIONS DES VARIABLES	81

APPENDICE C DESCRIPTEURS CONSTITUANTS L'INDICE INTÉGRÉ D'EXAMEN DE LA SANTÉ.....	82
APPENDICE D PHOTOGRAPHIE D'ANOMALIES OBSERVÉES SUR LE FOIE ET LA RATE D'ESTURGEONS JAUNES	83
APPENDICE E MATRICE DE CORRÉLATION GÉNÉRALE DE L'ENSEMBLE DES VARIABLES.	86
APPENDICE F ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DE CHAQUE STATION	93
APPENDICE G MICROGRAPHIES DE FOIE D'ESTURGEON JAUNE	96
APPENDICE H DISTANCES DE MAHALANOBIS COMPLÉMENTAIRES	97
APPENDICE I DISTRIBUTIONS DE FRÉQUENCES DE L'INDICE HÉPATOSOMATIQUE	98
APPENDICE J DISTRIBUTION DE FRÉQUENCES DE LA COMPOSANTE PRINCIPALE 1.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1	Esturgeon jaune <i>Acipenser fulvescens</i> (source : MRNF)..... 3
2.1	Localisation des stations d'échantillonnage. Coordonnées des stations (NAD27 Canada) : Lac Saint-Louis = latitude 45° 24', longitude 73° 48'; Archipel du lac Saint-Pierre = latitude 46° 05', longitude 73° 04'; Lac Berthelot = latitude 48° 26', longitude 76° 14' 8
2.2	Coupes histologiques de foie d'esturgeon jaune colorées à l'hématoxyline et l'éosine (H&E). Échelle = 10 µm. Attribution des stades de gouttelettes lipidiques : Absence dans le champ microscopique = 1 ; 1 à 20% de la surface = 2; 20 à 30% = 3 ; plus de 30% = 4. 19
3.1	Distribution de fréquence du nombre d'esturgeons en fonction des stades de développement des gonades selon les sexes pour les trois stations. 30
3.2	Analyse discriminante des stations pour les descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé. Dispersion des individus dans le plan formé par les axes canoniques. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis..... 43
3.3	Analyse en composantes principales de l'ensemble de l'échantillon. Dispersion des esturgeons dans l'espace multivarié selon les trois axes principaux. En X = principale 1, en Y = principale 2 et en Z = principale 3. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis. 46
3.4	Distances de Mahalanobis. Un point correspond à un individu. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis..... 48
3.5	Corrélation canonique. X canonique = « indice hépatosomatique » et Y canonique = « présence de gouttelette lipidique + pourcentage de lipides + apparence des sinusoides ». Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis..... 49

- 3.6 Régression linéaire illustrant la relation entre l'indicateur « indice hépatosomatique » et la composante principale 1 issue de l'ACP présentée au tableau 3.4. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis. La ligne pleine indique la relation et les lignes discontinues correspondent aux intervalles de confiance de 95%. 51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Récapitulatif des caractéristiques des deux régions concernées	9
2.2 Résumé des prélèvements effectués sur les esturgeons	11
2.3 Indicateurs retenus pour évaluer la santé des esturgeons jaunes.....	13
2.4 Cotes attribuées aux descripteurs pour le calcul de l'indice intégré d'examen de la santé	15
2.5 Cotes attribuées aux observations effectuées sur les lames microscopiques d'échantillons de foie colorées à l'hématoxyline et à l'éosine (H&E).....	18
2.6 Schéma d'analyse statistique.....	27
3.1 Caractéristiques physiologiques des esturgeons jaunes. Moyennes, écart-types, minima et maxima.	29
3.2 Concentrations de divers contaminants mesurés dans la chair d'esturgeons jaunes	32
3.3 Analyse de l'ensemble des indicateurs de santé. Moyennes, écart-types, minima et maxima.....	34
3.4 Résumé des significations statistiques* des effets confondants sur les différences entre les trois stations pour chacun des indicateurs.....	38
3.5 Résumé des corrélations significatives* entre les indicateurs.....	41
3.6 Analyse discriminante des stations élaborée avec les descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé.	42
3.7 Résumé de l'analyse en composantes principales élaborée avec l'ensemble des indicateurs	45

3.8 Résumé de l'analyse en composantes principales élaborée avec trois
indicateurs biochimiques..... 50

RÉSUMÉ

Au Québec, l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*) fait l'objet d'une pêche commerciale importante malgré le fait qu'à l'échelle mondiale la plupart des espèces d'esturgeons sont menacées de disparition. Si les données dont disposent les intervenants dans la gestion de cette ressource les informent sur l'état des stocks, en terme de quantité, elles ne les renseignent pas sur la qualité des individus pêchés. Des doutes subsistent sur le potentiel réel de régénération et de subsistance à long terme de cette espèce. Ce travail vise à élargir nos connaissances sur l'esturgeon jaune du Québec, une espèce de poissons qui affiche des traits biologiques particuliers dont une forte longévité et une reproduction tardive à longue périodicité. L'hypothèse principale de la recherche est que certains indicateurs biologiques pourraient signaler une atteinte potentielle à la santé des esturgeons, ce qui pourrait conduire à un examen plus approfondi des phénomènes détectés. Des relevés physiologiques (âge, sexe, indices somatiques, relevés d'irrégularités morpho-pathologiques) et des analyses en laboratoire (concentrations de lipides, protéines et glycogène hépatiques, histologie du foie, cycle cellulaire des splénocytes) ont été effectuées sur des esturgeons jaunes (n=122) provenant de trois stations d'échantillonnage. Des analyses de contaminants environnementaux furent également effectuées (mercure, biphényles polychlorés (BPC), dioxines, furanes, éthers de diphényles polybrominés (PBDE), biphényles polybrominés (BPB)). Deux stations se trouvent dans le fleuve Saint-Laurent (lac Saint-Louis et archipel du lac Saint-Pierre), et la troisième se trouve en Abitibi (lac Berthelot). Un indice intégré d'examen de la santé, traité tel qu'il le fut dans le présent travail, ne constitue pas un signal préventif adéquat. Les résultats concernant les lipides hépatiques totaux ainsi que certaines observations histologiques indiquent que le suivi de l'indice hépatosomatique constitue un signal préventif d'atteinte potentielle à la santé. Les fluctuations spatiales et temporelles de la proportion d'individus présentant une valeur supérieure à 3.15 pour cet indice constitue un outil de suivi.

Mots clés : Poisson; Indicateurs biologiques; Histologie; Contaminants lipophiles; Esturgeon jaune;

INTRODUCTION

1.1 Contexte de la recherche

Le Québec est reconnu pour ses nombreux plans d'eau et leur diversité écologique. On dénombre au moins cent onze espèces de poissons, appartenant à 24 familles différentes, qui fréquentent les eaux douces du Québec à un moment ou à un autre de leur cycle vital (Bernatchez et Giroux, 1991). Ce réseau hydrographique, constitué de nombreux lacs et rivières, se divise en deux bassins versants principaux. Le premier correspond à celui de la baie d'Hudson, dont les eaux coulent dans des espaces relativement peu habités et se déversent dans la baie d'Hudson. Le second correspond au bassin hydrographique du fleuve Saint-Laurent, qui regroupe un ensemble de cours d'eau le long desquels furent construites plusieurs grandes villes nord-américaines.

Au Québec, la pêche commerciale s'est développée depuis plus d'un siècle. Aujourd'hui, les pêcheries en eau douce ciblent une dizaine d'espèces, dont l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*). Ces pêches sont réglementées afin d'assurer la pérennité de ces ressources naturelles. Cette gestion, qui relève du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), repose sur l'examen des données de débarquement, sur une caractérisation périodique de la récolte commerciale, ainsi que sur le suivi périodique du recrutement, obtenu par un échantillonnage bisannuel du segment juvénile de la population. L'émission des permis de pêche et la gestion des quotas sont effectuées par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) à partir d'un plan produit annuellement par le MRNF. En 2004, plus de 70 des pêcheurs commerciaux d'esturgeons jaunes pêchaient sur le fleuve Saint-Laurent. On retrouvait deux pêcheurs sur la rivière des

Outaouais et deux en Abiti-Témiscamingue. En tant qu'espèce d'intérêt commercial, l'esturgeon jaune occupait le troisième rang en importance pendant les années 1990. On enregistrait à cette époque des captures annuelles moyennes de 200 000 kg, pour une valeur annuelle au débarquement de plus de 500 000 \$ (Fortin *et al.*, 1992). En 2003, la pêche à l'esturgeon jaune occupait le 4^e rang en importance, avec une récolte de 85 000 kg, pour une valeur d'environ 300 000 \$ (MAPAQ, 2003). La plus grande partie de ces prises sont destinées au marché étasunien, où les grossistes distribuent en vrac les carcasses dépiautées et congelées. Dans les premières années de la pêche commerciale, presque toutes les parties de l'esturgeon jaune trouvaient des débouchés commerciaux. Mais, de nos jours, seule la chair et parfois les œufs sont récoltés. A maturité, ces derniers constituent un caviar de bonne qualité, qui est vendu principalement au Québec. De façon générale, l'esturgeon jaune est peu connu des Québécois.

1.2 Biologie de l'esturgeon jaune

L'esturgeon jaune est un poisson dulçaquicole de la famille des Acipenséridés (fig. 1.1). Cette famille très primitive comprend 25 espèces présentes en Amérique du Nord, en Europe et en Asie. On reconnaît les esturgeons à leur aspect unique. Ils présentent un profil archaïque avec une peau parsemée de plaques osseuses. Ils possèdent un long museau muni de quatre barbillons et une bouche ventrale protractile. On trouve deux espèces d'esturgeons au Québec, l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*) et l'esturgeon noir (*Acipenser oxirius*), une espèce anadrome. L'esturgeon jaune se distingue de l'esturgeon noir par son museau plus court et par l'absence des plaques osseuses entre la nageoire dorsale et la queue. L'aire de répartition de l'esturgeon jaune comprend principalement les eaux douces du fleuve Saint-Laurent, jusqu'à la limite des eaux saumâtres, les lacs et rivières qui s'y déversent ainsi que plusieurs des fleuves du bassin versant de la Baie James. Son

poids moyen varie généralement entre 5 et 35 kg et sa taille entre 90 et 140 cm. L'esturgeon jaune atteint une longévité remarquable, soit près de 100 ans au Québec. Il se nourrit d'organismes benthiques tels que mollusques, crustacés, larves d'insectes et invertébrés (Bernatchez et Giroux, 1991; Nilo *et al.*, 2006). L'esturgeon jaune fraie au printemps dans les rivières rocailleuses. La période moyenne entre deux fraies est de l'ordre de quatre à six ans et pourrait atteindre neuf ans pour les femelles du Lac Saint-Pierre. Il atteint la maturité sexuelle tardivement, en moyenne à 20 ans pour les mâles et à près de 28 ans pour les femelles (Fortin *et al.*, 2002). On distingue au Québec trois géotypes d'esturgeons jaunes distribués dans les plans d'eau des bassins de drainage du fleuve Saint-Laurent et de la Baie d'Hudson (Guénette *et al.*, 1993).



Figure 1.1 : Esturgeon jaune *Acipenser fulvescens* (source : MRNF)

1.3 Problématique

Mondialement, la plupart des espèces d'esturgeons sont menacées de disparition. Au Québec, la situation de l'esturgeon jaune du fleuve Saint-Laurent est jugée préoccupante en raison de sa fragilité à l'exploitation. En 1987, un comité scientifique conjoint formé par le MAPAQ et le Ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche (MLCP) établissait un constat de surexploitation du stock d'esturgeon jaune du fleuve Saint-Laurent. Au milieu des années quatre-vingt-dix, les intervenants en la matière ont mentionné leurs inquiétudes face aux populations ichthyologiques en général. Six des espèces commerciales, y compris l'esturgeon jaune, étaient susceptibles d'être considérées comme menacées ou vulnérables (Beaulieu et Huot, 1993). De 1994 à 1999, plusieurs études vinrent renforcer ce diagnostic (Dumont *et al.*, 2000). L'esturgeon jaune s'est vu attribuer les rangs S3 (rare ou peu commun dans la province) et G3 (rare ou peu commun mondialement) (Moisan et Laflamme, 1999). Les principaux obstacles à sa survie sont la surexploitation par la pêche légale ou illégale ainsi que la fragmentation et les perturbations de l'habitat, particulièrement au niveau des frayères (Dumont *et al.*, 2006). Depuis vingt-cinq ans, de nombreux efforts sont déployés au Québec afin de parvenir à une gestion durable des populations d'esturgeons et pour protéger et restaurer ses habitats. Récemment, les conclusions du plan de gestion de l'esturgeon jaune du fleuve Saint-Laurent du MRNF soulignaient l'importance d'adopter une démarche dynamique et conservatrice dans la gestion de cette richesse naturelle.

A ce jour, ce que l'on sait de l'esturgeon jaune du Québec est obtenu via un suivi de la dynamique des populations. Les données de pêcheries, les études de migration et le suivi de la force des cohortes nous renseignent en ce sens. Cependant, en considérant la longévité de ces organismes et le fait qu'ils évoluent dans un environnement contaminé depuis de nombreuses années (le fleuve Saint-Laurent), il apparaît adéquat de se questionner sur l'état de santé de ces poissons. Les informations dont nous

disposons à ce jour nous renseignent sur l'état des stocks en termes de quantité, mais ne nous informent pas sur la qualité des esturgeons pêchés. Les travaux de Doyon *et al.* (1998) sur l'esturgeon jaune du Québec, présentés plus loin, font mention des effets néfastes des contaminants environnementaux sur le potentiel de reproduction de cette espèce. L'esturgeon se nourrit d'invertébrés benthiques, ce qui maximise son exposition aux contaminants présents dans les sédiments. Il est également considéré comme un poisson gras (Ruelle et Henry, 1992). Ces caractéristiques, en plus d'une taille importante et d'une forte longévité, le prédisposent à accumuler des contaminants lipophiles tels que les biphényles polychlorés (BPC) et d'autres contaminants organiques. Des doutes subsistent sur le potentiel réel de régénération et de subsistance à long terme de cette espèce qui fait pourtant l'objet d'une pêche commerciale depuis plus de cent ans.

Des recherches ont démontré que des esturgeons capturés et marqués dans les rivières Des Prairies et L'Assomption, toutes deux se trouvant entre les stations lac Saint-Louis et archipel du lac Saint-Pierre de la présente recherche, furent recapturés dans l'ensemble du fleuve entre ces stations (Fortin *et al.*, 1993). Ainsi, par sa longévité et sa présence ubiquiste dans les eaux du fleuve Saint-Laurent, l'esturgeon jaune peut être considéré comme un intégrateur temporel (longue exposition) et spatial (vaste territoire) de l'environnement dans lequel il évolue. À ce titre, l'examen de la condition physique de l'esturgeon jaune, sous la forme d'un bilan de santé de l'espèce, constitue un atout dans une démarche de protection et de conservation de l'esturgeon jaune et d'autres espèces évoluant dans cet écosystème. Si au sens large, on peut définir la santé comme un état de bien-être complet, en ce qui concerne les esturgeons, on pourrait simplifier cela en une bonne aptitude à vivre longtemps et à se reproduire adéquatement. Et ce faisant, contribuer à la biomasse de l'espèce et potentiellement soutenir l'exploitation commerciale. Cet état exige d'abord la satisfaction des besoins fondamentaux des individus, et doit également inclure une

capacité d'adaptation à un environnement changeant, tel qu'il en est pour ce qui concerne le fleuve Saint-Laurent.

1.4 Objectifs et hypothèses

L'objectif de ce travail est de vérifier si un indicateur ou une combinaison d'indicateurs biologiques, mesurables dans le cadre du suivi périodique des captures de la pêche commerciale, peut constituer un signal préventif d'atteinte potentielle à la santé des esturgeons. Ces indicateurs, quantitatifs et qualitatifs, se divisent en trois niveaux d'examen : morphologique, histologique et biochimique. Par une approche écotoxicologique, cette recherche exploratoire vise également à élargir nos connaissances de l'esturgeon jaune du Québec, une espèce qui affiche une biologie particulière.

Dans une perspective de protection et de gestion de cette ressource, l'obtention d'un tel signal préventif constituerait un apport complémentaire significatif au suivi de cette espèce. Cette information, sous la forme d'un indice intégrateur, pourrait entre autres mettre en évidence les effets de contaminants environnementaux dont les symptômes dans le milieu naturel ne se manifestent chez les organismes vivants que suite à de longues périodes d'exposition (Adams, 1990). En l'occurrence, il est reconnu que les poissons du fleuve Saint-Laurent sont exposés de façon chronique à de faibles concentrations de divers contaminants (Centre Saint-Laurent, 1996). L'hypothèse principale de la recherche est que certains indicateurs biologiques (détaillés plus loin) pourraient signaler une atteinte potentielle à la santé des esturgeons, ce qui pourrait conduire à un examen plus approfondi des phénomènes détectés.

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

2.1 Choix des stations

Le choix des stations d'échantillonnage fut motivé par la nécessité de couvrir une grande étendue de la variabilité biologique que présente l'esturgeon jaune au Québec. Dans la répartition des stations, nous avons cherché à couvrir un gradient latitudinal et un gradient d'exposition aux contaminants environnementaux, maximisant ainsi les chances d'obtenir des individus manifestant les caractéristiques morphologiques et physiologiques les plus diverses telles qu'elles apparaissent dans les captures commerciales (mâles et femelles, petits et grands, jeunes et vieux, sains et contaminés). Initialement, le projet comprenait cinq stations d'échantillonnage : trois dans le fleuve Saint-Laurent, une dans la rivière des Outaouais et une dans le bassin versant de la rivière Nottaway, un affluent de la Baie James, en Abitibi. En raison de contraintes temporelles (saison de pêche fixe) et de la faible abondance de captures de taille légale dans certains secteurs, seulement trois stations furent échantillonnées avec succès, soit deux dans le fleuve Saint-Laurent et une en Abitibi. La première station d'échantillonnage sur le Saint-Laurent correspond au lac Saint-Louis, en amont de la ville de Montréal (fig. 2.1). La seconde station est l'archipel du lac Saint-Pierre, à 80 km en aval de Montréal. En Abitibi, la station échantillonnée correspond au lac Berthelot.

Les deux régions concernées se situent dans des bassins hydrographiques distincts et affichent des conditions climatiques différentes. Tandis que le fleuve Saint-Laurent constitue un milieu de vie ayant un potentiel de production et de biodiversité plus élevé associé à un climat doux dans une région sédimentaire, le lac Berthelot situé sur le bouclier précambrien présente une densité ichtyologique et une productivité plus

faible. Conjointement aux écarts démographiques, les taux d'industrialisation de ces régions suggèrent des différences quant aux apports anthropiques de contaminants environnementaux (tabl. 2.1). Le fleuve Saint-Laurent draine une région fortement développée au niveau urbain, industriel et agricole alors que le lac Berthelot se situe en milieu forestier.

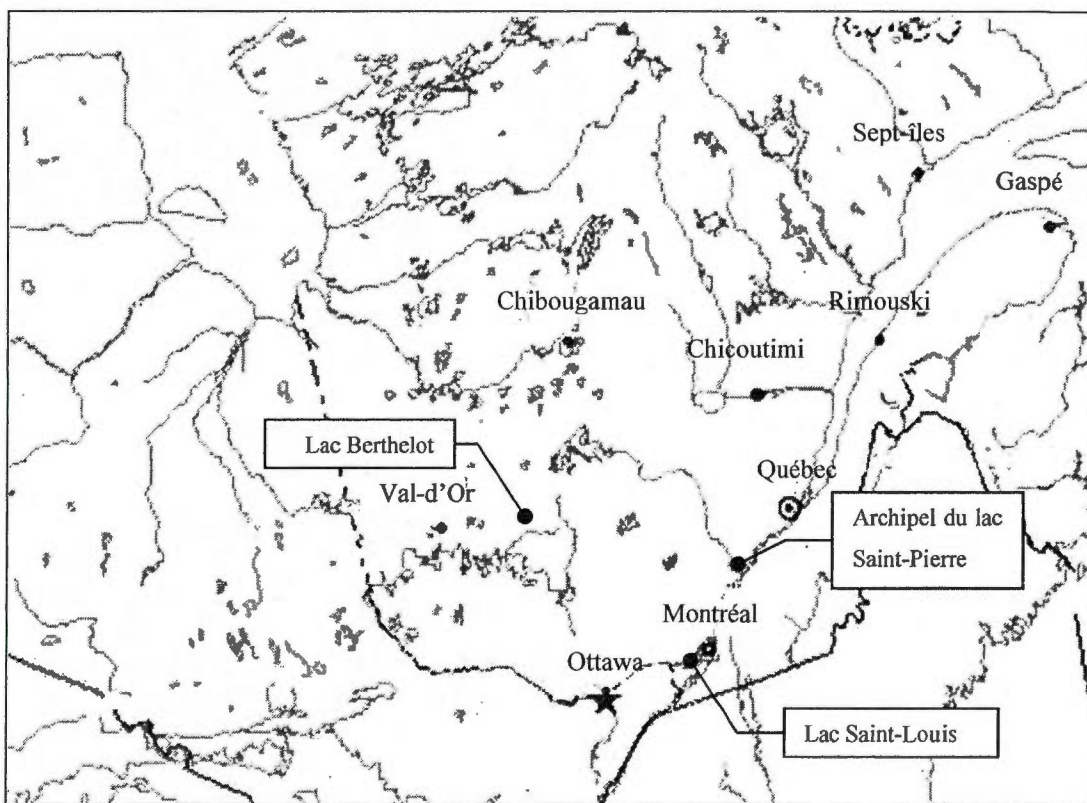


Figure 2.1 : Localisation des stations d'échantillonnage. Coordonnées des stations (NAD27 Canada) : Lac Saint-Louis = latitude $45^{\circ} 24'$, longitude $73^{\circ} 48'$; Archipel du lac Saint-Pierre = latitude $46^{\circ} 05'$, longitude $73^{\circ} 04'$; Lac Berthelot = latitude $48^{\circ} 26'$, longitude $76^{\circ} 14'$.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des caractéristiques des deux régions concernées

Caractéristiques	Grand Montréal	Abitibi
Population*	1 873 813	24 354
Industries*	4843	188
Site de rejet industriel **	121	11
Degrés jours au-dessus de 5 °C **	3500	2500
Pourcentage moyen annuel d'ensoleillement **	40	35
Précipitations moyennes de la saison de végétation (mm) **	381	305
Zone de rusticité **	5a	2a

* Institut de la statistique du Québec

** Ressources Naturelles Canada

Les deux régions présentent des conditions environnementales très différentes. La pollution industrielle élevée de la région de Montréal engendre une pression toxicologique plus intense et plus diversifiée sur les milieux aquatiques. D'autres pressions, dont la pêche commerciale, la dégradation des sites de reproduction et le braconnage, s'exercent plus fortement sur les populations du fleuve. Également, ces pressions s'exercent sur l'écosystème du fleuve Saint-Laurent depuis plus longtemps que celles pouvant affecter l'Abitibi (COSEWIC, 2006). En contrepartie, le climat plus doux de la région du fleuve Saint-Laurent engendre une productivité plus élevée dans les milieux naturels.

2.2 Collecte des échantillons

Les esturgeons furent capturés entre le 28 juin et le 13 juillet 2004 pour les stations du fleuve Saint-Laurent et entre le 18 et le 29 septembre 2004 pour la station du lac Berthelot. L'échantillonnage fut effectué en collaboration avec les pêcheurs commerciaux et les équipes techniques du MRNF dans le cadre d'un suivi périodique des caractéristiques de la récolte commerciale. Les esturgeons pêchés étaient tous vivants au moment de la levée des filets. Ils furent euthanasiés par décapitation. Tous étaient destinés à être vendus sur le marché, ce qui a permis un examen poussé sur un échantillon important. Dans toutes les stations, les esturgeons furent pêchés de façon conforme aux règlements de la pêche commerciale à l'aide de filets maillants dont les mailles étirées mesurent 209 mm. Les esturgeons furent récoltés par les pêcheurs commerciaux et seul le critère de la longueur légale (environ 800 mm du rostre à la fourche) fut retenu dans le choix des spécimens. Les méthodes et techniques utilisées pour examiner la santé des individus furent limitées par des considérations pratiques lors de la pêche. Les paramètres sanguins ne purent être mesurés et les analyses furent concentrées sur des paramètres considérés relativement stables dans le temps.

Au total, 122 spécimens furent échantillonnés (environ quarante à chaque station). Suite à la levée des filets, les esturgeons furent examinés au niveau de l'apparence externe puis des viscères. Le poids total fut noté avec une précision de ± 125 g. La longueur totale fut notée avec une précision de ± 5 mm. Les particularités morphologiques furent notées. Elles correspondent entre autres aux malformations, traces d'érosion cutanée et de plaies, lorsque vraisemblablement non provoquées par l'engin de pêche (sect. 2.3). Une attention particulière fut portée à l'examen des yeux dans lesquels on retrouve généralement des parasites. Au niveau des organes internes, les anomalies morphologiques telles les lésions et les œdèmes furent notées. Un examen de l'intérieur du système digestif a permis de relever la présence de parasites intestinaux. Le poids du foie, de la rate, des gonades et du tube digestif furent notés

avec une précision de ± 5 g. Pour d'éventuelles analyses en laboratoire, de nombreux prélèvements furent effectués (tabl. 2.2). Les organes internes furent récoltés au moment du dépiautage et immédiatement mis sur glace. Par la suite, les échantillons de tissus furent traités, certains congelés dans l'azote liquide, d'autre fixés dans une solution de formaldéhyde ou d'alcool. Le temps écoulé entre le moment de la mort et les prélèvements des tissus fut noté pour chaque esturgeon. Cet intervalle est nommé délai de traitement dans la suite du présent travail. Cette démarche vise à évaluer les effets négatifs de la dégradation des tissus par autolyse.

