



178957
Scientific Excellence • Resource Protection & Conservation • Benefits for Canadians
Excellence scientifique • Protection et conservation des ressources • Bénéfices aux Canadiens

Environmental Requirements of the Blue Mussel (*Mytilus edulis*) in Eastern Canada and Its Response to Human Impacts

P.L. Stewart

Biological Sciences Branch
Scotia-Fundy Region
Department of Fisheries and Oceans
Bedford Institute of Oceanography
P.O. Box 1006
Dartmouth, Nova Scotia B2Y 4A2
Canada

1994

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2004



Fisheries
and Oceans

Pêches
et Océans

Canada

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

These reports contain scientific and technical information that represents an important contribution to existing knowledge but which for some reason may not be appropriate for primary scientific (i.e. *Journal*) publication. Technical Reports are directed primarily towards a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of the Department of Fisheries and Oceans, namely, fisheries management, technology and development, ocean sciences, and aquatic environments relevant to Canada.

Technical Reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report will be abstracted in *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts* and will be indexed annually in the Department's index to scientific and technical publications.

Numbers 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and the Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Details on the availability of Technical Reports in hard copy may be obtained from the issuing establishment indicated on the front cover.

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Ces rapports contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution importante aux connaissances actuelles mais qui, pour une raison ou pour une autre, ne semblent pas appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Il n'y a aucune restriction quant au sujet, de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques du Ministère des Pêches et des Océans, notamment gestion des pêches, techniques et développement, sciences océaniques et environnements aquatiques, au Canada.

Les Rapports techniques peuvent être considérés comme des publications complètes. Le titre exact paraîtra au haut du résumé de chaque rapport, qui sera publié dans la revue *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts* et qui figurera dans l'index annuel des publications scientifiques et techniques du Ministère.

Les numéros 1-456 de cette série ont été publiés à titre de Rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457-714, à titre de Rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715-924 ont été publiés à titre de Rapports techniques du Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom de la série a été modifié à partir du numéro 925.

La page couverture porte le nom de l'établissement auteur où l'on peut se procurer les rapports sous couverture cartonnée.

Canadian Technical Report of
Fisheries and Aquatic Sciences 2004

1994

**ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS OF
THE BLUE MUSSEL (*MYTILUS EDULIS*) IN EASTERN CANADA
AND ITS RESPONSE TO HUMAN IMPACTS**

by

P.L. Stewart¹

Biological Sciences Branch
Scotia-Fundy Region
Department of Fisheries and Oceans
Bedford Institute of Oceanography
P.O. Box 1006
Dartmouth, Nova Scotia B2Y 4A2
Canada

¹Envirosphere Consultants Limited, Box 2906, Windsor, NS B0N 2T0, Canada

© Minister of Public Works and Government Services Canada 1994
Cat. No. Fs 97-6/2004 ISSN 0706-6457

Correct citation for this publication:

Stewart, P.L. 1994. Environmental requirements of the blue mussel (*Mytilus edulis*) in eastern Canada and its response to human impacts. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2004: x + 41 p.

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES	vi
LIST OF TABLES	vi
ABSTRACT	vii
RÉSUMÉ	viii
PREFACE	x
NATURAL HISTORY	1
GEOGRAPHIC DISTRIBUTION	1
SEASONAL CYCLES	1
Reproduction	1
Growth	2
FEEDING	2
SIZE AND AGE COMPOSITION	4
<i>MYTILUS TROSSULUS</i>	4
PARASITES AND DISEASES	4
SUMMER DIE-OFF	5
PREDATORS	5
ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS	5
TEMPERATURE	5
SALINITY	6
DISSOLVED OXYGEN	6
DEPTH	6
SUSPENDED PARTICULATE MATTER	7
SUBSTRATE	7
CURRENTS	7
SEA ICE	8
ECONOMIC IMPORTANCE AND RESOURCE USE	8
NATURAL POPULATIONS	8
AQUACULTURE	8
Techniques	9
Distribution	9
Regulation	11
Environmental Concerns	11

TABLE OF CONTENTS (continued)

BIOFOULING	11
SHELLFISH TOXINS	12
 HUMAN IMPACTS	 13
ENVIRONMENTAL CONTAMINANTS AND POLLUTION	13
Responses to Contaminants	13
<i>Mussel Watch</i>	16
Heavy Metals	16
Accumulation	16
Effects	17
Organic Contaminants	18
Polychlorinated Biphenyls (PCBs)	18
Pesticides	19
Petroleum Hydrocarbons	19
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)	19
Other Organic Compounds	20
Tributyltin	21
PHYSICAL DISTURBANCE	21
Dredging	21
Coastal and Offshore Structures	22
INDUSTRIAL CONTAMINATION	22
Pulp and Paper	22
Mining and Smelting	22
Chlorination	22
Brines	23
Thermal Pollution	23
Hydrocarbon Industry	24
AGRICULTURAL AND FORESTRY IMPACTS	25
DOMESTIC WASTES	25
WASTE ROCK DUMPING	25
HYDROELECTRIC DEVELOPMENT	25
ACKNOWLEDGEMENTS	26

TABLE OF CONTENTS (continued)

SELECTED REFERENCES	26
DEPARTMENT OF FISHERIES AND OCEANS EXPERTS	30
REFERENCES	31

LIST OF FIGURES

Figure 1. Generalized life cycle of blue mussel, <i>Mytilus edulis</i> , in eastern Canada.	3
Figure 2. Generalized mussel aquaculture methods used in eastern Canada.	10

LIST OF TABLES

Table 1. Important toxic phytoplankton in eastern Canadian waters.	13
--	----

ABSTRACT

Stewart, P.L. 1994. Environmental requirements of the blue mussel (*Mytilus edulis*) in eastern Canada and its response to human impacts. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2004: x + 41 p.

The common or blue mussel, *Mytilus edulis*, is one of the most abundant and widely distributed invertebrate species found in intertidal and shallow subtidal waters in the North Atlantic. Its planktonic larvae and adult stages are important as food for fish, various invertebrates, birds, mammals, and humans. The species also supports a major aquaculture industry in eastern Canada, centred principally in Iles-de-la-Madeleine, Prince Edward Island, the Atlantic Coast of Nova Scotia, and the northeastern coast of Newfoundland (principally Notre Dame Bay). No significant commercial harvest of natural populations of blue mussels occurs in eastern Canada. Recreational fisheries and aquaculture operations are impacted by occurrence of various phytoplankton species which produce toxins, which have virtually eliminated these activities from the Bay of Fundy, but limit them only seasonally in the Gulf of St. Lawrence (except in Iles-de-la-Madeleine) and periodically in other areas. *M. edulis* feeds on suspended phytoplankton and detrital organic matter throughout the year and responds to spring bloom conditions by developing gonads and spawning in the May-July period. Larval stages feed on plankton and subsequently adopt a life on the seabed and intertidal areas, reaching adult size in from 1 to 3 yr and reproducing after 1 yr.

M. edulis is one of the most commonly used marine organism (if not the most common) in studies of contaminant toxicology and physiology, and in monitoring and evaluating environmental impacts of humans on the marine environment. The blue mussel is the main organism used in *Mussel Watch* studies world wide which use analyses of chemical contaminants in mussels to assess trends in environmental contamination. In addition, mussels have been used widely in Canada and elsewhere, both in transplant experiments and natural populations, to identify contaminant sources and behaviour, and baseline levels of contaminants. Mussels tolerate many chemical contaminants and have biochemical systems (such as production of metallothioneins and "heat shock" proteins, and induction of mixed-function oxidase enzyme systems) to reduce their impact. Physiological measures such as scope for growth, oxygen/nitrogen ratio, and condition indices have been used commonly to assess stress resulting from both contamination and other environmental factors.

Main problems in mussel aquaculture include the existence of shellfish toxins, ice in winter, and a phenomenon known as "summer die-off" in which a large proportion of individuals die. Natural populations may be impacted by reduced-salinity water from industrial outfalls, as well as contamination from metals and various organic compounds. In general, pollution is localized in point sources which do not impact the majority of the blue mussel populations. Human contamination from fecal coliform bacteria, organic releases in connection with sewage disposal, and agricultural run-off pose the greatest potential for widespread impact on human use of mussel populations.

RÉSUMÉ

Stewart, P.L. 1994. Environmental requirements of the blue mussel (*Mytilus edulis*) in eastern Canada and its response to human impacts. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2004: x + 41 p.

La moule bleue ou moule commune (aussi appelée moucle ou mouke), *Mytilus edulis*, est une des espèces d'invertébrés les plus abondantes et les plus largement répandues dans les zones intertidales et les eaux infratidales peu profondes de l'Atlantique Nord. Les larves planctoniques et les adultes de cette espèce représentent une importante source de nourriture pour les poissons, divers invertébrés, les oiseaux et les mammifères, dont l'homme. En outre, son élevage (mytiliculture) est beaucoup pratiqué dans l'est du Canada, principalement dans les îles de la Madeleine, dans l'Île-du-Prince-Édouard, sur le littoral atlantique de la Nouvelle-Écosse et sur la côte nord-est de Terre-Neuve (surtout la baie Notre Dame). L'exploitation commerciale des populations sauvages de moules bleues est peu pratiquée dans l'est du Canada. La présence de diverses espèces phytoplanctoniques produisant des toxines nuit à la récolte récréative et à l'élevage de la moule, deux activités qui ont à peu près disparu de la baie de Fundy mais qui ne sont interdites que de façon saisonnière dans le golfe du Saint-Laurent (sauf les îles de la Madeleine), et périodiquement ailleurs. *M. edulis* se nourrit toute l'année de phytoplancton et de matières organiques détritiques en suspension dans l'eau, et réagit à la prolifération printanière en développant ses gonades et en se reproduisant dans les mois de mai et juin. Les larves se nourrissent de plancton et vont ensuite se fixer au fond de la mer et en zone intertidale; elles atteignent leur taille adulte après une à trois années et se reproduisent après un an.

M. edulis est un des organismes marins les plus fréquemment employés (sinon le plus couramment employé) dans l'étude toxicologique et physiologique des contaminants et dans la surveillance et l'évaluation de l'impact écologique exercé par l'activité humaine sur l'environnement marin. La moule bleue occupe la première place dans les études internationales de surveillance des moules (programme *Mussel Watch*), consistant à analyser la contamination chimique des moules pour faire le point sur l'évolution de la contamination de l'environnement. En outre, des populations transplantées et naturelles de moules ont été souvent utilisées, au Canada comme à l'étranger, pour déterminer l'origine et le comportement des contaminants et mesurer le taux de contamination ambiant. Les moules tolèrent de nombreux contaminants chimiques et peuvent en atténuer les effets grâce à des fonctions biochimiques particulières (comme la production de métallothionéines et de protéines de «choc thermique», ou l'induction de systèmes enzymatiques d'oxydases à fonction mixte). Le stress créé par la contamination et d'autres facteurs environnementaux est communément mesuré par l'analyse de facteurs physiologiques comme le potentiel de croissance, le rapport oxygène/azote et divers indices de condition.

Les principaux problèmes de la mytiliculture sont causés par la présence de toxines, l'englacement des eaux en hiver et un phénomène de «mortalité massive estivale» causant la mort d'une forte proportion de la population de moules. Pour les

populations naturelles, les menaces peuvent être une désalinisation des eaux imputable aux rejets industriels, ou encore une contamination par les métaux et divers composés organiques. En général, la pollution se limite à des sources ponctuelles qui ne menacent pas la majorité des populations. La contamination d'origine humaine (bactéries coliformes fécales, matières organiques transportées par les égouts, ruissellement agricole) est celle qui peut avoir l'impact le plus étendu sur la consommation humaine de moules.

PREFACE

Habitat managers in the Department of Fisheries and Oceans (DFO) often require key information on the habitat and environmental requirements of resource species in order to assess the potential impacts of industrial and other types of development. Such information is often spread over various diverse sources including reference books, scientific journals, technical reports, unreferenced hard copy, and computer files, as well as in the memory of individuals. It follows that the information is often difficult and time consuming to access. As a result, managers often must make decisions without the benefit of key material because it is not readily available to them. This document is one of a series of technical reports that attempts to rectify this situation by making available user-friendly habitat profiles summarizing existing information on species life history, habitat requirements, and known anthropogenic effects on their populations.

Building on the model of the successful pilot project on lobster¹ conducted by DFO's Marine Atlantic Standing Subcommittee on Habitat (MASSH) in 1992, this report and two other profiles^{2,3} have recently been produced. The current project, which involved literature review and consultation, was undertaken under contract by Envirosphere Consultants Limited of Windsor, Nova Scotia. The three species - Atlantic herring, blue mussel, and sea scallop - were selected jointly by the four Atlantic Regions of DFO (Newfoundland, Scotia-Fundy, Gulf, and Québec). Each report is published in English and French as a single document. Funding for this work was provided through the Sustainable Fisheries Program of Environment Canada's Green Plan.

We hope that it will be possible to develop further profiles in the near future, and welcome your suggestions and ideas for improving the usefulness of these profiles.

Donald C. Gordon
Project Manager
Biological Sciences Branch
Department of Fisheries and Oceans
Scotia-Fundy Region

H. Brian Nicholls
Scientific Authority
Marine Assessment and Liaison Division
Department of Fisheries and Oceans
Scotia-Fundy Region

¹Harding, G.C. 1992. American lobster (*Homarus americanus* Milne Edwards): A discussion paper on their environmental requirements and the known anthropogenic effects on their populations. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1887: vi + 16 p.

²Stewart, P.L., and S.H. Arnold. 1994. Environmental requirements of the Atlantic herring (*Clupea harengus harengus*) in eastern Canada and its response to human impacts. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2003: ix + 37 p.

³Stewart, P.L., and S.H. Arnold. 1994. Environmental requirements of the sea scallop (*Placopecten magellanicus*) in eastern Canada and its response to human impacts. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2005: ix + 36 p.

NATURAL HISTORY

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION

The blue or sea mussel (*Mytilus edulis*) is distributed widely in the North Atlantic⁴. It occurs in Europe and North America from north of the Arctic Circle to a southern limit at Cape Hatteras, North Carolina.

SEASONAL CYCLES

Reproduction

Reproduction in *M. edulis* follows an annual cycle, which depends on a balance of various environmental factors such as temperature, salinity, and food availability, and aspects of the mussel's physiology. Interaction between these factors ensures that blue mussels in a given population reach reproductive condition at the same time. *M. edulis* produces microscopic eggs and sperm which are released simultaneously into the water to allow fertilization. Ovaries and testes develop during the spring, and account for the creamy (males) or orange (females) colour of shucked mussels. Release of eggs and sperm can take place over a brief period when the reproductive organs are ripe and is likely triggered by external stimuli such as increasing water temperature, changing salinity, mechanical disturbance by waves, dessication, high concentrations of phytoplankton, and presence of mussel sperm.

Most populations of *M. edulis* produce one generation per year and, following spawning, continue to grow in preparation for the next reproductive effort. In certain populations some gonad development takes place during the winter, but not until spring in Newfoundland waters (Thompson 1984). In Newfoundland, development of gametes begins in the spring and most spawning takes place in June or July. In other areas, spawning occurs: in late May-July (Nova Scotia), soon after ice break-up in May (Prince Edward Island), and in the May-June period (Québec). A second spawning occasionally occurs in autumn if an adequate food supply is available. Mussels do not spawn in the first year of growth.

The first of several swimming stages of mussel larvae develop from the eggs in about 5 h. Larvae live in the water column for 3 to 4 wk or more (depending on

⁴*Mytilus edulis* was formerly thought to occur worldwide, but it has been recognized that it instead consists of a complex of three evolutionary lines. In Europe, *M. edulis* co-occurs with *M. galloprovincialis* whose range encompasses the Mediterranean and Europe. *M. trossulus* co-occurs with *M. edulis* in eastern North American waters. *M. trossulus* is the dominant form on the west coast of North America; but *M. galloprovincialis* (thought to have been introduced from Europe) and *M. californianus*, a fourth species, also occurs there. The three lines are generally acknowledged to deserve listing as separate species.

temperature) and reach a size of about 0.25 mm before settling (Fig. 1). On a suitable substrate (preferably filamentous algae) they extend a flap-like foot and begin secreting byssus threads to anchor themselves. If they do not find an adequate substrate, they detach and enter the water column for up to several weeks until a suitable one is found. Young less than about 2 mm leave the bottom again by secreting long byssus threads which catch currents and disperse them over the bottom. At this stage they favour settling on other mussels, leading to their characteristic accumulation in beds. Aquaculturists acquire seed stock for their operations by collecting the natural settlement ("spatfall") of newly attached juveniles.

Growth

Greatest growth takes place in spring, and reflects local biological production. Growth of shell and non-reproductive tissue follows different patterns, the latter fluctuating significantly owing to the reproductive cycle. Most of the spring growth is due to gonad development. Development of gonads leads to increases in tissue weight in the spring and early summer and to declines in tissue weight at the time of spawning. Generally, tissue weight declines during the winter as energy reserves are used for overwintering. The seasonal cycle results in changes in the biochemical composition of the mussel as well, typically with lipid concentration (reflecting content of gonads), peaking before spawning. The shell continues to grow through the year, but the rate varies seasonally when energy is diverted into other tissues. A condition index (commonly used to describe the degree of tissue development of the mussel and for making comparisons among environments) may use the ratio of tissue weight to shell measurements (volume, weight, linear measurement), which frequently mirrors the seasonal growth cycle (Freeman 1974).

FEEDING

M. edulis is a suspension feeder, using its gills to remove organic material from the water and to double as oxygen-gathering organs. The gills function like sieves, enabling the mussel to concentrate particles of specific sizes and food value; but they do not filter in the conventional sense, and the exact mechanism is under debate (e.g. Ward et al. 1993). Cilia (hairs) on the gills create currents in the mantle cavity, drawing water from outside through an inhalent opening, passing it over and through the gills, and directing it to an exhalent opening between the membranes (mantle) lining the shell. Both inhalent and exhalent openings are readily visible in an actively feeding mussel. Mussels can pump significant quantities of water, up to 4 L per hour for a 50 to 60 mm mussel (Scarratt 1993). Particles (algae, detritus, inorganic particles) are trapped on gill surfaces, bound in mucus, and then are moved by cilia over the gill surface to grooves. The grooves channel strings of mucus containing particles to the end of the gill where the mouth is located. Tissue flaps (labial palps) in the mouth area reject varying amounts of the mucus/particle mixture from the stream to control the amount and physical composition of food entering the mouth. The rejects, together

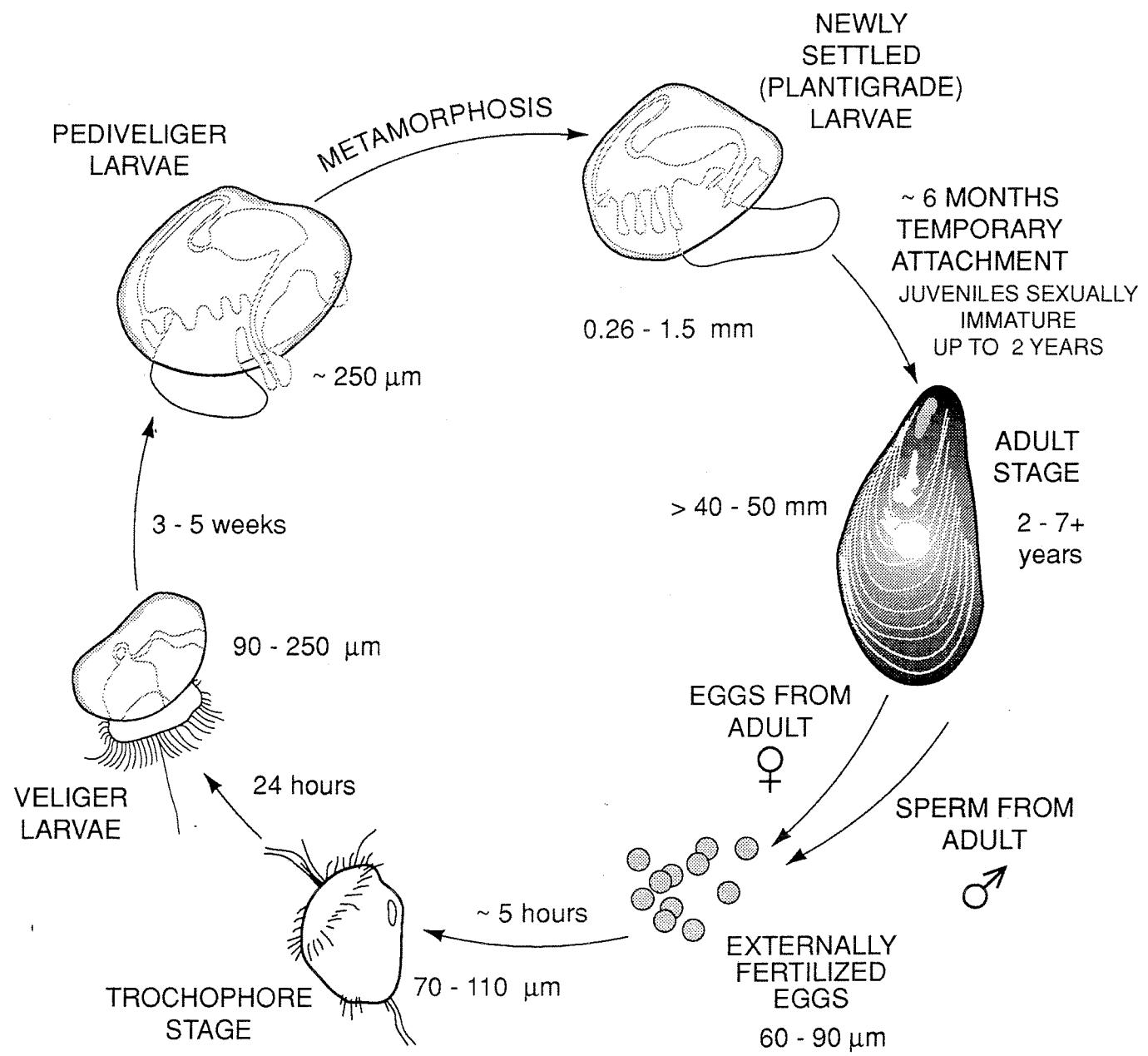


Figure 1. Generalized life cycle of Blue Mussel, *Mytilus edulis*, in Eastern Canada.

with various particles which escape capture on the gill or are otherwise rejected, are expelled as "pseudofeces" with the outflowing water. *M. edulis* can alter the pumping rate to optimize food input within normal ranges. In areas of high inorganic suspended sediment loading the species can compensate for lower food value by increasing pumping rate and altering the amount absorbed from the gut.