Tableau 2.2 : Résumé des prélèvements effectués sur les esturgeons

Organe	Prélèvement* et conservation	Analyses
Foie	Six échantillons de 1 g congelés séparément dans l'azote liquide et conservés à -80° C	Mesure des lipides, de l'eau, des protéines et du glycogène
Foie	Un échantillon de 1 g fixé et conservé dans 20 ml d'une solution de formaldéhyde 10% non tamponné	Histologie
Rate	Un échantillon de 0,25 g trituré dans une solution d'éthanol 70%	Évaluation du pourcentage de splénocytes à l'état apoptotique par cytofluorométrie
Gonades	Un échantillon de 5 g fixé et conservé dans 20 ml d'une solution de formaldéhyde 10% non tamponné	Détermination du sexe et du stade de développement des gonades
Chair	Un échantillon de 1 g congelé à -20° C	Mesure des contaminants environnementaux
Rayon de nageoire	Rayons de chacune des nageoires pectorales, congelés à -20° C	Détermination de l'âge

* Tous les échantillons furent prélevés dans la même partie de l'organe chez tous les individus.

2.3 Indicateurs potentiels d'atteinte à la santé

Il n'existe pas à ce jour d'indice intégré de la santé des esturgeons dans les milieux naturels. Dans cette perspective, l'examen de l'information obtenue dans les deux régions investiguées (fleuve Saint-Laurent et Abitibi) pourra mener à l'identification d'indicateurs d'atteinte potentielle à la santé. Le présent travail ne vise pas l'analyse chez l'esturgeon jaune des biomarqueurs classiques reconnus. Ces travaux s'inscrivent tout de même à la suite des recherches de Doyon *et al.* (1998, 1999) qui ont mesuré les rétinoïdes hépatiques (vitamine A, co-facteurs essentiels à la reproduction et au développement) et l'induction de EROD (éthoxyrésorufine-*o*-dééthylase, une enzyme de détoxification) en tant que biomarqueur chez des esturgeons jaunes du fleuve Saint-Laurent et de l'Abitibi. Ils constatèrent une diminution des rétinoïdes stockés au niveau du foie des poissons du fleuve. Selon ces auteurs, cette diminution se compare aux effets d'une exposition aux BPC vingt fois supérieure à la normale dans le fleuve Saint-Laurent. Parallèlement, Rousseaux *et al.* (1995) constatèrent une plus forte induction de l'enzyme de détoxification EROD ainsi qu'une plus forte prévalence d'irrégularités potentiellement pathologiques dans le foie.

Tel qu'indiqué dans l'hypothèse de recherche, les mesures physiologiques et les résultats d'analyses effectuées sur les poissons de la présente étude seront examinés afin d'évaluer leur potentiel à indiquer la santé. Nous utiliserons le terme indicateur pour désigner tous types de mesures effectuées sur un spécimen, qu'il s'agisse d'informations simples comme le poids d'un organe ou d'informations issues d'analyses effectuées en laboratoire. Le tableau 2.3 présente un résumé des indicateurs choisis afin d'évaluer l'état de santé de ces poissons. Les sections suivantes présentent ces indicateurs de façon plus détaillée.

Tableau 2.3 : Indicateurs retenus pour évaluer la santé des esturgeons jaunes.

Indice de condition K de Fulton : $K = (\text{Poids}_{\text{total}} (\text{g}) / \text{Longueur}_{\text{totale}}^3 (\text{cm})) * 100$
Indice d'atteinte de santé intégré construit à partir des relevés d'anomalies morphologiques et pathologiques (Adams <i>et al.</i> 1993, détails à la section 2.3.2)
Indices somatiques des organes : foie, rate, système digestif et gonades (poids organe / poids total * 100)
Résultats quantifiés d'examen visuel de coupes histologiques du foie (détails à la section 2.3.3)
Concentrations hépatiques de glycogène, lipides, eau et protéines (détails à la section 2.3.4)
Pourcentage de splénocytes à l'état apoptotique (détails à la section 2.3.5)

2.3.1 Indice de condition

L'indice de condition reflète le statut nutritionnel ou le « bien-être » d'un poisson et est utilisé pour évaluer la croissance par rapport à des standards attendus (Schreck et Moyle, 1990). Cet indice est entre autres employé dans des études d'effets des agents de stress. Il est admis qu'une diminution de l'indice de condition peut être associée aux effets négatifs des conditions environnementales (Goede et Barton, 1990). Un indice de condition peu élevé peut être révélateur d'une faible disponibilité des ressources alimentaires ou de dysfonctions métaboliques.

2.3.2 Indice intégré d'examen de santé

Adams *et al.* (1993 et 1994) ont développé un indice intégré d'évaluation de la santé des poissons basé sur la compilation de plusieurs descripteurs. Cette approche permet de combiner divers types d'informations telles les anomalies morpho-pathologiques, les paramètres hématologiques et les enzymes de détoxification. L'intégration de l'information produit ce qu'Adams *et al.* ont nommé l'indice d'examen de santé (*Health Assessment Index*). Cet indice intégré constitue une valeur numérique obtenue à partir d'une compilation mathématique de l'information relevée chez les spécimens. Il permet des comparaisons statistiques entre différents échantillons et peut être utilisé en analyse multivariée afin d'évaluer de façon intégrée la réponse d'une espèce face aux stress environnementaux (Adams *et al.*, 1994, 1996, 1999; Ham *et al.*, 1997; Galloway, 2004). L'indice intégré fut utilisé pour des esturgeons blancs (*Acipenser transmontanus*) dans la région du Pacifique (É.U.) afin d'évaluer la prévalence de malformations (Burner *et al.*, 2002).

L'approche développée par Adams et ses collaborateurs fut adaptée au présent travail en excluant les paramètres sanguins ainsi que les enzymes de détoxification en raison des contraintes temporelles mentionnées précédemment. Le but visé était d'obtenir, pour l'esturgeon jaune, une conclusion rapide sur son état de santé à partir d'observations simples. L'indice intégré d'examen de la santé utilisé dans notre étude est construit à partir des descripteurs suggérés par Adams *et al.* (1993) qui peuvent s'appliquer à l'esturgeon (tabl. 2.4). Pour un descripteur, plus la cote est élevée, plus la sévérité de l'atteinte potentielle est considérée élevée. L'état normal de l'observation prend une valeur « 0 » (l'absence de parasite oculaire par exemple), tandis que le niveau maximum prend une valeur de « 2 » (parasites dans les deux yeux). Des pondérations différentes furent attribuées selon les organes. Ainsi, une anomalie du foie, du moment qu'elle est observable lors de l'examen visuel macroscopique et indépendamment de sa nature, se voit attribuer la valeur « 4 », tel

que le suggèrent Adams *et al* (1993). Les anomalies de la rate furent comptabilisées selon une échelle progressive. Certaines fonctions hématopoïétiques de la rate sont remplies par les reins (Heath, 1995) et ceux-ci ne purent être prélevés car ils sont détruits lors du dépiautage.

Tableau 2.4 : Cotes attribuées aux descripteurs pour le calcul de l'indice intégré d'examen de la santé

Descripteurs	Cotes
Parasites oculaires (douves)	Sans parasites = 0 1 œil parasité = 1 2 yeux parasités = 2
Parasites intestinaux (nématodes)	Sans parasites = 0 Présence de parasites = 1
Parasites externes (sangsues, lamproies)	Sans parasites = 0 Présence de parasites = 1
Malformations, érosions et déformation des nageoires, déviation du rostre, décalage de la position des yeux.	Esturgeon sans défauts apparents = 0 Chaque anomalie relevée = 1, cumulatif
Irrégularités grossières du foie (excroissance, déformation)	Foie d'apparence saine = 0 Présence d'anomalie = 4 systématiquement
Irrégularités grossières de la rate (taches rondes décolorées)	Rate d'apparence saine = 0 1 à 5 taches, diamètre < 2 mm = 1 1 à 5 taches, diamètre < 5 mm = 2 plus de 5 taches, diamètre < 10 mm = 3 plus de 5 taches, diamètre > 10 mm = 4
Fusion d'organes (foie et rate)	Aucune fusion apparente = 0 Fusion apparente = 1 indépendamment de l'étendue

La sommation des cotes attribuées à un individu constitue son indice intégré de santé. Par exemple, un spécimen chez qui furent observés des parasites dans les deux yeux en plus de déformations aux deux nageoires pectorales obtiendra une valeur de 4 pour son indice de santé. Si l'on avait observé en plus une fusion apparente du foie et de la rate, ce poisson aurait reçu la valeur de 5. Selon Adams *et al.* (1993) les indices élevés au sein d'un groupe d'esturgeon peuvent révéler une moindre condition de santé.

2.3.3 Indicateurs issus d'observations histologiques

L'histologie du foie permet un diagnostic d'une pertinence reconnue (Hinton et Laurén, 1990; Haschek *et al.*, 2002). Chez les poissons, cette approche constitue un outil efficace capable de mettre en évidence de façon sensible et sélective les effets sous-létaux des contaminants sur le biote aquatique (Schwaiger *et al.*, 1997; Arellano *et al.*, 1998). Selon ces derniers, les caractéristiques histologiques des organes, dont le foie, peuvent indiquer la condition de santé et constituent des indicateurs qui intègrent temporellement les impacts de pressions endogènes et exogènes.

La préparation des tissus fut effectuée selon un protocole standard. Sur le terrain, les échantillons de foie furent d'abord fixés et conservés dans une solution de formaldéhyde 10% non tamponné. Au moment du traitement, des cubes de 3 mm de côté furent prélevés à même les échantillons fixés sur le terrain. Ces morceaux furent déshydratés dans l'alcool et inclus dans des blocs de paraffine à l'aide d'un système d'inclusion automatisé. Les coupes furent effectuées avec un microtome et disposées sur des lames microscopiques standard. Dans un premier temps, des coupes histologiques de 9 μm d'épaisseur furent colorées à l'hématoxyline et à l'éosine (H&E) selon un protocole standard (Junquiera *et al.*, 1992). Les détails méthodologiques des colorations sont présentés dans l'appendice A. Pour confirmer

les observations effectuées sur les coupes colorées H&E, quelques coupes furent colorées selon d'autres techniques. Des coupes de onze échantillons furent traitées avec la technique du *Oil red O* servant à colorer spécifiquement les lipides. Ces échantillons frais non fixés furent coupés à 10 μm d'épaisseur à l'aide d'un cryotome à une température de -20°C . Quinze échantillons coupés à 5 μm d'épaisseur furent colorés au trichrome de Masson, lequel constitue une coloration différentielle à trois couleurs permettant de visualiser le fibrinogène. Seize autres coupes de 5 μm furent colorées selon la technique utilisant l'acide per-iodique et le réactif de Schiff (PAS) afin de mettre en évidence le glycogène.

L'examen des coupes histologiques fut effectué par l'auteur, sans que celui-ci ne connaisse la provenance des échantillons. Cet examen fut effectué à l'aide d'un microscope optique standard de marque Wild®. Les résultats de l'examen des colorations *Oil red O* (lipides), PAS (glycogène) et trichrome (fibrinogène) ne sont pas présentés en détail. Ces démarches servirent à confirmer les observations effectuées sur les lames colorées H&E. Les indicateurs histologiques retenus sont : présence de gouttelettes lipidiques, présence d'agrégats de mélanophages, présence d'agrégats de lymphocytes, présence d'hétérophiles, présence de lymphocytes libres, apparence des sinusoides et apparence d'autolyse tissulaire grossière. Ces indicateurs histologiques furent évalués de façon semi-quantitative selon une échelle de 1 à 4, correspondant à l'intensité du phénomène observé. Le tableau 2.5 présente les cotes attribuées aux observations effectuées sur les lames microscopiques.

Tableau 2.5 : Cotes attribuées aux observations effectuées sur les lames microscopiques d'échantillons de foie colorées à l'hématoxyline et à l'éosine (H&E)

Indicateurs histologiques	Attribution des stades
Gouttelettes lipidiques	Absence dans le champ microscopique = 1 ; 1 à 20% de la surface = 2; 20 à 30% = 3 ; plus de 30% = 4
Agrégats de mélanophages	Absence dans le champ microscopique = 1 ; 1 à 20% de la surface = 2; 20 à 30% = 3 ; plus de 30% = 4
Agrégats de lymphocytes	Absence dans le champ microscopique = 1 ; 1 à 20% de la surface = 2; 20 à 30% = 3 ; plus de 30% = 4
Apparences des sinusoides	Sinusoides joignant les triades = 1 ; sinusoides apparentes dans 50 à 25% de l'aire autour des triades = 2 ; 25 à 1 % = 3 ; sinusoides très peu apparentes = 4
Hétérophiles	Aucun hétérophyle observé dans le champ microscopique = 1 ; moins de 10 = 2 ; de 10 à 50 = 3 ; plus de 50 dénombrés = 4
Apparence d'autolyse	Excellente définition des structures = 1 ; structures légèrement désordonnées = 2 ; structures désordonnées = 3 ; structures peu repérables = 4
Lymphocytes libres	Présence de lymphocytes libres dans 1 à 10% de l'aire du champ microscopique = 1 ; 10 à 25% = 2 ; 25 à 50 % = 3 ; dans 50 % et plus = 4

Pour les sept indicateurs histologiques présentés au tableau 2.5, les différences observées furent associées à des classes cotées de 1 à 4, établies *a posteriori* en fonction de l'étendue du phénomène observé suite à l'examen du spectre complet de l'ampleur de ces différences. Par exemple, le stade 1 fut associé à un champ microscopique où l'on ne rencontre que peu ou pas de gouttelettes lipidiques. Le stade 4 fut associé à un champ microscopique où les gouttelettes lipidiques occupent plus de 30% du champ microscopique (Fig. 2.2). Les champs microscopiques de deux coupes histologiques non consécutives furent examinés. De nombreuses heures furent consacrées par l'auteur à l'examen des coupes pour l'étalonnage de l'observation et pour la validation des cotes attribuées. La confirmation des observations de présence de gouttelettes de lipides et des mélanophages fut apportée par Colin Rousseaux BVSc, PhD, DABT, FRCPath, FIATP (Colin Rousseaux and Associates, 19 Klondike Road, Wakefield, Qc, Canada, J0X 3G0). La figure 2.2 illustre un exemple de détermination des stades avec le cas de la présence de gouttelettes lipidiques.

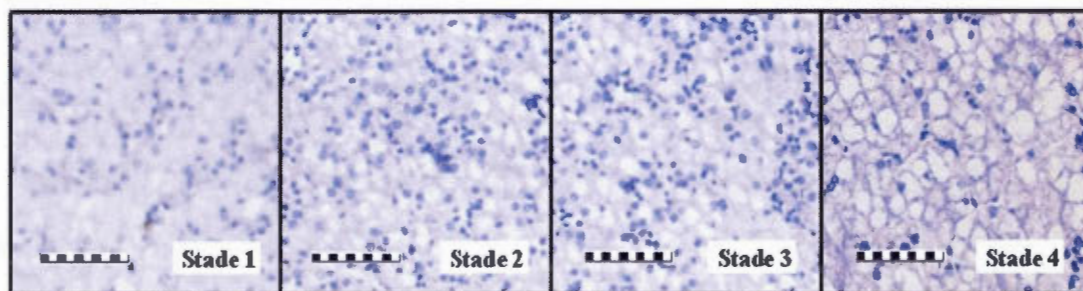


Figure 2.2 : Coupes histologiques de foie d'esturgeon jaune colorées à l'hématoxyline et l'éosine (H&E). Échelle = 10 μ m. Attribution des stades de gouttelettes lipidiques : Absence dans le champ microscopique = 1 ; 1 à 20% de la surface = 2 ; 20 à 30% = 3 ; plus de 30% = 4.

2.3.4 Indicateurs issus d'analyses biochimiques

Les analyses d'indicateurs biochimiques furent concentrées sur le foie. Ce dernier, jouant une fonction centrale associée au métabolisme général et à la détoxification, constitue un organe cible lors de l'évaluation de l'état de santé (Arellano *et al.*, 1998; Klaassen, 2001). Chez de nombreuses espèces de poissons, le foie a reçu une attention particulière dans l'investigation d'effets toxicologiques de contaminants organiques et inorganiques (Heath, 1995; Schwaiger *et al.*, 1997 ; Arellano *et al.*, 1998 ; Gül *et al.*, 2004). Il est souvent constaté que les polluants ont tendance à s'accumuler dans cet organe, ce qui peut avoir des conséquences entre autres sur le métabolisme énergétique et la régulation hormonale. Il est également possible d'observer des effets sur la croissance et la reproduction qui peuvent se manifester par des changements au niveau de la compartimentation du stockage des réserves énergétiques (Heath, 1995).

Dans le présent travail, les indicateurs issus d'analyses biochimiques du foie examinés pour leur potentiel à représenter la santé des esturgeons sont les concentrations de glycogène, de lipides totaux et de protéines. Les analyses biochimiques du foie furent effectuées à partir d'échantillons congelés sur le terrain dans l'azote liquide puis conservés à -80 °C pendant six mois. Une quantité d'environ 0,1 g d'échantillon fut utilisée pour chacune des analyses. Les poids précis furent notés à $\pm 0,001$ g pour les corrections subséquentes.

Les lipides hépatiques totaux furent quantifiés selon une adaptation de la méthode gravimétrique de Folch *et al.*, (1957). Une quantité de 0,1 g de foie fut additionnée de 0,4 ml d'eau déionisée. Le tout fut homogénéisé dans 9,5 ml d'une solution de chloroforme/méthanol (2:1) à l'aide d'un homogénéisateur Brinkmann Kinematica Polytron® muni d'un couteau rotatif de 12 mm de diamètre. Après centrifugation pendant 30 minutes à 6 000 G, le surnageant fut filtré sous vide sur un filtre

Whatman® GF-A (1,6 µm). Une partition de phase du filtrat fut amorcée avec 2 ml d'une solution de CaCl₂ (0,04% p/v). Après partition complète, la phase organique fut extraite à l'aide de trois portions consécutives de 5 ml d'une solution chloroforme/méthanol/CaCl₂ (6:96:94), puis transférée dans une nacelle d'aluminium pré-pesée. Les nacelles et leur contenu furent finalement pesés après évaporation complète des solvants pendant 48 h. La concentration relative de lipides fut obtenue à partir du poids net de lipides, en comparant ce dernier au poids initial de foie duquel furent extraits les lipides.

La proportion d'eau des échantillons de foie fut évaluée à partir d'échantillons d'environ 0,1 g. Les échantillons frais furent pesés dans des nacelles de plastique pré-pesées. Ils furent ensuite mis à sécher dans une étuve ventilée à 48° C jusqu'à l'obtention d'un poids constant (environ 10 jours). La proportion d'eau fut déterminée en soustrayant le poids sec net de l'échantillon de son poids humide.

La concentration totale de protéines hépatiques fut déterminée par colorimétrie selon une version adaptée de la méthode de Lowry *et al.*, (1951). Pour chaque échantillon, une quantité de 0,05 g de foie fut homogénéisée à l'aide d'un Micro Potter® à micro-éprouvette conique (Eppendorf) dans 0,95 ml d'une solution de NaOH (1 N). Une quantité de 0,005 ml d'homogénat fut prélevée et fut additionnée de 0,495 ml d'eau déionisée. Cette dilution fut incubée pendant 10 minutes avec une solution de CuSO₄ (10 mg/ml). Un volume de 0,25 ml de réactif Folin-Cicalteu (Sigma F-9252; 2 N) fut ajouté préalablement à une incubation de 30 minutes. Une courbe standard fut produite à partir d'albumine sérique bovine. Les lectures d'absorbance à 600 nm furent effectuées en duplicata dans des tubes de borosilicate à l'aide d'un spectrophotomètre (Amersham Pharmacia Biotech, Ultrospec® 2000 UV/visible). Les concentrations de protéines furent corrigées en fonction du poids initial de l'échantillon analysé.

La concentration de glycogène hépatique fut mesurée selon une méthode colorimétrique de dosage du NADPH. L'échantillon de foie d'environ 0,1 g fut digéré pendant 24 h ou jusqu'à dissolution complète dans 0,7 ml d'une solution de KOH (1N). Le tout fut ensuite neutralisé avec 0,7 ml d'acide acétique (1,5 N) puis centrifugé pendant 10 minutes à 10 000 G. Une quantité de 0,05 ml de surnageant fut recueillie puis digérée avec 0,05 ml d'une solution d'amyloglucosidase (1 mg/ml; Sigma # A-7255) dans une solution tampon acétate (0,07 mg/ml) pendant 30 minutes à 37 °C. Cette opération permet de transformer le glycogène en glucose. Une quantité de 0,002 ml de cette solution de glucose fut ensuite incubée dans 0,2 ml de réactif « Discretepack Glucose Hexokinase » (Catachem # C-124-01) pendant 30 minutes à 37 °C. Le NADPH formé fut dosé par mesure de l'absorbance à 340 nm. Une courbe standard fut produite à partir de glycogène de lapin (Boehringer Mannheim # 106089). Les analyses furent effectuées en quadruplicata dans des microplaques de 96 puits et les lectures furent effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre (Tecan SpectraFluor® Plus). Les concentrations de glycogène furent finalement corrigées en fonction du poids initial de l'échantillon analysé.

2.3.5 Pourcentage de splénocytes à l'état apoptotique

Conjointement à la partie antérieure des reins, la rate constitue le centre de production et d'activation des lymphocytes chez les poissons (Heath, 1995). Il est proposé qu'une activité immunitaire intense, en réponse à des agents de stress, puisse être décelable via la proportion de splénocytes à l'état apoptotique. À cet égard, et dans une démarche exploratoire, le contenu en ADN des splénocytes fut analysé par cytométrie en flux afin de déterminer le cycle cellulaire (Darzynkiewicz, 1997). En considérant que la ploïdie des phases du cycle cellulaire est : $M1 = 2n$, $M2 = 4n$ et $M3 \approx 1n$, le pourcentage de splénocytes en apoptose fut évalué d'après la proportion de cellules en phase M3 (D. Flipo. Pavillon des sciences biologiques de l'UQAM. 141 Président-Kennedy, Montréal (Québec) H2X 3Y5, communication personnelle). À ce stade, le matériel génétique des splénocytes se trouve dans un état fragmenté, que l'on peut associer à l'état apoptotique.

Le comptage cellulaire fut effectué selon une méthode standard. Pour chaque individu, lors de l'échantillonnage sur le terrain, un morceau de rate d'environ 0,25 g fut trituré et fixé dans 1 ml d'éthanol 70 %. En laboratoire, une quantité de 0,02 ml de cet homogénat fut recueillie puis rincée avec 2 ml de PBS (*proteins-free buffered saline*). Après centrifugation pendant 5 minutes à 1 000 G, le culot fut incubé dans 0,5 ml d'une solution de PBS additionnée du colorant iodure de propidium (0,1 mg/ml) et d'ARNase (0,008 mg/ml). L'analyse du cycle cellulaire fut effectuée à l'aide d'un cytomètre en flux (Beckton, Dickinson and Company, San Jose, Californie). Pour chaque échantillon, le cycle cellulaire fut évalué sur 10 000 splénocytes. La sélection (*gating*) fut calibrée manuellement pour chaque échantillon afin de corriger l'analyse pour le fait que les globules rouges des poissons sont nucléés.

2.4 Autres analyses et relevés physiologiques

L'âge des esturgeons fut déterminé par le décompte des anneaux de croissance visibles sur des coupes de segments de rayons de nageoires pectorales (Tardif *et al.*, 2004). La préparation, les coupes et le décompte des anneaux de croissance furent effectués par Huguette Massé et Jean Leclerc du MRNF.

Le sexe des individus fut déterminé par Huguette Massé du MRNF suite à l'examen d'échantillons de gonades à l'aide d'une loupe binoculaire. Sur ces mêmes échantillons, le stade de maturité des gonades fut déterminé selon une adaptation de la classification de Cuerrier développée au MRNF (Cuerrier, 1966 ; Goyette *et al.*, 1987).

Les biphényles polychlorés (BPC), les dioxines, les furanes et le mercure furent mesurés dans la chair des esturgeons. Les résultats de ces analyses sont utilisés en tant qu'indicateur d'exposition et ont été effectués sur trois homogénats de tissus musculaires contenant tous les poissons d'une même station. Dans une démarche exploratoire, deux autres types de contaminants nouvellement recensés furent mesurés chez l'esturgeon jaune. Ce sont les biphényles éthers polybrominés (*polybrominated diphenyl ethers* ou PBDE) et les biphényles polybromés (BPB). Comme les BPC, les PBDE et les BPB font partie d'un groupe de contaminants lipophiles et persistants dont les concentrations tissulaires augmentent de façon logarithmique avec la taille des poissons. Les BPB et les PBDE sont principalement employés comme agents retardateurs de flamme dans les matériaux des équipements électriques, les peintures et les textiles. Leur principale utilisation est dans la composition des circuits imprimés encapsulés. En 1992, la production mondiale de PBDE atteignait 40 000 tonnes (Van Esch, 1994). Ces composés ont été retrouvés presque partout dans le monde dans plus de 50 espèces et dans différents niveaux trophiques. De par leur similitude avec les BPC et en raison de leur utilisation en

grande quantité dans l'industrie manufacturière, les BPB et BPDE constituent un sujet de recherche d'actualité (Santillo et Johnston, 2003).

Les échantillons destinés à l'analyse de ces contaminants furent recueillis dans des contenants de verre préalablement nettoyés à l'acétone et à l'hexane. Ils furent conservés à -20 °C pendant six mois avant d'être traités. Les échantillons (environ 1g par individu) d'une même station furent regroupés et homogénéisés. Les analyses furent effectuées sur des homogénats d'environ 40 g correspondant à chacune des trois stations. Elles furent conduites selon des méthodologies officielles standardisées utilisées par le Ministère de l'Environnement. Les BPC furent analysés selon la méthode MA400-BPCHR 1.0 : BPC congénères en haute résolution. Le dosage des PBDE et des BPB fut effectué par GC-HRMS. Les dioxines et les furanes furent mesurés selon la méthode standardisée MA400-DF 1.0. Le mercure fut mesuré par GC-HRMS.

2.5 Schéma d'analyse et traitement statistique

Le schéma d'analyse statistique de l'information se divise en dix étapes principales présentées dans le tableau 2.6. Les tests statistiques furent effectués à l'aide du logiciel JumpIn 5.0 (SAS Institute, Cary, N.C. U.S.A.) avec un $p < 0,05$ sauf exceptions notées. La normalité des distributions de tous les paramètres fut examinée pour les effectifs (caractéristiques physiologiques et indicateurs) à l'aide du test W de Shapiro-Wilk. La signification statistique des différences entre les stations fut évaluée pour tous les indicateurs à l'aide du test non paramétrique de Wilcoxon. Les effets confondants potentiels sur les différences entre les stations de l'âge, du sexe, du stade de développement gonadique et du délai de traitement furent caractérisés à l'aide d'ANOVA à deux critères. Les indicateurs furent examinés à l'aide de méthodes multivariées. L'ensemble des variables fut analysé dans une matrice de

corrélation générale (Rho de Spearman). Une correction de Bonferroni fut effectuée pour réajuster le seuil statistique. Une analyse discriminante des stations fut effectuée à partir des descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé (tabl. 2.4). Une analyse en composantes principales (ACP) regroupant tous les indicateurs pertinents fut effectuée pour explorer graphiquement l'ensemble de l'information. D'autres analyses présentées plus loin découleront de cette première ACP.

Tableau 2.6 : Schéma d'analyse statistique

Étapes	But recherché et conséquences sur le cheminement de l'analyse
1) Test de normalité des distributions des variables (Shapiro-Wilk).	Vérifier si les distributions des variables sont statistiquement différentes d'une distribution normale. Il en résulte que certains tests devront être non paramétriques.
2) Comparaisons entre les stations des moyennes de toutes les variables (Wilcoxon).	Examiner la signification statistique des différences observées entre les stations. Certaines de ces différences pourraient être induites par des effets confondants.
3) Caractérisation de l'effet confondant potentiel de l'âge, du sexe, du stade de développement gonadique et du délai de traitement (ANOVA à deux critères).	Déterminer quelle part de la différence observée entre les stations peut être attribuée à l'effet confondant.
4) Étude exploratoire des corrélations (Rho de Spearman et correction de Bonferoni).	Mesurer les corrélations entre toutes les variables (n = 24).
5) Analyse discriminante des stations avec les descripteurs constituant l'indice intégré (tabl. 2.4).	Mesurer la contribution relative des descripteurs à expliquer les différences entre les stations.
6) Examen graphique des relations entre les indicateurs biologiques par l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP fut effectuée pour l'ensemble de l'échantillon ainsi que pour chaque station individuellement.	Examiner simultanément les corrélations significatives mises en évidence à l'étape 4. Réduire le nombre d'indicateurs et en regrouper certains pour examiner d'éventuelles corrélations entre ces groupes.
7) Analyse des déviants (distance de Mahalanobis).	Porter une appréciation de l'ACP de l'étape 6.
8) Corrélation canonique (variables canoniques issues de MANOVA).	Mesurer la corrélation entre les groupes de variables corrélées de l'étape 6.
9) ACP avec les variables de l'un des groupes de variables corrélées de l'étape 8.	Regrouper en une composante la variabilité de ces variables. La composante principale 1 de cette ACP peut être utilisée pour représenter la variabilité globale du groupe.
10) Régressions linéaires avec la principale 1 de l'étape 9 et tous les indicateurs (méthode des moindres carrés).	Déterminer la forme de la relation et identifier l'indicateur le plus corrélé à la principale 1 de l'étape 9.

RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques biologiques des esturgeons échantillonnés

Cette section présente les caractéristiques physiologiques générales afin d'illustrer la variabilité biologique des échantillons. Parmi les esturgeons échantillonnés, ceux du lac Saint-Louis se distinguent des autres par leur plus grande taille et leur poids plus élevé (tabl. 3.1). Les esturgeons du lac Berthelot sont plus âgés bien que de taille et de poids similaires à ceux de l'archipel du lac Saint-Pierre, qui sont plus jeunes. Au niveau du ratio entre les sexes, la station du lac Berthelot affiche la plus grande disproportion avec davantage de femelles.

Certaines distributions des variables sont statistiquement différentes d'une distribution normale (Appendice B). Pour toutes les variables, hormis les protéines hépatiques, la distribution des échantillons regroupés des trois stations est statistiquement différente d'une distribution normale. Examinées individuellement pour chaque station, les distributions ont une autre forme. Aux niveaux des poids et des longueurs, seul l'échantillon de l'archipel du lac Saint-Pierre présente une distribution normale. Pour l'âge, les échantillons de l'archipel du lac Saint-Pierre et du lac Berthelot présentent des distributions normales. La distribution de l'indice de condition est normale pour les deux échantillons du fleuve Saint-Laurent. Toutes les distributions de l'indice intégré d'examen de santé sont statistiquement différentes d'une distribution normale. Pour les indices hépatosomatiques et splénosomatiques, les échantillons du lac Saint-Louis et du lac Berthelot présentent des distributions normales. Les distributions d'indices gonadosomatiques sont marginalement toutes statistiquement différentes d'une distribution normale. Pour l'indice viscérosomatique, les échantillons du lac Saint-Louis et du lac Berthelot présentent

des distributions normales. Toutes les distributions des indicateurs histologiques sont statistiquement différentes d'une distribution normale. Les lipides totaux hépatiques présentent une distribution normale pour l'échantillon du lac Saint-Louis. L'eau du foie présente une distribution normale pour les échantillons de l'archipel du lac Saint-Pierre et celui du lac Berthelot. Les protéines hépatiques affichent une distribution normale pour les échantillons du lac Saint-Louis et celui de l'archipel du lac Saint-Pierre. Toutes les distributions de glycogène hépatique sont statistiquement différentes d'une distribution normale. Pour le pourcentage de splénocytes en apoptose, seul l'échantillon du lac Saint-Louis présente une distribution normale.

**Tableau 3.1 : Caractéristiques physiologiques des esturgeons jaunes.
Moyennes, écart-types, minima et maxima.**

Paramètres	Stations*							
	Lac Saint-Louis (n = 41)		Archipel du lac Saint-Pierre (n = 41)		Lac Berthelot (n = 40)		Bilan total (n = 122)	
Poids (g)	11494 ± 5639 a 6900 - 18900		5933 ± 1993 b 2350 - 11600		6571 ± 1887 b 3855 - 9979		8011 ± 4386 2350 - 18900	
Longueur totale (mm)	1204 ± 145 a 1017 - 1500		1056 ± 98 b 811 - 1280		1051 ± 96 b 850 - 1220		1094 ± 134 811 - 1500	
Age	25 ± 6 a 17 - 43		22 ± 4 b 14 - 29		38 ± 6 c 28 - 48		28 ± 9 14 - 48	
Sexe	M= 23 (56%)	F= 18 (44%)	M= 16 (40%)	F= 25 (60%)	M= 15 (37%)	F= 25 (63%)	M= 54 (44%)	F= 68 (56%)

* Les lettres indiquent les différences statistiques pour un seuil $p < 0,05$

Les stades de développement des gonades sont présentés afin d'illustrer la variabilité de l'échantillon (fig. 3.1). Ils correspondent au degré de maturation. Les stades 1 et 1,5 sont associés à des esturgeons immatures, les stades 2, 3 et 4 correspondent à des stades où les gonades sont en maturation, le stade 5 correspond à l'état mature des gonades (stade caviar). Aucun esturgeon post-fraie (stade 6) n'a été capturé. On remarque une forte proportion de juvéniles dans les stations du fleuve Saint-Laurent alors que la station du lac Berthelot comporte une majorité d'individus matures.

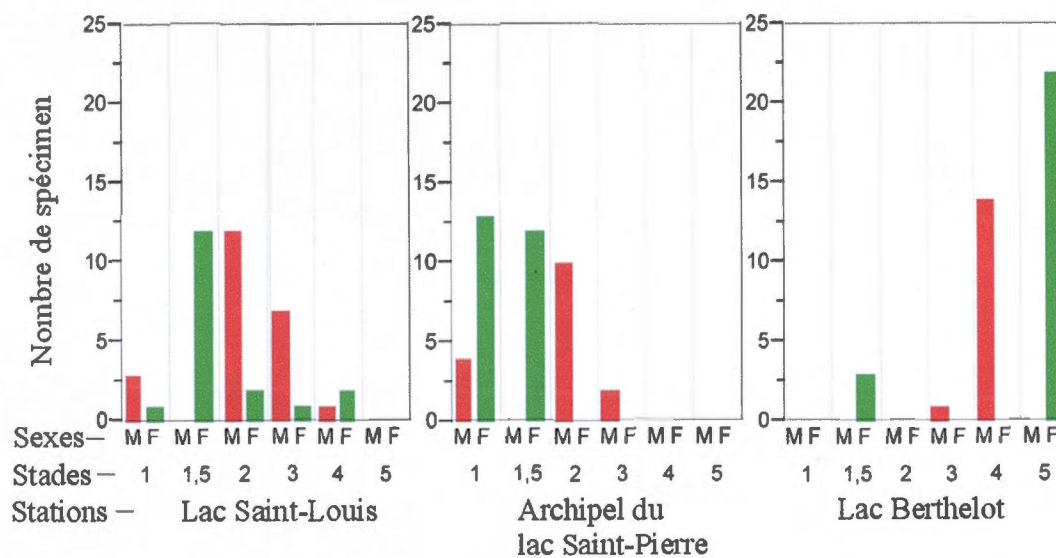


Figure 3.1 : Distribution de fréquence du nombre d'esturgeons en fonction des stades de développement des gonades selon les sexes pour les trois stations.

3.2 Contaminants dans la chair

Plusieurs contaminants environnementaux furent mesurés dans la chair des esturgeons (tabl. 3.2). Ces données illustrent la quantité et la diversité des polluants présents dans les échantillons. La mention « ND » signifie non détecté. On constate que les BPC sont retrouvés en plus grande concentration dans les esturgeons du fleuve Saint-Laurent. C'est l'inverse pour le mercure que l'on retrouve en plus grande concentration dans les poissons du lac Berthelot. On observe les plus grandes concentrations de dioxines et de furanes dans les poissons de l'archipel du lac Saint-Pierre. Ces composés n'ont pas été détectés dans les esturgeons du lac Berthelot. Les éthers de diphenyles polybrominés (BPDE) et les biphenyles polybromés (BPB) sont retrouvés en plus grande concentration dans les esturgeons de l'archipel du lac Saint-Pierre. Les BPB n'ont pas été détectés dans les esturgeons du lac Berthelot. On retrouve davantage de congénères de BPC et de famille de BPDE dans les esturgeons du lac Saint-Louis alors que c'est dans ceux de l'archipel du lac Saint-Pierre que l'on retrouve les plus grandes concentrations totales de ces contaminants. Les résultats concernant les BPDE et les BPB constituent une information inédite sur l'esturgeon jaune.

Tableau 3.2 : Concentrations de divers contaminants mesurés dans la chair d'esturgeons jaunes

Contaminants	Stations		
	Lac Saint-Louis	Archipel du lac Saint-Pierre	Lac Berthelot
Mercure (mg/kg)	0,32	0,14	0,40
BPC totaux (ng/g)	52	86	2,3
Nombre de congénères BPC	91	90	48
Dioxines (pg/g)	ND	1,3	ND
Furanes (pg/g)	0,6	0,8	ND
Équivalents toxiques dioxines*	0	0,005	0
Équivalents toxiques furanes*	0,001	0,8	0
Éthers de diphényles polybrominés (pg/g)	7,28	23,85	3,27
Nombre de familles	10	8	7
Biphényles polybrominés (pg/g)	22	34	ND
Gras (%)	1,39	1,7	1,4

* L'équivalent toxique exprime sous une forme normalisée la toxicité des dioxines et furanes en fonction de la dioxine la plus toxique et persistante (T4CDD 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine) (OMS 1998).

3.3 Indicateurs biologiques

Les comparaisons effectuées entre les stations (tabl. 3.3) montrent que l'indice de condition K de Fulton et l'indice intégré de santé sont plus élevés chez les esturgeons du lac Saint-Louis. Seuls les résultats finaux de l'indice intégré d'examen de la santé

sont présentés. Les valeurs individuelles des cotes de chacun des descripteurs (tabl. 2.4) sont présentées dans l'appendice C. Des photographies de quelques anomalies grossières du foie et de la rate sont présentées dans l'appendice D.

Les poissons du lac Berthelot se distinguent de ceux du lac Saint-Louis et de l'archipel du lac Saint-Pierre par leur très grand indice gonadosomatique et leur très petit indice viscérosomatique (tabl. 3.3). L'indice hépatosomatique est plus élevé chez les esturgeons du lac Saint-Louis alors que l'indice splénosomatique est plus élevé chez ceux de l'archipel du lac Saint-Pierre. Il est à noter que les indices somatiques furent calculés en utilisant le poids total, en incluant les gonades et le système digestif. Le fait de calculer les indices somatiques en soustrayant le poids des gonades du poids total ne change pas les résultats obtenus au niveau des différences entre les stations.

Pour l'histologie, les poissons du lac Saint-Louis se distinguent de ceux des autres stations par les gouttelettes lipidiques, l'apparence des sinusoides, les hétérophiles et l'apparence d'autolyse qui sont tous plus élevés. Les agrégats de mélanophages sont plus élevés au lac Berthelot. Le pourcentage de lipides hépatiques totaux est plus élevé chez les esturgeons du lac Saint-Louis alors que le pourcentage d'eau y est faible. Les concentrations hépatiques de protéines totales sont similaires pour les trois stations. Le pourcentage d'apoptose est plus élevé chez les esturgeons du lac Saint-Louis tandis qu'il est le plus bas chez ceux de l'archipel du lac Saint-Pierre.

Tableau 3.3 : Analyse de l'ensemble des indicateurs de santé. Moyennes, écart-types, minima et maxima.

Indicateurs	Stations*					Bilan global (n=122)
	Lac Saint-Louis (n=41)	Archipel du lac Saint-Pierre (n=41)	Lac Berthelot (n=40)	Lac Berthelot (n=40)	Lac Berthelot (n=40)	
Indice de condition K de Fulton	0,63 ± 0,10 0,30 - 0,82	0,53 ± 0,06 0,34 - 0,52	0,55 ± 0,06 0,42 - 0,78	a	a	0,57 ± 0,087 0,30 - 0,82
Indice intégré d'examen de santé	2,80 ± 1,93 0 - 8	2,19 ± 1,52 0 - 6	1,70 ± 1,53 0 - 6	ab	a	2,23 ± 1,72 0 - 8
Foie	2,47 ± 0,79 1,15 - 4,82	1,97 ± 0,53 1,29 - 3,22	1,05 ± 0,14 0,79 - 1,45	b	c	1,83 ± 0,81 0,79 - 4,82
Rate	0,28 ± 0,82 0,14 - 0,50	0,33 ± 0,16 0,15 - 0,85	0,19 ± 0,06 0,12 - 0,34	a	b	0,27 ± 0,10 0,12 - 0,85
Gonades	2,72 ± 2,03 0,38 - 10,72	1,53 ± 0,69 0,20 - 3,63	9,27 ± 4,56 0,62 - 17	a	b	4,46 ± 4,45 0,38 - 17
Viscères	8,22 ± 2,15 2,92 - 12,45	7,63 ± 2,17 3,64 - 12,5	2,94 ± 0,60 2,05 - 4,45	a	b	6,29 ± 2,96 2,05 - 12,54
Gouttelettes lipidiques	3,00 ± 1,18 1 - 4	1,80 ± 1,49 1 - 4	0,80 ± 1,16 1 - 4	b	c	1,87 ± 1,56 1 - 4
Agrégats de mélanophages	0,65 ± 0,79 1 - 3	0,61 ± 0,67 1 - 3	1,67 ± 0,86 1 - 4	a	b	0,97 ± 0,91 1 - 4
Agrégats de lymphocytes	2,58 ± 0,74 1 - 4	2,56 ± 0,67 1 - 4	2,05 ± 0,71 1 - 4	a	b	2,41 ± 0,75 1 - 4

* Les lettres indiquent les différences statistiques pour un seuil $p < 0,05$

Tableau 3.3 suite : Analyse de l'ensemble des indicateurs de santé. Moyennes, écart-types, minima et maxima.

Indicateurs	Stations*				Bilan global (n=122)
	Lac Saint-Louis (n=41)	Archipel du lac Saint-Pierre (n=41)	Lac Berthelot (n=40)		
Histologie	Hétérophiles	2,95 ± 0,77 1 - 4	2,80 ± 1,12 1 - 4	2,15 ± 0,97 1 - 4	2,63 ± 1,02 1 - 4
	Lymphocytes libres	1,09 ± 0,74 1 - 3	1,29 ± 0,90 1 - 4	1,92 ± 0,97 1 - 4	1,43 ± 0,93 1 - 4
	Apparence des sinusoides	2,85 ± 0,93 1 - 4	2,61 ± 1,04 1 - 4	1,47 ± 0,72 1 - 3	2,31 ± 1,08 1 - 4
	Apparence d'autolyse	1,76 ± 1,15 1 - 4	1,24 ± 0,99 1 - 4	0,55 ± 0,84 1 - 3	1,18 ± 1,11 1 - 4
Biochimie du foie	Lipides hépatiques totaux (%)	17,19 ± 8,27 2 - 40	12,14 ± 5,96 4 - 30	6,25 ± 3,94 1 - 16	11,91 ± 7,71 1 - 40
	Eau (%)	66,78 ± 7,38 54 - 78	70,04 ± 6,27 55 - 81	75,65 ± 3,72 67 - 82	70,8 ± 6,99 54 - 82
Biochimie du foie	Protéines totales (%)	17,73 ± 2,54 13 - 23	17,63 ± 2,57 12 - 23	17,57 ± 2,70 13 - 26	17,64 ± 2,58 12 - 26
	Glycogène (µg/g)	37,10 ± 93,18 0 - 535	4,65 ± 13,57 0 - 79	1,72 ± 5,07 0 - 23	14,59 ± 56,56 0 - 535
Biochimie du foie	Splénocytes en apoptose (%)	29,20 ± 16,99 1,89 - 70,59	5,71 ± 3,82 0,69 - 22,5	10,61 ± 4,24 3,54 - 25,83	15,21 ± 14,48 0,69 - 71

* Les lettres indiquent les différences statistiques pour un seuil $p < 0,05$

3.4 Effets confondants des caractéristiques physiologiques et du délai de traitement sur les différences entre les stations

Les différences observables entre les stations, au niveau des indices somatiques présentés dans le tableau 3.3, se manifestent lorsqu'aucune autre variable n'est introduite dans l'analyse. Le tableau 3.4 présente les effets confondants sur les différences entre les stations de l'âge, du sexe, du stade de développement et du délai de traitement. Il apparaît que le sexe a une influence statistiquement significative sur l'indice splénosomatique, l'indice gonadosomatique, les indicateurs gouttelettes lipidiques, l'apparence des sinusoides, l'apparence d'autolyse, le pourcentage de lipides totaux hépatiques et le pourcentage d'eau du foie. Toutefois, pour ces sept indicateurs, les ratios F associés aux différences entre les stations sont, dans tout les cas, de deux à quatre fois plus élevés que ceux engendrés par le sexe.

L'âge des individus exerce un effet confondant sur l'indice de condition, sur l'indice splénosomatique ainsi que sur l'indicateur de présence d'agrégats de mélanophage. Pour ces deux derniers cas, c'est le ratio F engendré par l'effet de l'âge qui est plus élevé que celui des différences entre les stations.

Le stade de développement gonadique a un effet sur l'indice de condition, l'indice hépatosomatique, l'indice gonadosomatique, les indicateurs de présence de gouttelette lipidiques, les agrégats de mélanophages, les agrégats de lymphocytes, l'apparence d'autolyse, le pourcentage de lipides totaux hépatiques et le pourcentage d'eau du foie. Pour l'indice gonadosomatique et l'indicateur agrégats de lymphocytes, les ratios F de ce facteur confondant sont plus élevés que ceux des différences entre les stations. Pour les sept autres indicateurs, les ratios F associés aux différences entre les stations sont plus élevés que ceux engendrés par le stade de développement gonadique.

Bien que les techniques de pêche sensiblement différentes d'une station à l'autre ainsi que les délais variables entre la capture par le pêcheur et la fixation des tissus ont pu favoriser l'autolyse des structures intra-cellulaires le délai de traitement des échantillons (1 – 6 heures entre la capture et la fixation) n'a pas d'incidence statistiquement significative sur les différences observées entre les stations (tabl. 3.4).

Tableau 3.4 : Résumé des significations statistiques* des effets confondants sur les différences entre les trois stations pour chacun des indicateurs.

Légende des cases :		Facteurs confondants					
F stations	p stations						
F facteur	p facteur	Sexe	Age	Développement gonade	Délai de traitement		
Indice de condition K de Fulton	19,5606	<0,0001	9,6402	0,0001	32,3329	<0,0001	
	0,5284	0,4688	4,6615	0,0329*	8,7687	<0,0001*	
Indice intégré d'examen de santé	4,5962	0,0120	2,0286	0,1362	1,8891	0,1559	
	0,7826	0,3782	0,8320	0,3636	1,0938	0,3678	
Foie	60,4464	<0,0001	30,8852	<0,0001	31,5053	<0,0001	
	1,2573	0,2645	0,9112	0,3418	5,0085	0,0003*	
Rate	20,8532	<0,0001	1,3590	0,2610	3,9439	0,0221	
	3,6993	0,0569	6,5551	0,0117*	1,1976	0,3149	
Gonades	85,4891	<0,0001	13,3540	<0,0001	0,9071	0,4066	
	18,9478	<0,0001	3,7151	0,0564	37,3241	<0,0001*	
Viscères	95,1138	<0,0001	32,4882	<0,0001	18,2387	<0,0001	
	0,0000	0,9976	0,9723	0,3262	1,6074	0,1637	
Gouttelettes lipidiques	26,7917	<0,0001	10,4224	<0,0001	9,4472	0,0002	22,5343
	6,2408	0,0139*	0,0050	0,9435	3,0426	0,0129*	0,0441 0,8340
Agréats de mélanophages	29,0840	<0,0001	5,1635	0,0071	2,4790	0,0883	12,6929
	0,3362	0,5631	9,0918	0,0032*	2,3809	0,0428*	0,1412 0,7078
Agréats de lymphocytes	6,4571	0,0022	1,6352	0,1994	1,1553	0,3186	6,0523 0,0032
	0,0211	0,8847	0,1260	0,7233	2,9359	0,0157*	0,9600 0,3292
Hétérophiles	6,7019	0,0018	2,6298	0,0764	0,3225	0,7250	6,6086 0,0019
	1,8516	0,1762	0,6112	0,4359	0,6983	0,6258	0,7386 0,3919

* Effet confondant statistiquement significatif pour un seuil $p < 0,05$

Tableau 3.4 suite : Résumé des significations statistiques* des effets confondants sur les différences entre les trois stations pour chacun des indicateurs.

Légende des cas : F stations F facteur	Facteurs confondants				
	Sexe	Age	Développement gonade	Délai de traitement	
Lymphocytes	10,3236	7,3574	3,8816	5,0906	0,0076
libres	1,2396	0,7579	0,3829	0,0036	0,9523
Apparence des	23,3663	7,2347	5,3176	19,5824	<0,0001
sinusoïdes	10,5577	1,2549	3,7439	0,1134	0,7369
Apparence	12,3679	2,6965	4,6789	9,5010	0,0002
d'autolyse	8,6651	1,9932	2,3768	1,0159	0,3156
Lipides hépatiques	27,2525	8,1242	9,9808	24,1692	<0,0001
taux (%)	6,4502	0,9892	3,4467	0,3449	0,5581
Eau (%)	19,0467	7,4656	7,5019	19,1044	<0,0001
	5,3155	0,8388	3,9427	0,3324	0,5654
Protéines totales	0,0825	0,0058	0,1844	0,2905	0,7484
(%)	0,7246	0,3329	0,8043	0,0644	0,8002
Glycogène (µg/g)	4,7421	2,6650	3,9465	3,6311	0,0295
	0,2392	0,0014	1,1136	0,0000	0,9985
Pourcentage de	60,2552	23,2001	48,4649	31,6404	<0,0001
splénocytes en apoptose	0,8133	0,0091	0,5758	0,0008	0,9771

* Effet confondant statistiquement significatif pour un seuil $p < 0,05$

3.5 Approche multivariée

3.5.1 Corrélations générales

L'ensemble des 300 corrélations entre les variables (Rho de Spearman) est présenté dans l'appendice E. Parmi ces nombreuses corrélations, 16 sont statistiquement significatives (Bonferoni : $p < 0,0002$). Elles sont reportées dans le tableau 3.5. Plusieurs corrélations concernent l'indice hépatosomatique. Ce dernier est fortement corrélé positivement aux lipides hépatiques totaux, aux gouttelettes lipidiques et à l'apparence des sinusoides. L'indice splénosomatique est corrélé positivement avec l'indice hépatosomatique et négativement avec l'âge. Les lipides hépatiques totaux sont corrélés positivement aux gouttelettes lipidiques et à l'apparence des sinusoides, et négativement au pourcentage d'eau et à l'âge. Le pourcentage de splénocytes en apoptose est corrélé positivement avec le délai de traitement et les parasites oculaires le sont négativement avec l'âge. On constate une suite de corrélations toutes positives : indice hépatosomatique – lipides totaux hépatiques – gouttelettes lipidiques – apparence des sinusoides – indice hépatosomatique.