SIZE AND AGE COMPOSITION

Maximum sizes of 10 cm or more have been observed in mussels subtidally, but more commonly individuals range from fingernail size to 6 or 7 cm. In Newfoundland, *M. edulis* typically reaches a maximum size of 8 to 9 cm. Mussels typically develop in dense aggregations (beds) so that in some areas large numbers of individuals similar in size can be found, resulting in unimodal size distributions; but bimodal distributions can occur. In a given area, size and age depend on many factors relating to the past development of the organism, patterns of predation, cover, etc.

MYTILUS TROSSULUS

This species was confirmed to occur in eastern Canada in 1984 where it has since been shown to be widespread and to make up a significant proportion of populations in the region previously thought to consist solely of *M. edulis*. Juveniles of the species are similar in appearance to *M. edulis* and can be distinguished by biochemical tests which compare characteristic combinations of enzymes, and, as fully grown adults, by appearing slightly narrower, having a lower meat volume, and having slight differences in the pattern of muscle scars (Freeman et al. 1992; Lobel et al. 1990). *M. trossulus* has a thinner shell and must be handled more gently in mussel processing operations.

PARASITES AND DISEASES

There are no significant parasite or disease problems in eastern Canadian mussel populations. Various parasites or commensals, and a blood disorder (haemic neoplasia), do occur infrequently. Eastern Canadian mussels harbour several ciliate species on the gills and in the digestive system, and flatworm larvae commonly occur in tissues of bottom-growing mussels. Several species of the polychaete worm *Polydora*, chiefly *Polydora websteri*, and boring sponges (*Cliona* spp.) can burrow into mussel shells, resulting in bumps and deformities on the inner surface. Burrows breaking through cause "mud blister," a bump on the inner layer of the shell (McGladdery et al. 1993). Infestations of *P. ciliata* have been shown to stress individual mussels but have little effect on overall populations (Ambariyanto and Seed 1991). Some ciliates have been associated with gill conditions of blue mussels associated with pollution (Farley 1988).

SUMMER DIE-OFF

Mussels in Nova Scotia, Iles-de-la-Madeleine, and Prince Edward Island show an increased rate of mortality in summer, in some cases resulting in major losses known as "summer die-off" (Myrand 1991). Various hypotheses have been put forward; but it appears that the phenomenon is a natural response to environmental stress, which is greater in summer (Mallet et al. 1990). There is a strong genetic component to stress resistance, and mussel stocks show a range of capabilities, presumably to enable them to adapt to wide environmental fluctuations (Mallet et al. 1990).

PREDATORS

M. edulis is subjected to predation at all life stages. Planktonic larvae are exposed to other larger zooplankton including jellyfish, and larval and adult planktivorous fish. Adults on the bottom as well as in some aquaculture operations are predated heavily by starfish, whelks, lobster, crabs, and various fish species, including winter flounder and cunner. Higher vertebrates such as the common eider (*Somateria mollissima*), several species of gulls, and other seabird species, as well as seals, also feed on blue mussels. Some predation of aquacultured mussels by waterfowl has occurred in eastern Canada.

ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS

TEMPERATURE

Mussels can tolerate significant temperature variations, particularly in specimens exposed at low tide. The blue mussel grows successfully under a wide range of temperature conditions where it occurs in Canada, from the eastern Arctic to warmest areas, typically in the Gulf of St. Lawrence, Prince Edward Island, and Iles-de-la-Madeleine. Along the United States east coast the range may extend from 0° to 25°C and in Newfoundland from -1.5° to 23°C. Under extreme cold, mussels can isolate themselves from ambient seawater by shutting the shells for long periods, during which they survive using metabolic processes which do not use oxygen, and by building up a high salt concentration inside the shell to improve tolerance of freezing (Anuaas et al. 1988).

Physiological rates can be maintained relatively independently of temperature over temperature ranges between 5° and 20°C (Widdows 1978b from Bayne et al. 1985). The blue mussel can effectively ingest seston and absorb food at temperatures even in the range of -1° to 4.8°C (Loo 1992).

The upper lethal limit for blue mussels is about 25°C, which corresponds to the mean summer water temperature at the southern distribution extreme for *M. edulis* in North America, which is 26.7°C (Wells and Gray 1960). Temperatures slightly above normal ranges can stress mussels and lead to imbalances which affect population dynamics.

Exposures to high temperatures suddenly reduce byssus thread formation (Young 1985). Hot water treatments are, therefore, used as a means of controlling biofouling where mussels are a problem.

Temperature can also affect the rates of physiological processes, such as depuration of metals from tissues (Dahlgaard 1986). Silver and zinc are released more readily at temperatures 8° to 10°C above winter levels.

SALINITY

M. edulis tolerates a wide range of salinities, from as low as 5 ppt to full strength seawater at 35 ppt; but the minimum is about 15 ppt under prolonged exposures. Normally, blue mussels can acclimate (have the capability to accommodate extremes physiologically if exposed to a gradual change in salinity) to a range of salinities. Exposure to reduced salinities commonly occurs in estuaries and river mouths, and in areas having ice cover subject to melting. Larvae tend to be more sensitive than adults to reduced salinity, while exposure of adults to rapid fluctuations in salinity can lead to reductions in growth.

DISSOLVED OXYGEN

Dissolved oxygen is not usually a problem for *M. edulis* as the species normally occurs in shallow water where oxygen content is usually high. In some situations, such as lagoons, enclosed areas of brackish water, salt marshes, etc., and in severely polluted situations, such as in the vicinity of some sewage outfalls and fish plant discharges, the dissolved oxygen content may be reduced or anoxic conditions may occur (Harding 1992). *M. edulis* can adjust or acclimate down to oxygen concentrations of about 50% saturation. At lower concentrations, mussels cannot grow and eventually die. The species can endure short exposures to anoxic conditions by closing the shell and using metabolic systems not requiring oxygen. Mid-summer occurrences of anoxia under hot (>25°C) and calm conditions can be devastating to mussels in aquaculture operations and wild populations. Exposure to high concentrations of copper can reduce the capacity of *M. edulis* to tolerate long periods of exposure to air (Weber et al. 1992).

DEPTH

Mussels occur mainly where the spat settle, usually at greatest densities at depths between 2 and 3 m; but they can move after attachment by detaching and re-attaching byssus or anchor threads. Mussels can settle and establish in significant depths of water where there is adequate hard substrate and food. Typically, however, the larvae settle near the water surface on exposed surfaces, rocky coastlines, ropes, and other submerged, solid structures.

SUSPENDED PARTICULATE MATTER

Suspended particulate matter (SPM) can consist both of inorganic material (silt, sand, etc.) and particulate organic material (POM) (living phytoplankton and the decomposing particulate remains of plants and animals). Mussels feed on POM, deriving nutrition from digesting plant components and bacteria from detrital material. Detrital material from sea- and saltmarsh grasses, which occurs commonly in estuaries and waters such as the Bay of Fundy which are near saltmarshes, generally has a small fraction of organic material that may be used by mussels. A normally wide range of SPM levels occur in eastern Canadian waters from high levels typified by the inner Bay of Fundy to Newfoundland waters where absence of sources of fine suspended material results in low concentrations throughout the year (Thompson 1984). In shallow coastal waters, storms can resuspend bottom sediments, elevating levels of suspended particulate matter over normal levels by one order of magnitude or more. The presence of inorganic particulate matter at high concentrations is a stress for blue mussels as the species must filter larger water volumes to extract an adequate amount of food, but at natural concentrations SPM appears to be necessary and may enhance growth over pure algal diets (Kiorboe et al. 1981). *M. edulis* responds to excess concentrations (which can result from resuspension from storms) by closing entirely for short periods, or, depending on concentration, by increasing filtration rate and selecting between organic and inorganic particles.

SUBSTRATE

Juvenile mussels can attach to various substrates including plants and other solid material. Adults are usually found on hard substrate including resistant rocks, pilings, wood debris, refuse, other mussels, vessel hulls, and buoys. In some cases, beds of mussels can occur on mud flats, their presence probably initiated by some mussels initially attaching to available hard substrate in the flat, and other mussels subsequently attaching to them (Myrand and Richard 1987; Scarratt 1993; Svane and Ompi 1993).

CURRENTS

Water movement is important for suspension feeders in providing an adequate supply of food, and greatest abundance occurs in tidal rips and rocky coastal areas subject to significant surge and water movement. Mussels growing at high densities can have a significant impact on SPM concentrations; in some cases beds of mussels have been shown to deplete the water of suspended material, impacting mussels downstream; and mussel culture operations can cause marked reductions in the SPM content of water moving through the mussel array (J. Grant, Dalhousie University, pers. comm.). Moderate flows have been shown, however, to cause reductions in filtration rate by *M. edulis* (Wildish and Miyares 1990). Current also influences the rate of secretion of byssal threads, having a variable effect depending on mussel size (Lee et al. 1990); and agitation (as by water movement) has been shown to be the main environmental factor

in causing an increased rate of byssus formation (Young 1985). The dense concentrations, in which the blue mussel is typically found, provide the species with protection and resistance to wave and current action.

SEA ICE

Ice scour impacts all eastern Canadian coastlines to some degree, resulting in loss of some of the mussel population each year. Ice can originate from floes formed locally in bays and inlets or from packs which develop in the Gulf of St. Lawrence and along the Labrador coast. Ice is present in the nearshore zone of the Gulf of St. Lawrence for up to 4 mo each year, and is present for up to 7 mo in central Labrador (Owens 1977). The southwestern coast of Nova Scotia is virtually ice-free, but even areas along the Atlantic coast of that province have been affected by sea ice in some years.

ECONOMIC IMPORTANCE AND RESOURCE USE

Mussels were harvested by aboriginal peoples before the first Europeans came to North America. Currently, they are harvested recreationally and in commercial harvests of both natural and aquacultured mussels. Mussel populations may also have negative impacts, since their growth leads to fouling of industrial and coastal structures as well as shipping.

NATURAL POPULATIONS

Mussels are harvested in most areas by the public for personal consumption, where not prohibited by local bans connected with shellfish toxins and fecal coliform contamination. Typically, natural mussels can be gritty and require exposure to clean water to bring levels of grit to acceptable levels. Because of the occurrence of paralytic shellfish poisoning (PSP), most areas of the Bay of Fundy are permanently closed to harvesting of natural mussel populations. Natural concentrations of mussels in commercial quantities occur in some areas of eastern Canada, but no significant commercial harvests occur. They do occur, however, in the northeastern United States where techniques for harvesting can include rakes and drags (Scarratt 1993). Mussel dragging may have a limited impact on other organisms and plants. In Europe, mussel dredging increased suspended particulate concentrations in the water only briefly and could not be presumed to impact other populations (Rieman and Hoffman 1991).

AQUACULTURE

Aquaculture of mussels has been practised in North America for roughly two decades, and is now a growing industry in eastern Canada. Most of the production (about 80%) takes place in Prince Edward Island, where it amounted to about 4000 t in 1993,

compared with Nova Scotia (400 t), Québec (200 t), Newfoundland (150 t), and New Brunswick (45 t) (Scarratt 1993).

Techniques

Mussel-growing techniques have evolved with the growth of the Canadian industry. Initial eastern Canadian efforts at mussel culture employed rafts supporting strings of mussels, but the universal method at present involves "long lines" of floats from which long tubular socks of plastic mesh are hung (Fig. 2). Long lines can be sunk in winter to avoid ice, and in some cases mussels can be harvested through the ice. Winter ice is a major factor limiting which aquaculture techniques are used in eastern Canada.

Aquaculture operators first collect newly settled mussel "spat" and then bring them through two phases of growth to produce a commercial product. Spat are collected on ropes or other hanging collectors moored on site or in adjacent waters. Those reaching a certain size (typically about 20 mm shell length) are removed from collectors and placed in mesh socks 2 m in length in fall or spring. Socks are suspended from moorings, usually consisting of lines and floats to suspend them, and a system to anchor the array. Typically, a grow-out period of 1.5 to 2 yr is required to bring mussels to a marketable size of 50 to 60 mm. Spatfall can vary considerably, both from year to year and with location. Mussels may be harvested year round, but summer harvesting is less desirable due to spawning and generally thinner meats. Many technological innovations have accompanied the industry, including specially designed motor vessels for hauling lines, and equipment for stripping mussels and removing byssus threads from the product.

Distribution

Mussel aquaculture efforts are concentrated mainly in Prince Edward Island, Nova Scotia, Newfoundland, and Iles-de-la-Madeleine. In Prince Edward Island, most effort is concentrated in estuaries on the north and east coasts, from Malpeque Bay to Murray River. Nova Scotia mussel farming occurs mainly along the Atlantic coast from West Pubnico to the northern tip of Cape Breton Island. A significant mussel aquaculture operation is carried out in the lagoons on Iles-de-la-Madeleine. In Newfoundland, culture operations are confined mainly in Notre Dame Bay on the north coast but also in Trinity, Bonavista, and Placentia Bays. Isolated experimental sites and commercial operations occur on the north shores of Baie des Chaleurs, northeastern New Brunswick, and the Gulf of St. Lawrence. A single mussel farm is currently operating in the Bay of Fundy (St. Martins, New Brunswick).

With the exception of Iles-de-la-Madeleine, mussel aquaculture in the Gulf of St. Lawrence is limited by ice, availability of suitable protected inlets, and periodic outbreaks of toxic phytoplankton. Several experimental sites in Baie des Chaleurs

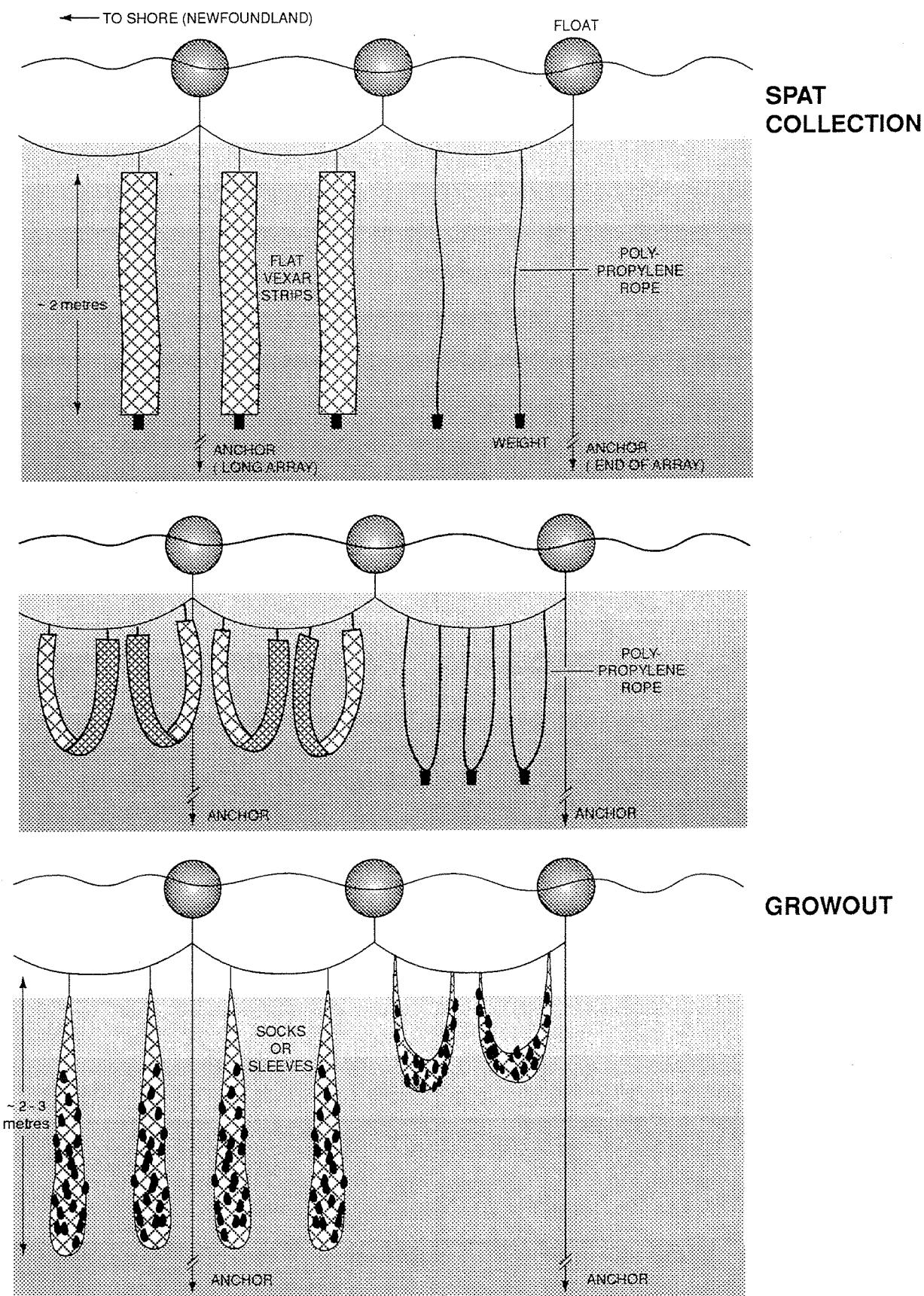


Figure 2. Generalized mussel aquaculture methods used in Eastern Canada.

use open-water areas, which require more expensive gear and therefore make the product less competitive with other areas of eastern Canada. Several inlets on the Québec north shore are suitable for aquaculture and have experimental mussel operations, but lack of access to a road network is a competitive disadvantage.

Regulation

Mussel farming in all areas of eastern Canada except Prince Edward Island is regulated jointly by DFO, Environment Canada, and the respective provinces. Generally, the provinces are responsible for licensing, DFO for testing and monitoring product from experimental leases, and Environment Canada for determining areas of closure. In Prince Edward Island, DFO is solely responsible for licensing.