Tableau 3.5 : Résumé des corrélations significatives* entre les indicateurs.

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Indice hépatosomatique	Indice splénosomatique	0,5236	<0,0001
Indice hépatosomatique	Lipides hépatiques totaux	0,6974	<0,0001
Indice hépatosomatique	Apparence des sinusoides	0,7024	<0,0001
Indice hépatosomatique	Gouttelettes lipidiques	0,6663	<0,0001
Indice hépatosomatique	Pourcentage d'eau	-0,7088	<0,0001
Indice hépatosomatique	Age	-0,5313	<0,0001
Indice splénosomatique	Age	-0,4999	<0,0001
Lipides hépatiques totaux	Gouttelettes lipidiques	0,7628	<0,0001
Lipides hépatiques totaux	Pourcentage d'eau	-0,9214	<0,0001
Lipides hépatiques totaux	Age	-0,4318	<0,0001
Lipides hépatiques totaux	Apparence des sinusoides	0,7573	<0,0001
Pourcentage d'eau	Gouttelettes lipidiques	-0,7379	<0,0001
Pourcentage d'eau	Apparence des sinusoides	-0,7744	<0,0001
Gouttelettes lipidiques	Apparence des sinusoides	0,7097	<0,0001
Pourcentage de splénocytes en apoptose	Délai de traitement	0,544	<0,0001
Parasite yeux	Age	-0,5095	<0,0001

* Seuil de signification statistique individuel corrigé $p < 0,0002$

3.5.2 Analyse discriminante des stations avec les descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé.

Une analyse discriminante des stations fut effectuée à partir des descripteurs (tabl. 2.4) notés pour les 122 échantillons. Le tableau 3.6 présente les valeurs des vecteurs

propres issus de cette analyse. La figure 3.2 illustre la dispersion des spécimens dans le plan formé par les axes canoniques 1 et 2. Le premier axe canonique est la combinaison linéaire des variables qui discriminent le mieux les stations. Le deuxième axe est orthogonal par rapport au premier et correspond aussi à la meilleure combinaison discriminante. Les positions relatives des stations dans le plan canonique sont représentées par les centroïdes associés aux moyennes. Les vecteurs indiquent, par leur longueur et leur orientation, les descripteurs qui expliquent le plus la ségrégation entre les stations. L'axe canonique 1 représente 91% de la dispersion, le 9% restant est entièrement associé à l'axe canonique 2. Pour l'axe 1 (en X), c'est l'absence de parasites dans les yeux qui différencie la station lac Berthelot des deux stations du fleuve. Le long de l'axe 2 (en Y), les présences de parasites intestinaux et de malformations différencient la station de l'archipel du lac Saint-Pierre des deux autres.

Tableau 3.6 : Analyse discriminante des stations élaborée avec les descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé.

Stations*	Vecteurs propres						
	Parasite yeux	Parasite intestin	Parasite corps	Malformation	Anomalies grossière du foie	Anomalies grossières de la rate	Fusion d'organes
Archipel du lac Saint-Pierre (n=41)	1,00	0,12	0,24	0,36	0,00	0,39	0,07
Lac Berthelot (n=40)	0,02	0,00	0,17	1,10	0,32	0,00	0,07
Lac Saint-Louis (n=41)	1,14	0,02	0,27	0,85	0,12	0,34	0,04
Canonique 1	1,60	1,10	-0,08	-0,43	-0,32	0,26	0,14
Canonique 2	0,66	-2,53	-0,31	0,74	0,26	-0,06	-0,36

* Individus adéquatement classés = 72 %

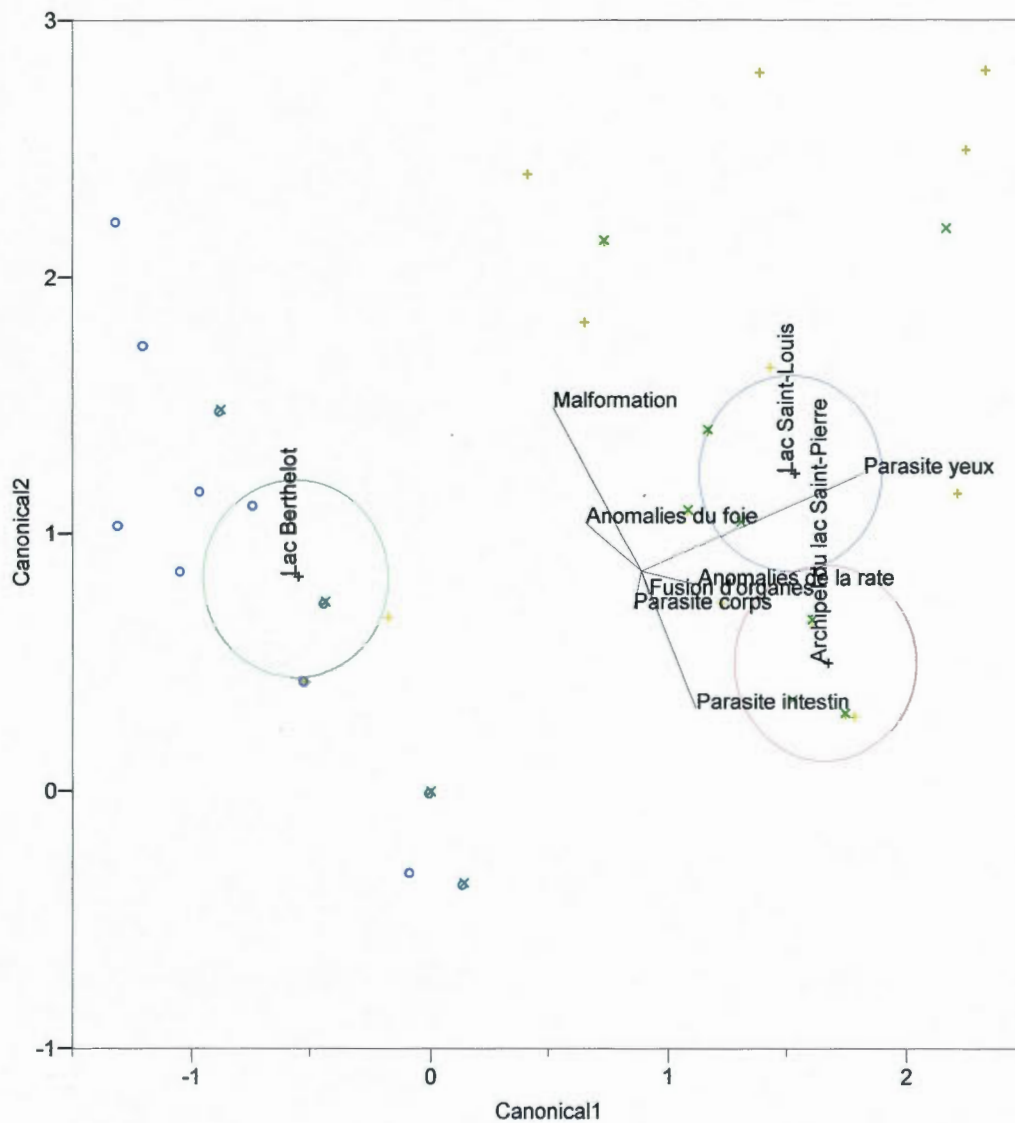


Figure 3.2 : Analyse discriminante des stations pour les descripteurs constituant l'indice intégré d'examen de la santé. Dispersion des individus dans le plan formé par les axes canoniques. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis.

3.5.3 Examen de l'ensemble des indicateurs biologiques par l'analyse en composantes principales (ACP).

Une analyse en composantes principales pour l'ensemble de l'échantillon fut produite en utilisant onze des indicateurs examinés dans le présent travail. Ces indicateurs sont : l'indice intégré d'examen de la santé, l'indice hépatosomatique, l'indice splénosomatique, la présence d'agrégats de mélanophages, la présence d'agrégats de lymphocytes, la présence de gouttelettes de lipides, le glycogène hépatique, le pourcentage de lipides totaux hépatiques, l'apoptose des splénocytes, la présence d'hétérophiles ainsi que l'apparence des sinusoides. Cette analyse vise à examiner comment se répartit la variabilité des indicateurs au sein de l'échantillon. Le tableau 3.7 présente le résumé de cette première ACP. Les variables n'étant pas de dimensions homogènes, les composantes principales furent obtenues en standardisant les covariances par l'élaboration d'une matrice de corrélation plutôt que d'une matrice de covariance.

Tableau 3.7 : Résumé de l'analyse en composantes principales élaborée avec l'ensemble des indicateurs

	Composantes principales										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valeur propre	3,767	1,519	1,443	0,904	0,800	0,769	0,618	0,479	0,258	0,227	0,211
Pourcentages	34,251	13,813	13,125	8,218	7,280	6,992	5,618	4,354	2,352	2,071	1,921
Pourcentages cumulatifs	34,251	48,065	61,190	69,408	76,689	83,682	89,301	93,655	96,007	98,078	100,000
Vecteurs propres											
Indicateurs											
Indice intégré	0,1219	0,4746	0,2955	-0,4396	-0,3043	-0,1558	0,5522	0,1630	0,0339	0,0886	-0,1472
Indice hépatosomatique	0,4403	-0,0889	-0,0034	0,1672	0,0226	0,3096	0,0334	-0,2017	-0,0694	0,4912	-0,6211
Indice splénosomatique	0,2486	0,1688	-0,4764	-0,1581	0,0431	0,4627	-0,0826	0,6421	0,1106	-0,0288	0,0962
Agrégats de mélanophages	-0,2717	-0,0354	0,2540	0,6600	0,1316	0,0826	0,4222	0,4585	-0,0081	0,1090	-0,0044
Agrégats de lymphocytes	0,1096	0,6286	-0,1599	0,3222	0,1301	0,2736	0,1677	-0,4821	-0,0067	-0,0735	0,3247
Hétérophiles	0,2108	0,4472	-0,0703	0,3084	0,0047	-0,6019	-0,4383	0,2449	-0,0870	0,0717	-0,1677
Apparence des sinusoides	0,4326	-0,1594	-0,0371	0,0762	0,2344	-0,1127	0,2853	0,0106	-0,2362	-0,7225	-0,2304
Gouttelettes lipidiques	0,4302	-0,1971	0,0840	0,1515	-0,0605	-0,1824	0,0840	-0,0402	0,8062	0,0194	0,2232
Lipides hépatiques totaux	0,4372	-0,2342	0,0606	-0,0043	-0,0562	-0,1339	0,1125	0,0665	-0,5084	0,3385	0,5821
Glycogène hépatique	0,0900	0,1369	0,5183	-0,2586	0,7521	0,1046	-0,1988	0,0807	0,0641	0,0773	0,0683
Pourcentage de splénocytes en apoptose	0,1655	0,0623	0,5564	0,1530	-0,4931	0,3829	-0,3845	0,0693	-0,0747	-0,2907	0,0546

Les trois premières composantes représentent 61 % de la variabilité observée dans l'échantillon. Les 39 % résiduels sont contenus dans huit autres composantes principales. La figure 3.3 présente la dispersion des esturgeons dans le volume formé par les trois premières composantes principales.

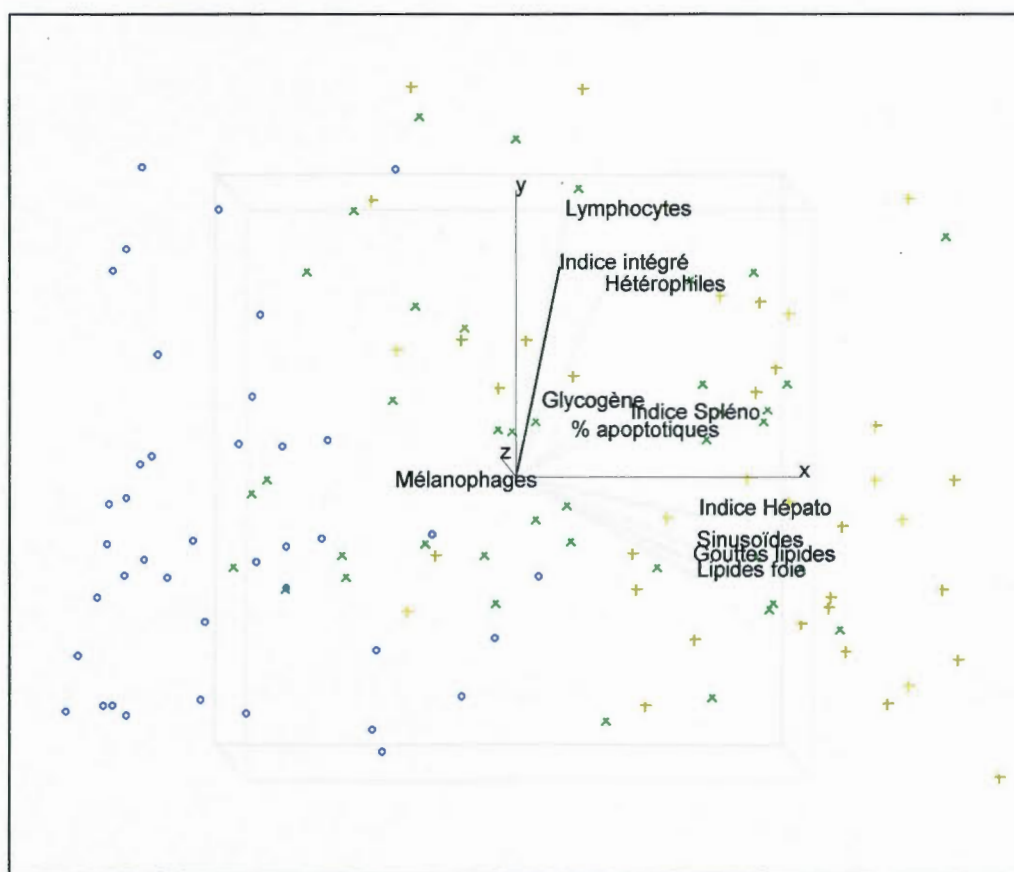


Figure 3.3 : Analyse en composantes principales de l'ensemble de l'échantillon. Dispersion des esturgeons dans l'espace multivarié selon les trois axes principaux. En X = principale 1, en Y = principale 2 et en Z = principale 3. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis.

Les onze vecteurs illustrent, par leur longueur et leur orientation, la force et la tendance des affinités multivariées qui existent entre eux. Les axes X et Y forment un plan affiché à plat dans la figure 3.3, tandis que l'axe Z est orienté approximativement selon la normale de ce plan. Dans une telle représentation, des vecteurs parallèles indiquent la présence d'une corrélation entre eux alors que des vecteurs orthogonaux sont présumés ne pas être corrélés.

La distance de Mahalanobis (fig. 3.4) est une mesure de distance basée sur la corrélation entre les variables. A la différence de la distance euclidienne où toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids moins important aux composantes les plus bruitées. La distance de Mahalanobis est souvent utilisée pour la détection de données aberrantes dans un jeu de données (*outliers analysis*). Dans la figure 3.4, la ligne pointillée correspond au seuil établi par le modèle de covariance pour déterminer quelles données se situent à l'écart. Les individus se positionnant au-dessus de cette ligne présentent, pour un ou plusieurs indicateurs, des valeurs significativement différentes (ou à l'écart) de l'ensemble de l'effectif. Il apparaît que c'est l'échantillon du lac Saint-Louis qui contient le plus grand nombre d'individus différents ($n = 5$). Suivent dans l'ordre l'échantillon de l'archipel du lac Saint-Pierre ($n = 3$) et celui du lac Berthelot ($n = 2$). Les cas de ces individus sont traités dans la discussion.

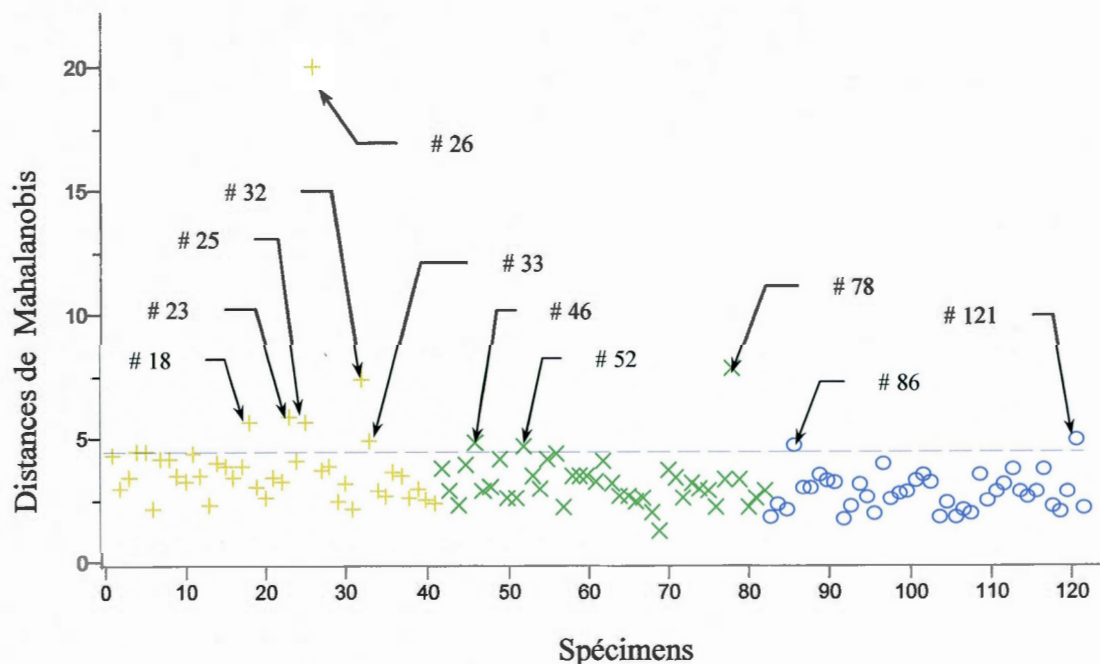
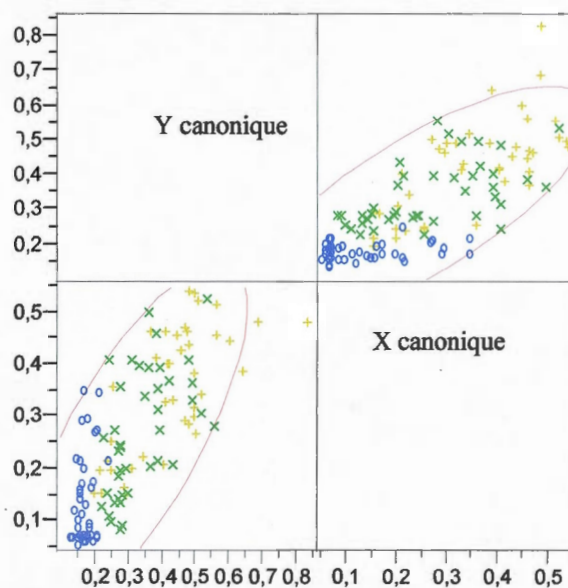


Figure 3.4 : Distances de Mahalanobis. Un point correspond à un individu. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis.

A l'examen de la figure 3.3, il est possible de remarquer que certains indicateurs apparaissent corrélés. Les vecteurs associés aux indicateurs indice hépatosomatique, gouttelettes lipidiques, lipides hépatiques totaux et apparence des sinusoides sont d'orientations et de tailles relativement homogènes. Cela s'observe également par les vecteurs propres de ces indicateurs présentés dans le tableau 3.7. Trois analyses en composantes principales similaires à celle présentée à la figure 3.3 furent effectuées, une pour chaque station (Appendice F). Il en ressort que les vecteurs convergents à la figure 3.3 le sont également dans chacune des analyses par station.

Une analyse de corrélation canonique fut effectuée sur les quatre variables corrélées (indice hépatosomatique, gouttelettes lipidiques, pourcentage de lipides et apparence des sinusoides) afin d'examiner la force de la corrélation entre les deux groupes d'indicateurs présents. Ces groupes sont, d'une part, l'indicateur indice hépatosomatique, qui constitue un descripteur facilement mesurable sur les

esturgeons et d'autre part, les trois autres indicateurs (présence de gouttelettes lipidiques, pourcentage de lipides et apparence des sinusoides) qui correspondent à des résultats d'analyses effectuées en laboratoire. L'analyse de corrélation canonique consiste à examiner la force de corrélation entre des valeurs X canonique et Y canonique, lesquelles sont extraites respectivement des groupes de variables. Ces valeurs canoniques sont de nouvelles variables construites de façon à maximiser la force de corrélation entre elles (R^2 maximisé). La figure 3.5 présente un résumé de cette analyse, les ellipses correspondent à l'intervalle de confiance de 95%. Les esturgeons du lac Berthelot n'affichent pas une dispersion aussi marquée que ceux des autres stations.



Corrélation canonique générale (n = 122)

Figure 3.5 : Corrélation canonique. X canonique = « indice hépatosomatique » et Y canonique = « présence de gouttelette lipidique + pourcentage de lipides + apparence des sinusoides ». Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis.

Afin de poursuivre l'examen des liens entre les quatre vecteurs corrélés (fig. 3.3) mis en évidence dans la corrélation canonique (fig. 3.5), de nouvelles composantes principales furent extraites du groupe de trois variables formées par les indicateurs gouttelettes lipidiques, lipides hépatique totaux et apparence des sinusoides. Le tableau 3.8 présente le résumé de l'ACP produite avec ces trois indicateurs.

Tableau 3.8 : Résumé de l'analyse en composantes principales élaborée avec trois indicateurs biochimiques

	Composantes principales		
	1	2	3
Valeur propre	2,4533	0,2892	0,2575
Pourcentage	81,7757	9,6394	8,5849
Pourcentage cumulatif	81,7757	91,4151	100,0000
	Vecteurs propres		
Gouttelettes lipidiques	0,57533	-0,70339	0,41742
Lipides hépatiques totaux	0,58149	-0,00715	-0,81352
Apparence des sinusoides	0,57520	0,71077	0,40490

La composante principale 1 issue de cette dernière analyse explique 82 % de la variabilité. Cette composante principale 1 fut mise en relation avec divers indicateurs autres que ceux ayant servi à produire cette ACP. De tous les indicateurs testés, c'est l'indice hépatosomatique qui permet de construire le modèle prédictif le plus solide (fig. 3.6). On constate dans cette figure que les individus du lac Berthelot n'affichent pas une dispersion aussi marquée que ceux des deux autres stations.

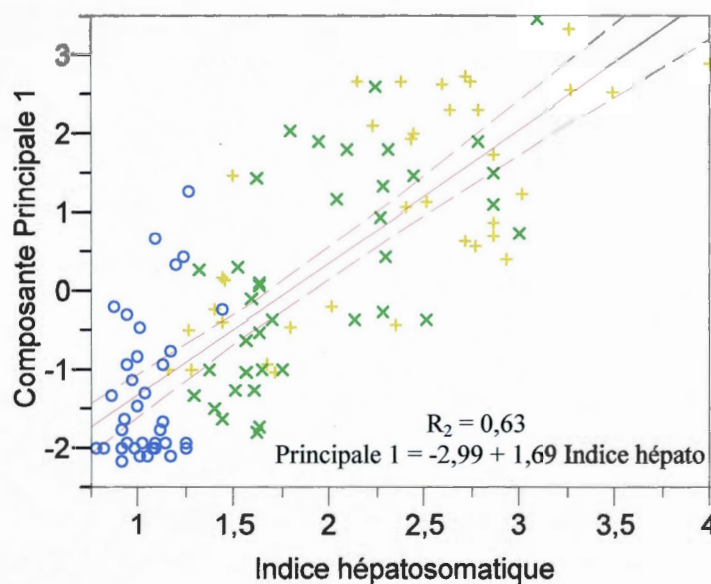


Figure 3.6 : Régression linéaire illustrant la relation entre l'indicateur « indice hépatosomatique » et la composante principale 1 issue de l'ACP présentée au tableau 3.4. Légende : « o » = lac Berthelot, « x » = archipel de Sorel et « + » = lac Saint-Louis. La ligne pleine indique la relation et les lignes discontinues correspondent aux intervalles de confiance de 95%.

DISCUSSION

4.1 Variabilité biologique de l'échantillon

De façon générale, il apparaît que l'échantillon couvre les segments sub-adulte et adulte de la population, conformément à la sélectivité des engins de pêche commerciale. Ces derniers ciblent en effet les esturgeons sur une plage de longueur relativement étroite (entre 80 et 120 cm) et les pêcheurs commerciaux ont pour consigne de rejeter les prises de taille inférieure. Cette plage de longueur de 40 cm correspond, selon les secteurs, à un gradient d'exposition de l'ordre de 15 à 20 ans.