Aquaculture leases are not permitted in areas which have been closed (either complete or marginal) because of fecal coliform contamination or shellfish toxins, although the permitting of licenses in areas under marginal closure is currently being considered. Future regulations may permit collection of spat in closed areas.

Environmental Concerns

Mussel culture (and aquaculture in general) is gradually becoming established in eastern Canada, but it can be a source of public opposition. Mussel operations can reach significant scale and may lead to the aesthetic pollution of coastal water bodies, resulting in opposition from landowners and community organizations. Mussel culture operations may also interfere with local boat traffic, leading to opposition from fishermen involved in nearby fisheries, and operators of other boat traffic. Although mussel farming operations lead to elevated sedimentation of organic matter, and may enhance nutrient release from sediments (Grant et al. in press), their impact on ecosystems appears to be minor. Some of the aesthetic impact of mussel aquaculture may be mitigated by using unobtrusive buoys, or by sinking them routinely.

Mussel spat can retain cells of toxic phytoplankton in the gut for short periods, and transfer of spat from areas having toxic algal species (see "Biofouling" section below) has the potential to contaminate "clean" areas (Scarratt 1993). No such incidents have occurred.

BIOFOULING

Mussels are one of the major organisms causing biofouling in coastal areas. While not a significant impact on coastal structures such as wharves and bridges, they can cause the loss of buoyancy and increase frictional resistance of vessels, clog water intakes in ships, thermal generating plants, and various industrial operations, and foul buoys.

They are also among the most difficult fouling organisms to control in temperate latitudes. Heat and chlorine treatments, including chlorine gas and sodium hypochlorite, are frequently used to control mussel development. Biofouling control also includes use of antifouling paints which frequently have heavy metals (e.g. tributyltin oxide) complexed in the structure.

SHELLFISH TOXINS

M. edulis is one of the commercially important shellfish species which can accumulate algal toxins. Three main types of shellfish poisons for which there have been outbreaks affecting human health have occurred in the region (Table 1). Blue mussels become exposed when they filter toxic phytoplankton from the water column and, in the case of paralytic shellfish poisoning (PSP), can also accumulate toxins from the toxic dinoflagellate's resting stages which can be resuspended from the sediments throughout the year (White 1982; Hawryluk et al. 1992). *M. edulis* is relatively insensitive to PSP (although high concentrations can block nerve impulses and inhibit byssus formation), and to the toxins which cause amnesic shellfish poisoning (ASP) and diarrhetic shellfish poisoning (DSP), and can accumulate both PSP and ASP toxins in tissues, particularly the digestive gland (Prakash et al. 1971; Haya et al. 1989). PSP toxin inhibits byssus formation in blue mussels (Shumway et al. 1987). Presence of toxins throughout the body leads to problems with human consumption as people usually eat the whole mussel. Mussels tend to become more toxic than clams in a given area, and their consumption leads to the second highest number of incidents of PSP poisoning and 30% of deaths (Prakash et al. 1971). Mussel harvesting in the Bay of Fundy is closed due to annual events of poisoning (Eddy 1992).

Levels of PSP toxin build to saturation concentrations after a few weeks' exposure to the toxic phytoplankton (*Alexandrium* sp.), show a partial rapid initial drop over 1 d (corresponding to the gut contents being cleared), and then fall over several weeks' exposure to uncontaminated water (Cembella et al. 1991). Domoic acid (the toxin responsible for amnesic shellfish poisoning) is highly soluble in water, and mussels eliminate the bulk of it to achieve acceptable levels shortly after the *Nitzschia* bloom is over, as little as 48 h at normal temperatures, and slower in cold water (Outerbridge et al. 1992). Diarrhetic shellfish poisoning (DSP) is a relatively recent newcomer to eastern Canada, but incidents have not resulted in deaths.

There is a widespread perception that incidents of PSP and other poisonings from algal toxins have been increasing in duration and frequency. Public health concerns related to growing mussels in a PSP area necessitate more routine monitoring than elsewhere (Scarratt 1993), and mussels are tested routinely for PSP and ASP toxins.

Most of the organisms responsible for algal toxicity occur throughout the Atlantic region but at concentrations generally too low to cause outbreaks. The majority of incidents of PSP poisoning occur in the inner Gulf of St. Lawrence and the Bay of

Table 1. Important toxic phytoplankton in eastern Canadian waters.

		Causative Species			
Type of Poisoning	Chemical Responsible	Bay of Fundy	St. Lawrence Estuary and Gulf	Nova Scotia Atlantic Coast	Newfoundland
Paralytic Shellfish Poisoning (PSP)	saxitoxin (STX)	<i>Alexandrium fundyense</i> (dinoflagellate)	<i>Alexandrium excavatum*</i>	No poisoning incidents	<i>Alexandrium</i> spp.
Amnesic Shellfish Poisoning (ASP)	domoic acid	<i>Nitzschia pseudodelicatissima</i> (diatom)	<i>Nitzschia pungens f. multiseries</i> (diatom)	No poisoning incidents**	No poisoning incidents
Diarrhetic Shellfish Poisoning (DSP)	dinophysis toxin-1	<i>Dinophysis</i> spp.	<i>Dinophysis</i> spp.	<i>Dinophysis</i> spp.	<i>Dinophysis</i> spp.

*Iles-de-la-Madeleine are considered free from PSP, although *Alexandrium* does occur.

**ASP species are present along the Atlantic Coast of Nova Scotia but have not caused outbreaks.

Fundy. Isolated outbreaks of DSP and PSP have occurred in Newfoundland and Nova Scotia waters.

Occasionally, the ciliate *Mesodinium rubrum* has developed in large enough concentrations on the Nova Scotia coast to give mussels a reddish colour ("red mussels"). Mussels having fed on these organisms have a reddish colour and frequently a peppery taste but are not toxic (Scarratt 1993).

HUMAN IMPACTS

ENVIRONMENTAL CONTAMINANTS AND POLLUTION

Responses to Contaminants

Mussels have been used widely in studies of environmental contaminants for various reasons, including their widespread distribution and abundance, wide salinity and temperature tolerance, sedentary nature, and resistance to and ability to concentrate pollutants. *M. edulis* is a suspension feeder and filters large volumes of water, bringing it into contact with contaminants in dissolved, suspended, and resuspended phases. It should be noted, however, that impacts on natural populations of mussels from contaminants arising from human activity are rarely encountered, except in extreme situations (e.g. at point sources, in severely contaminated sites, under anoxia). Mussels

have been used in international contaminant monitoring (*Mussel Watch*) programs which attempt to monitor coastal water quality through measurement of the concentration of chemical contaminants in their tissues (see *Mussel Watch* section below) as well as in focused research and monitoring efforts. Typical contaminants which have been studied in this manner include chlorinated hydrocarbons (e.g. Risebrough et al. 1976), aromatics (e.g. Fossato and Canzonier 1976), and metals (e.g. Lowe and Moore 1979). Mussels have also been used to monitor antibiotics administered to salmon aquaculture operations (Tibbs et al. 1989). In that study, mussels in a net-pen operation did not accumulate oxytetracycline (OTC) after 10 d during which the chemical was fed to coho salmon in food.

Exposure to contaminants can lead to physiological, tissue, and cellular effects, reduction of resistance to disease, and altered growth, reproduction, and population parameters. For example, inflammation, mucous cell abnormalities, and ciliate infestations of the mussel gill appear to be associated with pollution (Farley 1988). Incidence of tumours in mussels in the United States *Mussel Watch* sites can be correlated with incidence of various organic and inorganic contaminants (Hillman et al. 1992), but the overall incidence is low. Zinc induces acute inflammation reactions in mussel gills as well as other effects (Hietanen et al. 1988).

Exposures to contaminants and resulting tissue burdens in *M. edulis* are influenced by many factors, including:

- distance from point sources,
- vertical distribution on the shore or in the water column,
- amount of tidal exposure,
- mix of contaminants,
- water characteristics such as temperature and salinity,
- seasonal cycle of growth, reproduction and development, and
- type of tissues involved.

Contaminants and other environmental stresses have a range of effects from sublethal to acutely toxic. Several adaptive responses are available to mussels to aid them in coping with environmental stressors. Metallothioneins (low molecular weight proteins) are produced widely in marine organisms, including blue mussels, in response to elevated metal concentrations (Page et al. 1984). These proteins bind metals, thereby making them less available for interfering with other physiological processes.

A class of proteins normally generated in response to heat shock ("heat shock proteins") has been shown to respond to exposures of *M. edulis* to contaminants and appears to be useful in detecting stress to the organism from elevated metal concentrations (Sanders et al. 1991).

In common with vertebrates, mussels and other bivalves also have enzyme systems to detoxify organic chemicals. The mixed-function oxidase enzyme system (MFO) is apparently universally distributed, although in mussels it is reduced in importance

compared with vertebrates (Viarengo and Canesi 1991). MFO systems often generate intermediates which can be mutagenic, although the importance for *M. edulis* is expected to be minor.

The biochemical responses of mussels to contaminants are frequently used as sensitive measures of exposure to contaminants and to evaluate pollution gradients. These can provide useful information even when impacts at the population level cannot be detected. The presence of the mixed-function oxidase systems for detoxifying hydrocarbons, PAHs, organics, and pesticides has been widely used for testing for exposures to these chemicals in fish and other vertebrates. Various enzymes in this system can be used as markers or indicators of MFO activity.

Biochemical stress indicators are also used to detect impacts of contaminants on mussels. Some of the more common include: adenylate energy charge, a measure of energy storage chemicals available for metabolism (Zaroogian and Johnson 1989); "lysozomal stability" tests of enzyme changes in lysozymes (cells secreting digestive enzymes in the digestive gland); and ratio of the concentrations of two amino acids (taurine and glycine, T/G ratio [Bayne et al. 1985]). In addition, several genetic indicators, including "chromosome aberration," sister chromatid exchange (SSC), and DNA damage have also been used as indicators of contaminant effects (Viarengo and Canesi 1991).

Stress may also be determined by studies of metabolic and energy balance parameters of the mussels. The amount of energy available for growth and reproduction (scope for growth) has been used extensively in mussels and other marine invertebrates as a stress indicator (Bayne et al. 1985) in part because it is an integrated measure of impacts on the organism. For example, Widdows et al. (1981) showed a reduction in scope for growth of mussels transplanted along a pollution gradient with increasing concentrations of hydrocarbons and a metal. The "oxygen to nitrogen ratio" (O/N, ratio of oxygen consumption to nitrogen excretion) gives a measure of the kinds of compounds the organism is using as energy sources. Under stressed conditions the amount of protein used in metabolism increases, increasing the amount of nitrogen excreted and lowering the ratio.

In general, cytochemical tests (e.g. cell chemistry) have not been widely used in eastern Canada to assess pollution; but their application has proven promising in several studies. Various biochemical indicators were used to evaluate the distribution of petroleum hydrocarbons in sediments (Pelletier et al. 1991), and Ward (1990) found lysozomal stability measures reflected zinc concentrations in Halifax Harbour.

Measurements of metallothioneins and scope for growth in mussels have been suggested as having the best potential as measures for use in environmental monitoring by the Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution (GESAMP) (Harding 1992).

Mussel Watch

Mussels have been used for both regional and global efforts to monitor marine environmental quality. The idea of *Mussel Watch* was put forward by Goldberg (1975) and has been implemented in various forms. The United States has a formal program which monitors a suite of contaminants in coastal waters under the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Status and Trends Program. Mussels are currently used as environmental quality monitors in the Canada/United States Gulf of Maine Working Group efforts to determine levels of contamination in that body of water. The accuracy of *Mussel Watch* comparisons is limited, however, because of the many sources of variation affecting contaminant concentrations; but the mussels are usually effective indicators of major pollutant influences. For example, the United States Mussel Watch program has shown declines in tributyltin in coastal environments following restriction of its use (O'Connor 1992).

Lobel et al. (1990) have pointed out the importance of knowing the taxonomic status of *M. edulis* in *Mussel Watch* studies. *Mytilus trossulus* may be better able to accumulate metals in unpolluted waters than *M. edulis*.

Heavy Metals

Metal pollution is a significant concern in some areas of eastern Canada, although impacts are localized in areas where mining, urban development and domestic sewage, transportation and shipping, and other industrial activities take place. Mussels are frequently used as indicators of metal concentrations in the marine environment, although only in extreme cases are mussel populations impacted by them. Studies of metal concentrations in mussels may be performed by analysis of resident mussels or by transplanting them for varying periods at study sites or along pollution gradients. Ingested particles are a major source of metal contamination in blue mussels.

Metals are harmful to *M. edulis* and to marine organisms in general, primarily because they interfere with the activity of enzymes and ionic transfer processes on which physiological processes depend. Concentrations in the environment, even in moderately polluted situations, are not generally lethal, however; but occurrences of high concentrations can be toxic. Mussels can accumulate concentrations which are significantly above ambient levels, 100,000 or more in some cases (Sturesson 1976; Phillips 1976). A worldwide survey of cadmium concentrations in blue mussels showed a 10,000 to 20,000 x concentration over levels found in the surrounding water (Cossa 1988).

Accumulation: Studies of interactions of metals and *M. edulis* have concentrated on metals such as zinc and copper, which have important biological functions, and on cadmium and mercury which are among the most toxic of marine contaminants but have no biological function (Viarengo et al. 1988). *M. edulis* can accumulate metals both in

soft tissues (mostly used) and less commonly in shells (Sturesson 1976; Bourgoin 1990). Rate of accumulation as well as the final concentration depends on the tissue type; gills and digestive gland have been shown to be the main sites of metal concentration. Metals are stored in various forms: in combination with proteins and particles, in shell material, as inorganic precipitates, in microscopic cellular compartments (e.g. vesicles), in dissolved form, or bound to proteins. Metals such as arsenic and mercury can occur in organic forms (e.g. methyl mercury) which have different properties than the inorganic metal; and arsenic is lipid soluble. Davies et al. (1979) found that under unpolluted conditions more than one-half of the mercury in *M. edulis* was in the methyl form, but the proportion was less in polluted situations.

Accumulation in *M. edulis* can be influenced by the presence of other metals (Elliott et al. 1985; Popham and d'Auria 1982), salinity, temperature, and form of metal (dissolved or particulate). Phosphate fertilizer in the water at Belledune Harbour, New Brunswick, is believed to have reduced uptake of lead by blue mussels at the site (Bourgoin et al. 1989). Mussels will accumulate some metals in proportion to duration of exposure when exposed to fluctuating concentrations in the environment (e.g. lead and cadmium [Elliott et al. 1985]) while others (e.g. copper and zinc) do not.

Metals can be depurated readily from mussel tissues by exposure to clean water. There is a suggestion that mussels recover more quickly (provided the exposure is not too severe) from metal treatment (copper) than from some organic contaminants (the PAH phenanthrene) (Moore et al. 1984).

Variations in metal concentration in the blue mussel can result from intrinsic factors such as size, sex, age, condition, metabolism, population growth rate, and maturity (Roberts et al. 1986). Seasonal changes in metal concentration occur, corresponding to body weight and gonad changes. Mussels having seasonably high body tissue weights (through cycles of growth and reproduction) may have seasonally low concentrations of metals, but the relationship is not always observed. Starvation can impact metal levels in blue mussels depending on type of metal (Uthe and Chou 1986).

Effects: Metals can have a wide range of effects in mussels, stemming from damage caused at the physiological level. Typically, they can be acutely or sublethally toxic and often inhibit or impair functions. To illustrate, *M. edulis* at all life stages is highly sensitive to copper (continued exposure to as little as 20 ug/L can produce 100% mortality in 1 mo); veligers (early swimming stages) are more tolerant of copper than juveniles or adults (Beaumont et al. 1987). Both copper and silver can cause reduced growth (e.g. Strömgren 1986; Calabrese et al. 1984), and copper reduces scope for growth (energy available for growth) (Moore et al. 1984). Various metals, particularly mercury, copper, and silver, cause abnormal shell development of *M. edulis* larvae (Martin et al. 1981). Metals can inhibit coordinated activity and spontaneous beating of cilia and can alter activity patterns of early larval stages. Elevated copper causes the

mussel to close and otherwise inhibits filtration and clearance rate (Strömgren 1986; Moore et al. 1984) and causes changes in gastrointestinal tissues (Lowe and Clarke 1989). Copper and zinc inhibit sperm respiration, have either positive or negative effects on egg respiration (Aberkali et al. 1985), may inhibit embryo development, and retard development of eggs (Maung-Myint and Tyler 1982).

The effects of other metals can be similar to those of copper. Cadmium inhibits the maturation of reproductive tissues but increases spawning frequency (Kluytmans et al. 1988). Elevated concentrations of nickel and zinc can inhibit byssus formation (Friedrich and Filice [1976] and Hietanen et al. [1988] respectively).

Metals can also interfere with enzyme systems such as the mixed-function oxidase system for detoxifying other chemicals, normally reserved for detoxifying organics (Moore et al. 1984). This is believed to be the mechanism for synergistic effects when some metals are presented at the same time as organics; impact of the organics is intensified by the presence of a metal.

Impacts of metals are moderated by the ability of organisms to generate metallothioneins. Other enzymes normally containing metal constituents (metalloenzymes) can confer some measure of protection, and "heat-shock" proteins (which confer general stress resistance or tolerance) are induced in *M. edulis* on exposure to trace metals.

Organic Contaminants

Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Polychlorinated biphenyls (PCBs) frequently contaminate coastal environments, typically sediments and dredge material. They are soluble in lipid and can be concentrated in mussels. *M. edulis* was a useful indicator in locating sources of PCB pollution in Baie des Anglais, an area heavily contaminated with PCBs near Baie Comeau, Québec; but concentrations in the mussel did not correlate well with local concentrations of PCBs in sediments (Bertrand et al. 1988). PCBs are soluble in lipid and are only slowly metabolized and so tend to bioaccumulate.

Concentrations of some PCBs in mussels can vary seasonally (declining in autumn) and depend on lipid concentration and type of PCB involved. The major factors controlling the distribution of PCBs in mussels appears to be the relevant ambient concentrations of individual contaminants in waters, modified by the differences in partitioning between organisms and water and seasonal variability in lipid content (Capuzzo et al. 1989).

PAHs and PCBs have been shown to be rapidly accumulated by mussels from suspended contaminated sediment, accumulating steady-state concentrations of both in about 20 d (Pruell et al. 1986). Depuration of PCBs was comparatively slow (half-life of 16 to 46 d depending on the specific PCB involved).

Pesticides: Pesticides do not frequently impact mussels in concentrations high enough to cause damage, although mussels are frequently used to detect pesticides in the environment (Phillips 1978; Zitko 1981). Use in monitoring requires an appreciation of the potential variability in measurements, as levels are affected by intrinsic (age, sex, and seasonal cycle, lipid content, etc.) and extrinsic factors (salinity, temperature, chemical interactions before uptake) (Phillips 1978). Even in the late 1960s, levels of DDT in mussels and a range of finfish and invertebrates from Atlantic coastal waters were safe for human consumption (Sprague and Duffy 1971).

M. edulis appears to have the capability to detoxify various pesticides, including paraquat and diquat (Wenning and DiGiulio 1988), and organophosphates (Noellgen 1990), and can metabolize hexachlorobenzene (a fungicide and industrial waste).

M. edulis does not accumulate appreciable quantities of the forest spray insecticide aminocarb, which was not detected in mussels sampled in New Brunswick estuaries for up to 2 wk after spraying. A second forest spray, fenitrothion, was detected, however, in various shellfish (including *M. edulis*) from Buctouche Harbour and estuary, New Brunswick (Lord et al. 1978). *M. edulis* is also relatively insensitive to exposures to the fish delousing agent dichlorvos (Cusack and Johnson 1989, in McHenery et al. 1991).