Au niveau des stades de développement gonadique, il est normal de constater une différence tant chez les mâles que les femelles au niveau de l'avancement du développement car la maturité sexuelle est plus tardive chez les femelles et le cycle de maturation est étalé sur plusieurs années. La périodicité de la fraie varie de un à trois ans chez les mâles et de quatre à six ans chez les femelles (Goyette *et al.*, 1987; Dumont *et al.*, 2006).

La différence de longueur et de poids que présentent les esturgeons du lac Saint-Louis par rapport à ceux des autres stations constitue un phénomène attendu. Il est reconnu que les esturgeons de l'Abitibi ont, à longueur égale, un poids inférieur à ceux du Lac Saint-Louis (Fortin *et al.*, 1995). Les esturgeons de l'archipel du lac Saint-Pierre présentent un poids inférieur à ceux du lac Saint-Louis, conformément au modèle d'occupation du fleuve Saint-Laurent en fonction des différentes phases du cycle vital de l'espèce. Les esturgeons jaunes naissent principalement dans la partie amont du fleuve Saint-Laurent (rivières des Prairies, rivière des Mille Îles, rivière l'Assomption et les rapides de Lachine), d'où ils dérivent passivement. Ils recolonisent le fleuve de l'aval vers l'amont sur une période d'une vingtaine

d'années (Garceau et Bilodeau, 2004). Les juvéniles sont rares dans la partie amont et les esturgeons sont plus petits dans les secteurs de pêche commerciale situés en aval du fleuve (Dumont *et al.*, 2006). Le fait que les esturgeons du lac Saint-Pierre soient en moyenne plus jeunes que ceux du lac Saint-Louis cadre également avec ce modèle. Au lac Berthelot, on s'attend à ce que les esturgeons soient relativement âgés. Les esturgeons de l'Abitibi sont plus vieux que leurs congénères du sud pour une longueur donnée (Fortin *et al.*, 1992; 1995) et l'engin de pêche est le même pour tous les pêcheurs. Au niveau de la représentation relative des sexes, on observe certaines différences entre les stations, sans pour autant qu'elles introduisent de biais importants dans les analyses. Il apparaît donc à ce point de la discussion que le poids et la longueur des échantillons recueillis affichent une variabilité relativement étendue, d'où pourront être tirées des conclusions représentatives des segments sub-adulte et adulte des populations à l'étude.

Les concentrations de BPC totaux mesurées dans l'échantillon de la station de l'Abitibi s'apparentent aux résultats obtenus par Doyon *et al.*, (1999) pour la même station. On constate toutefois une nette diminution de ces contaminants pour l'échantillon du lac Saint-Louis par rapport aux résultats de ces auteurs. Pour la même station, la concentration de BPC dans la chair des esturgeons est passée de 760 ng/g en 1998 à 52 ng/g en 2004, avec un pourcentage de lipides comparable. En ce qui concerne les PBDE, les résultats de la présente étude (3,27 - 23,85 ng/g poids frais, pourcentage de lipides 1,4% à 1,7%) sont largement supérieurs à ceux rapportés par Christensen *et al.*, (2002) qui ont mesuré ces composés (1,8 - 8,2 ng/g poids frais, pourcentage de lipides 16,7% - 19,1%) dans la chair de chabosseaux communs (*Myoxocephalus scorpius*) capturés au large d'une ville côtière. Comme pour le cas des BPC, l'esturgeon jaune semble avoir une prédisposition à accumuler ce type de contaminants lipophiles par rapport à d'autres espèces. La tendance observée entre les stations entre l'âge moyen et les concentrations de mercure pourraient correspondre au degré d'exposition des individus.

4.2 Pertinence de l'indice intégré d'examen de la santé

Un indice intégré d'examen de la santé adapté et traité tel qu'il le fut dans le présent travail ne constitue pas un outil adéquat d'évaluation de l'état de santé de l'esturgeon jaune du Québec. L'indice intégré fut construit à partir des relevés d'irrégularités morphologiques et pathologiques notées sur le terrain (Adams *et al.*, 1990). Les résultats obtenus indiquent que les poissons capturés au lac Saint-Louis ont un indice plus élevé comparativement aux deux autres stations, suggérant ainsi un plus grand risque d'atteinte à la santé. Cela concorde avec la réalité attendue dans la mesure où l'on envisageait que les esturgeons de l'Abitibi soient en bonne santé en raison d'une meilleure qualité de leur environnement. Toutefois, par l'analyse discriminante, qui permet d'examiner l'information de façon intégrée, on remarque que l'anomalie produisant la plus forte ségrégation des stations est « parasites oculaires » ; avec une valeur de 1,60 pour l'axe canonique 1. Si on retire cet indicateur de l'analyse discriminante, le modèle ne tient plus et affiche un faible pourcentage d'individus adéquatement classés (40%). Si l'indice intégré reflétait la réalité, l'importance de cette valeur pourrait s'expliquer par le fait que ces parasites rendent les poissons aveugles et moins capables de se nourrir, de se déplacer, etc. Son influence sur l'indice intégré serait donc évidente. La corrélation négative entre âge et parasites peut suggérer que les individus fortement parasités meurent. Il est peu vraisemblable que les esturgeons plus jeunes soient davantage parasités que les plus âgés. Sauf si l'espérance de vie du parasite (ou la durée du stade du parasite qui infecte l'œil) est nettement moindre que la longévité de l'esturgeon, ce qui est très probable. L'esturgeon jaune étant un brouteur olfactif, il apparaît plausible que les parasites oculaires n'aient pas d'effet sur sa santé. De plus, Levin (1988) mentionne que la vision n'est pas utilisée pour l'alimentation.

Dans le présent travail, l'indice intégré d'examen de la santé fut construit avec les relevés des descripteurs morpho-pathologiques, des variables de dimensions comparables s'échelonnant toutes entre 0 et 4. Les autres indicateurs ne furent pas recadrés ni inclus dans l'indicateur d'atteinte de santé. Cela provient du fait que, contrairement à ce qu'a fait Adams *et al.*, (1993; 1994) pour le crapet à longues oreilles (*Lepomis auritus*) et l'achigan à grande bouche (*Micropterus salmoides*), il ne fut pas possible, faute de références spécifiques, d'attribuer aux esturgeons des valeurs seuils (*end point*) associées spécifiquement à la santé (ou à l'atteinte) pour chacun des indicateurs. Dans sa démarche Adams recadre les résultats d'analyse de façon à couvrir, avec peu d'incrément, la plage de réponses s'échelonnant entre « santé » et « atteinte potentielle ». Un résultat jugé « normal » sera recadré à la valeur de 1 et des résultats légèrement plus élevés (ou plus bas) seront recadrés à des valeurs de 2 ou 3 selon l'écart. Les résultats dépassant certains « end points » se verront attribuer systématiquement une valeur de quatre. Cela vise probablement à homogénéiser les dimensions des variables, ce qui a pour effet de diminuer la représentation des individus marginaux. En disposant d'un échantillon plus vaste, la technique de sélection de variables (stepwise) pour l'analyse discriminante développée par Klecka (1980) aurait peut-être permis de contourner ces problèmes. Cette approche produit un examen itératif pas à pas de l'effet de chacune des variables en analyse.

4.3 Potentiel des indicateurs à représenter la santé

Cette section traite du potentiel des indicateurs examinés dans cette recherche à représenter la santé des esturgeons. L'indice de condition, les indices somatiques, les indicateurs histologiques et les indicateurs biochimiques seront discutés.

En tant qu'indicateur de santé, l'indice de condition pourrait, selon la forme de sa distribution en regard des stations, identifier les endroits où l'on retrouve davantage d'individus très gras ou très maigres. Étant le plus élevé au lac Saint-Louis, il pourrait refléter une meilleure disponibilité des ressources (Goede et Barton, 1990). Dans l'hypothèse où les individus de cette station sont exposés aux pires (en terme d'exposition aux contaminants) et aux meilleures (en terme de d'abondance des ressources) conditions environnementales, cette station pourrait ne pas afficher une distribution normale de l'indice de condition (Appendice B). On pourrait par exemple y constater une distribution bimodale suggérant de nombreux individus en embonpoint mais ce n'est pas le cas. Le fait que seule la station du lac Berthelot présente une distribution statistiquement différente d'une distribution normale est sans doute attribuable à l'effet confondant de l'âge et du stade de développement gonadique. Bien que ces effets confondants soient statistiquement significatifs, la plus grande part des différences observées entre les stations demeure tout de même attribuable aux stations elles-mêmes. En outre, il est reconnu que de nombreux facteurs peuvent influencer l'indice de condition. Puisque cet indice ne constitue qu'une évaluation ponctuelle dans le temps de la condition des individus dans la présente recherche, il ne constitue pas à lui seul un indicateur significatif de la santé des esturgeons. Un tel indice devrait être suivi dans le temps, parallèlement à des mesures de contaminants environnementaux pour renseigner sur l'effet des agents de stress sur la santé des esturgeons.

Une analyse mixte (ANCOVA à deux critères) a permis de mettre en évidence qu'une grande partie des différences d'indice de condition observées entre les stations est attribuable au poids du foie. Une analyse plus détaillée fut menée pour vérifier cette assertion. En utilisant un indice de condition modifié, calculé sans le poids des organes, le processus de sélection de variable pas à pas (*Stepwise*) a permis d'évaluer les contributions relatives du poids de chacun organes sur les différences d'indice de condition observées entre les stations (prob. entrée = 0,05; prob. sortie = 0,100). Ainsi, bien que le poids du foie parut au premier regard avoir une influence sur l'indice de condition, il s'avère que les variables expliquant la plus grande part des différences d'indice de condition entre les stations sont le poids des gonades et du tractus digestif.

Les différences d'indices hépatosomatiques observées entre les stations suggèrent deux interprétations plausibles. L'augmentation de cet indice est soit la conséquence de l'abondance des ressources disponibles, soit le résultat d'une adaptation aux pressions induites par les contaminants environnementaux. Dans le cas de la seconde hypothèse, l'indice hépatosomatique pourrait constituer un signal préventif adéquat d'une atteinte potentielle à la santé des esturgeons. Il est reconnu qu'une augmentation de l'indice hépatosomatique peut être associée à des dommages au foie. Une telle augmentation souligne également l'exposition aux polluants, plus particulièrement aux BPC et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Goede et Barton, 1990; Heath, 1995; Gül *et al.*, 2004). Une hausse du poids du foie peut être due soit à une hyperplasie (augmentation du nombre d'hépatocytes) soit à une hypertrophie (augmentation de la taille des hépatocytes) ou à ces deux phénomènes simultanément. Elle peut être associée à une augmentation de la capacité à métaboliser les xénobiotiques, ce qui serait considéré comme une adaptation à la présence de polluants, plutôt qu'à une dysfonction. Heath (1995) avance que des poissons stressés par des polluants environnementaux présentent un faible indice hépatosomatique lorsque les

ressources alimentaires sont limitées ou que l'exposition est de courte durée. Mais, en présence d'une exposition chronique et lorsque les ressources sont abondantes, on peut s'attendre à une hausse de l'indice hépatosomatique. En l'occurrence, d'importantes différences de productivité existent entre les stations d'échantillonnage. On dénombre par exemple plus de 2000 invertébrés/m² dans le fleuve Saint-Laurent et moins de 100 dans le nord de l'Ontario (Nilo *et al.*, 2006). En tenant compte de ce que proposent Heath (1995) et Gül *et al.*, (2004) (présenté plus loin), on peut supposer que, puisque les esturgeons du fleuve Saint-Laurent disposent vraisemblablement de ressources alimentaires abondantes, les valeurs élevées de leur indice hépatosomatique constituent vraisemblablement une réponse adaptative à la présence de contaminants. Bien qu'influencées par le stade de développement gonadique, la plus grande part des différences observées entre les stations demeure attribuable aux stations elles-mêmes. Le calcul d'un indice hépatosomatique avec un poids de spécimen duquel fut soustrait le poids du foie ($\text{indice} = \text{foie} / (\text{total} - \text{foie}) * 100$) ne modifie pas les résultats obtenus au niveau des différences entre les stations pour cet indicateur. Les valeurs d'indice hépatosomatique s'échelonnent sur des pourcentages relativement faibles et en deçà de 5% (90^e percentiles = 2,91 et maximum = 4,82), ce qui suggère que l'effet confondant inhérent à cet indicateur est faible.

L'indice splénosomatique semble détenir un certain potentiel pour l'évaluation de la santé des esturgeons. En examinant les indices splénosomatiques des trois stations en fonction des contaminants environnementaux, on constate que les valeurs d'indice semblent refléter l'exposition aux contaminants. Les échantillons du lac Saint-Louis et de l'archipel du lac Saint-Pierre présentent les valeurs d'indice splénosomatique les plus élevées ainsi que les plus fortes concentrations de contaminants. Cela suggère que l'indice splénosomatique peut indiquer une atteinte potentielle à la santé. Cependant, la plus grande part des différences d'indice splénosomatique entre les stations est engendrée par l'âge des individus. Le fait

qu'un esturgeon plus jeune ait une rate plus grosse semble masquer le potentiel de cet indicateur à représenter la santé. Ce sont en effet les individus du lac Berthelot qui présentent un faible indice splénosomatique mais qui sont à la fois les plus âgés et issus d'un milieu moins contaminé. L'échantillon de la présente recherche ne comporte pas suffisamment d'individus d'âge similaire dans les trois stations pour interpréter les variations de l'indice splénosomatique tout en extrayant l'effet confondant de l'âge.

Il fut suggéré au début de ce document qu'un individu soumis à de nombreux stress environnementaux présente un indice splénosomatique et un pourcentage de splénocytes à l'état apoptotique élevés. Il est proposé ici que, pour un individu donné, un pourcentage élevé de splénocytes en apoptose reflète un renouvellement plus rapide des splénocytes, et que cette vitesse de renouvellement pourrait hypothétiquement être liée aux effets des pressions environnementales. A ce titre, les résultats de l'indice splénosomatique et du cycle cellulaire auraient dû indiquer les mêmes tendances. Tous deux auraient dû être élevés pour les esturgeons du lac Saint-Louis, mais ce n'est pas le cas. En considérant les valeurs très élevées du pourcentage de splénocytes en apoptose chez les esturgeons du lac Saint-Louis, qui suggèrent un renouvellement rapide des splénocytes engendré par les stress environnementaux, il semblerait que cette information puisse constituer un outil de suivi de la santé adéquat. Cet indicateur n'a toutefois pas été retenu en raison de sa forte corrélation avec le délai de traitement.

Les résultats histologiques présentés constituent des observations de base qui soulignent des différences marquées entre les stations. S'il est reconnu que l'histologie du foie peut offrir un diagnostic intégré des effets néfastes des contaminants environnementaux, cette approche doit être effectuée selon un protocole qui ne put être déployé dans le présent travail. La principale entrave fut le délai entre la capture des poissons par les pêcheurs commerciaux et la fixation des

tissus. Les résultats histologiques présentés dans ce travail ne peuvent donc être interprétés dans l'optique stricte de l'histopathologie. Les différences observées entre les stations et entre les poissons aux niveaux des descripteurs qualitatifs de l'histologie du foie offrent cependant de bonnes possibilités d'interprétation en regard de l'objectif du présent travail.

L'approche histologique a mis en évidence des phénomènes attendus au niveau de l'accumulation des lipides hépatiques. Les observations concordent avec les résultats de Rousseaux *et al.* (1995), qui ont noté ce phénomène chez des esturgeons jaunes provenant des mêmes régions. Il fut suggéré que les cellules présentant une accumulation de lipides puissent être des cellules de Ito pleines de vitamine A (Colin Rousseau, communications personnelles). Les valeurs très faibles de rétinoides mesurées par Doyon *et al.* (1998 et 1999) chez des esturgeons du lac Saint-Louis suggèrent toutefois que ce n'est pas le cas. Cette assertion fut confirmée par l'analyse des rétinoides chez quelques individus de la présente étude (données non communiquées). Les indicateurs histopathologiques évalués dans cette recherche (particulièrement les gouttelettes lipidiques) paraissent cohérents avec la manifestation d'un stress immunitaire et métabolique pour les esturgeons capturés dans le fleuve Saint-Laurent. Les résultats de l'indicateur histologique de la présence de gouttelettes lipidiques soulignent que ce phénomène est fortement accentué chez les esturgeons du lac Saint-Louis. Biagianti-Risbourg (1997) mentionne que l'augmentation du nombre et de la taille des inclusions lipidiques est la perturbation hépatocytaire la plus fréquemment observée chez des poissons qui habitent des environnements pollués. Cet auteur suggère également que la séquestration des toxiques liposolubles à l'intérieur d'inclusions lipidiques pourrait constituer un moyen de protection hépatocytaire contre l'agression toxique. Selon Arellano *et al.* (1998), les hépatocytes de la sole du Sénégal (*Solea senegalensis*) exposées au cuivre présentent des gouttelettes lipidiques qui occupent la plus grande partie du cytoplasme et où le noyau se trouve comprimé à la périphérie de

l'hépatocyte. Ces phénomènes furent observés dans l'échantillon de la présente recherche. Deux formes de gouttelettes de lipides furent observées dans les champs microscopiques. D'abord l'accumulation macrovésiculaire, caractérisée par la présence d'une seule grande goutte de lipides, puis l'accumulation microvésiculaire, caractérisée par la présence de nombreuses gouttelettes lipidiques fragmentées au sein du cytoplasme. Gül *et al.* (2004) soutiennent qu'un surplus de lipides est une conséquence des effets des contaminants environnementaux et que les deux formes d'inclusions lipidiques constituent des indicateurs du type d'action toxique exercée par les polluants. En raison de limitations techniques, les micrographies obtenues n'ont pas la résolution nécessaire pour illustrer sur papier ce phénomène. La prévalence de chacune des formes d'inclusions n'a pas été comptabilisée. À la lumière des résultats de l'examen histologique, il apparaît que les considérations avancées par Biagianti-Risbourg et Gül *et al.* s'appliquent aux esturgeons de la présente recherche. La densité élevée des gouttelettes lipidiques observées dans le foie des esturgeons du lac Saint-Louis semble constituer une indication des effets des contaminants environnementaux. À l'inverse, les densités faibles de gouttelettes lipidiques relevées dans les échantillons provenant du lac Berhelot coïncident avec un environnement peu contaminé.

L'indicateur histologique des agrégats de mélanophages, quantifié de la même façon que l'indicateur de la présence de gouttelettes lipidiques, est plus élevé au lac Berhelot que dans les stations du fleuve. Cette observation correspond à ce qui fut relevé par Rousseau *et al.* en 1995 pour des esturgeons jaunes de la même station. Il est cependant important de rappeler que dans la présente étude, c'est l'âge qui explique en grande partie les différences observées entre les stations. Cet effet confondant de l'âge sur les agrégats de mélanophages avait été mis en évidence sur des perchaudes (*Perca flavescens*) par Brown et George (1985). Selon Rice (2001), les agrégats de mélanophages seraient un indicateur sensible mais non spécifique d'exposition à des contaminants environnementaux. Les résultats obtenus par

Oulmi *et al.* (1995), pour des truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) exposées à des concentrations sub-létales de Linuron (un herbicide), indiquent que l'infiltration par les mélanophages et leur activité phagocytaire augmentent en fonction de la concentration de pesticide à laquelle sont exposés ces poissons. Également, les travaux de Simpson *et al.* (2000) mentionnent une plus grande prolifération des agrégats de mélanophages chez des flétans (*Platichthys flesus*) en provenance d'un estuaire hautement contaminé par les BPC, les organochlorés et les HAP, en comparaison à d'autres flétans provenant d'un milieu témoin. Les travaux de ces auteurs suggèrent aussi que la présence d'agrégats de mélanophages constitue un indicateur des pressions engendrées par les contaminants environnementaux. L'échantillon de la présente recherche ne comporte pas suffisamment d'individus d'âge similaire dans les trois stations pour extraire l'effet de l'âge sur les variations observées au niveau des agrégats de mélanophages. Cependant, en examinant les deux stations du fleuve Saint-Laurent seulement, la valeur plus élevée des mélanophages observée au Lac Saint-Louis pourrait indiquer que les esturgeons de cette station sont davantage exposés aux contaminant environnementaux tel que le suggèrent les travaux de Oulmi *et al.* (1995) et Simpson *et al.* (2000). Cette observation concorde avec les résultats des contaminants environnementaux pour ces stations. Le potentiel des agrégats de lymphocytes à indiquer une atteinte potentielle à la santé des esturgeons n'a toutefois pu être mis en évidence dans la présente recherche.

La plus forte abondance d'agrégats de lymphocytes chez les esturgeons des stations du lac Saint-Louis et de l'archipel de Sorel suggère que le foie de ces poissons puisse être davantage sollicité. La présence d'hétérophiles peut être interprétée comme la manifestation d'un stress immunitaire à long terme (C. Rousseaux, communication personnelle). Les résultats obtenus pour cet indicateur indiquent une valeur plus élevée pour la station du lac Saint-Louis et plus faible pour le lac Berthelot. Considérant la plus forte contamination des individus du lac Saint-Louis,

il semble que l'indicateur de la présence d'hétérophiles soit adéquat. Il est suggéré qu'il représente une forme d'activation. Parallèlement, l'indicateur histologique des lymphocytes libres peut être interprété dans cette optique. Cet indicateur correspond à la densité des lymphocytes qui ne forment pas d'agrégats dans le champ microscopique. Ces lymphocytes sont distribués presque uniformément dans le tissu hépatique, seul leur nombre par unité de surface (de volume dans la réalité) change d'un individu à l'autre. Les différences observées entre les stations pour ces deux indicateurs histologiques suggèrent que, si les lymphocytes libres forment des agrégats en réponse à la sécrétion de cytokines induites par les contaminants environnementaux, la plus forte abondance des agrégats de lymphocytes observée chez les esturgeons du lac Saint-Louis renforce l'hypothèse que ces derniers sont davantage affectés que ceux des autres stations. La proportion de lymphocytes libres, qui est plus élevée chez les esturgeons du lac Berthelot, pourrait constituer la proportion non mobilisée des lymphocytes présents dans le foie. Cependant, les observations histologiques de la présente recherche n'ont pas la portée nécessaire pour étayer ces assertions. Il en ressort que les résultats histologiques traitant des lymphocytes et des hétérophiles nécessitent d'être validés par une démarche spécifique à cette fin pour pouvoir constituer un signe d'atteinte potentielle à la santé des esturgeons.

L'apparence des sinusoides décrit l'aspect général de ces canaux observables dans le champ microscopique et pourrait signaler une atteinte potentielle. Une valeur élevée de cet indicateur correspond à un tissu où les sinusoides sont peu ou pas observables. Une valeur faible est associée à un tissu où les sinusoides sont très apparentes et bien définies. Des sinusoides fortement apparentes pourraient suggérer un organe dont les réseaux tridimensionnels sont en bonne condition. Cela caractériserait un organe peu engorgé où les fluides circulent aisément. L'aspect compact et engorgé du foie des esturgeons du fleuve Saint-Laurent (Appendice G) semble souligner les effets adverses de contaminants tels que l'indiquent Gül *et al.*

(2004). Ces derniers ont examiné différentes espèces de cyprins exposées à des milieux contaminés et considèrent l'engorgement du foie comme le reflet d'une déficience fonctionnelle qui pourrait être engendrée par les polluants. Dans notre échantillon, cet indicateur est influencé par le sexe des individus et par le stade de développement gonadique. Toutefois, comme précédemment, les différences entre les stations prédominent sur l'effet confondant.

En ce qui concerne les indicateurs biochimiques, la forte corrélation négative qui existe entre l'eau du foie et les lipides hépatiques permet de confirmer que cette dernière analyse constitue une quantification adéquate. Notons également que les concentrations de lipides hépatiques totaux et la présence de gouttelettes lipidiques tendent dans le même sens. La corrélation très significative ($Rho = 0,6974$, $p < 0,0001$) observée entre ceux-ci suggère que les gouttelettes lipidiques furent adéquatement quantifiées sur les coupes histologiques. Les observations des coupes histologiques colorées à l'aide du colorant pour lipide *Oil red O* (données non présentées), renforcent également la validité de la quantification visuelle des lipides. Les concentrations de lipides mesurées chez les esturgeons de la présente recherche s'apparentent aux résultats obtenus par Ruelle et Henry (1992) pour l'esturgeon pâle (*Scaphirhynchus albus*). Ces auteurs notèrent un pourcentage moyen en lipides hépatiques totaux de $40,1 \pm 16,7\%$ chez des spécimens contaminés par des pesticides organochlorés. Gül *et al.* (2004) considèrent un surplus de lipides comme une manifestation du dérèglement du métabolisme des protéines. La présence de contaminants environnementaux aurait pour conséquence de mobiliser les ressources protéiques du foie (pour fin de détoxification) ou d'interférer directement avec les mécanismes associés à l'anabolisme et/ou au catabolisme des lipides hépatiques. Pour le choquemort (*Fundulus heteroclitus*), une espèce de poisson relativement tolérante à la pollution, l'augmentation des lipides dans le foie est considérée comme un bioindicateur hépatique d'une exposition aux BPC, aux HAP, au mercure et au plomb (Schmalz *et al.*, 2002). Ces

auteurs mentionnent eux aussi que la présence de ces lipides pourrait indiquer une altération du métabolisme des lipides. Les concentrations totales de protéines hépatiques sont relativement stables (ou comparables) entre les stations. Cela suggère que les lipides et l'eau sont « interchangeables » dans le foie. Plus il y a de lipides, moins il y a d'eau, et vice versa. Cette stabilité des concentrations de protéines, observée malgré les différences d'expositions entre les stations, est hypothétiquement attribuable à un changement de la nature des protéines.

Les concentrations de glycogène observées sont très variables, particulièrement au lac Saint-Louis. Plusieurs études à court terme ont démontré que, suite à une exposition à divers contaminants, il est possible d'observer une diminution du glycogène hépatique (Biagianni-Risbourg, 1997; Hontela et Dorval, 2004). Ces derniers auteurs font également mention, en plus de fluctuations du glycogène, de variations des réponses physiologiques associées aux catécholamines et corticostéroïdes, lesquels constituent des inducteurs plasmatiques d'ajustement métabolique. Il apparaît qu'un individu affichant un surplus de glycogène peut quand même être considéré en bonne condition mais les maxima observés dans la présente recherche suggèrent davantage un dérèglement au niveau de la régulation des réserves de glycogène. Les observations effectuées par les auteurs cités proviennent en bonne partie d'expériences effectuées en laboratoire sur des périodes d'exposition relativement courtes. En revanche, les poissons examinés dans la présente recherche furent soumis à des expositions chroniques à très long terme. Quelques individus affichent des concentrations de glycogène particulièrement élevées (plus de 100 mg/g) en comparaison aux moyennes relativement faibles. Ce phénomène correspond vraisemblablement à un dérèglement des mécanismes de régulation du glycogène qui pourrait avoir des conséquences négatives sur la santé des esturgeons. Cette assertion doit cependant être validée.

4.4 Exploration de l'information par l'analyse multivariée

L'analyse multivariée constitue un travail exploratoire qui a permis de mettre en relation les indicateurs qui affichaient le meilleur potentiel à traduire l'état de santé des esturgeons. L'ACP générale a fourni un point de vue intégré sur l'ensemble des indicateurs et un patron de dispersion des données dans un espace multivarié. Un résultat important révèle que plusieurs indicateurs (i.e. indice hépatosomatique, gouttelettes lipidiques, apparence des sinusoides et lipides hépatiques totaux), suggérant tous une atteinte potentielle à la santé, sont regroupés dans l'espace de dispersion. Les vecteurs corrélés dans cette ACP générale le sont également lorsque l'on examine les stations individuellement (Appendice F). Pour les indicateurs mentionnés, les faits saillants relevés dans l'ACP générale correspondent relativement bien à ceux observés dans l'ACP de chaque station. Il est suggéré que cette similitude, entre le modèle général et les modèles individuels, constitue une validation de l'absence de biais potentiel qu'auraient pu introduire les différences de période d'échantillonnage (fleuve Saint-Laurent = été, Abitibi = automne).

En tant que principal organe impliqué dans la détoxification, le foie est le premier viscère à afficher des manifestations associables aux pressions auxquelles il est soumis. Un foie plus gros n'est pas nécessairement signe de pathologie, mais si ce poids élevé est attribuable à des manifestations potentiellement pathologiques (comme nous le supposons à la lumière des résultats des gouttelettes lipidiques, des lipides hépatiques totaux et de l'apparence des sinusoides), il prend une nouvelle signification. Les vecteurs parallèles l'ACP générale montrent une redondance de l'information et suggèrent qu'un choix devrait être fait parmi ce groupe d'indicateurs. L'analyse de corrélation canonique a de plus mis en évidence de façon intégrée la force des corrélations qui existent entre le poids du foie et les observations effectuées sur cet organe (gouttelettes lipidiques, lipides hépatiques

totaux et apparence des sinusoides). Ce mode d'analyse permet le rapprochement de plusieurs informations d'origines différentes. Puisqu'il en ressort que le poids du foie est fortement lié à l'intensité des trois indicateurs, il apparaît que l'indice hépatosomatique peut être retenu pour son aptitude à représenter les trois autres indicateurs.

La distance de Mahalanobis est une distance statistique qui met en évidence les valeurs extrêmes dans l'espace multivarié. Cette analyse a permis de souligner que plusieurs esturgeons affichent des particularités communes. Il fut constaté que les individus # 23, 25, 46 et 52 du fleuve Saint-Laurent sont significativement différents de l'ensemble de l'effectif avec des valeurs élevées pour les indices hépatosomatique et splénosomatique. De plus, les individus # 18, 23, 25, 32, 46, 78 et 86 présentent des résultats élevés pour les indicateurs histologiques de la présence de gouttelettes lipidiques et de l'apparence des sinusoides. Ces manifestations ne sont pas anecdotiques. Elles apparaissent simultanément chez plusieurs individus, cela plus particulièrement au lac Saint-Louis, et elles suggèrent que certains esturgeons soient plus atteints que d'autres. Le fait que certains esturgeons affichent des différences communes pour deux indices somatiques pourraient être interprété comme une confirmation, via des effets manifestés sur différents organes, d'une atteinte potentielle à leur santé. L'individu # 86 se trouve à l'écart des autres en raison de la valeur élevée de son indice splénosomatique et le # 121 est à l'écart en raison de ses valeurs élevées des indicateurs des agrégats de mélanophages et des agrégats de lymphocytes. Il est à noter que seuls les esturgeons du fleuve Saint-Laurent sont à l'écart pour plus de deux indicateurs simultanément. Les distances de Mahalanobis issues d'une ACP de laquelle l'indice hépatosomatique fut retiré présentent sensiblement le même profil (Appendice H). On constate que ce sont les mêmes individus qui demeurent à l'écart du reste de l'effectif et pour les mêmes raisons. Il semblerait que, si un individu présente un indice hépatosomatique élevé, il y a de fortes chances qu'il affiche des valeurs

élevées pour d'autres indicateurs. Ce constat renforce le potentiel de l'indice hépatosomatique à indiquer une atteinte potentielle au foie des esturgeons.

Le modèle de régression linéaire vise à définir la forme de relation entre le poids du foie et la composante principale 1 issue de l'ACP produite avec les trois indicateurs corrélés (gouttelettes lipidiques, lipides hépatiques totaux et apparence des sinusoides). Mentionnons que cette composante principale représente 82% de la variabilité de l'échantillon pour ces trois indicateurs. Si l'on accepte que des valeurs élevées au niveau des trois indicateurs formant cette composante principale soient associées à des états potentiellement pathologiques (excès importants de lipides et apparence d'engorgement des sinusoides), on peut conclure qu'une valeur élevée de cette composante principale constitue un reflet intégré de divers états potentiellement pathologiques pour le foie. La corrélation entre cette composante principale de la seconde ACP et la distance de Mahalanobis de la première ACP semble valider cette assertion ($Rho = 0,3752$; $Prob > |Rho| < 0,0001$). Pour un individu donné, une valeur de composante principale élevée constituerait un signe d'atteinte potentielle à sa santé.

Il apparaît à ce point de la discussion que l'indice hépatosomatique, en tant que reflet intégré de plusieurs phénomènes, renseigne sur la santé des esturgeons. En examinant cet indicateur sur plusieurs années, des fluctuations de la forme de sa distribution pourraient être interprétées comme un signe de changements dans l'état de santé des esturgeons. Par exemple, pour une station donnée, l'évolution d'une distribution normale vers une distribution bimodale constituerait un phénomène à investiguer davantage. La forme des distributions de fréquence de l'indice hépatosomatique de chaque station illustre la valeur de cette hypothèse (Appendice I). En outre, il est possible de calculer une valeur seuil d'indice hépatosomatique à partir de l'équation du modèle de régression présenté plus haut ($Principale\ 1 = -2,99 + 1,69 \cdot \text{Indice hépatosomatique}$). En utilisant la valeur du 90^e percentile (2,338) de

la distribution de fréquence de la composante principale 1 (Appendice J) issue des trois indicateurs pour l'introduire dans l'équation du modèle de régression, nous obtenons une valeur d'indice hépatosomatique de 3,15. Soulignons que parmi l'effectif de la présente recherche, on constate que sept individus, dont quatre mâles et trois femelles âgés entre 25 et 42 ans, affichent un indice hépatosomatique supérieur à 3,15. Ces individus proviennent tous du fleuve Saint-Laurent. Cinq ont un indice splénosomatique au-dessus de 0,31 et six présentent des valeurs élevées pour l'indicateur de la présence de gouttelettes lipidiques et de l'apparence des sinusoides. Deux esturgeons de la station du lac Saint-Louis présentent les indices hépatosomatiques les plus élevés de l'échantillon avec des valeurs respectivement de 3,99 et 4,82. Il semble donc que les variations temporelles de la proportion d'individus présentant un indice hépatosomatique supérieur à cette valeur constitue effectivement un outil de suivi.

CONCLUSION

L'ensemble des résultats présentés repose sur un échantillon important et constitue un ajout pertinent à nos connaissances de cette espèce à la biologie particulière. Plusieurs résultats obtenus dans la présente étude s'avèrent inédits. L'information présentée ne permet toutefois pas d'établir directement des liens entre les caractéristiques du foie et une atteinte potentielle à la santé. L'indice intégré d'examen de la santé (Adams *et al*, 1993), tel que traité dans le présent travail, ne convient pas à l'esturgeon jaune du Québec en tant que signal préventif d'atteinte potentiel à la santé. Les descripteurs utilisés ici ne forment pas un outil de diagnostic rapide pour cette espèce à forte longévité. L'emphase sur les parasites et l'abandon des indicateurs sanguins en ont biaisé l'analyse. De nouvelles études sur l'esturgeon jaune axées sur l'histopathologie bénéficieraient grandement d'un échantillonnage destiné et adapté spécifiquement à cette approche. Il faudrait entre autres minimiser les délais de fixation des tissus, ce que le contexte de la pêche commercial n'a pas permis. Des micrographies de la meilleure qualité possible permettraient de calibrer un modèle informatique de reconnaissance des structures qui pourrait valider les observations histologiques de la présente étude tout en mettant en évidence des phénomènes non détectés par l'auteur. L'ensemble des travaux portant sur le foie suggère que l'examen des fluctuations temporelles de la distribution de l'indice hépatosomatique constitue un outil de suivi de la santé des esturgeons. Des changements à la hausse de la prévalence des individus présentant un indice hépatosomatique supérieur à la valeur suggérée pourraient justifier l'élaboration d'étude plus détaillée. Les esturgeons ainsi ciblés pourraient faire l'objet d'une caractérisation individuelle des contaminants environnementaux, conjointement à une étude détaillée des performances des enzymes hépatiques.

RÉFÉRENCES

- Adams, S. M., M. S. Bevelhimer, M. S. Greeley, D.A. Levine et S.J. Teh. 1999. « Ecological risk assesement in a large reservoir : 6. bioindicators of fish population health. » *Environmental Toxicity and Chemistry*, vol. 18, p. 628-640.
- , K. D. Ham, M.S. Greeley, R.F. LeHew, D. E. Hinton, et C. F. Saylor. 1996. « Downstream gradients in bioindicator responses : point source contaminant effects on fish health. » *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 53, p. 2177-2187.
- , K. D. Ham et J. J. Beauchamo. 1994. « Application of canonical multivariate analysis in the evaluation and presentation of multivariate biological response data. » *Environmental Toxicity and Chemistry*, vol. 13, p. 1673-1683.
- , A. M. Brown et R. W. Goede. 1993. « A Quantitative Health Assessment Index for Rapid Evaluation of Fish Condition in the Field. » *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 122, p. 63-73.
- , S.M., L. R. Shuggart, G.R. Southworth, et D.E. Hinton. 1990. « Application of bioindicators in assessing the health of fish population experiencing contaminant stress. Chap. dans *Biomarkers of environmental contaminaton*. J. F. McCarty et L. R. Shugart. Lewis Publishers. p. 333-353.
- Arellano, J. M., V. Storch et C. Sarasquette. 1999. « Histological Changes and Copper Accumulation in Liver and Gills of the Senegales Sole, *Solea senegalensis* ». *Ecotoxicology and Environnemental Safety*, vol. 44, p. 62-72.
- Beaulieu, H. et M. Huot. 1993. Liste des espèces de la faune vertébrée susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables. Gouvernement du Québec, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche. 107p.
- Bernatchez, L. et M. Giroux. 1991. *Guide de poisons d'eau douce du Québec et leur distribution dans l'Est du Canada*. L'Acadie (Qué.) : Éditions Broquet Inc. 304 p.

- Biagianni-Risbourg, S. 1997. « Les perturbations (ultra) structurales du foie des poissons utilisées comme biomarqueurs de la qualité sanitaire des milieux aquatiques ». Chap. dans *Biomarqueurs en écotoxicologie : aspects fondamentaux*, sous la dir. de Laurent Lagadic, Thierry Caquet, Jean-Claude Amiard et François Ramade, p. 355-391. Paris : Masson.
- Brown, C. L. et C. J. George. 1985. « Age-dependent accumulation of macrophage aggregates in the yellow perch *Perca flavescens* ». *Journal of Fish Diseases*, vol. 8 p. 135-138.
- Burner, L. C. et T. A. Brien. 2002. « Incidence of white sturgeon deformities in two reaches of the Columbia river. » *California Fish and Games*, vol. 88, no 2, p. 57-67.
- Centre Saint-Laurent. 1996. *Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume 1. L'écosystème du Saint-Laurent*. Environnement Canada – Région du Québec, Conservation de l'environnement et Éditions MultiMondes. Coll. « Bilan Saint-Laurent ».
- Christensen, J. H., M. Glasius, M. Pécseli, J. Platz et G. Pritzl. 2002. « Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in marine fish and blue mussel from southern Greenland », *Chemosphere*. vol. 47, p. 631-638.
- Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada (COSEWIC). 2006. Status Report on Lake Sturgeon *Acipenser fulvescens*. Ottawa
- Cuerrier, J. P. 1966. « L'esturgeon de lac *Acipenser fulvescens* Raf. de la région du lac Saint-Pierre au cours de la période du frai ». *Naturaliste Canadien*, vol. 94, p. 279-334.
- Darzynkiewicz Z. 1997. « Practical Flow Cytometry, Nuclei Acid Analysis ». *Current Cytometry*. Sous la dir. de Robinson, JP, New York : J Wiley & Sons
- Doyon, C., S. Boileau, R. Fortin and P. A. Spear. 1998. « Rapid HPLC analysis of retinoids and dehydroretinoids stored in fish liver : comparaison of two lake sturgeon populations ». *Journal of Fish Biology*, vol. 53, p. 973-986.
- , R. Fortin, et P. A. Spear. 1999. « Retinoic acid hydroxylation and teratogenesis in lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) from the St. Lawrence River and Abitibi region, Quebec. » *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, vol. 56, p. 1428-1436.

- Dumont, P. et collaborateurs. 2006. « The biology, status and management of Lake Sturgeon (*Acipenser fulvescens*) in the Québec part of the St. Lawrence River : a summary ». Lake Sturgeon Recovery Planning Workshop, Fisheries and Ocean Canada. Feb. 28 – March 02 2006, Winnipeg, Manitoba.
- , Y. Mailhot, R. Dumas et P. Bilodeau. 2000. Plan de gestion de l'esturgeon jaune du fleuve Saint-Laurent 2000-2002. FAPAQ, Direction de l'aménagement de la faune du centre-du-Québec, de Lanaudière, de la Montérégie et de Montréal.
- Folch, J., M. Lees et G. H. Sloane Stanley. 1957. « A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues ». *Journal of Biology and Chemistry*, vol. 226, p. 497-509.
- Fortin, R., J. D'Amours et S. Thibodeau. 2002. « Effets de l'aménagement d'un nouveau secteur de frayère sur l'utilisation du milieu en période de frais et sur le succès de reproduction de l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*) à la frayère de la rivière des Prairies ». Rapport synthèse 1995-1999. Pour l'unité Hydraulique et Environnement, Hydro-Québec et la société de la faune de Québec, Direction de l'aménagement de la faune de Montréal, de Laval et de la Montérégie. Département des Sciences biologiques, Université du Québec à Montréal.
- , P. Dumont et S. Guénette. 1995. « Determinant of growth and body condition of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 53, p. 1150-1156.
- , J. R. Mongeau, G. Desjardins et P. Dumont. 1993. « Movement and biological statistics of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) population from the St. Lawrence and Ottawa River system, Quebec ». *Canadian Journal of Zoology*, vol. 71, p. 638-650.
- , S. Guénette et P. Dumont. 1992. « Biologie, exploitation, modélisation et gestion des populations d'Esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*) dans 14 réseaux de lacs et de rivières de Québec ». Québec, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune et Service de la faune aquatique, Montréal et Québec. 213 p.
- Galloway, T. S., R. J. Brown, M.A. Browne, A. Dissanayake, D. Lowe, M.B. Jones et M. H. Depledge, 2004. « A Multibiomarker Approach to Environmental Assessment ». *Environmental Science Technologies*, vol. 38, p. 1723-1731.

- Garceau, S. et P. Bilodeau. 2004. « La dérive larvaire de l'esturgeon jaune à la rivière des prairies, aux printemps 2002 et 2003 ». Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des Parcs, Direction de l'aménagement de la faune de Montréal, de Laval, Longueuil. Rapp. Tech. p. 16-21.
- Goede, R. W. et B. A. Barton. 1990. « Organismic indices and an autopsy-based assessment as indicators of health and condition of fish ». *American Fisheries Society Symposium* 8, Bethesda. MD.
- Goyette, D., S. Guénette, N. Fournier, J. Leclerc, G. Roy, R. Fortin et P. Dumont. 1987. « Maturité sexuelle et périodicité de la reproduction chez la femelle de l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*) du fleuve Saint-Laurent ». Québec, Ministère du loisir, de la Chasse et de la Pêche, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, Montréal, Rapp. Trav. 06-02 84 p.
- Guénette, S., R. Fortin et E. Rassart. 1993. « Mitochondrial DNA Variation in Lake Sturgeon (*Acipenser fulvescens*) from the St. Lawrence River and James Bay Drainage Basins in Québec, Canada ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 50, no 3, p. 659-664.
- Gül, S., E. Belge-Kurutas, E. Yldiz, A. Sahan et F. Doran. 2004. « Pollution corolated modification of liver antioxidant system and histopathology of fish (*Cyprinidae*) living in Seylam Dam Lake, Turkey ». *Environnemnt International*, vol. 30, p. 605-609.
- Ham, K. D., S. M. Adams et M. J. Peterson. 1997. « Application of Multiple Bioindicators to Differentiate Spatial and Temporal Variability from the Effects of Contaminant Exposure on Fish ». *Ecotoxicology And Environmental Safety*, vol. 37, p. 53-61.
- Haschek, W. M., C. G. Rousseaux et M. Wallig. 2002. *Handbook of Toxicologic Pathology*. Volumes I et II. San Diego : Academic Press.
- Heath, Alan G. 1995. *Water pollution and fish physiology*. Floride : CRC Press, 359 p.
- Hinton, D. E. et D. J. Laurén. 1990. « Liver structural alterations accompanying chronic toxicity in fishes : Potential biomarkers of exposure ». Dans *Biomarkers of Environmental Contamination*, sous la dir. de McCarthy, J.F. et L.R. Shugart. Chap. 2, p. 17-58. Floride : CRC Press,

- Hontela, A., et J. J. Dorval. 2004. « Défaillance de la synthèse des hormones corticostéroïdes : exposition de poissons et amphibiens aux métaux et pesticides ». Chap. dans *Écotoxicologie moléculaire : principes fondamentaux et perspectives de développement*, sous la dir. de E. Pelletier, Peter, G.C. Campbell et F. Denizeau, p. 161-195. Sainte-Foy (Qué.) : Presses de l'Université du Québec.
- Institut de la statistique du Québec (ISQ). 2005. Site Internet : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/sectr_manfc/production/ra_2003_scian3_couts.htm
- Janeway, C. A., P. Travers, M. Walport et M. Shlomchik. 2001. *Immunobiology : The Immune System In Health And Disease*. New York : Garland Publishing. 732 p.
- Junquiera L. C., J. Carneiro et R. O. Kelley. 1992. *Basic Histology*, 7th ed. Connecticut : Prentice Hall.
- Klaassen, C. D. 2001. *Cassarett and Doull's toxicology : The Basic Science of Poisons*. New York. McGraw-Hill.
- Klecka, W. R. 1980. « Discriminant Analysis » dans *Sage University paper series on Quantitative Application in the Social Sciences*, vol. 07, no 19. Californie : Sage Publication.
- Levin, A. V. 1988. Characteristics of feeding behavior of juvenile Russian sturgeon, *Acipenser gueldenstaedti*, in relation to food availability. « Voprosy Ikhtiologii », vol. 1, p. 110-116.
- Lowry, O. H., N. J. Rosebrough, N. J. Farr et R. J. Randall (1951) « Protein measurement with the Folin phenol reagent. » *Journal of biological chemistry*, vol. 193, p. 251-265.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2003. Site Internet : <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Peches/md/statistiques/pecheaquaculture/pecheeaudouce/>
- Moisan, M. et H. Laflamme. 1999. Rapport sur la situation de l'esturgeon jaune (*Acipenser fulvescens*) au Québec. Faune et Parcs Québec, Direction de la faune et des habitats, Québec. 68 p.

- Nilo, Pedro, S. Tremblay, A. Bolon, J. Dodson, Pierre et R. Fortion. 2006. « Feeding Ecology of Lake Sturgeon in the St. Lawrence River System ». *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 135, p. 1044-1055.
- Organisation mondiale de la santé (OMS). Van den Berg, M., *et al.* 1998. « Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for Humans and Wildlife », *Environmental Health Perspectives*, Vol. 106, no 12 p. 775 - 791.
- Oulmi, Y., R. D. Negele et T. Braunbeck. 1995. « Cytopathology of liver and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after long-term exposure to sublethal concentration of linuron ». *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 21, no 1 p. 35-52.
- Ressources naturelles Canada (RNC). Site internet :
<http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/index.html>
- Rice, C.D. 2001. « Fish Immunotoxicology : Understanding Mechanisms of Action » . pages 96-138. Dans : *Target Organ Toxicity in Marine and Freshwater Teleosts* vol. 2-Systems (édité par D.Schlenk and W.H. Benson). Taylor and Francis Publishers : London.
- Rousseaux, C. G., A Branchaud et P. A. Spear. 1995. « Evaluation of liver hystopathology and EROD activity in St-Laurence lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) in comparison with a reference population ». *Environmental toxicology and Chemistry*, vol. 14 p. 843-849.
- Ruelle, R., et C. J. Henry. 1992. « Contaminant information bulletin, organochlorine compounds in pallid sturgeon ». U.S. Fish and Wildlife service. Pierre. 7 p.
- Santillo, David, et Paul Johnstson. 2003. « Playing with fire : the global threat presented by brominated flame retardant justifies urgent substitution ». *Environment International*, Vol. 29, p. 725-734.
- Schmalz W. F. Jr, A. D. Hernandez et P. Weis. 2002. « Hepatic histopathology in two populations of the mummichog (*Fundulus heteroclitus*) ». *Marine Environmental Research*, vol. 54 no 3-5 p. 539-542.
- Schreck, C. B. et P. B. Moyle. (éditeurs) 1990. « Methods for fish biology ». *American Fisheries Society*, Bethesda, Maryland. 684 p.

- Schwaiger J., R. Wanke, S. Adam, M. Pawert, W. Honnen et R. Tribskorn. 1997. « The use of histopathological indicators to evaluate contaminant-related stress in fish ». *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and recovery*, vol. 6 p. 75-86.
- Simpson M. G., M. Parry, A. Kleinkauf, D. Swarbreck, P. Walker et R. T. Leah. 2000. « Pathology of the liver, kidney and gonad of flounder (*Platichthys flesus*) from a UK estuary impacted by endocrine disrupting chemicals ». *Marine Environmental Research*, vol. 50 p. 283-287.
- Tardif, R., D. Deschamps, J. Leclerc, P-Y. Collin, C. Gauthier, et B. Baillargeon, 2004. « Technique de préparation de structure et d'interprétation de l'âge chez l'esturgeon noir et l'esturgeon jaune ». Société de la faune et des parcs du Québec.
- Van Esch, G.J. 1994. Environment Health Criteria vol. 162 : Brominated Diphenyl Ethers. World Health Organisation. Geneva.