Petroleum Hydrocarbons: In general, petroleum is not highly toxic to mussels. Prolonged exposure to petroleum and its components either together or separately can have a range of effects, from acute to sublethal, including effects on energy balance, as well as cellular and subcellular effects. Juvenile stages appear to be more sensitive to oil exposures; aromatic hydrocarbons may be more toxic than aliphatic ones; and scope for growth in some long-term exposures has been shown to be negatively correlated with total aromatic hydrocarbon concentration but not with total aliphatic hydrocarbon concentration (Stickle et al. 1985). Petroleum hydrocarbons induce MFO responses in various organisms, and presumably do in *Mytilus* as well.

Hydrocarbons are rapidly taken up by gills; and high concentrations can develop in the alimentary canal, particularly in the digestive gland (Roberts 1976). Blue mussels exposed to sublethal hydrocarbon levels concentrate them in lipids, accumulating greater quantities of paraffinic hydrocarbons (mineral oil and heptadecane) than aromatic ones.

Mussel populations generally survive oiling as occurs in major marine accidental spills. In the case of the West Falmouth spill on the United States east coast, mussel populations were sterilized for at least 1 yr after the spill (Blumer et al. 1970).

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): PAHs are a class of organic chemicals found in oil and hydrocarbon derivatives and naturally in the environment as a byproduct of combustion, and in the wood-preservative product creosote. Low

molecular weight PAHs (e.g. naphthalene) tend to be water soluble and acutely toxic to various organisms while those of high molecular weight are more lipid soluble and tend to be carcinogenic (e.g. benzo[*a*]pyrene). They do not have significant toxic effects in blue mussels at normal concentrations (harbour waters in Atlantic Canada generally have concentrations of total PAH under 0.01 ug/L, and under 0.1 ug/L in polluted harbours [O'Neill and Kieley 1992]). They can, however, cause biochemical responses, such as induction of the MFO system, which can be used to indicate their presence. At high concentrations (10 to 100 ug/L) they can affect lysosomal stability in mussels (indicative of stress [Moore et al. 1978]) but may not affect scope for growth (phenanthrene [Moore et al. 1984]). Benzo(*a*)pyrene may cause tumour-like disorders in mussels (Wong et al. 1984).

Mussels have a limited ability to detoxify PAHs via MFO systems, although the level of MFO activity is low when compared with vertebrates (Viarengo and Canesi 1991). Until recently it was believed that *M. edulis* did not have the capability to detoxify PAHs (Eaton et al. 1986), consequently accounting for bioconcentration. Mussels have as well been shown to depurate PAHs fairly readily (e.g. Pruell et al. 1986).

PAH levels in mussels have been used in eastern Canada in a number of studies to monitor PAH concentrations. Sirota et al. (1984) and Matheson et al. (1983) examined pollution gradients away from the Sydney tar ponds, while mussels were used as indicators for PAH content in a broad survey of the St. Lawrence estuary and northwest Gulf of St. Lawrence (Cossa et al. 1983). Eaton and Zitko (1978) detected PAH gradients in tissues away from creosoted wharf timbers. Levels of the PAH 3,4-benzopyrene in mussels in the estuary and Gulf of St. Lawrence are not detectable except at the mouth of the Saguenay River, while mussel transplants have shown that at one time the whole Saguenay Fjord was contaminated with this PAH (Picard-Bérubé et al. 1983). A study of contaminant concentrations in Newfoundland waters using mussels as indicators showed low levels of PAHs in mussel tissues (Hellou et al. 1993). PAH concentrations are expected to fluctuate seasonally depending on lipid content (in which PAHs are soluble) and tissue weight which changes in response to development of the gonads. Concentrations of PAHs (phenanthrene) tend to be highest for digestive gland and mantle (Moore et al. 1984) where lipid concentrations tend to be highest. Because of the association with lipids which are present in eggs and sperm, a substantial proportion of PAHs may be shed during reproduction (Hummel et al. 1989).

Other Organic Compounds: Several other organic compounds can enter the marine environment in eastern Canada and impact mussels. Pentachlorophenol (formerly used in wood preservative industries) impacts some metabolic systems in *M. edulis*, affecting oxygen consumption at high and low environmental oxygen concentrations (Wang and Widdows 1993). Aromatic amines (a class of compounds found in fuel oils and synthetic dyes) can be detoxified and depurated by mussels using normal biochemical pathways and generally without producing intermediates which can cause genetic damage (Knezovich et al. 1988). Various N-nitrosoamines can cause tissue damage when injected into *M. edulis* (Rasmussen 1982). *M. edulis* may have the capability

to detoxify certain compounds such as phenolics, quinones, nitroaromatics, azo dyes, and compounds such as the pesticides paraquat and diquat (Wenning and DiGiulio 1988).

Tributyltin: Tributyltin oxide (TBTO) was widely used in antifoulant paints and for treating nets and lobster traps until concentrations became detectable in the marine environment. Elevated levels have been found in eastern Canadian harbours (Maguire et al. 1986) and widely in United States coastal areas. TBTO breaks down to less toxic derivatives (dibutyl- and monobutyltin), and as a result of use restrictions there is a suggestion that levels in marine organisms are now declining or stable (Uhler et al. 1993). TBT is acutely toxic to bivalve larvae (Beaumont and Budd 1984), causes growth rate reduction in juveniles (Stromgren and Bongard 1987), and in adults causes increases in oxygen uptake and decreases in clearance rate as well as severe inhibition of growth (Widdows and Page 1993). Organic and total tin depurates rapidly from mussels.

PHYSICAL DISTURBANCE

Dredging

Dredging has a minor, if any, impact on mussels. Most dredging takes place in areas of heavy river input and coastal sediment transport and is closely regulated by DFO and Environment Canada. Natural mussel population in dredge areas may be affected only from exposure to elevated SPM levels and contaminants released from the sediments, but population impacts are not significant.

Dredging occasionally has taken place in areas having aquaculture operations for mussels. Dredging of the lagoon on Iles-de-la-Madeleine was accomplished recently without incident under restrictions to dredge under calm conditions only. A dredge spoil disposal site 2.5 km from an aquaculture site in Baie des Chaleurs did not adversely affect mussels, as expressed by immediate and long-term measures of filtration rate, growth, and mortality of transplanted cultured mussels (Bergeron et al. 1990). Peak concentrations of suspended sediments from ocean dumping are generally less and of shorter duration than caused by resuspension of bottom material by storms (Bohlen et al. 1979). Mussels can accumulate contaminants from suspended dredge material, however (Pruell et al. 1986); and incidents where contaminated material is likely to resuspend after disposal could lead to contamination.

Major works activities involving dredging can arouse public opposition. In a recent court case a Neguac, New Brunswick, a mussel aquaculture operator sought and won damages for presumed effects of an ocean dumpsite several kilometres from his operation.

Coastal and Offshore Structures

Coastal structures create mussel habitat, often in areas which might not otherwise support them. Breakwaters, jetties, and other coastal structures of resistant rock are suitable substrate for mussels. Creosoted timbers in wharfs and breakwaters have led to elevated PAH concentrations in mussels which presumably would lead to elevated concentrations further up the food chain.

INDUSTRIAL CONTAMINATION

Pulp and Paper

Pulp and paper facilities typically cause reduced dissolved oxygen in adjacent waters resulting from elevated biological demand of effluents and, in older plants, have resulted in contamination by dioxins and furans (byproducts of chlorine bleaching). Plumes of effluent from pulp mills have a dark colour and low salinity and may impact primary production in the water column. The Scott Maritimes Kraft pulp mill in Pictou, Nova Scotia, has resulted in a zone largely barren of intertidal life in the vicinity of the outfall of the main settling pond (Boat Harbour) (Scarratt 1969). Some wood debris resulting from pulp mill operations can be colonized by mussels (e.g. Saint John Harbour [Wildish and Thomas 1985]).

Mining and Smelting

Mining operations impact marine environments chiefly through effluent from smelting operations and losses from loading facilities, as well as contaminants from combustion processes involved. For example: Brunswick Mining and Smelting lead zinc processing operations at Belledune, New Brunswick, led to contamination of mussels in the vicinity of the outfall (Ray et al. 1980); Sydney Steel Corporation's coking operations at the steel mill in Sydney, Nova Scotia, led to elevated PAH concentrations in the adjacent Muggah Creek and consequently elevated PAH concentrations in lobster and mussels declined over a gradient from the inner harbour to the open coast; and aluminum smelters on the Saguenay River led to PAH contamination and elevated levels in mussels and other marine organisms in the St. Lawrence River.

Chlorination

Chlorination is one of the main treatments for fouling by mussels. Chlorine weakens the mussel's byssus attachment, mainly by depressing activity of the foot but also by reducing the strength of attachment by the byssus by interfering with the tanning process (Roberts 1976). Chlorine may be applied in continuous or intermittent exposure to control larval and adult mussels and growth of algal and bacterial slime.

Presence of fouling organisms interferes with efficient operation of cooling structures such as condensers by blocking flow, interfering with heat transfer properties, and aggravating corrosion. Chlorine treatment introduces principally chlorine-produced oxidants into the environment, but some contaminants such as organohalogens (e.g. bromoform) are produced in low concentrations. Applied as a gas (which produces oxidants such as hypochlorite in seawater) or directly as a hypochlorite solution, chlorine results in significant mortality, reduces spat settlement, leads to detachment of settled spat, causes pathological tissue effects, reduces pumping or feeding rates, and decreases growth (Khalanski and Bordet 1983).

Hypochlorite is extremely short-lived in seawater, mainly because of chemical interactions with bromine and iodine. Concentrations decline with the amount of organic matter available for oxidation. The rapid reduction in concentration in seawater is one of the major problems in applying chlorine. Effective treatments under varying conditions generally do not exceed final concentrations of about 1 mg/L chlorine-produced oxidant. The main criteria to be considered for the design of a chlorination process effective against mussel development are: 1) biological characterization of the water (e.g. phytoplankton richness) and availability of organic particles, 2) growth rate of local mussel populations, and 3) seawater chemical characteristics.

Brines

Exposure of mussels to salinities above normal ranges is not common. A possible exposure would result from marine disposal of brines from effluents from potash mining operations. In a study of potash brines from a mining operation in New Brunswick, *M. edulis* tolerated salinities of 40 ppt and accumulated metals from potash brines, but metals did not reach concentrations greater than could be found in mussels in normally industrialized areas of North America. Salinities of 55 ppt can be toxic and can reduce activity of cilia on the gills of *M. edulis* (Hutcheson 1983).

Thermal Pollution

Thermal electric and nuclear power plants generate elevated temperatures in cooling water and can lead to reductions in local mussel populations. Generally, outfalls are designed to result in sufficient mixing to maintain temperatures at acceptable levels for key species at the site, and to minimize extremes of temperature. Consequently, receiving water temperatures from outfalls at thermal plants in Atlantic Canada generally do not exceed 14°C (Swiss 1984). Blue mussels cannot grow optimally at temperatures above 20°C and are severely compromised above 25°C (Bayne et al. 1985). In general, temperatures in this range would occur a short distance from outfalls and are not likely to be a problem to natural mussel populations. Elevated winter temperatures and low winter food levels near a thermal power plant in one case reduced the number of eggs and the frequency of spawning compared with a control population nearby (Bayne and Widdows 1978; Bayne and Worrall 1980). Heat

treatments of *M. edulis* between 20° and 30°C can affect cell division in eggs and can reduce the numbers and behaviour of larvae (Beaumont and Kelly 1989). Extremes in temperature resulting from thermal plants can cause physical damage and lead directly to mortality. Above 25°C, *M. edulis* stops feeding and gill damage occurs. An entire bed of blue mussels was killed when water in a cooling channel at a steam generating plant reached 27°C (Gonzalez and Yevich 1976). Rafted mussels in Maine near a nuclear power generating station indicated high mortality at temperatures above 20°C, especially during the post-spawning period (Newell and Lutz 1991).

Hydrocarbon Industry

Mussels are not typically found offshore, and so impacts are only a concern in connection with accidental spills and industrial releases in coastal areas. Mussels can be impacted by accidental spills of oil or through exposure to dissolved and solid phases from industrial discharges, bilge pumping of ocean-going tankers, oil and grease in stormwater run-off, and from industries such as petroleum refining which commonly have hydrocarbons in effluent. Oiling can lead to toxicity, as well as tainting of product of commercial aquaculture operations and natural mussel beds.

Owing to their position in the intertidal and immediate subtidal zone, intertidal organisms such as *M. edulis* are exposed to elevated concentrations of oil during a spill. Oil in fine particulate form (which can be ingested by mussels) appears to be more toxic (as measured by reductions in growth rate) than water-soluble fractions. Dispersants can thus contribute to the toxicity of a spill by creating fine particles which can be ingested, but they have a lower inherent toxicity. Although dispersants may increase toxicity in this way, mussels receiving dispersant treatments may recover faster than those exposed to natural emulsions of oil in seawater (Strömgren 1987). The practise of applying heated water to intertidal zones to clean spilled hydrocarbons results in significantly elevated concentrations of hydrocarbons in mussel tissues (Ganning et al. 1983). In the case of the *Exxon Valdez* spill in Prince William Sound, Alaska, high-pressure heated water may have resulted in greater losses of intertidal populations than would have ensued without treatment. Mussels can further accumulate taint from oil exposures, and tainting can occur from exposures to oil-based drilling muds. Eastern Canadian aquaculture operations could be potentially seriously affected by spills or tanker releases in their vicinity.

Major oil spills that have occurred in eastern Canadian waters (*Arrow*, 1970; *Kurdistan*, 1979) have resulted in short-term effects, but affected areas have recovered in succeeding years. The widespread distribution of *M. edulis* provides sources of recolonization for local populations damaged by hydrocarbon spills.

AGRICULTURAL AND FORESTRY IMPACTS

Agricultural and forestry practices introduce suspended sediment into coastal waters and can lead to the introduction of pesticides and fecal coliforms. In many areas, fecal coliforms from livestock operations wash into coastal waters in periods of high run-off and cause conditional closures of shellfish beds. A combination of conditions (such as elevated nutrient levels, changes in freshwater regime, and sediment loadings), arising from agriculture and forestry practises and other human developments, may be contributing to more widespread incidence of shellfish toxins. Fenitrothion from forest spraying has been detected in shellfish from Buctouche Harbour and estuary, New Brunswick (Lord et al. 1978).

DOMESTIC WASTES

Contamination of coastal waters with fecal coliform bacteria is a major problem in most areas of eastern Canada, restricting harvesting of mussels and other shellfish species in general. In the Atlantic Provinces about one-half of the shellfish zones are closed (New Brunswick, 43%; Nova Scotia, 35%; Prince Edward Island, 15%; and Newfoundland, 51% (Menon 1988). Closures limit not only commercial and recreational harvesting, but development of aquaculture operations is limited in most cases to "open" areas only. Areas may be conditionally closed if conditions warrant, frequently during periods of high rainfall when fecal coliforms are likely to be present in high concentrations.

A significant proportion of applications for aquaculture licenses in Newfoundland (most of which were for mussel culture) were turned down due to fecal contamination (Harding 1992).

WASTE ROCK DUMPING

The ocean dumping regulatory process generally precludes dumping on sites with significant biological populations. Rock, fill, and other materials dumped in coastal areas can serve as a substrate for development of mussel populations, in part compensating for any which are buried or destroyed by the process.

HYDROELECTRIC DEVELOPMENT

Hydro diversions result in flow reductions to some marine areas and may or may not result in flow enhancements to others. Mussel populations can be reduced in the immediate proximity of outflow from hydroelectric diversions due to reduced salinities.

ACKNOWLEDGEMENTS

This technical report was prepared under a contract to Envirosphere Consultants Limited by the Habitat Ecology Division of the Department of Fisheries and Oceans. The author would like to acknowledge the assistance of Mr. H. Brian Nicholls and Dr. Donald C. Gordon, as well as Drs. Marcel Fréchette, Tom Sephton, and Jerry Payne, and Messrs. Ken Freeman and Randy Penney, all from DFO, and M. Bruno Myrand of Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation du Québec. Ms. Sarah Arnold and Ms. Patty Kendrick assisted with collection and management of background information.

SELECTED REFERENCES

General and Aquaculture:

- Bayne, B.L. 1976. Marine mussels: Their ecology and physiology. IBP 10. Cambridge University Press, London. 506 p.
- Myrand, B., and J. Richard. 1987. La moule bleue. Conseil des Productions Animales du Québec. AGDEX 485. 107 p.
- Newell, R.I.E. 1989. Species profiles: Life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (North and Mid-Atlantic). Biol. Rep. 82 (11.102), TR EL-82-4. United States Army Corps of Engineers, Coastal Ecology Group, Waterways Experimental Station, and United States Department of the Interior, Fish and Wildlife Service.
- Scarratt, D.J. 1993. A handbook of northern mussel culture. Island Press, Montague, P.E.I. 167 p.

Ecology and Physiology:

- Freeman, K.R. 1974. Growth, mortality and seasonal cycle of *Mytilus edulis* in two Nova Scotian embayments. Fish. Mar. Serv. Tech. Rep. 500.
- Freeman, K.R., K.L. Perry, and T.G. Dibacco. 1992. Morphology, condition and reproduction of two co-occurring species of *Mytilus* at a Nova Scotia mussel farm. Bull. Aquacult. Assoc. Can. 92(3): 1-3.
- McGladdery, S.E., R.E. Drinnan, and M.F. Stephenson. 1993. A manual of parasites, pests and diseases of Canadian Atlantic bivalves. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1931.

Myrand, B. [ed.]. 1991. Proceedings of a workshop on summer mortality of mussels on the Magdalen Islands (Atelier de travail sur la mortalité estivale des moules aux Iles-de-la-Madeleine). 23-25 Avril 1991. Conseil de l'Aquiculture et des Pêches du Québec. 196 p.

Thompson, R.J. 1984. The reproductive cycle and physiological ecology of the mussel *Mytilus edulis* in a subarctic, non-estuarine environment. Mar. Biol. 79: 277-288.

Ward, J.E., B.A. MacDonald, and R.J. Thompson. 1993. Mechanisms of suspension feeding in bivalves: Resolution of current controversies by means of endoscopy. Limnol. Oceanogr. 38: 265-272.

Shellfish Toxins:

Prakash, A., J.A. Medcof, and A.D. Tennant. 1971. Paralytic shellfish poisoning in eastern Canada. Bull. Fish. Res. Board Can. 177: 87 p.

Theriault, J.-C., and M. Levasseur [ed.]. 1992. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Maurice Lamontagne Institute, Mont-Joli, Québec, May 12-14, 1992. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.

Dredging:

Bergeron, P., M. Fréchette, L. Pagé, Y. Lavergne, and G. Walsh. 1990. Sedimentation et dispersion des déblais de dragage en mer et effets sur la moule bleue (*Mytilus edulis*) en élevage dans la Baie des Chaleurs. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1746.

Seakem Oceanography Limited. 1991. Assessment of the effects of suspended dredge material on aquaculture organisms. Ocean Dumping Rep. 8. Environment Canada, Atlantic Region.

Industrial Activities:

Khalanski, M., and F. Bordet. 1983. Effects of chlorination on marine mussels, p. 557-567. In R.L. Jolley, W.A. Brungs, J.A. Cotruvo, R.B. Cumming, J.S. Mattice, and V.A. Jacobs [ed.]. Water Chlorination. Environmental Impact and Health Effects 4, Chapt. 49. Proc. 4th Conference on Water Chlorination. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich. 1491 p.

Swiss, J. 1984. The effects of heated effluents on marine water quality in the Atlantic Region, p. 138-144. In R.C.H. Wilson and R.F. Addison [ed.]. Health of the Northwest Atlantic. Can. Dept. Environ., Dept. Fish. Oceans, Dept. Energy, Mines and Resources. 174 p.

Environmental Contaminants - General:

Bayne, B.L., D.A. Brown, K. Burns, D.R. Dixon, A. Ivanovici, D.R. Livingstone, D.M. Lowe, M.N. Moore, A.R.D. Stebbing, and J. Widdows. 1985. The effects of stress and pollution on marine animals. Praeger, New York. 384 p.

Roberts, D. 1976. Mussels and pollution. In B.L. Bayne [ed.]. Marine mussels: Their ecology and physiology, Chapt. 3. IBP 10. Cambridge University Press, London. 506 p.

Viarengo, A., and L. Canesi. 1991. Mussels as biological indicators of pollution. Aquaculture 94: 225-243.

PCBs and PAHs:

Bertrand, P., G. Verreault, Y. Vigneault, and G. Walsh. 1988. Biphenyles polychlorés dans les sédiments et les organismes marin de la Baie-des-Anglais (Côte-Nord du golfe Saint-Laurent). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1669: 1x + 42 p.

Capuzzo, J.M., J.W. Farrington, P. Rantamaki, C.H. Clifford, B.A. Lancaster, D.F. Leavitt, and X. Jia. 1989. The relationship between lipid composition and seasonal differences in the distribution of PCBs in *Mytilus edulis* L. Mar. Environ. Res. 28: 259-264.

Moore, M.N., J. Widdows, J.J. Cleary, R.K. Pipe, P.N. Salkeld, P. Donkin, S.V. Farrar, S.V. Evans, and P.E. Thomson. 1984. Responses of the mussel *Mytilus edulis* to copper and phenanthrene: Interactive effects. Mar. Environ. Res. 14: 167-183.

Pesticides:

Phillips, D.J.H. 1978. Use of biological indicator organisms to quantitate organochlorine pollutants in aquatic environments - a review. Environ. Pollut. 16: 167-189.

Hydrocarbons:

Ganning, B., D.Broman, and C. Lindblad. 1983. Uptake of petroleum hydrocarbons by the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) after experimental oiling and high pressure, hot water shore cleaning. Mar. Environ. Res. 10: 245-254.

National Research Council. 1985. Oil in the sea. Inputs, fates and effects. National Academy Press, Washington, D.C. 601 p.

Strömgen, T. 1986. The combined effect of copper and hydrocarbons on the length growth of *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 19: 251-258.

----- 1987. Effect of oil and dispersants on the growth of mussels. Mar. Environ. Res. 21: 239-246.

Widdows, J., T. Bakke, B.L. Bayne, P. Donkin, D.R. Livingstone, D.M. Lowe, M.N. Moore, S.V. Evans, and S.L. Moore. 1982. Responses of *Mytilus edulis* L. on exposure to the water-accommodated fraction of North Sea oil. Mar. Biol. 67: 15-31.

Metals:

Bourgoin, B.P. 1990. *Mytilus edulis* shell as a bioindicator of lead pollution: Considerations on bioavailability and variability. Mar. Ecol. Prog. Ser. 61: 253-262.

Cossa, D., and J.-G. Rondeau. 1985. Seasonal, geographical and size-induced variability in mercury content of *Mytilus edulis* in an estuarine environment: A re-assessment of mercury pollution level in the estuary and Gulf of St. Lawrence. Mar. Biol. 88: 43-49.

Cossa, D. 1988. Cadmium in *Mytilus* spp.: Worldwide survey and relationship between seawater and mussel content. Mar. Environ. Res. 26: 265-284.

Elliott, N.G., R. Swain, and D.A. Ritz. 1985. The influence of cyclic exposure on the accumulation of heavy metals by *Mytilus edulis planulatus* (Lamarck). Mar. Environ. Res. 15: 17-30.

Sewage:

Johnson, D., and T.J. Lack. 1985. Some responses of transplanted *Mytilus edulis* to metal-enriched sediments and sewage sludge. Mar. Environ. Res. 17: 277-280.

Menon, A. 1988. Molluscan shellfish and water quality problems in Atlantic Canada.
Tox. Assess. 3: 679-686.

DEPARTMENT OF FISHERIES AND OCEANS EXPERTS

Ecology and Distribution	Ken Freeman ¹ Robert Miller ¹	(902) 423-7360 (902) 426-8108
Algal Toxins	Tom Sephton ² John Smith ²	(902) 851-2053 (506) 851-3827
Aquaculture and Fisheries	Randy Penney ³ Marcel Fréchette ⁴ Thomas Landry ²	(709) 772-4704 (418) 775-0625 (506) 851-6219
Contaminants	Jack Uthe ¹ Vlado Zitko ⁵	(902) 426-6277 (506) 529-8854
Parasites	Sharon McGladdery ²	(506) 851-2018
Shellfish Sanitation	Michael Gilgan ¹	(902) 426-6284

¹Department of Fisheries and Oceans
Halifax Fisheries Research Laboratory
P.O. Box 550
Halifax, NS B3J 2S7
Canada

⁴Department of Fisheries and Oceans
Institute Maurice Lamontagne
P.O. Box 1000
Mont-Joli, PQ G5H 3Z4
Canada

²Department of Fisheries and Oceans
Gulf Fisheries Centre
P.O. Box 5030
Moncton, NB E1C 9B6
Canada

⁵Department of Fisheries and Oceans
St. Andrews Biological Station
Brandy Cove Road
St. Andrews, NB E0G 2X0
Canada

³Department of Fisheries and Oceans
Northwest Atlantic Fisheries Centre
P.O. Box 5667
St. John's, NF A1C 5X1
Canada

REFERENCES

- Akberali, H.B., M.J. Earnshaw, and K.R.M. Marriott. 1985. The action of heavy metals on the gametes of the marine mussel, *Mytilus edulis* (L.). II. Uptake of copper and zinc and their effect on respiration in the sperm and unfertilized egg. Mar. Environ. Res. 16: 37-59.
- Ambariyanto, and R. Seed. 1991. The infestation of *Mytilus edulis* Linnaeus by *Polydora ciliata* (Johnston) in the Conway Estuary, North Wales. J. Molluscan Stud. 57: 413-424.
- Anuass, T., J.P. Denstad, and K.E. Zachariassen. 1988. Ecophysiological importance of the isolation response of hibernating blue mussels (*Mytilus edulis*). Mar. Biol. 98: 415-419.
- Bayne, B.L., and J. Widdows. 1978. The physiological ecology of two populations of *Mytilus edulis* L. Oecologia Berlin 37: 137-162.
- Bayne, B.L., and C.M. Worrall. 1980. Growth and production of mussels *Mytilus edulis* from two populations. Mar. Ecol. Prog. Ser. 3: 317-328.
- Bayne, B.L., D.A. Brown, K. Burns, D.R. Dixon, A. Ivanovici, D.R. Livingstone, D.M. Lowe, M.N. Moore, A.R.D. Stebbing, and J. Widdows. 1985. The effects of stress and pollution on marine animals. Praeger, New York. 384 p.
- Beaumont, A.R., and M.D. Budd. 1984. High mortality of the larvae of the common mussel at low concentrations of tributyltin. Mar. Poll. Bull. 15: 402-405.
- Beaumont, A.R., G. Tserpes, and M.D. Budd. 1987. Some effects of copper on the veliger larvae of the mussel *Mytilus edulis* and the scallop *Pecten maximus* (Mollusca, Bivalvia). Mar. Environ. Res. 21: 299-309.
- Beaumont, A.R., and K.S. Kelly. 1989. Production and growth of triploid *Mytilus edulis* larvae. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 132: 69-84.
- Bergeron, P., M. Fréchette, L. Pagé, Y. Lavergne, and G. Walsh. 1990. Sedimentation et dispersion des déblais de dragage en mer et effets sur la moule bleue (*Mytilus edulis*) en élevage dans la Baie des Chaleurs. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1746.
- Bertrand, P., G. Verreault, Y. Vigneault, and G. Walsh. 1988. Biphényles polychlorés dans les sédiments et les organismes marin de la Baie-des-Anglais (Côte-Nord du golfe Saint-Laurent). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1669: 1x + 42 p.

- Blumer, M., G. Souza, and J. Sass. 1970. Hydrocarbon pollution of edible shellfish by an oil spill (Buzzard's Bay, Massachussets). Mar. Biol. 5: 195-202.
- Bohlen, W.F., D.F. Cundy, and J.M. Tramontano. 1979. Suspended material distributions in the wake of estuarine channel dredging operations. Estuarine Coastal Mar. Sci. 9: 699-711.
- Bourgoin, B.P. 1990. *Mytilus edulis* shell as a bioindicator of lead pollution: Considerations on bioavailability and variability. Mar. Ecol. Prog. Ser. 61: 253-262.
- Bourgoin, B.P., M.J. Risk, and A.E. Aitken. 1989. Possible effect of sedimentary phosphorus on the accumulation of lead in *Mytilus edulis*. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 43: 635-640.
- Calabrese, A., J.R. MacInnes, D.A. Nelson, R.A. Greig, and P.P. Yevich. 1984. Effects of long-term exposure to silver or copper on growth, bioaccumulation and histopathology in the blue mussel *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 11: 253-274.
- Capuzzo, J.M., J.W. Farrington, P. Rantamaki, C.H. Clifford, B.A. Lancaster, D.F. Leavitt, and X. Jia. 1989. The relationship between lipid composition and seasonal differences in the distribution of PCBs in *Mytilus edulis* L. Mar. Environ. Res. 28: 259-264.
- Cembella, A., M. Bricelj, and J. Lee. 1991. Kinetics of paralytic shellfish toxin uptake and detoxification in bivalve molluscs, p. 7. In D.C. Gordon, Jr. [ed.]. Proceedings of the Second Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, N.S., October 2-4, 1990. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1799: 66 p.
- Cossa, D., M. Picard-Berubé, and J.-P. Gouygou. 1983. Polynuclear aromatic hydrocarbons in mussels from the estuary and northwestern Gulf of St. Lawrence, Canada. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 31: 41-47.
- Cossa, D. 1988. Cadmium in *Mytilus* spp.: Worldwide survey and relationship between seawater and mussel content. Mar. Environ. Res. 26: 265-284.
- Dahlgaard, H. 1986. Effects of season and temperature on long-term in situ loss rates of Pu, Am, Np, Ce, Ag, Tc, Zn, Co and Mn in a Baltic *Mytilus edulis* population. Mar. Ecol. Prog. Ser. 33: 157-165.
- Davies, I.M., W.C. Graham, and J.M. Pirie. 1979. A tentative determination of methyl mercury in sea-water. Mar. Chem. 7: 111-116.

- Eaton, P., and V. Zitko. 1978. Polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments and shellfish near creosoted wharf structures in eastern Canada. Int. Counc. Explor. Sea C.M.1978/E:25.
- Eaton, P., L.P. Hildebrand, and A.A. d'Entremont. 1986. Environmental quality in the Atlantic Region. 1985. Environ. Can., Environ. Prot. Serv., Atl. Region.
- Eddy, S. 1992. Temporal and spatial variation in PSP in southwestern N.B. 1943 to the present, p. 34. In J.-C. Therriault and M. Levasseur [ed.]. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.
- Elliott, N.G., R. Swain, and D.A. Ritz. 1985. The influence of cyclic exposure on the accumulation of heavy metals by *Mytilus edulis planulatus* (Lamarck). Mar. Environ. Res. 15: 17-30.
- Farley, C.A. 1988. A computerized coding system for organs, tissues, lesions, and parasites of bivalve mollusks and its application in pollution monitoring with *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 24: 243-249.
- Fossato, V.U., and W.J. Canzonier. 1976. Hydrocarbon uptake and loss by the mussel *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 36: 243-250.
- Freeman, K.R. 1974. Growth, mortality and seasonal cycle of *Mytilus edulis* in two Nova Scotian embayments. Fish. Mar. Serv. Tech. Rep. 500.
- Freeman, K.R., K.L. Perry, and T.G. Dibacco. 1992. Morphology, condition and reproduction of two co-occurring species of *Mytilus* at a Nova Scotia mussel farm. Bull. Aquacul. Assoc. Can. 92(3): 1-3.
- Friedrich, A.R., and F.P. Filice. 1976. Uptake and accumulation of the nickle ion by *Mytilus edulis*. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 16: 750-755.
- Ganning, B., D. Broman, and C. Lindblad. 1983. Uptake of petroleum hydrocarbons by the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) after experimental oiling and high pressure, hot water shore cleaning. Mar. Environ. Res. 10: 245-254.
- Goldberg, E.D. 1975. The mussel watch - a first step in global marine monitoring. Mar. Poll. Bull. 6: 111.
- Gonzalez, J.G., and P. Yevich. 1976. Responses of an estuarine population of the blue mussel *Mytilus edulis* to heated water from a steam generating plant. Mar. Biol. 34: 177-189.

- Grant, J., A. Hatcher, D.B. Scott, P. Pocklington, C.T. Schafer, and G.V. Winters. In press. A multidisciplinary approach to evaluating benthic impacts of shellfish aquaculture.
- Harding, L. 1992. Measures of marine environmental quality. Mar. Poll. Bull. 25: 23-27.
- Hawryluk, M., P. Schwinghamer, C. Powell, and C.H. Mackenzie. 1992. Winter occurrence of PSP in inshore Newfoundland waters is caused by resuspended hypnozygotes of *Alexandrium fundyense*, p. 13. In J.-C. Therriault and M. Levasseur [ed.]. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.
- Haya, K., J.L. Martin, B.A. Waiwood, and L.E. Burridge. 1989. Distribution of PSP toxins in mussels cultured in Deadman's Harbour, New Brunswick, p. 15-16. In S.S. Bates and J. Worms [ed.]. Proceedings of the First Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Gulf Fisheries Centre, Moncton, N.B., September 27-28, 1989. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1712: 58 p.
- Hellou, J., C. Upshall, J.P. Payne, S. Naidu, and M.A. Paranjape. 1993. Total unsaturated compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in molluscs collected from waters around Newfoundland. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 24: 249-257.
- Hietanen, B., I. Sunila, and R. Kristoffersson. 1988. Toxic effects of zinc on the common mussel *Mytilus edulis* L. (Bivalvia) in brackish water. 1. Physiological and histopathological studies. Ann. Zool. Fenn. 25: 341-347.
- Hillman, R.E., R.A Lordo, R.G. Menton, C.S. Peven, A.D. Uhler, E. Crecelius, and W.G. Steinhauer. 1992. Relationship of environmental contaminants to occurrence of neoplasia in mussels (*Mytilus edulis*) from East and West Coast Mussel Watch sites, p. 230-239. In Proceedings of the MTS '92, Global Ocean Partnership Conference, Washington, D.C., 19-21 Oct. 1992.
- Hummel, H., J.P. UitOudeGroeneveld, J. Nieuwenhuize, J.M. van Liere, R.H. Bogaards, and L. de Wolf. 1989. Relationship between PCB concentration and reproduction in mussels *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 28: 489-493.
- Hutcheson, M.S. 1983. Toxicological effects of potash brine on Bay of Fundy marine organisms. Mar. Environ. Res. 9: 237-255.
- Khalanski, M., and F. Bordet. 1983. Effects of chlorination on marine mussels, p. 557-567. In R.L. Jolley, W.A. Brungs, J.A. Cotruvo, R.B. Cumming, J.S. Mattice, and V.A. Jacobs [ed.]. Water Chlorination. Environmental Impact and Health Effects 4, Chapt. 49. Proc. 4th Conference on Water Chlorination. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich. 1491 p.

- Kiorboe, T., F. Mohlenberg, and O. Nohr. 1981. Effect of suspended bottom material on growth and energetics in *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 61: 283-288.
- Kluytmans, J.H., F. Brands, and D.I. Zandee. 1988. Interactions of cadmium with the reproductive cycle of *Mytilus edulis* L. Mar. Environ. Res. 24: 189-192.
- Knezovich, J.P., M.P. Lawton, and F.L. Harrison. 1988. *In vivo* metabolism of aromatic amines by the bay mussel, *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 24: 89-91.
- Lee, C.Y., S.S.L. Lim, and M. Dowen. 1990. The rate and strength of byssal reattachment by the blue mussels (*Mytilus edulis* L.). Can. J. Zool. 68: 2005-2009.
- Lobel, P.B., S.P. Belkhode, S.E. Jackson, and H.P. Longerich. 1990. Recent taxonomic discoveries concerning the mussel *Mytilus*: Implications for biomonitoring. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 19: 508-512.
- Loo, L. 1992. Filtration, assimilation, respiration and growth of *Mytilus edulis* L. at low temperatures. Ophelia 35: 123-131.
- Lord, D.A., R.A.F. Matheson, L. Stuart, J.J. Swiss, and P.G. Wells. 1978. Environmental monitoring of the 1976 spruce budworm spray program in New Brunswick, Canada. Environ. Can., Environ. Prot. Serv., Surveill. Rep. EPS-5-AR-78-3. 161 p.
- Lowe, D.M., and M.N. Moore. 1979. The cytochemical distributions of zinc (Zn II) and Iron (Fe III) in the common mussel, *Mytilus edulis*, and their relationship with lysosomes. J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 59: 851-858.
- Lowe, D.M., and K.R. Clarke. 1989. Contaminant-induced changes in the structure of the digestive epithelium of *Mytilus edulis*. Aquat. Toxicol. 15: 345-358.
- Maguire, R.J., R.J. Tkacz, Y.K. Chau, G.A. Gengert, and P.T.S. Wong. 1986. Occurrence of organotin compounds in water and sediment in Canada. Chemosphere 15: 253-274.
- Mallet, A.L., C.E.A. Carver, and K.R. Freeman. 1990. Summer mortality of the blue mussel in eastern Canada: Spatial, temporal, stock and age variation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 67: 35-41.
- Martin, M., K.E. Osborn, P. Billig, and N. Glickstein. 1981. Toxicities of ten metals to *Crassostrea gigas* and *Mytilus edulis* embryos and *Cancer magister* larvae. Mar. Poll. Bull. 12: 305-308.

- Matheson, R.A.F., G.L. Trider, W.R. Ernst, K.G. Hamilton, and P.A. Hennigar. 1983. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination of Sydney Harbour, Nova Scotia. Environ. Can., Environ. Prot. Serv., Atl. Region. EPS-5-AR-83-6.
- Maung-Myint, U., and P.A. Tyler. 1982. Effects of temperature, nutritive and metal stressors on the reproductive biology of *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 67: 209-223.
- McGladdery, S.E., R.E. Drinnan, and M.F. Stephenson. 1993. A manual of parasites, pests and diseases of Canadian Atlantic bivalves. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1931.
- McHenerny, J.G., D. Saward, and D.D. Seaton. 1991. Lethal and sub-lethal effects of the salmon delousing agent dichlorvos on the larvae of the lobster (*Homarus gammarus* L.) and herring (*Clupea harengus* L.). Aquaculture 98: 331-347.
- Menon, A. 1988. Molluscan shellfish and water quality problems in Atlantic Canada. Tox. Assess. 3: 679-686.
- Moore, M.N., D.M. Lowe, and P.E.M. Fieth. 1978. Lysozomal responses to experimentally injected anthracene in the digestive cells of *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 48: 297-302.
- Moore, M.N., J. Widdows, J.J. Cleary, R.K. Pipe, P.N. Salkeld, P. Donkin, S.V. Farrar, S.V. Evans, and P.E. Thomson. 1984. Responses of the mussel *Mytilus edulis* to copper and phenanthrene: Interactive effects. Mar. Environ. Res. 14: 167-183.
- Myrand, B., and J. Richard. 1987. La moule bleue. Conseil des Productions Animales du Québec. AGDEX 485. 107 p.
- Myrand, B. [ed.]. 1991. Proceedings of a Workshop on summer mortality of mussels on the Magdalen Islands (Atelier de travail sur la mortalité estivale des moules aux Iles-de-la-Madeleine). 23-25 Avril 1991. Conseil de l'Aquiculture et des Pêches du Québec. 196 p.
- Newell, C.R., and R.A. Lutz. 1991. Growth and survival of cultured mussels in Maine. Bull. Aquacult. Assoc. Can. 91: 47-53.
- Noellgen, R.M. 1990. Organophosphate-hydrolyzing activity in *Mytilus edulis*, p. 1139-1142. In P. Chapman, F. Bishay, E. Power, K. Hall, L. Harding, D. McLeay, M. Nassichuk, and W. Knapp [ed.]. Proceedings of the Seventeenth Annual Aquatic Toxicity Workshop, November 5-7, Vancouver, B.C. Volumes 1 and 2. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1774.