APPENDICE A
DÉTAILS DES MÉTHODOLOGIES HISTOLOGIQUES

Déshydratation des tissus

- 1) Rinçage à l'eau distillée, 3 fois pendant 5 minutes
- 2) Éthanol 30% : 1 h.
- 3) Éthanol 50% : 2 h.
- 4) Éthanol 70% : 2 h.
- 5) Éthanol 80% : 2 h.
- 6) Éthanol 95% : 1 h.
- 7) Éthanol 100% : 2 fois 30 minutes
- 8) Éthanol / xylène 1:1, 2 fois 30 minutes
- 9) Xylène 30 minutes
- 10) Xylène / paraffine 1:1, 30 minutes
- 11) Paraffine, 2 fois 30 minutes
- 12) Inclusion dans les moules

Coloration standard avec hématoxyline et éosine (H&E)

- 1) Toluène pur : 5 minutes
- 2) Éthanol pur : 1 minute
- 3) Éthanol 95 % : 1 minute
- 4) Éthanol 90 % : 1 minute
- 5) Éthanol 80 % : 1 minute
- 6) Éthanol 70 % : 1 minute
- 7) Éthanol 30 % : 1 minute
- 8) Hématoxyline : 30 – 120 secondes, selon la force de la solution
Sigma – Aldrich # HHS-16
- 9) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 10) Eau distillée : 2 minutes
- 11) Éosine : 10 - 45 secondes, selon la force de la solution
Sigma # HT110-1-16
- 12) Éthanol 30 % : 1 minute
- 13) Éthanol 50 % : 1 minute
- 14) Éthanol 70 % : 1 minute
- 15) Éthanol 80 % : 1 minute
- 16) Éthanol 90 % : 1 minute

- 17) Éthanol 95 % : 1 minute
- 18) Éthanol pur : 1 minute
- 19) Toluène / éthanol 1:1, 4 minutes
- 20) Toluène pur : 5 minutes

Coloration avec trichrome de Masson (coloration du fibrinogène)

- 1) Deuxième fixation dans Bouin pendant 1 heure à 56°C
Sigma # HT-10132
- 2) Toluène pur : 1 minute
- 3) Éthanol / toluène 1:1, 1 minute
- 4) Éthanol pur : 1 minute
- 5) Éthanol 95 % : 1 minute
- 6) Éthanol 70 % : 1 minute
- 7) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 8) Eau distillée : 1 minute
- 9) Hématoxyline « Weigerts » avec fer : 1 minute
Sigma # HT-1079
- 10) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 11) Eau distillée : 1 minute
- 12) Fuscine acide (fuscine 5 g/L + acide acétique 0,5% v/v) : 5 minutes
Sigma # F-8129
- 13) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 14) Eau distillée : 1 minute
- 15) Acide phosphomolybdique 10 g/L pendant 5 minutes
- 16) Bleu aniline acide (aniline 25 g/L + acide acétique 2% v/v) : ~3 minutes
Sigma # 61335
- 17) Acide acétique 1% : ~5 minutes jusqu'à différenciation
- 18) Éthanol 95 % : 1 minute
- 19) Éthanol pur : 1 minute
- 20) Toluène / éthanol 1:1, 4 minutes
- 21) Toluène pur : 5 minutes

Coloration avec acide per-iodique et réactif de Schiff (coloration du glycogène)

- 1) Toluène pur : 1 minute
- 2) Éthanol / toluène 1:1, 1 minute
- 3) Éthanol pur : 1 minute
- 4) Éthanol 95 % : 1 minute
- 5) Éthanol 70 % : 1 minute
- 6) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 7) Eau distillée : 1 minute

- 8) Acide per-iodique 0,5% pendant 5 minutes
- 9) Eau distillée : 1 minute
- 10) Réactif de Schiff pendant 30 minutes
Fisher Scientific # SS32-500
- 11) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 12) Hématoxyline : 30 – 120 secondes, selon la force de la solution
Sigma # HHS-16
- 13) Éthanol 70 % : 1 minute
- 14) Éthanol 95 % : 1 minute
- 15) Éthanol pur : 1 minute
- 16) Toluène / éthanol 1:1, 4 minutes
- 17) Toluène pur : 5 minutes

Coloration avec « Oil red O » (coloration des lipides)

- 1) Effectuer les coupes à partir de tissus frais à 10 μm d'épaisseur à - 20°C
- 2) Fixer sur les lames dans formaldéhyde 10% pendant 15 minutes
- 3) Propylène glycol : 2 fois pendant 5 minutes
- 4) Oil red O pendant 10 minutes
Sigma – Aldrich # O-0625
- 5) Propylène glycol 85% pendant 3 minutes
- 6) Eau distillée : 1 minute
- 7) Hématoxyline : 30 – 120 secondes, selon la force de la solution
Sigma # HHS-16
- 8) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 9) Bleu de méthylène (20 gouttes dans 200 ml d'eau) pendant 30 secondes
Sigma – Aldrich # M-9140
- 10) Rinçage à l'eau du robinet pendant 5 minutes
- 11) Eau distillée : 1 minute
- 12) Montage sur lame avec « gel mount »
Fisher Scientific # BM-M01

APPENDICE B

TEST W DE SHAPIRO-WILK DE LA NORMALITÉ DES DISTRIBUTIONS DES VARIABLES

Variables	Lac Saint-Louis (n = 41)		Archipel du lac Saint-Pierre (n = 41)		Lac Berthelot (n = 40)		Ensemble de l'échantillon	
	W	Prob<W	W	Prob<W	W	Prob<W	W	Prob<W
Poids	0,6444	<0,0001*	0,9601	0,2279	0,8699	0,0001*	0,7480	<0,0001*
Longueur	0,8965	0,0010*	0,9762	0,6575	0,9349	0,0310*	0,9413	<0,0001*
Age	0,9034	0,0018*	0,9683	0,4117	0,9548	0,1589	0,9159	<0,0001*
Indice de condition K de Fulton	0,9628	0,2789	0,9501	0,1025	0,9292	0,0190*	0,9581	0,0056*
Indice intégré d'examen de santé	0,9323	0,0224*	0,8260	<0,0001*	0,8896	0,0007*	0,9028	<0,0001*
Indice hépatosomatique	0,9500	0,1018	0,8927	0,0007*	0,9705	0,4835	0,9043	<0,0001*
Indice splénosomatique	0,9728	0,5462	0,8340	<0,0001*	0,9141	0,0053	0,9111	<0,0001*
Indice Gonadosomatique	0,7997	<0,0001*	0,8998	0,0013*	0,9488	0,0979	0,7619	<0,0001*
Indice Viscérosomatique	0,9775	0,7016	0,9659	0,3705	0,9371	0,0372*	0,9150	<0,0001*
Présence de gouttelettes lipidiques	0,7912	<0,0001*	0,8458	<0,0001*	0,7154	<0,0001*	0,8186	<0,0001*
Présence d'agrégats de mélanophages	0,7356	<0,0001*	0,7223	<0,0001*	0,8235	<0,0001*	0,8166	<0,0001*
Présence d'agrégats de lymphocytes	0,8415	<0,0001*	0,8116	<0,0001*	0,7731	<0,0001*	0,8258	<0,0001*
Hétérophiles	0,8422	<0,0001*	0,8388	<0,0001*	0,8423	<0,0001*	0,8648	<0,0001*
Lymphocytes libres	0,8357	<0,0001*	0,8438	<0,0001*	0,8852	0,0005*	0,8608	<0,0001*
Apparence des sinusoides	0,8538	<0,0001*	0,8552	<0,0001*	0,6594	<0,0001*	0,8301	<0,0001*
Apparence d'autolyse	0,8937	0,0008*	0,8769	0,0002*	0,6794	<0,0001*	0,8397	<0,0001*
Lipides hépatiques totaux	0,9739	0,5795	0,9373	0,0347*	0,8799	0,0003*	0,9219	<0,0001*
Eau du foie	0,9235	0,0105*	0,9620	0,2636	0,9446	0,0698	0,9196	<0,0001*
Protéines hépatiques totales	0,9593	0,2146	0,9595	0,2190	0,9283	0,0177*	0,9715	0,1229
Glycogène hépatique	0,4255	<0,0001*	0,4073	<0,0001*	0,4018	<0,0001*	0,2893	<0,0001*
Apoptose des splénocytes	0,9557	0,1620	0,8156	<0,0001*	0,8860	0,0005*	0,7775	<0,0001*

* Statistiquement différent d'une distribution normale pour Prob<0,05.

APPENDICE C

DESCRIPTEURS CONSTITUANTS L'INDICE INTÉGRÉ D'EXAMEN DE LA SANTÉ.

Les valeurs des descripteurs sont présentées sous forme de moyenne et écart-types, avec minima et maxima.

Descripteurs	Station*			Bilan total
	Lac Saint-Louis	Archipel du lac Saint-Pierre	Lac Berthelot	
Parasites oculaires	1,15 ± 0,79 0 - 2 a	1,0 ± 0,59 0 - 2 a	0,03 ± 0,15 0 - 1 b	0,72 ± 0,76 0 - 2
Parasites corporels	0,27 ± 0,44 0 - 1 a	0,24 ± 0,48 0 - 2 a	0,18 ± 0,44 0 - 2 a	0,22 ± 0,46 0 - 2
Parasites intestinaux	0,02 ± 0,15 0 - 1 ab	0,12 ± 0,33 0 - 1 a	0 b	0,05 ± 0,22 0 - 1
Malformations, érosions, œdèmes	0,85 ± 0,79 0 - 2 a	0,36 ± 0,66 0 - 2 b	1,1 ± 1,08 0 - 4 a	0,77 ± 0,91 0 - 4
Anomalies grossières du foie	0,12 ± 0,64 0 - 4 a	0 a	0,33 ± 1,07 0 - 4 a	0,14 ± 0,72 0 - 4
Anomalies grossières de la rate	0,34 ± 0,99 0 - 4 a	0,39 ± 1,20 0 - 4 a	0 a	0,24 ± 0,91 0 - 4
Fusion d'organe	0,04 ± 0,21 0 - 1 a	0,07 ± 0,26 0 - 1 a	0,08 ± 0,27 0 - 1 a	0,06 ± 0,24 0 - 1

* Les lettres indiquent les différences statistiques pour un seuil de signification $p < 0,05$.

APPENDICE D

PHOTOGRAPHIE D'ANOMALIES OBSERVÉES SUR LE FOIE ET LA RATE D'ESTURGEONS JAUNES



Figure D1 : Photographie de foie d'esturgeon jaune. La flèche indique la présence d'un exsudat fibrineux.



Figure D2 : Photographie de rate d'esturgeon jaune. La flèche indique la présence de taches blanches.



Figure D3 : Photographie de rate d'esturgeon jaune. La flèche indique la présence de taches jaunes.



Figure D4 : Photographie de foie d'esturgeon jaune. La flèche indique l'endroit où le foie et la rate sont fusionnés.

APPENDICE E

MATRICE DE CORRÉLATION GÉNÉRALE DE L'ENSEMBLE DES VARIABLES.

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Indice condition	Age	0,0872	0,3395
Parasite yeux	Age	-0,5095	<.0001
Parasite yeux	Indice condition	0,0588	0,5199
Parasite intestin	Age	-0,3103	0,0005
Parasite intestin	Indice condition	-0,0921	0,3128
Parasite intestin	Parasite yeux	0,0577	0,5279
Parasite corps	Age	0,0765	0,4021
Parasite corps	Indice condition	0,0595	0,5149
Parasite corps	Parasite yeux	0,2115	0,0194
Parasite corps	Parasite intestin	-0,1181	0,1951
Malformation	Age	0,2292	0,0111
Malformation	Indice condition	0,2247	0,0128
Malformation	Parasite yeux	-0,0629	0,4914
Malformation	Parasite intestin	-0,1571	0,0840
Malformation	Parasite corps	0,1062	0,2443
Anomalie foie	Age	0,1708	0,0600
Anomalie foie	Indice condition	-0,0306	0,7381
Anomalie foie	Parasite yeux	-0,0772	0,3979
Anomalie foie	Parasite intestin	-0,0517	0,5716
Anomalie foie	Parasite corps	-0,0258	0,7782
Anomalie foie	Malformation	0,1015	0,2661
Anomalies rate	Age	-0,2183	0,0157
Anomalies rate	Indice condition	0,1910	0,0351
Anomalies rate	Parasite yeux	0,1372	0,1319
Anomalies rate	Parasite intestin	-0,0679	0,4574
Anomalies rate	Parasite corps	0,1300	0,1535
Anomalies rate	Malformation	-0,0421	0,6453
Anomalies rate	Anomalie foie	-0,0679	0,4576
Fusion d'organes	Age	-0,0113	0,9017
Fusion d'organes	Indice condition	0,0353	0,6995
Fusion d'organes	Parasite yeux	-0,0672	0,4621
Fusion d'organes	Parasite intestin	-0,0602	0,5098
Fusion d'organes	Parasite corps	-0,0582	0,5242
Fusion d'organes	Malformation	-0,0753	0,4100
Fusion d'organes	Anomalie foie	-0,0602	0,5099
Fusion d'organes	Anomalies rate	-0,0791	0,3866
Indice intégré d'atteinte de santé	Age	-0,1173	0,1982
Indice intégré d'atteinte de santé	Indice condition	0,2056	0,0231

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Indice intégré d'atteinte de santé	Parasite yeux	0,5309	<.0001
Indice intégré d'atteinte de santé	Parasite intestin	-0,0033	0,9713
Indice intégré d'atteinte de santé	Parasite corps	0,4275	<.0001
Indice intégré d'atteinte de santé	Malformation	0,5360	<.0001
Indice intégré d'atteinte de santé	Anomalie foie	0,2972	0,0009
Indice intégré d'atteinte de santé	Anomalies rate	0,3968	<.0001
Indice intégré d'atteinte de santé	Fusion d'organes	0,0072	0,9374
Délai de traitement	Age	0,1886	0,0375
Délai de traitement	Indice condition	0,2586	0,0040
Délai de traitement	Parasite yeux	-0,1013	0,2667
Délai de traitement	Parasite intestin	-0,1175	0,1975
Délai de traitement	Parasite corps	0,0398	0,6631
Délai de traitement	Malformation	0,3972	<.0001
Délai de traitement	Anomalie foie	0,0611	0,5038
Délai de traitement	Anomalies rate	0,0666	0,4660
Délai de traitement	Fusion d'organes	-0,0033	0,9713
Délai de traitement	Indice intégré d'atteinte de santé	0,2040	0,0242
Indice hépatosomatique	Age	-0,5313	<.0001
Indice hépatosomatique	Indice condition	0,3385	<.0001
Indice hépatosomatique	Parasite yeux	0,5449	<.0001
Indice hépatosomatique	Parasite intestin	0,0802	0,3799
Indice hépatosomatique	Parasite corps	0,0038	0,9671
Indice hépatosomatique	Malformation	-0,2108	0,0198
Indice hépatosomatique	Anomalie foie	-0,1609	0,0767
Indice hépatosomatique	Anomalies rate	0,1367	0,1333
Indice hépatosomatique	Fusion d'organes	-0,0837	0,3594
Indice hépatosomatique	Indice intégré d'atteinte de santé	0,1166	0,2010
Indice hépatosomatique	Délai de traitement	-0,1327	0,1450
Indice splénosomatique	Age	-0,4999	<.0001
Indice splénosomatique	Indice condition	0,0001	0,9994
Indice splénosomatique	Parasite yeux	0,3541	<.0001
Indice splénosomatique	Parasite intestin	0,2257	0,0124
Indice splénosomatique	Parasite corps	-0,0336	0,7135
Indice splénosomatique	Malformation	-0,3033	0,0007
Indice splénosomatique	Anomalie foie	-0,1328	0,1449
Indice splénosomatique	Anomalies rate	-0,0013	0,9884
Indice splénosomatique	Fusion d'organes	0,0522	0,5678
Indice splénosomatique	Indice intégré d'atteinte de santé	-0,0017	0,9855
Indice splénosomatique	Délai de traitement	-0,2838	0,0015
Indice splénosomatique	Indice hépatosomatique	0,5236	<.0001
Agrégats de mélanophages	Age	0,6060	<.0001
Agrégats de mélanophages	Indice condition	-0,0502	0,5831
Agrégats de mélanophages	Parasite yeux	-0,4215	<.0001
Agrégats de mélanophages	Parasite intestin	-0,0646	0,4793
Agrégats de mélanophages	Parasite corps	-0,0869	0,3414
Agrégats de mélanophages	Malformation	0,1663	0,0671
Agrégats de mélanophages	Anomalie foie	0,1792	0,0483

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Agrégats de mélanophages	Anomalies rate	-0,3282	0,0002
Agrégats de mélanophages	Fusion d'organes	-0,0434	0,6353
Agrégats de mélanophages	Indice intégré d'atteinte de santé	-0,1565	0,0852
Agrégats de mélanophages	Délai de traitement	0,1061	0,2447
Agrégats de mélanophages	Indice hépatosomatique	-0,4591	<.0001
Agrégats de mélanophages	Indice splénosomatique	-0,3713	<.0001
Agrégats de lymphocytes	Age	-0,2450	0,0065
Agrégats de lymphocytes	Indice condition	-0,0194	0,8324
Agrégats de lymphocytes	Parasite yeux	0,3110	0,0005
Agrégats de lymphocytes	Parasite intestin	0,0371	0,6846
Agrégats de lymphocytes	Parasite corps	0,2358	0,0089
Agrégats de lymphocytes	Malformation	-0,0309	0,7358
Agrégats de lymphocytes	Anomalie foie	-0,0033	0,9708
Agrégats de lymphocytes	Anomalies rate	0,1934	0,0328
Agrégats de lymphocytes	Fusion d'organes	-0,0567	0,5354
Agrégats de lymphocytes	Indice intégré d'atteinte de santé	0,2530	0,0049
Agrégats de lymphocytes	Délai de traitement	-0,1167	0,2006
Agrégats de lymphocytes	Indice hépatosomatique	0,3163	0,0004
Agrégats de lymphocytes	Indice splénosomatique	0,2965	0,0009
Agrégats de lymphocytes	Agrégats de mélanophages	-0,1551	0,0881
Gouttelettes lipidiques	Age	-0,3024	0,0007
Gouttelettes lipidiques	Indice condition	0,2958	0,0009
Gouttelettes lipidiques	Parasite yeux	0,3285	0,0002
Gouttelettes lipidiques	Parasite intestin	-0,0359	0,6945
Gouttelettes lipidiques	Parasite corps	-0,0011	0,9908
Gouttelettes lipidiques	Malformation	-0,0781	0,3923
Gouttelettes lipidiques	Anomalie foie	-0,1326	0,1455
Gouttelettes lipidiques	Anomalies rate	0,1414	0,1203
Gouttelettes lipidiques	Fusion d'organes	-0,0314	0,7316
Gouttelettes lipidiques	Indice intégré d'atteinte de santé	0,1009	0,2689
Gouttelettes lipidiques	Délai de traitement	0,0900	0,3240
Gouttelettes lipidiques	Indice hépatosomatique	0,6663	<.0001
Gouttelettes lipidiques	Indice splénosomatique	0,2510	0,0053
Gouttelettes lipidiques	Agrégats de mélanophages	-0,3360	0,0002
Gouttelettes lipidiques	Agrégats de lymphocytes	0,0224	0,8068
Glycogène	Age	-0,1013	0,2667
Glycogène	Indice condition	0,3205	0,0003
Glycogène	Parasite yeux	0,2414	0,0074
Glycogène	Parasite intestin	-0,1627	0,0734
Glycogène	Parasite corps	0,0390	0,6696
Glycogène	Malformation	-0,0364	0,6903
Glycogène	Anomalie foie	-0,0050	0,9562
Glycogène	Anomalies rate	-0,0323	0,7236
Glycogène	Fusion d'organes	-0,0700	0,4439
Glycogène	Indice intégré d'atteinte de santé	0,0405	0,6580
Glycogène	Délai de traitement	0,1452	0,1107
Glycogène	Indice hépatosomatique	0,4822	<.0001

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Glycogène	Indice splénosomatique	0,0130	0,8867
Glycogène	Agrégats de mélanophages	-0,1454	0,1101
Glycogène	Agrégats de lymphocytes	0,0189	0,8365
Glycogène	Gouttelettes lipidiques	0,4642	<.0001
Lipides hépatiques totaux	Age	-0,4318	<.0001
Lipides hépatiques totaux	Indice condition	0,3322	0,0002
Lipides hépatiques totaux	Parasite yeux	0,3304	0,0002
Lipides hépatiques totaux	Parasite intestin	0,0334	0,7149
Lipides hépatiques totaux	Parasite corps	-0,0908	0,3200
Lipides hépatiques totaux	Malformation	-0,0739	0,4187
Lipides hépatiques totaux	Anomalie foie	-0,1313	0,1495
Lipides hépatiques totaux	Anomalies rate	0,1949	0,0315
Lipides hépatiques totaux	Fusion d'organes	-0,0315	0,7302
Lipides hépatiques totaux	Indice intégré d'atteinte de santé	0,1175	0,1973
Lipides hépatiques totaux	Délai de traitement	-0,0011	0,9902
Lipides hépatiques totaux	Indice hépatosomatique	0,6974	<.0001
Lipides hépatiques totaux	Indice splénosomatique	0,3591	<.0001
Lipides hépatiques totaux	Agrégats de mélanophages	-0,4392	<.0001
Lipides hépatiques totaux	Agrégats de lymphocytes	-0,0105	0,9089
Lipides hépatiques totaux	Gouttelettes lipidiques	0,7628	<.0001
Lipides hépatiques totaux	Glycogène	0,3770	<.0001
Eau du foie	Age	0,3617	<.0001
Eau du foie	Indice condition	-0,2847	0,0015
Eau du foie	Parasite yeux	-0,2884	0,0013
Eau du foie	Parasite intestin	0,0151	0,8689
Eau du foie	Parasite corps	0,0782	0,3917
Eau du foie	Malformation	0,0591	0,5176
Eau du foie	Anomalie foie	0,0701	0,4429
Eau du foie	Anomalies rate	-0,1117	0,2205
Eau du foie	Fusion d'organes	0,0871	0,3400
Eau du foie	Indice intégré d'atteinte de santé	-0,0966	0,2899
Eau du foie	Délai de traitement	0,0552	0,5462
Eau du foie	Indice hépatosomatique	-0,7088	<.0001
Eau du foie	Indice splénosomatique	-0,3544	<.0001
Eau du foie	Agrégats de mélanophages	0,3546	<.0001
Eau du foie	Agrégats de lymphocytes	-0,0363	0,6917
Eau du foie	Gouttelettes lipidiques	-0,7379	<.0001
Eau du foie	Glycogène	-0,4023	<.0001
Eau du foie	Lipides hépatiques totaux	-0,9214	<.0001
Protéines hépatiques totales	Age	-0,0778	0,3944
Protéines hépatiques totales	Indice condition	-0,0331	0,7174
Protéines hépatiques totales	Parasite yeux	0,0540	0,5548
Protéines hépatiques totales	Parasite intestin	0,1850	0,0413
Protéines hépatiques totales	Parasite corps	-0,0073	0,9360
Protéines hépatiques totales	Malformation	-0,0009	0,9925
Protéines hépatiques totales	Anomalie foie	0,0426	0,6416
Protéines hépatiques totales	Anomalies rate	0,1023	0,2621

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Protéines hépatiques totales	Fusion d'organes	0,0114	0,9010
Protéines hépatiques totales	Indice intégré d'atteinte de santé	0,1332	0,1435
Protéines hépatiques totales	Délai de traitement	-0,0134	0,8837
Protéines hépatiques totales	Indice hépatosomatique	0,0092	0,9199
Protéines hépatiques totales	Indice splénosomatique	-0,0218	0,8118
Protéines hépatiques totales	Agrégats de mélanophages	0,0344	0,7065
Protéines hépatiques totales	Agrégats de lymphocytes	0,0321	0,7254
Protéines hépatiques totales	Gouttelettes lipidiques	-0,1763	0,0521
Protéines hépatiques totales	Glycogène	-0,2581	0,0041
Protéines hépatiques totales	Lipides hépatiques totaux	-0,1029	0,2592
Protéines hépatiques totales	Eau du foie	0,1014	0,2663
Splénocytes à l'état apoptotique	Age	0,1155	0,2054
Splénocytes à l'état apoptotique	Indice condition	0,4226	<.0001
Splénocytes à l'état apoptotique	Parasite yeux	0,0736	0,4207
Splénocytes à l'état apoptotique	Parasite intestin	-0,2217	0,0141
Splénocytes à l'état apoptotique	Parasite corps	0,1056	0,2471
Splénocytes à l'état apoptotique	Malformation	0,3643	<.0001
Splénocytes à l'état apoptotique	Anomalie foie	0,1087	0,2335
Splénocytes à l'état apoptotique	Anomalies rate	-0,0757	0,4075
Splénocytes à l'état apoptotique	Fusion d'organes	0,0075	0,9345
Splénocytes à l'état apoptotique	Indice intégré d'atteinte de santé	0,2045	0,0239
Splénocytes à l'état apoptotique	Délai de traitement	0,5440	<.0001
Splénocytes à l'état apoptotique	Indice hépatosomatique	0,0621	0,4966
Splénocytes à l'état apoptotique	Indice splénosomatique	-0,2311	0,0104
Splénocytes à l'état apoptotique	Agrégats de mélanophages	0,1266	0,1646
Splénocytes à l'état apoptotique	Agrégats de lymphocytes	-0,0158	0,8630
Splénocytes à l'état apoptotique	Gouttelettes lipidiques	0,1711	0,0596
Splénocytes à l'état apoptotique	Glycogène	0,3842	<.0001
Splénocytes à l'état apoptotique	Lipides hépatiques totaux	0,0740	0,4180
Splénocytes à l'état apoptotique	Eau du foie	-0,0184	0,8403
Splénocytes à l'état apoptotique	Protéines hépatiques totales	0,0096	0,9168
Apparence des sinusoides	Age	-0,4198	<.0001
Apparence des sinusoides	Indice condition	0,2421	0,0072
Apparence des sinusoides	Parasite yeux	0,3284	0,0002
Apparence des sinusoides	Parasite intestin	0,0469	0,6083
Apparence des sinusoides	Parasite corps	-0,0373	0,6837
Apparence des sinusoides	Malformation	-0,1516	0,0955
Apparence des sinusoides	Anomalie foie	-0,1410	0,1213
Apparence des sinusoides	Anomalies rate	0,1653	0,0689
Apparence des sinusoides	Fusion d'organes	-0,0107	0,9067
Apparence des sinusoides	Indice intégré d'atteinte de santé	0,0760	0,4051
Apparence des sinusoides	Délai de traitement	-0,0386	0,6731
Apparence des sinusoides	Indice hépatosomatique	0,7024	<.0001
Apparence des sinusoides	Indice splénosomatique	0,3671	<.0001
Apparence des sinusoides	Agrégats de mélanophages	-0,3576	<.0001
Apparence des sinusoides	Agrégats de lymphocytes	0,1021	0,2631
Apparence des sinusoides	Gouttelettes lipidiques	0,7097	<.0001