- O'Connor, T.P. 1992. Recent trends in coastal environmental quality: Results from the first five years of the NOAA Mussel Watch Project. U.S. National Status and Trends Program, NOAA Coastal Monitoring Branch. 46 p.
- O'Neill, H.J., and K.M. Kieley. 1992. Polynuclear aromatic hydrocarbons: Atlantic Region data summary and review. Environ. Can., Conserv. Prot., Atl. Region Tech. Rep. Ser. 92-01.
- Outerbridge, G., A.M. Renata, and D.J. Scarratt. 1992. Uptake and elimination of domoic acid by mussels (*Mytilus* sp.) in various experimental conditions, p. 21. In J.-C. Therriault and M. Levasseur [ed.]. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Maurice Lamontagne Institute, Mont-Joli, Québec, May 12-14, 1992. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.
- Owens, E.H. 1977. Coastal environments of Canada: The impact and cleanup of oil spills. Rep. to Can., Dept. Fish. Environ., Environ. Prot. Serv., Ottawa. EPS-3-EC-77-13. 413 p.
- Page, D.S., E.S. Gilfillan, S.A. Hanson, J.R. Hotham, and J.C. Foster. 1984. Correlation of body burden of heavy metals with physiological stress indicators in *Mytilus edulis* and *Mya arenaria* exposed to heavy metals in the field. Mar. Environ. Res. 14: 505.
- Pelletier, E., S. Ouellet, and M. Paquet. 1991. Long-term chemical and cytochemical assessment of oil contamination in estuarine intertidal sediments. Mar. Poll. Bull. 22: 273-281.
- Phillips, D.J.H. 1976. The common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper. II. Relationship of metals in the mussel to those discharged by industry. Mar. Biol. 38: 71-80.
- Phillips, D.J.H. 1978. Use of biological indicator organisms to quantitate organochlorine pollutants in aquatic environments - a review. Environ. Pollut. 16: 167-187.
- Picard-Bérubé, M., D. Cossa, and J. Piuze. 1983. Teneurs en benzo 3,4 pyrene chez *Mytilus edulis* L. de l'Estuaire et du Golfe du Saint-Laurent. Mar. Environ. Res. 10: 63-71.
- Popham, J.D., and J. D'Auria. 1982. Effects of season and seawater concentrations on trace metals in organs of *Mytilus edulis*. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 11: 273-282.
- Prakash, A., J.A. Medcof, and A.D. Tennant. 1971. Paralytic shellfish poisoning in eastern Canada. Bull. Fish. Res. Board Can. 177: 87 p.

- Pruell, R.J., J.L. Lake, W.R. Davis, and J.G. Quinn. 1986. Uptake and depuration of organic contaminants by blue mussels, (*Mytilus edulis*) exposed to environmentally contaminated sediment. *Mar. Biol.* 91: 497-507.
- Rasmussen, L. 1982. Light microscopical studies of the acute toxic effects of N-nitrosodimethylamine on the marine mussel, *Mytilus edulis*. *J. Invertebr. Pathol.* 39: 66-80.
- Ray, S., D.W. McLeese, L.E. Burridge, and B.A. Waiwood. 1980. Distribution of cadmium in marine biota in the vicinity of Belledune, p. 11-34. In J.F. Uthe and V. Zitko [ed.]. Cadmium contamination of Belledune Harbour, New Brunswick, Canada. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 963: v + 107 p.
- Rieman, B., and E. Hoffman. 1991. Ecological consequences of dredging and bottom trawling in the Limfjord, Denmark. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 69: 171-178.
- Risebrough, R.W., B.W. DeLappe, and T.T. Schmidt. 1976. Bioaccumulation factors of chlorinated hydrocarbons between mussels and seawater. *Mar. Poll. Bull.* 7: 225-228.
- Roberts, D. 1976. Mussels and pollution. In B.L. Bayne [ed.]. *Marine mussels: Their ecology and physiology*, Chapt. 3. IBP 10. Cambridge University Press, London. 506 p.
- Roberts, D.F., M. Elliott, and P.A. Reid. 1986. Cadmium contamination, accumulation and some effects of this metal in mussels from a polluted marine environment. *Mar. Environ. Res.* 18: 165-183.
- Sanders, B.M., L.S. Martin, W.G. Nelson, D.K. Phelps, and W. Welch. 1991. Relationships between accumulation of a 60 kDa stress protein and scope-for-growth in *Mytilus edulis* exposed to a range of copper concentrations. *Mar. Environ. Res.* 31: 81-97.
- Scarratt, D.J. 1969. Bleached kraft mill effluent near Pictou, N.S., and its effect on the marine flora and fauna with a note on the Pictou Co. lobster landings. *Fish. Res. Board Can. Manuscr. Rep.* 1037.
- Scarratt, D.J. 1993. A handbook of northern mussel culture. Island Press, Montague, P.E.I. 167 p.
- Scarratt, A.M., D.J. Scarratt, and M.G. Scarratt. 1993. Survival of live *Alexandrium tamarensis* cells in mussel and scallop spat under simulated transfer conditions. *J. Shellfish Res.* 12(2): in press.

- Shumway, S.E., F.C. Pierce, and K. Knowlton. 1987. The effect of *Protogonyaulax tamarensis* on byssus production in *Mytilus edulis* L., *Modiolus modiolus* Linnaeus, 1758 and *Geukensia demissa* Dillwyn. Comp. Biochem. Physiol. 87A: 1021-1023.
- Sirota, G.R., J.F. Uthe, D.G. Robinson, and C.J. Musial. 1984. Polycyclic aromatic hydrocarbons in American lobster (*Homarus americanus*) and blue mussel (*Mytilus edulis*) collected in the area of Sydney Harbour, Nova Scotia. Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1758.
- Sprague, J.B., and J.R. Duffy. 1971. DDT residues in Canadian Atlantic fishes and shellfishes in 1967. J. Fish. Res. Board Can. 28: 59-64.
- Stickle, W.B., Jr., S.D. Rice, C. Villars, and W. Metcalf. 1985. Bioenergetics and survival of the marine mussel *Mytilus edulis* L. during long-term exposure to the water-soluble fraction of Cook Inlet crude oil, p. 427-446. In F.J. Vernberg, F.P. Thurberg, A. Calabrese, and W.B. Vernberg [ed.]. Marine pollution and physiology: Recent advances. Belle W. Baruch Library in Marine Science 13. Univ. South Carolina Press.
- Strömgren, T. 1986. The combined effect of copper and hydrocarbons on the length growth of *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 19: 251-258.
- _____. 1987. Effect of oil and dispersants on the growth of mussels. Mar. Environ. Res. 21: 239-246.
- Strömgren, T., and T. Bongard. 1987. The effect of tributyltin oxide on growth of *Mytilus edulis*. Mar. Poll. Bull. 18: 30-31.
- Sturesson, U. 1976. Lead enrichment in shells in *Mytilus edulis*. Ambio 5: 253-256.
- Svane, I., and M. Ompi. 1993. Patch dynamics in beds of the blue mussel *Mytilus edulis* L.: Effects of site, patch size, and position within a patch. Ophelia 37: 187-202.
- Swiss, J. 1984. The effects of heated effluents on marine water quality in the Atlantic Region, p. 138-144. In R.C.H. Wilson and R.F. Addison [ed.]. Health of the Northwest Atlantic. Can. Dept. Environ., Dept. Fish. Oceans, Dept. Energy, Mines and Resources. 174 p.
- Thompson, R.J. 1984. The reproductive cycle and physiological ecology of the mussel *Mytilus edulis* in a subarctic, non-estuarine environment. Mar. Biol. 79: 277-288.
- Tibbs, J.F., R.A. Elston, R.W. Dickey, and A.M. Guarino. 1989. Studies on the accumulation of antibiotics in shellfish. Northwest Environ. J. 5: 161-162.

- Uhler, A.D., G.S. Durell, W.G. Steinhauer, and A.M. Spellacy. 1993. Tributyltin levels in bivalve mollusks from the east and west coasts of the United States: Results from the 1988-1990 National Status and Trends Mussel Watch Project. Environ. Toxicol. Chem. 12: 139-153.
- Uthe, J.F., and C.L. Chou. 1986. The effects of prolonged starvation on concentrations and tissue burdens of a number of divalent trace metals in mussels (*Mytilus edulis*). Int. Counc. Explor. Sea C.M.1986/E:28: 4 p.
- Viarengo, A., G. Mancinelli, G. Martino, M. Pertica, L. Canesi, and A. Mazzucotelli. 1988. Integrated cellular stress indices in trace metal contamination: Critical evaluation in a field study. Mar. Ecol. Prog. Ser. 46: 65-70.
- Viarengo, A., and L. Canesi. 1991. Mussels as biological indicators of pollution. Aquaculture 94: 225-243.
- Wang, W.K., and J. Widdows. 1993. Interactive effects of pentachlorophenol (PCP) and hypoxia on the energy metabolism of the mussel, *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 35: 109-113.
- Ward, R.E. 1990. Metal concentrations and digestive gland lysosomal stability in mussels from Halifax Inlet, Canada. Mar. Poll. Bull. 21: 237-240.
- Ward, J.E., B.A. MacDonald, and R.J. Thompson. 1993. Mechanisms of suspension feeding in bivalves: Resolution of current controversies by means of endoscopy. Limnol. Oceanogr. 38: 265-272.
- Weber, R.E., A. de-Zwaan, and A. Bang. 1992. Interactive effects of ambient copper and anoxia, temperature and salinity stress on survival and hemolymph and muscle tissue osmotic effectors in *Mytilus edulis*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 159: 135-156.
- Wells, H.W., and I.E. Gray. 1960. The seasonal occurrence of *Mytilus edulis* on the Carolina coast as a result of transport around Cape Hatteras. Biol. Bull. Mar. Biol. Lab., Woods Hole 119: 550-559.
- Wenning, R.J., and R.T. DiGiulio. 1988. The effects of paraquat on microsomal oxygen reduction and antioxidant defenses in ribbed mussels (*Geukensia demissa*) and wedge clams (*Rangia cuneata*). Mar. Environ. Res. 24: 301-305.
- White, A.W. 1982. Intensification of *Gonyaulax* blooms and shellfish toxicity in the Bay of Fundy. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1064: 12 p.
- Widdows, J., D.K. Phelps, and W. Galloway. 1981. Measurement of physiological condition of mussels transplanted along a pollution gradient in Narragansett Bay. Mar. Environ. Res. 4: 181-194.

- Widdows, J., and D.S. Page. 1993. Effects of tributyltin and dibutyltin on the physiological energetics of the mussel, *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 35: 233-249.
- Wildish, D.J., and M.L.H. Thomas. 1985. Effects of dredging and dumping on benthos of Saint John Harbour, Canada. Mar. Environ. Res. 15: 45-57.
- Wildish, D.J. and M.P. Miyares. 1990. Filtration rate of blue mussels as a function of flow velocity: Preliminary experiments. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 142: 213-219.
- Wong, C.S., W.J. Cretney, M.A. Cosson-Mannevy. 1984. Putative neoplastic disorders in mussels (*Mytilus edulis*) from southern Vancouver Island waters, British Columbia. J. Invertebr. Pathol. 44: 151-160.
- Young, G.A. 1985. Byssus-thread formation by the mussel *Mytilus edulis*: Effects of environmental factors. Mar. Ecol. Prog. Ser. 24: 261-271.
- Zaroogian, G.E., and M. Johnson. 1989. Adenylate energy charge and adenine nucleotide measurements as indicators of stress in the mussel, *Mytilus edulis*, treated with dredged material under laboratory conditions. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 43: 635-640.
- Zitko, V. 1981. Monitoring program for major Atlantic coast fisheries. Can. Manusc. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1615: iii + 15 p.



Scientific Excellence • Resource Protection & Conservation • Benefits for Canadians
Excellence scientifique • Protection et conservation des ressources • Bénéfices aux Canadiens

Besoins environnementaux et réactions aux activités humaines de la moule bleue (*Mytilus edulis*) dans l'est du Canada

P.L. Stewart

Direction des sciences biologiques
Région Scotia-Fundy
Ministère des Pêches et des Océans
Institut océanographique de Bedford
C.P. 1006
Dartmouth (Nouvelle-Écosse) B2Y 4A2
Canada

1994

**Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 2004**



Fisheries
and Oceans

Pêches
et Océans

Canada

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

These reports contain scientific and technical information that represents an important contribution to existing knowledge but which for some reason may not be appropriate for primary scientific (i.e. *Journal*) publication. Technical Reports are directed primarily towards a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of the Department of Fisheries and Oceans, namely, fisheries management, technology and development, ocean sciences, and aquatic environments relevant to Canada.

Technical Reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report will be abstracted in *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts* and will be indexed annually in the Department's index to scientific and technical publications.

Numbers 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and the Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Details on the availability of Technical Reports in hard copy may be obtained from the issuing establishment indicated on the front cover.

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Ces rapports contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution importante aux connaissances actuelles mais qui, pour une raison ou pour une autre, ne semblent pas appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Il n'y a aucune restriction quant au sujet, de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques du Ministère des Pêches et des Océans, notamment gestion des pêches, techniques et développement, sciences océaniques et environnements aquatiques, au Canada.

Les Rapports techniques peuvent être considérés comme des publications complètes. Le titre exact paraîtra au haut du résumé de chaque rapport, qui sera publié dans la revue *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts* et qui figurera dans l'index annuel des publications scientifiques et techniques du Ministère.

Les numéros 1-456 de cette série ont été publiés à titre de Rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457-714, à titre de Rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715-924 ont été publiés à titre de Rapports techniques du Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom de la série a été modifié à partir du numéro 925.

La page couverture porte le nom de l'établissement auteur où l'on peut se procurer les rapports sous couverture cartonnée.

Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 2004

1994

**BESOINS ENVIRONNEMENTAUX ET RÉACTIONS AUX ACTIVITÉS HUMAINES
DE LA MOULE BLEUE (*MYTILUS EDULIS*) DANS L'EST DU CANADA**

par

P.L. Stewart¹

Direction des sciences biologiques
Région Scotia-Fundy
Ministère des Pêches et des Océans
Institut océanographique de Bedford
C.P. 1006
Dartmouth (Nouvelle-Écosse) B2Y 4A2
Canada

¹Envirosphere Consultants Limited, C.P. 2906, Windsor (N.-É) B0N 2T0, Canada

© Ministre des Travaux publics et des Services gouvernementaux Canada 1994
N° de cat. Fs 97-6/2004 ISSN 0706-6570

Ce document devra être cité comme suit:

Stewart, P.L. 1994. Besoins environnementaux et réactions aux activités humaines de la moule bleue (*Mytilus edulis*) dans l'est du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2004: x + 44 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vi
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	viii
PRÉFACE	x
BIOLOGIE DE L'ESPÈCE	1
RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE	1
CYCLES SAISONNIERS	1
Reproduction	1
Croissance	2
ALIMENTATION	2
COMPOSITION PAR TAILLES ET PAR ÂGES	4
<i>MYTILUS TROSSULUS</i>	4
PARASITES ET MALADIES	4
MORTALITÉ MASSIVE ESTIVALE	5
PRÉDATEURS	5
BESOINS ENVIRONNEMENTAUX	5
TEMPÉRATURE	5
SALINITÉ	6
OXYGÈNE DISSOUS	7
PROFONDEUR	7
PARTICULES EN SUSPENSION	7
SUBSTRAT	8
COURANTS	8
GLACE DE MER	8
IMPORTANCE ÉCONOMIQUE ET UTILISATION DE LA RESSOURCE	9
POPULATIONS NATURELLES	9
AQUICULTURE	9
Techniques	10
Répartition	10
Réglementation	12
Problèmes environnementaux	12

TABLE DES MATIÈRES (suite)

BIO-ENCRASSEMENT	13
ACCUMULATION DE TOXINES	13
 RÉACTIONS AUX ACTIVITÉS HUMAINES	15
 CONTAMINANTS DE L'ENVIRONNEMENT ET POLLUTION	15
 Réactions aux contaminants	15
<i>Mussel Watch</i>	17
Métaux lourds	18
 Accumulation	18
Effets	19
 Contaminants organiques	20
Biphényles polychlorés (BPC)	20
Pesticides	20
Hydrocarbures pétroliers	21
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	21
Autres composés organiques	22
Tributylétain	23
 PERTURBATIONS PHYSIQUES	23
Dragage	23
Ouvrages côtiers et hauturiers	24
 CONTAMINATION INDUSTRIELLE	24
Pâtes et papiers	24
Mines et fonderies	25
Chloration	25
Saumures	26
Pollution thermique	26
Industrie des hydrocarbures	27
 IMPACTS DES PRATIQUES AGRICOLES ET FORESTIÈRES	27
DÉCHETS DOMESTIQUES	28
DÉBLAIS	28
AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES	28
 REMERCIEMENTS	29
RÉFÉRENCES CHOISIES	29

TABLE DES MATIÈRES (suite)

SPÉCIALISTES DU MINISTÈRE DES PÊCHES ET DES OCÉANS	33
BIBLIOGRAPHIE	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cycle vital généralisé de la moule bleue, <i>Mytilus edulis</i> , dans l'est du Canada.	3
Figure 2. Tableau général des méthodes de mytiliculture employées dans l'est du Canada.	11

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Principales intoxications d'origine phytoplanctonique dans les eaux de l'est du Canada.	14
--	----

RÉSUMÉ

Stewart, P.L. 1994. Besoins environnementaux et réactions aux activités humaines de la moule bleue (*Mytilus edulis*) dans l'est du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2004: x + 44 p.

La moule bleue ou moule commune (aussi appelée moucle ou mouke), *Mytilus edulis*, est une des espèces d'invertébrés les plus abondantes et les plus largement répandues dans les zones intertidales et les eaux infratidales peu profondes de l'Atlantique Nord. Les larves planctoniques et les adultes de cette espèce représentent une importante source de nourriture pour les poissons, divers invertébrés, les oiseaux et les mammifères, dont l'homme. En outre, son élevage (mytiliculture) est beaucoup pratiqué dans l'est du Canada, principalement dans les îles de la Madeleine, dans l'Île-du-Prince-Édouard, sur le littoral atlantique de la Nouvelle-Écosse et sur la côte nord-est de Terre-Neuve (surtout la baie Notre Dame). L'exploitation commerciale des populations sauvages de moules bleues est peu pratiquée dans l'est du Canada. La présence de diverses espèces phytoplanctoniques produisant des toxines nuit à la récolte récréative et à l'élevage de la moule, deux activités qui ont à peu près disparu de la baie de Fundy mais qui ne sont interdites que de façon saisonnière dans le golfe du Saint-Laurent (sauf les îles de la Madeleine), et périodiquement ailleurs. *M. edulis* se nourrit toute l'année de phytoplancton et de matières organiques détritiques en suspension dans l'eau, et réagit à la prolifération printanière en développant ses gonades et en se reproduisant dans les mois de mai et juin. Les larves se nourrissent de plancton et vont ensuite se fixer au fond de la mer et en zone intertidale; elles atteignent leur taille adulte après une à trois années et se reproduisent après un an.

M. edulis est un des organismes marins les plus fréquemment employés (sinon le plus couramment employé) dans l'étude toxicologique et physiologique des contaminants et dans la surveillance et l'évaluation de l'impact écologique exercé par l'activité humaine sur l'environnement marin. La moule bleue occupe la première place dans les études internationales de surveillance des moules (programme *Mussel Watch*), consistant à analyser la contamination chimique des moules pour faire le point sur l'évolution de la contamination de l'environnement. En outre, des populations transplantées et naturelles de moules ont été souvent utilisées, au Canada comme à l'étranger, pour déterminer l'origine et le comportement des contaminants et mesurer le taux de contamination ambiant. Les moules tolèrent de nombreux contaminants chimiques et peuvent en atténuer les effets grâce à des fonctions biochimiques particulières (comme la production de métallothionéines et de protéines de "choc thermique," ou l'induction de systèmes enzymatiques d'oxydases à fonction mixte). Le stress créé par la contamination et d'autres facteurs environnementaux est communément mesuré par l'analyse de facteurs physiologiques comme le potentiel de croissance, le rapport oxygène/azote et divers indices de condition.

Les principaux problèmes de la mytiliculture sont causés par la présence de toxines, l'englacement des eaux en hiver et un phénomène de "mortalité massive estivale" causant la mort d'une forte proportion de la population de moules. Pour les

populations naturelles, les menaces peuvent être une désalinisation des eaux imputable aux rejets industriels, ou encore une contamination par les métaux et divers composés organiques. En général, la pollution se limite à des sources ponctuelles qui ne menacent pas la majorité des populations. La contamination d'origine humaine (bactéries coliformes fécales, matières organiques transportées par les égouts, ruissellement agricole) est celle qui peut avoir l'impact le plus étendu sur la consommation humaine de moules.

ABSTRACT

Stewart, P.L. 1994. Besoins environnementaux et réactions aux activités humaines de la moule bleue (*Mytilus edulis*) dans l'est du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2004: x + 44 p.

The common or blue mussel, *Mytilus edulis*, is one of the most abundant and widely distributed invertebrate species found in intertidal and shallow subtidal waters in the North Atlantic. Its planktonic larvae and adult stages are important as food for fish, various invertebrates, birds, mammals, and humans. The species also supports a major aquaculture industry in eastern Canada, centred principally in Iles-de-la-Madeleine, Prince Edward Island, the Atlantic Coast of Nova Scotia, and the northeastern coast of Newfoundland (principally Notre Dame Bay). No significant commercial harvest of natural populations of blue mussels occurs in eastern Canada. Recreational fisheries and aquaculture operations are impacted by occurrence of various phytoplankton species which produce toxins, which have virtually eliminated these activities from the Bay of Fundy, but limit them only seasonally in the Gulf of St. Lawrence (except in Iles-de-la-Madeleine) and periodically in other areas. *M. edulis* feeds on suspended phytoplankton and detrital organic matter throughout the year and responds to spring bloom conditions by developing gonads and spawning in the May-July period. Larval stages feed on plankton and subsequently adopt a life on the seabed and intertidal areas, reaching adult size in from 1 to 3 yr and reproducing after 1 yr.

M. edulis is one of the most commonly used marine organism (if not the most common) in studies of contaminant toxicology and physiology, and in monitoring and evaluating environmental impacts of humans on the marine environment. The blue mussel is the main organism used in *Mussel Watch* studies world wide which use analyses of chemical contaminants in mussels to assess trends in environmental contamination. In addition, mussels have been used widely in Canada and elsewhere, both in transplant experiments and natural populations, to identify contaminant sources and behaviour, and baseline levels of contaminants. Mussels tolerate many chemical contaminants and have biochemical systems (such as production of metallothioneins and "heat shock" proteins, and induction of mixed-function oxidase enzyme systems) to reduce their impact. Physiological measures such as scope for growth, oxygen/nitrogen ratio, and condition indices have been used commonly to assess stress resulting from both contamination and other environmental factors.

Main problems in mussel aquaculture include the existence of shellfish toxins, ice in winter, and a phenomenon known as "summer die-off" in which a large proportion of individuals die. Natural populations may be impacted by reduced-salinity water from industrial outfalls, as well as contamination from metals and various organic compounds. In general, pollution is localized in point sources which do not impact the majority of the blue mussel populations. Human contamination from fecal coliform bacteria, organic releases in connection with sewage disposal, and agricultural run-off pose the greatest potential for widespread impact on human use of mussel populations.

PRÉFACE

Les gestionnaires de l'habitat au ministère des Pêches et des Océans (MPO) ont souvent besoin d'informations clés sur les besoins environnementaux de certaines espèces pour pouvoir évaluer les effets sur celles-ci du développement industriel ou autre. Ces informations sont souvent dispersées à travers les sources les plus diverses: ouvrages de référence, revues scientifiques, rapports techniques, imprimés non répertoriés, fichiers informatiques, sans compter la mémoire des individus. Aussi ces informations sont-elles souvent difficiles et fastidieuses à obtenir. C'est pourquoi les gestionnaires prennent souvent des décisions sans pouvoir compter sur des informations clés. Le présent document fait partie d'une série de plusieurs rapports techniques destinés justement à corriger cette lacune en présentant des profils d'habitat faciles à consulter et qui résument l'information existante sur la biologie de diverses espèces, leurs besoins environnementaux et les effets anthropiques connus sur leurs populations.

À la lumière des résultats probants de l'étude pilote consacrée au homard¹ en 1992 par le Sous-comité scientifique sur l'habitat marin de l'Atlantique, au MPO, on a produit le présent rapport et deux autres profils^{2,3}. Ce programme d'étude, qui a consisté en des analyses bibliographiques et des consultations, a été affermé à Envirosphere Consultants Limited, de Windsor (Nouvelle-Écosse). Le choix des trois espèces étudiées - hareng, moule bleue et pétoncle géant - a été conjointement fait par les quatre bureaux régionaux du MPO dans la zone atlantique (Terre-Neuve, Scotia-Fundy, Golfe, Québec). Chaque rapport fait l'objet d'une publication distincte, en anglais et en français. Ces travaux ont été financés par le Programme des pêches durables, découlant du Plan vert d'Environnement Canada.

Nous espérons que d'autres profils du genre seront publiés dans un proche avenir, et vous invitons à nous faire connaître vos commentaires et vos idées pour en accroître l'utilité.

Donald C. Gordon
Chargé de projet
Direction des sciences biologiques
Ministère des Pêches et des Océans
Région Scotia-Fundy

H. Brian Nicholls
Autorité scientifique
Division de l'évaluation des ressources marines et de la liaison
Ministère des Pêches et des Océans
Région Scotia-Fundy

¹Harding, G.C. 1992. Le homard d'Amérique (*Homarus americanus* Milne Edwards): Document de travail sur ses besoins environnementaux et sur les phénomènes anthropiques se répercutant sur sa population. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1887: vi + 17 p.

²Stewart, P.L., et S.H. Arnold. 1994. Besoins environnementaux et réactions aux activités humaines du hareng atlantique (*Clupea harengus harengus*) dans l'est du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2003: ix + 40 p.

³Stewart, P.L., et S.H. Arnold. 1994. Besoins environnementaux et réactions aux activités humaines du pétoncle géant (*Placoplecten magellanicus*) dans l'est du Canada. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2005: ix + 39 p.

BIOLOGIE DE L'ESPÈCE

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

La moule bleue ou moule commune (*Mytilus edulis*) est largement répandue dans l'Atlantique nord⁴. On la trouve en Europe et en Amérique du Nord, depuis le nord du cercle arctique jusqu'à sa limite méridionale à Cape Hatteras, en Caroline du Nord.

CYCLES SAISONNIERS

Reproduction

M. edulis se reproduit selon un cycle annuel dépendant d'un équilibre entre divers facteurs environnementaux comme la température, la salinité, l'abondance de nourriture, et certains facteurs physiologiques spécifiques. Grâce à l'interaction de ces facteurs, les moules d'une population atteignent simultanément le stade de la reproduction. Les moules produisent des gamètes microscopiques, qu'elles libèrent simultanément dans l'eau pour permettre la fertilisation. Les ovaires et les testicules se développent au printemps, et donnent aux moules écaillees leur coloration crèmeuse (mâle) ou orangée (femelle). L'émission des œufs et du sperme, qui peut se produire durant une brève période lorsque les organes reproducteurs sont rendus à maturité, est probablement déclenchée par des stimuli externes comme l'élévation de la température de l'eau, un changement de salinité, le mouvement des vagues, la dessiccation, une forte concentration de phytoplancton, ou la présence de sperme de moules.

La majorité des populations de *M. edulis* se reproduisent une fois par année et, après la ponte, poursuivent leur croissance en vue de la prochaine reproduction. Certaines populations connaissent un développement des gonades en hiver, mais dans les eaux de Terre-Neuve il faut attendre au printemps (Thompson 1984). À Terre-Neuve, le développement des gamètes débute au printemps et la ponte se déroule surtout en juin ou juillet. Ailleurs, l'espèce se reproduit entre la fin mai et juillet (Nouvelle-Écosse), peu après la débâcle en mai (Île-du-Prince-Édouard) et durant les mois de mai et de juin (Québec). Il peut y avoir une seconde ponte à l'automne, si la nourriture est suffisamment abondante. Les moules ne se reproduisent pas durant leur première année d'existence.

Cinq heures après la fécondation, les œufs libèrent une larve qui amorce le premier de plusieurs stades dits planctoniques; les larves de ces stades sont capables de nager.

⁴On croyait autrefois que *Mytilus edulis* était répandue sur toute la planète, mais on a constaté qu'on avait en fait affaire à un complexe de trois lignées évolutives. En Europe, on trouve à la fois *M. edulis* et *M. galloprovincialis*, dont l'aire de répartition englobe la Méditerranée et l'Europe. Les eaux de l'est de l'Amérique du Nord abritent à la fois *M. trossulus* et *M. edulis*. *M. trossulus* domine sur la côte ouest de l'Amérique du Nord, mais en compagnie de *M. galloprovincialis* (introduite d'Europe, croit-on) et de *M. californianus*, une quatrième espèce. On estime généralement que les trois lignées méritent d'être considérées comme des espèces distinctes.

Elles demeurent dans la colonne d'eau durant trois ou quatre semaines, parfois plus (selon la température), et atteignent une taille d'environ 0,25 mm avant de se fixer au fond (Fig. 1). Une fois déposées sur un substrat convenable (de préférence des algues filamenteuses), elles étendent un pied en forme de languette et commencent à sécréter des filaments de byssus pour s'y arrimer. En l'absence de substrat adéquat, elles se détachent et retournent dans la colonne d'eau pour une période pouvant atteindre plusieurs semaines, jusqu'à ce qu'elles trouvent un substrat qui leur convient. Les jeunes de moins de 2 mm quittent à nouveau le fond en sécrétant de longs filaments de byssus sur lesquels le courant agit pour les disperser sur le fond. À ce stade, les larves se fixent souvent sur d'autres moules et s'agglomèrent en bancs (ou gisements) caractéristiques. Les mytiliculteurs obtiennent leur stock d'ensemencement en prélevant dans ces gisements naturels de jeunes moules nouvellement fixées.

Croissance

La plus grande poussée de croissance a lieu au printemps, ce qui correspond à la production biologique locale. La coquille et les tissus non reproducteurs grossissent selon des scénarios différents, qui fluctuent considérablement dans le second cas en raison du cycle de reproduction. La croissance printanière est surtout attribuable au développement des gonades, qui entraîne une hausse du poids des tissus au printemps et au début de l'été, et une baisse au moment de la ponte. En général, le poids des tissus décline en hiver, la moule puisant dans ses réserves d'énergie pour hiverner. Le cycle saisonnier modifie également la composition biochimique de la moule, dont la concentration lipidique (qui reflète le contenu des gonades) culmine généralement avant la ponte. La coquille poursuit sa croissance durant l'année, mais à un rythme qui varie selon les saisons en fonction des besoins en énergie des divers tissus. On peut employer comme indice de condition (facteur fréquemment utilisé pour décrire le degré de développement des tissus chez la moule et faire des comparaisons entre divers milieux) le rapport entre le poids des tissus et diverses mesures de la coquille (volume, poids, mensurations linéaires), qui renseigne souvent sur le cycle saisonnier de croissance (Freeman 1974).

ALIMENTATION

M. edulis est un suspensivore dont les branchies lui servent à la fois à capter les matières organiques présentes dans l'eau et à prélever l'oxygène. Telles des passoires, les branchies concentrent des particules d'une taille et d'une valeur alimentaire déterminées; elles n'ont toutefois pas d'action filtrante au sens classique du terme, et le fonctionnement exact du mécanisme en jeu est discuté (p. ex. Ward et coll. 1993). Les branchies sont bordées de cils qui, en créant un courant dans la cavité du manteau, siphonnent par une ouverture inhalante l'eau de l'extérieur, laquelle passe sur et dans les branchies et ressort par une ouverture exhalante entre les membranes (manteau) qui tapissent la coquille. Les ouvertures inhalantes et exhalantes sont bien visibles chez une moule qui s'alimente activement. Une moule peut siphonner un volume d'eau

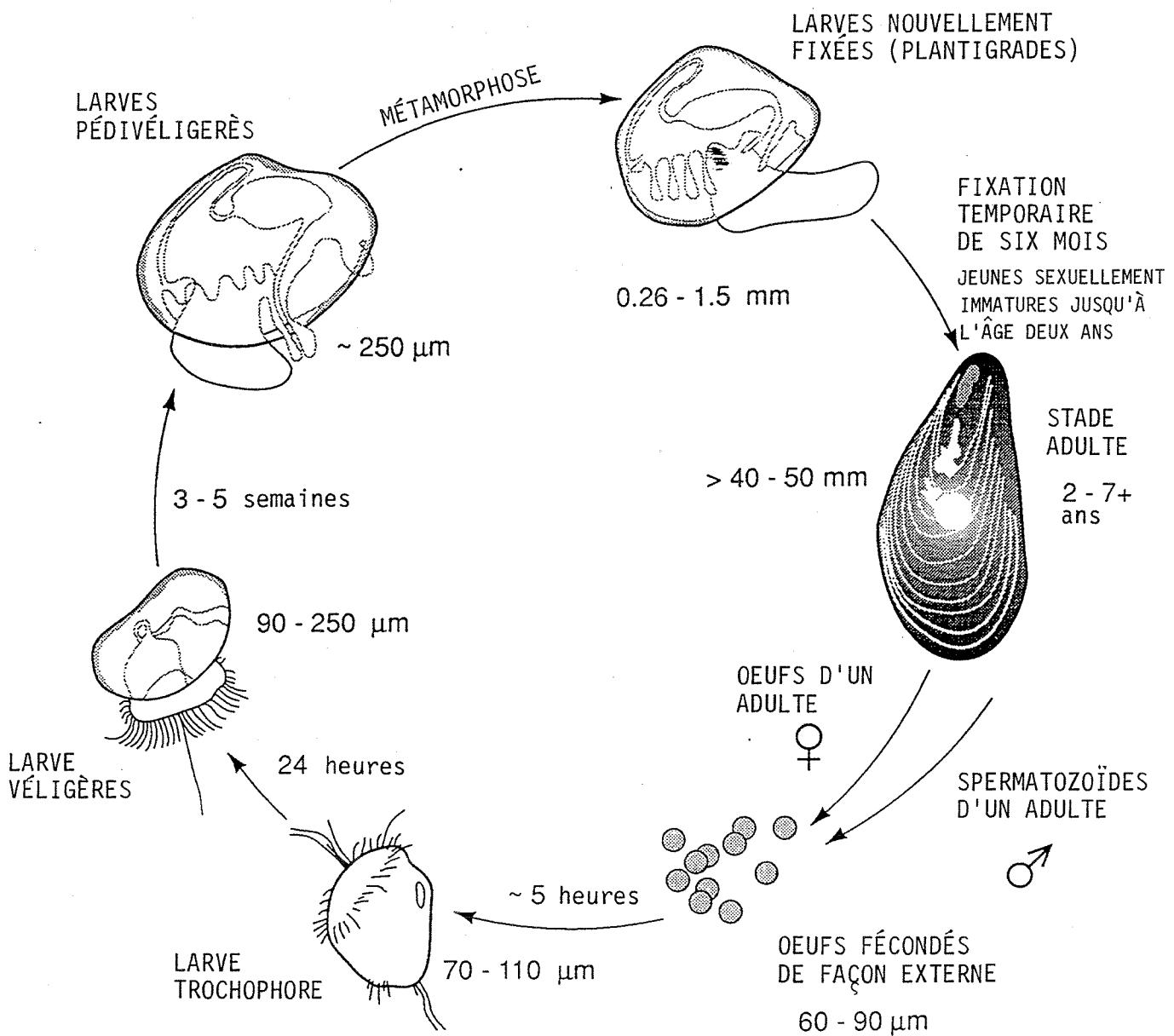


Figure 1. Cycle vital généralisé de la moule bleue, *Mytilus edulis*, dans l'est du Canada.

considérable, soit jusqu'à quatre litres à l'heure pour un individu de 50 à 60 mm (Scarratt 1993). Les particules (algues, détritus, matière organique) captées à la surface des branchies sont recouvertes de mucus, et transportées par les cils jusqu'à des stries qui canalisent des filaments de mucus contenant les particules jusqu'à l'extrémité de la branchie, où est située la bouche. Près de la bouche, des languettes de tissus (palpes labiaux) rejettent diverses quantités de l'amalgame mucus-particules pour réguler la quantité et la composition physique de la nourriture pénétrant dans la bouche. Ces rejets, ainsi que diverses particules qui échappent à la capture sur la branchie ou qui sont autrement renvoyées, sont expulsés comme "pseudofèces" avec l'eau exhalée. *M. edulis* peut, à l'intérieur de certaines limites, modifier la vitesse de siphonnage pour obtenir la quantité de nourriture dont elle a besoin. Dans les zones à forte charge inorganique en suspension, l'espèce peut compenser la faible valeur alimentaire des particules en suspension en accélérant le rythme de siphonnage et en modifiant son taux d'absorption intestinale.

COMPOSITION PAR TAILLES ET PAR ÂGES

Des moules de 10 cm ou plus ont été observées en zone infratidale, mais la taille de l'espèce varie généralement entre celle d'un ongle et 6 ou 7 cm. À Terre-Neuve, une taille maximum de 8 à 9 cm est typique. Normalement, les moules s'agglomèrent en agrégats denses (gisements ou moulières). Dans certaines zones, on peut donc trouver de nombreux individus de même grosseur, d'où une distribution unimodale par tailles, mais la répartition peut aussi être bimodale. Dans un secteur donné, la taille et l'âge dépendent de nombreux facteurs: développement antérieur de l'organisme, prédation, couvert, etc.

MYTILUS TROSSULUS

On a confirmé en 1984 la présence de cette espèce dans l'est du Canada, où l'on a depuis constaté qu'elle était largement répandue et qu'elle constituait une part importante des populations dans ce secteur jusque-là considéré comme peuplé exclusivement de *M. edulis*. Les jeunes moules de cette espèce ressemblent à *M. edulis*. On peut les distinguer au moyen de tests biochimiques qui comparent des combinaisons caractéristiques d'enzymes; au stade adulte, cette espèce semble un peu plus étroite, a un volume de chair inférieur et présente de légères différences dans la forme des impressions musculaires (Freeman et coll. 1992; Lobel et coll. 1990).

M. trossulus possède une coquille plus mince et doit être manipulée plus délicatement dans les opérations de transformation.

PARASITES ET MALADIES

Les populations de moules de l'est du Canada ne connaissent pas de problèmes graves de parasites ou de maladies. On signale, peu fréquemment, divers parasites ou

commensaux et une affection du sang (néoplasie haémale). Plusieurs espèces de ciliés vivent sur les branchies et dans le système digestif des moules de l'Est canadien, et l'on observe fréquemment des larves de vers plats dans les tissus des moules fixées au fond de l'eau. Plusieurs espèces du ver polychète *Polydora* — principalement *Polydora websteri* — et diverses éponges perforantes (*Cliona* spp.) peuvent creuser et pénétrer l'écailler de la moule, créant des bosses et des difformités à la surface interne. Les organismes fouisseurs qui pénètrent dans la moule peuvent boursoufler le revêtement interne de la coquille (McGladdery et coll. 1993). On a constaté que des infestations de *P. ciliata* pouvaient affecter les individus, mais avaient peu d'effet au niveau des populations (Ambariyanto et Seed 1991). On a imputé à certains ciliés des problèmes branchiaux associés à la pollution (Farley 1988).

MORTALITÉ MASSIVE ESTIVALE

La mortalité des moules de Nouvelle-Écosse, des îles de la Madeleine et de l'Île-du-Prince-Édouard s'accroît en été, et, parfois, de très fortes pertes, qu'on désigne par l'expression "mortalité massive estivale," se produisent (Myrand 1991). On a avancé diverses hypothèses, mais le phénomène semble constituer une réaction naturelle au stress environnemental, plus aigu en été (Mallet et coll. 1990). La résistance au stress comporte une importante composante génétique, et les stocks de moules présentent une vaste gamme d'aptitudes à cet égard, semble-t-il pour pouvoir s'adapter à de grandes fluctuations des conditions environnementales (Mallet et coll. 1990).