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Apparence des sinusoides	Glycogène	0,3998	<.0001
Apparence des sinusoides	Lipides hépatiques totaux	0,7573	<.0001
Apparence des sinusoides	Eau du foie	-0,7744	<.0001
Apparence des sinusoides	Protéines hépatiques totales	-0,1436	0,1147
Apparence des sinusoides	Splénocytes à l'état apoptotique	-0,0590	0,5186
Apparence d'autolyse	Age	-0,3643	<.0001
Apparence d'autolyse	Indice condition	0,2551	0,0046
Apparence d'autolyse	Parasite yeux	0,1770	0,0511
Apparence d'autolyse	Parasite intestin	0,1795	0,0479
Apparence d'autolyse	Parasite corps	-0,0641	0,4833
Apparence d'autolyse	Malformation	-0,0598	0,5133
Apparence d'autolyse	Anomalie foie	-0,1402	0,1236
Apparence d'autolyse	Anomalies rate	0,1473	0,1054
Apparence d'autolyse	Fusion d'organes	-0,1695	0,0619
Apparence d'autolyse	Indice intégré d'atteinte de santé	0,0171	0,8518
Apparence d'autolyse	Délai de traitement	-0,0495	0,5880
Apparence d'autolyse	Indice hépatosomatique	0,5638	<.0001
Apparence d'autolyse	Indice splénosomatique	0,3914	<.0001
Apparence d'autolyse	Agrégats de mélanophages	-0,3565	<.0001
Apparence d'autolyse	Agrégats de lymphocytes	0,0331	0,7177
Apparence d'autolyse	Gouttelettes lipidiques	0,5040	<.0001
Apparence d'autolyse	Glycogène	0,3107	0,0005
Apparence d'autolyse	Lipides hépatiques totaux	0,5250	<.0001
Apparence d'autolyse	Eau du foie	-0,5150	<.0001
Apparence d'autolyse	Protéines hépatiques totales	0,0051	0,9557
Apparence d'autolyse	Splénocytes à l'état apoptotique	0,0797	0,3829
Apparence d'autolyse	Apparence des sinusoides	0,4916	<.0001
Hétérophiles	Age	-0,2752	0,0022
Hétérophiles	Indice condition	0,0261	0,7754
Hétérophiles	Parasite yeux	0,1691	0,0626
Hétérophiles	Parasite intestin	0,1327	0,1452
Hétérophiles	Parasite corps	0,0460	0,6151
Hétérophiles	Malformation	-0,0047	0,9594
Hétérophiles	Anomalie foie	-0,0129	0,8883
Hétérophiles	Anomalies rate	0,1670	0,0660
Hétérophiles	Fusion d'organes	0,1376	0,1307
Hétérophiles	Indice intégré d'atteinte de santé	0,1828	0,0439
Hétérophiles	Délai de traitement	-0,0541	0,5540
Hétérophiles	Indice hépatosomatique	0,2847	0,0015
Hétérophiles	Indice splénosomatique	0,2441	0,0067
Hétérophiles	Agrégats de mélanophages	-0,2674	0,0029
Hétérophiles	Agrégats de lymphocytes	0,3886	<.0001
Hétérophiles	Gouttelettes lipidiques	0,2922	0,0011
Hétérophiles	Glycogène	-0,0104	0,9095
Hétérophiles	Lipides hépatiques totaux	0,2629	0,0034
Hétérophiles	Eau du foie	-0,2642	0,0033
Hétérophiles	Protéines hépatiques totales	0,0688	0,4515

Indicateurs		Rho de Spearman	Prob> Rho
Hétérophiles	Splénocytes à l'état apoptotique	-0,0872	0,3394
Hétérophiles	Apparence des sinusoides	0,2585	0,0040
Hétérophiles	Apparence d'autolyse	0,2071	0,0221
Lymphocytes libres	Age	0,1979	0,0289
Lymphocytes libres	Indice condition	0,0068	0,9407
Lymphocytes libres	Parasite yeux	-0,2477	0,0059
Lymphocytes libres	Parasite intestin	0,0649	0,4774
Lymphocytes libres	Parasite corps	-0,0441	0,6295
Lymphocytes libres	Malformation	0,1307	0,1515
Lymphocytes libres	Anomalie foie	0,0248	0,7863
Lymphocytes libres	Anomalies rate	-0,0524	0,5668
Lymphocytes libres	Fusion d'organes	0,1591	0,0800
Lymphocytes libres	Indice intégré d'atteinte de santé	0,0370	0,6858
Lymphocytes libres	Délai de traitement	0,0370	0,6855
Lymphocytes libres	Indice hépatosomatique	-0,3639	<.0001
Lymphocytes libres	Indice splénosomatique	-0,1218	0,1812
Lymphocytes libres	Agrégats de mélanophages	0,2582	0,0041
Lymphocytes libres	Agrégats de lymphocytes	0,0795	0,3839
Lymphocytes libres	Gouttelettes lipidiques	-0,3656	<.0001
Lymphocytes libres	Glycogène	-0,1158	0,2041
Lymphocytes libres	Lipides hépatiques totaux	-0,3662	<.0001
Lymphocytes libres	Eau du foie	0,3073	0,0006
Lymphocytes libres	Protéines hépatiques totales	0,2121	0,0190
Lymphocytes libres	Splénocytes à l'état apoptotique	-0,0415	0,6502
Lymphocytes libres	Apparence des sinusoides	-0,2208	0,0145
Lymphocytes libres	Apparence d'autolyse	-0,2378	0,0084
Lymphocytes libres	Hétérophiles	0,0534	0,5593

APPENDICE F

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DE CHAQUE STATION

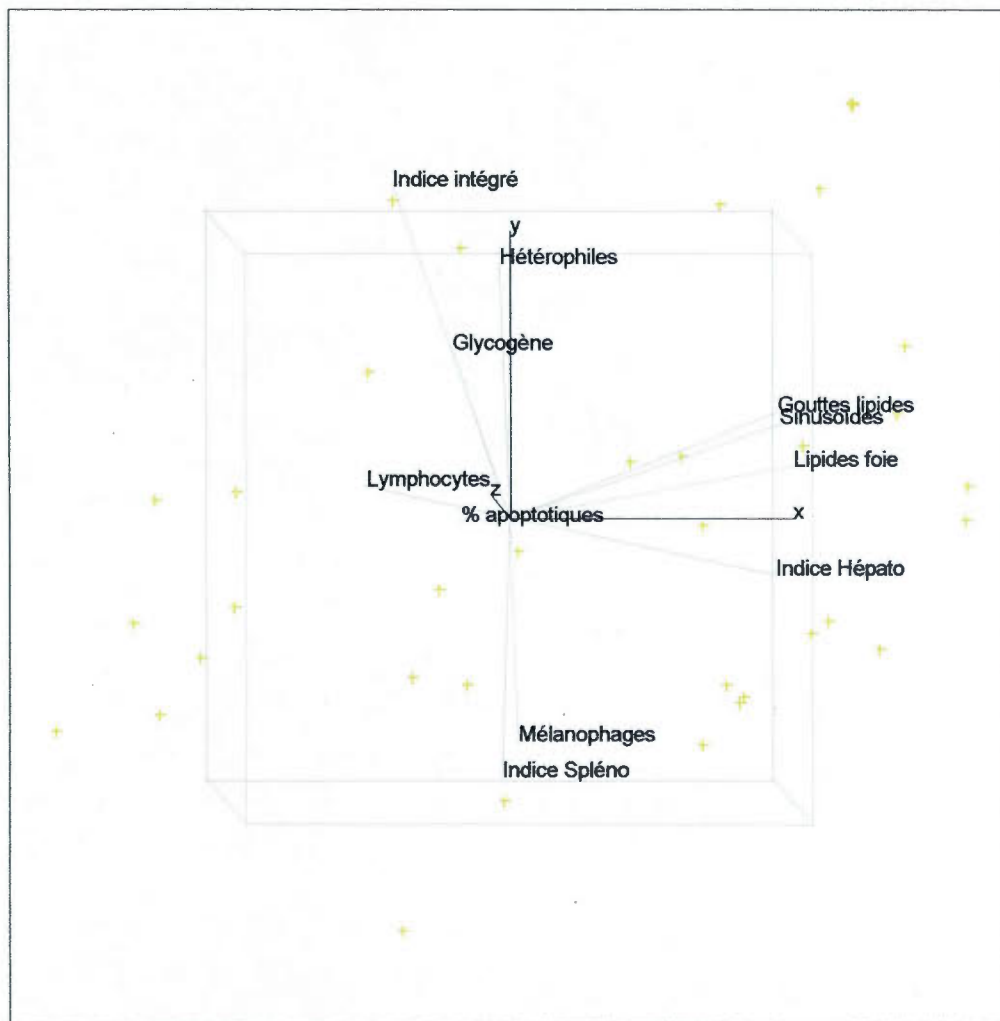


Figure F1 : Analyse en composantes principales des esturgeons de la station du lac Saint-Louis. Dispersion des esturgeons dans l'espace multivarié selon les trois axes principaux. En X = principale 1, en Y = principale 2 et en Z = principale 3.

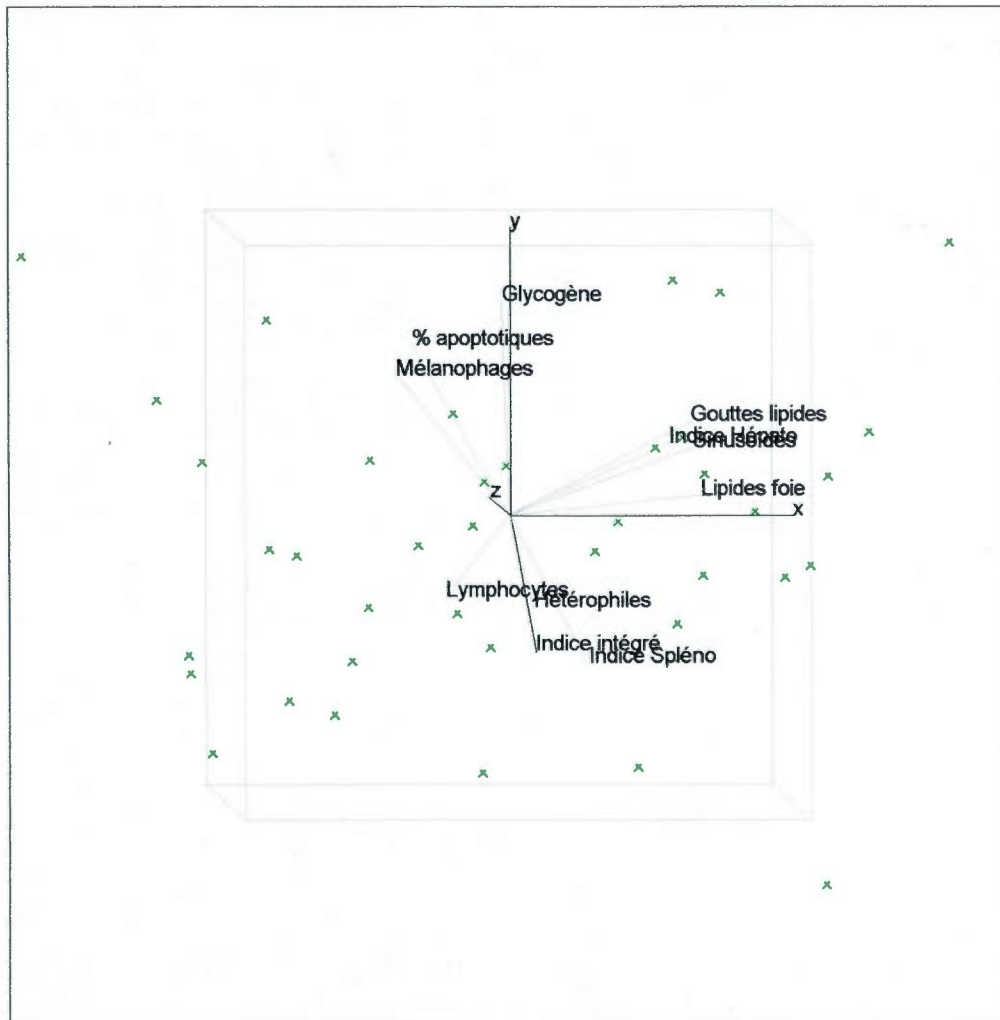


Figure F2 : Analyse en composantes principales des esturgeons de la station de l'archipel du lac Saint-Pierre. Dispersion des esturgeons dans l'espace multivarié selon les trois axes principaux. En X = principale 1, en Y = principale 2 et en Z = principale 3.

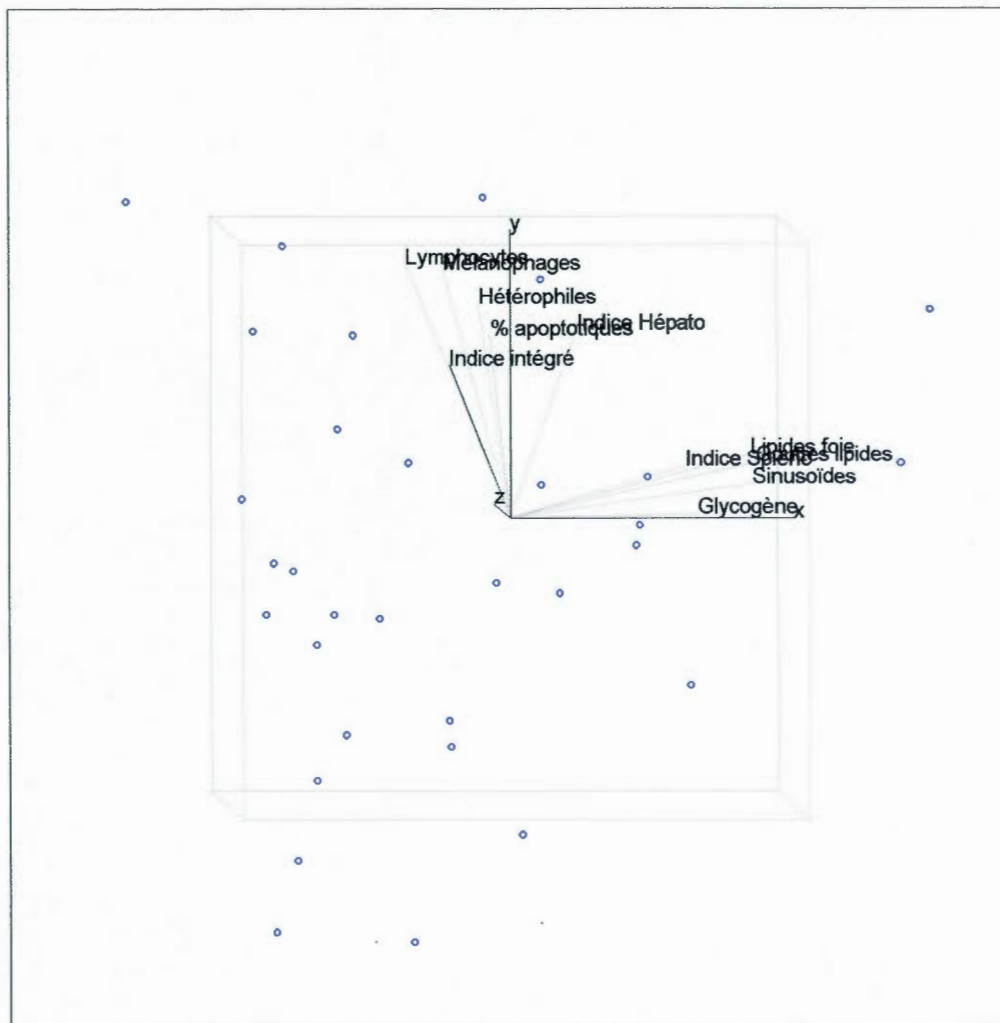


Figure F3 : Analyse en composantes principales des esturgeons de la station du lac Berthelot. Dispersion des esturgeons dans l'espace multivarié selon les trois axes principaux. En X = principale 1, en Y = principale 2 et en Z = principale 3.

APPENDICE G

MICROGRAPHIES DE FOIE D'ESTURGEON JAUNE.

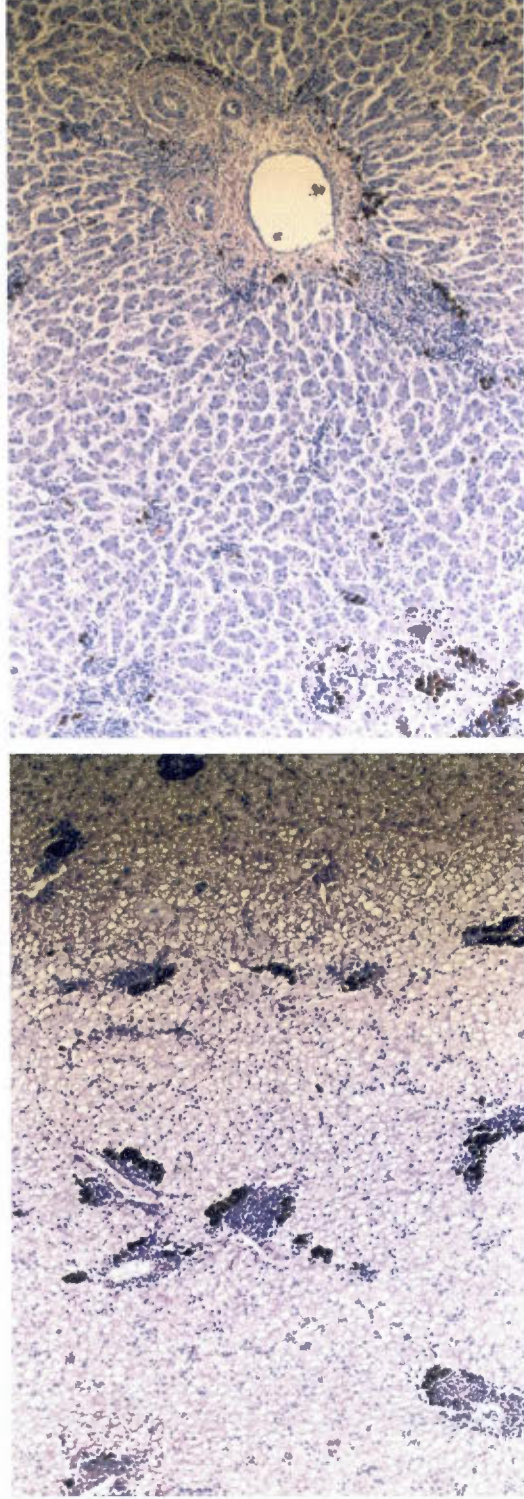


Figure G : Micrographie de foie d'esturgeon jaune colorée. Grossissement 150 X. Gauche : esturgeon du lac Saint-Louis.
Droite : esturgeon du lac Berthelot

APPENDICE H

DISTANCES DE MAHALANOBIS COMPLÉMENTAIRES

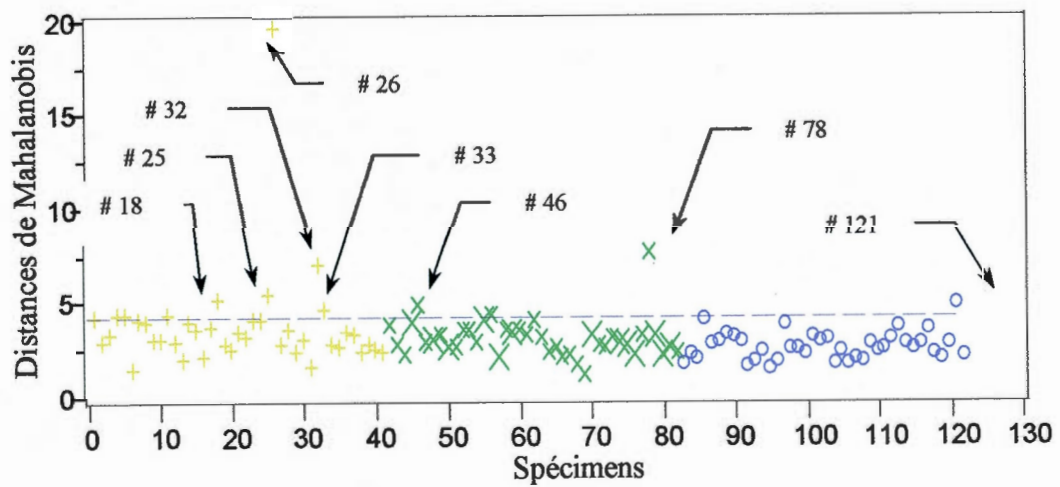


Figure H : Distances de Mahalanobis issues d'une ACP produite avec les mêmes indicateurs que ceux mentionnés dans le tableau 3.3 mais sans l'indice hépatosomatique.

APPENDICE I

DISTRIBUTIONS DE FRÉQUENCES DE L'INDICE HÉPATOSOMATIQUE

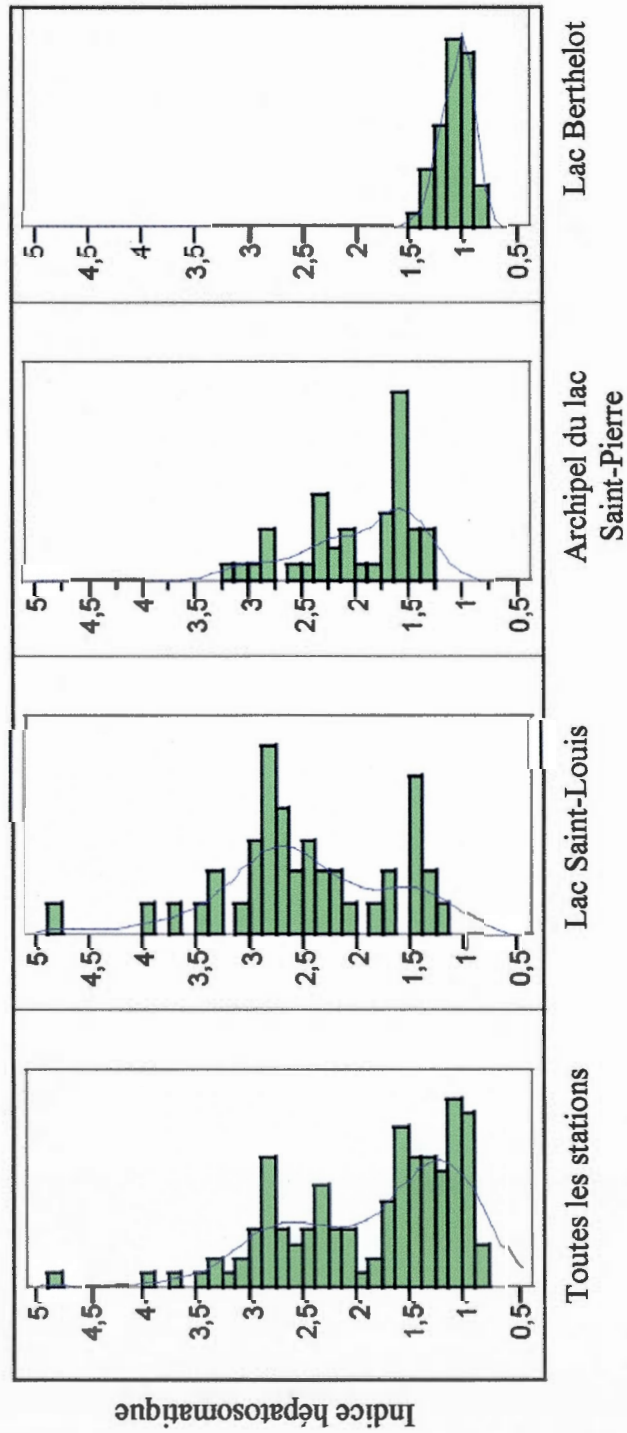


Figure I : Distributions de fréquences de l'indice hépatosomatique pour l'ensemble des stations et pour chaque station.

APPENDICE J

DISTRIBUTION DE FRÉQUENCES DE LA COMPOSANTE PRINCIPALE 1

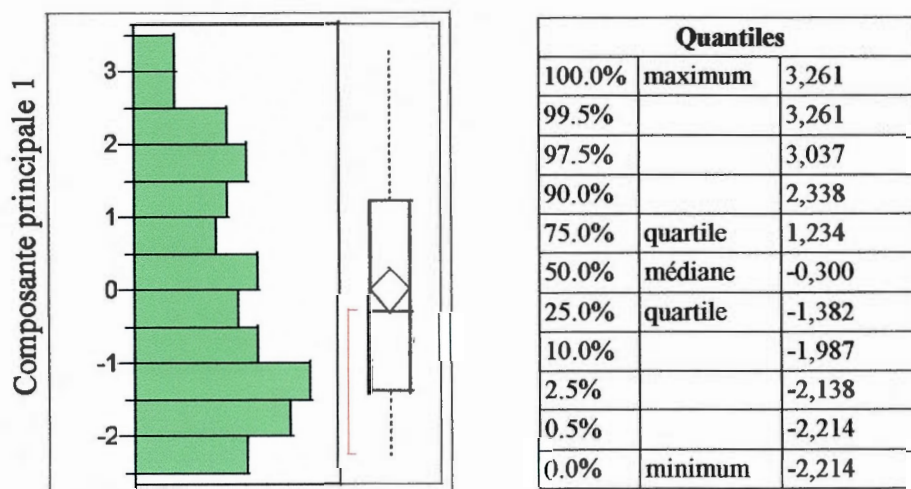


Figure J : Distribution de fréquence de la composante principale 1 issue des indicateurs présence de gouttelettes lipidiques, lipides hépatiques totaux et apparence des sinusoides.