PRÉDATEURS

M. edulis est sujette à la prédation à tous les stades de sa vie. Les larves planctoniques sont exposées au zooplancton de plus grande taille, dont les méduses, ainsi qu'aux poissons planctivores larvaires ou adultes. Les moules adultes qui vivent sur le fond et dans certaines installations mytilicoles sont extrêmement prisées par les étoiles de mer, les buccins, les homards, les crabes et diverses espèces de poissons, dont la plie rouge et la tanche taugogue. La moule figure également au menu de vertébrés supérieurs comme l'Eider commun (*Somateria mollissima*), plusieurs espèces de goélands et d'autres espèces d'oiseaux marins, en plus des phoques. Dans l'est du Canada, on a observé que la sauvagine pouvait prélever une certaine quantité de moules dans les mytilicultures.

BESOINS ENVIRONNEMENTAUX

TEMPÉRATURE

La moule bleue, et plus particulièrement les populations exposées à marée basse, peut tolérer de grands écarts de température. Elle croît sans problème dans les conditions de température très diversifiées caractérisant son aire de répartition canadienne, depuis

l'est de l'Arctique jusqu'aux zones plus tempérées incluant typiquement le golfe du Saint-Laurent, l'Île-du-Prince-Édouard et les îles de la Madeleine. Le long de la côte est des États-Unis, l'amplitude de température peut varier de 0° à 25°C, et à Terre-Neuve, de -1,5° à 23°C. Dans un froid extrême, la moule peut s'isoler de l'eau de mer en fermant sa coquille pour de longues périodes, durant lesquelles elle survit en utilisant des fonctions métaboliques qui ne consomment pas d'oxygène et en accroissant la concentration de sel dans sa coquille pour mieux tolérer le gel (Anuaas et coll. 1988).

La moule bleue peut maintenir les taux d'activité de ses fonctions physiologiques de façon relativement indépendante de la température dans la mesure où celle-ci se maintient entre 5° et 20°C (Widdows 1978b, de Bayne et coll. 1985). Même à des températures aussi basses que -1° à 4,8°C (Loo 1992), elle peut ingérer le seston sans problème et absorber de la nourriture.

Le température maximale que peut tolérer la moule bleue est d'environ 25°C, ce qui correspond à la température moyenne de l'eau en été dans l'extrême méridionale de son aire de répartition en Amérique du Nord, soit 26,7°C (Wells et Gray 1960). Un léger dépassement des températures maximales qu'elle peut normalement tolérer peut causer un stress et engendrer des déséquilibres qui affectent la dynamique des populations. L'exposition à des températures élevées réduit brusquement la formation des filaments de byssus (Young 1985). C'est pourquoi on recourt à des traitements à l'eau chaude pour combattre le bio-encrassement causé par les moules.

La température peut également modifier les taux d'activité de certains processus physiologiques tels que l'élimination des métaux contenus dans les tissus (Dahlgaard 1986). Des températures de 8° à 10°C supérieures aux températures hivernales activent l'élimination de l'argent et du zinc.

SALINITÉ

M. edulis tolère des salinités très variées, depuis 5 ppt jusqu'aux 35 ppt de l'eau de mer pleinement concentrée, mais, en cas d'exposition prolongée, le seuil minimum est d'environ 15 ppt. Normalement, elle peut s'acclimater (s'adapter physiologiquement à des conditions extrêmes si la salinité change graduellement) à une certaine fourchette de salinité. Une chute de salinité se produit fréquemment dans les estuaires et les embouchures, ainsi que dans les zones dont la couverture de glace peut fondre. Normalement, les larves sont plus sensibles que les adultes à la désalinisation; l'exposition des adultes à une fluctuation rapide de la salinité peut ralentir leur croissance.

OXYGÈNE DISSOUS

La concentration d'oxygène dissous ne cause habituellement pas de problème pour *M. edulis*, qui vit normalement dans des eaux peu profondes bien oxygénées. Dans certains cas (lagunes, eaux saumâtres confinées, marais salés, etc.) et dans les lieux gravement pollués, comme à proximité d'exutoires d'égout ou d'un émissaire d'usine de traitement du poisson, on peut observer une baisse de la teneur en oxygène dissous, ou même des conditions d'anoxie (Harding 1992). *M. edulis* peut s'adapter ou s'acclimater à des concentrations d'oxygène aussi faibles que 50% de la valeur de saturation. À des concentrations inférieures, la moule ne peut croître et finit par mourir. L'espèce peut subir de courtes expositions à des conditions d'anoxie en fermant sa coquille et en recourant à des fonctions métaboliques ne requérant pas d'oxygène. À la mi-été, des conditions d'anoxie quand le temps est chaud ($> 25^{\circ}\text{C}$) et calme peuvent s'avérer dévastatrices pour les populations cultivées ou sauvages. Les moules exposées à de fortes teneurs en cuivre peuvent moins bien tolérer de longues périodes d'exposition à l'air (Weber et coll. 1992).

PROFONDEUR

On observe les plus fortes densités de moules là où le naissain se fixe, habituellement à des profondeurs de 2 à 3 m, mais, après la fixation initiale, elles peuvent se déplacer en détachant et en rattachant les filaments du byssus ou d'ancrage. Elles peuvent se fixer et s'établir à des profondeurs considérables s'il y a un substrat ferme et une nourriture suffisante. Normalement, toutefois, les larves se fixent près de la surface sur des substrats exposés, un littoral rocheux, des cordes ou d'autres structures solides et submergées.

PARTICULES EN SUSPENSION

Les matières particulaires en suspension peuvent être de nature inorganique (limon, sable, etc.) ou organique (phytoplancton vivant et débris particulaires en décomposition d'organismes végétaux et animaux). Les moules se nourrissent de matière organique particulière en digérant les composantes végétales et les bactéries des matériaux détritiques. Généralement, une faible fraction de matière organique assimilable par la moule est contenue dans le matériau détritique des graminées marines et de marais salé qu'on trouve souvent dans les estuaires et les plans d'eau presque assimilables à des marais salés (comme la baie de Fundy). Les eaux de l'Est canadien présentent des densités de matière particulaire en suspension normalement diversifiées, depuis les fortes concentrations caractérisant l'intérieur de la baie de Fundy jusqu'aux faibles niveaux qui se maintiennent toute l'année dans les eaux de Terre-Neuve, attribuables à l'absence de sources de matières fines en suspension (Thompson 1984). Dans les eaux littorales peu profondes, les orages peuvent causer une remise en suspension des sédiments du fond et porter les concentrations de matière particulaire en suspension à un niveau d'au moins un ordre de grandeur supérieur aux valeurs normales. Une forte

concentration de particules inorganiques constitue un facteur de stress pour la moule bleue, qui doit alors filtrer un grand volume d'eau pour extraire suffisamment de nourriture, mais en concentrations naturelles ces particules en suspension semblent nécessaires et peuvent même être préférables pour la croissance à une diète purement algale (Kiorboe et coll. 1981). *M. edulis* réagit aux concentrations excessives (pouvant résulter d'une remise en suspension par un orage) en fermant complètement sa coquille pendant de courtes périodes ou, selon la concentration, en intensifiant le taux de filtration et en faisant un choix entre les particules organiques et inorganiques.

SUBSTRAT

Les jeunes moules peuvent s'amarrer à divers substrats, dont les végétaux et d'autres matières fermes. Les adultes présentent habituellement un support dur (roches résistantes, piliers, débris de bois, déchets, autres moules, coques de bateau, bouées, etc.). Les estrans vaseux abritent occasionnellement des bancs de moules dont l'origine est probablement due à la fixation, sur un substrat dur de l'estran, de quelques moules sur lesquelles d'autres individus sont venus s'établir (Myrand et Richard 1987; Scarratt 1993; Svane et Ompi 1993).

COURANTS

Le mouvement de l'eau joue un rôle important en assurant un apport suffisant de nourriture pour les organismes suspensivores, dont on observe une abondance maximale dans les rides de marée et dans les zones littorales rocheuses sujettes à une forte houle et à d'importants déplacements d'eau. La présence de fortes densités de moules peut modifier considérablement les concentrations de particules en suspension. Dans certains cas, on a observé que l'action des gisements de moules réduisait la quantité de matière en suspension dans l'eau et affectait les populations de moules en aval; de même, l'eau traversant une entreprise mytilicole peut subir une baisse marquée de sa teneur en matière particulaire (J. Grant, Université Dalhousie, comm. pers.). Des débits modérés peuvent toutefois causer une baisse du taux de filtration (Wildish et Miyares 1990). La force du courant influence également la sécrétion des filaments du byssus; l'effet est variable selon la taille de la moule (Lee et coll. 1990). De plus, on a constaté que l'agitation (p. ex. par le mouvement de l'eau) est le principal facteur environnemental accélérant la formation du byssus (Young 1985). La grande densité habituelle des bancs de moules bleues assure protection et résistance contre l'action des vagues et des courants.

GLACE DE MER

L'ensemble du littoral est du Canada est touché à un certain degré par le phénomène de rabotage glaciaire, qui cause chaque année la perte d'une partie de la population de moules. La glace peut provenir des floes (glaces flottantes) formés localement dans les

baies et les inlets, ou encore des packs dérivants qui se forment dans le golfe du Saint-Laurent et le long de la côte du Labrador. La zone côtière du golfe du Saint-Laurent est englacée jusqu'à quatre mois par année, et la région centrale de la côte du Labrador, jusqu'à sept mois (Owens 1977). La côte sud-ouest de la Nouvelle-Écosse est quasiment libre de glace, mais il arrive certaines années que l'on observe de la glace de mer même le long de la côte atlantique de cette province.

IMPORTANCE ÉCONOMIQUE ET UTILISATION DE LA RESSOURCE

En Amérique du Nord, les autochtones récoltaient les moules avant l'arrivée des premiers Européens. Aujourd'hui, il existe une récolte récréative ainsi qu'une récolte commerciale de populations naturelles et cultivées. Les populations de moules peuvent également avoir des effets négatifs, par exemple en encrassant les structures industrielles et côtières ou les coques des bateaux.

POPULATIONS NATURELLES

Dans la plupart des endroits, les gens récoltent les moules pour consommation personnelle lorsqu'il n'y a pas d'interdiction locale faisant suite à une contamination par les toxines ou les coliformes fécaux. Les moules sauvages contiennent généralement un peu de sable et doivent être nettoyées à l'eau claire. La menace d'intoxication paralysante par les mollusques (IPM) a entraîné l'interdiction permanente de la récolte des moules sauvages dans la plus grande partie de la baie de Fundy. Certains endroits de l'est du Canada abritent des concentrations commercialement exploitables de moules sauvages, mais l'activité commerciale est faible, contrairement à ce qu'on observe dans le nord-est des États-Unis, où l'on recourt au râtelage et au dragage (Scarratt 1993). Le dragage peut avoir des effets limités sur les autres espèces animales et végétales. En Europe, on a constaté que la pêche à la drague n'accroissait que brièvement les concentrations de particules en suspension et que les autres populations ne semblaient pas affectées (Rieman et Hoffman 1991).

AQUICULTURE

L'élevage de la moule (mytiliculture) se pratique en Amérique du Nord depuis une vingtaine d'années et constitue aujourd'hui une industrie en croissance dans l'est du Canada. L'Île-du-Prince-Édouard est le principal centre mytilicole (env. 80% de la production), ayant produit quelque 4 000 tonnes en 1993 comparativement à 400 tonnes en Nouvelle-Écosse, 200 tonnes au Québec, 150 tonnes à Terre-Neuve et 45 tonnes au Nouveau-Brunswick (Scarratt 1993).

Techniques

Au Canada, le développement de l'industrie mytilicole canadienne s'est accompagné d'une évolution des techniques d'élevage. Dans l'Est canadien, les premières tentatives consistaient à accrocher à des radeaux des cordes d'élevage sur lesquelles les moules étaient fixées, mais aujourd'hui, on emploie toujours de longues lignes de flotteurs d'où pendent de longs filets tubulaires ("boudins") à mailles de plastique (Fig. 2). En hiver, on peut submerger les lignes pour éviter la glace, et dans certains cas on peut récolter les moules au travers de la glace. L'englacement des eaux représente une contrainte déterminante dans le choix des techniques employées dans l'est du Canada.

Les mytiliculteurs commencent par recueillir le naissain récemment fixé pour ensuite élever les moules durant deux périodes de croissance au terme desquelles les moules ont une taille commercialisable. On récolte le naissain qui s'est fixé sur des cordes ou d'autres collecteurs suspendus qui ont été ancrés sur place ou dans les eaux adjacentes. Les moules atteignant une certaine taille (habituellement environ 20 mm de longueur de coquille) sont enlevées des collecteurs et placées dans des boudins à mailles de 2 m, à l'automne ou au printemps. On suspend ensuite les boudins à des ancrages habituellement formés de lignes et de flotteurs, en arrimant bien le tout au fond. Les moules doivent normalement engraisser durant une période de 1,5 à 2 ans avant d'atteindre une taille commercialisable (50 à 60 mm). La quantité de naissain captée peut varier considérablement selon l'année et l'endroit. On peut récolter les moules toute l'année, mais on évite généralement de le faire en été à cause de l'activité reproductrice et du volume de chair réduit. L'industrie a connu de nombreuses innovations techniques, notamment la mise au point de navires motorisés spécialement conçus pour relever les lignes ainsi que d'appareils permettant de détacher les moules et d'enlever les filaments du byssus.

Répartition

L'industrie mytilicole est surtout concentrée dans l'Île-du-Prince-Édouard, la Nouvelle-Écosse, Terre-Neuve et les îles de la Madeleine. À l'Île-du-Prince-Édouard, la moule est principalement cultivée dans les estuaires des littoraux nord et est, entre la baie Malpeque et la rivière Murray. En Nouvelle-Écosse, l'élevage est surtout effectué le long de la côte atlantique, depuis West Pubnico jusqu'à l'extrémité septentrionale de l'île du Cap-Breton. Les lagunes des îles de la Madeleine font aussi l'objet d'une importante activité mytilicole. À Terre-Neuve, l'activité est surtout confinée dans la baie Notre Dame, sur la côte nord, mais on la pratique également dans les baies Trinity, Bonavista et Placentia. Il existe également des centres expérimentaux et des entreprises commerciales sur la rive nord de la baie des Chaleurs, dans le nord-est du Nouveau-Brunswick et dans le golfe du Saint-Laurent. Il n'y a actuellement qu'une seule entreprise mytilicole dans la baie de Fundy (à St. Martins, au Nouveau-Brunswick).

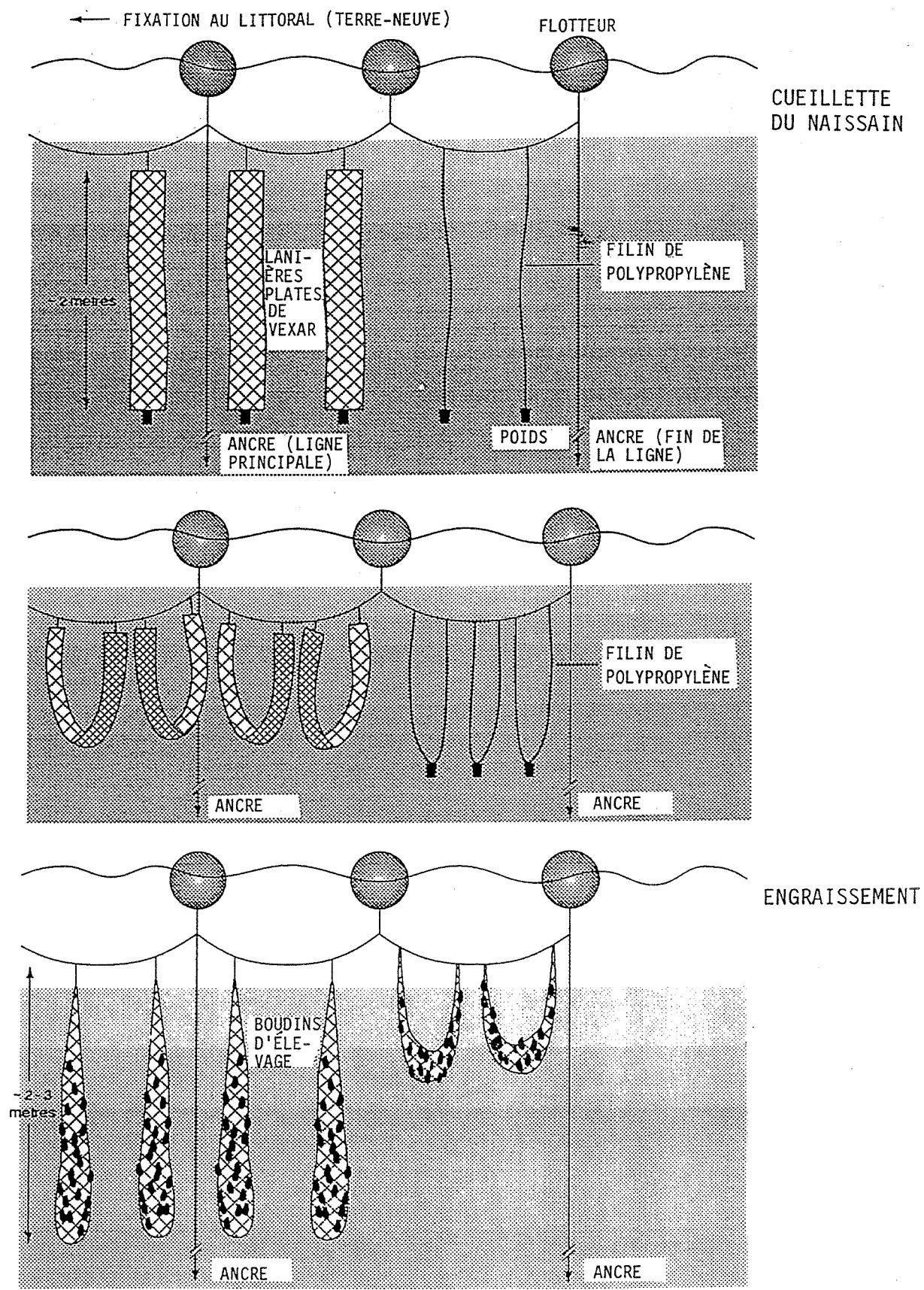


Figure 2. Tableau général des méthodes de mytiliculture employées dans l'est du Canada.

Sauf aux îles de la Madeleine, la pratique de la mytiliculture dans le golfe du Saint-Laurent est limitée par l'englacement des eaux, le manque d'anses adéquatement protégées et les infestations périodiques de phytoplancton toxique. Dans la baie des Chaleurs, plusieurs centres expérimentaux sont établis en eaux libres, ce qui nécessite un matériel plus onéreux et, par conséquent, réduit la compétitivité du produit par rapport aux moules d'élevage des autres régions de l'est du pays. Plusieurs inlets de la côte nord québécoise se prêtent à l'élevage et abritent des exploitations mytilicoles expérimentales, mais le manque de routes y constitue un désavantage concurrentiel.

Réglementation

Dans toutes les régions de l'est du Canada sauf l'Île-du-Prince-Édouard, l'élevage des moules est conjointement réglementé par le ministère des Pêches et des Océans (MPO), Environnement Canada et les autorités provinciales. Généralement, les provinces délivrent les permis, le MPO teste et contrôle les produits des concessions expérimentales, et Environnement Canada détermine les zones d'interdiction. Dans l'Île-du-Prince-Édouard toutefois, la délivrance des permis relève exclusivement du MPO.

Aucune concession mytilicole n'est accordée dans les régions faisant l'objet d'une interdiction de récolte (totale ou partielle) due à une contamination par les coliformes fécaux ou à la présence de toxines, quoiqu'on envisage actuellement la délivrance de permis dans les zones partiellement fermées. À l'avenir, il se peut que la réglementation autorise la cueillette du naissain dans les secteurs fermés.

Problèmes environnementaux

La mytiliculture (et l'aquiculture en général) se développe graduellement dans l'Est canadien, mais elle peut susciter l'opposition du public. Une exploitation mytilicole d'une certaine envergure peut causer une pollution visuelle des eaux littorales qui déplaira aux propriétaires fonciers et aux associations communautaires. La mytiliculture peut également nuire au trafic maritime local, au grand dam des pêcheurs et des autres exploitants de bateaux. Même si la mytiliculture intensifie la sédimentation de matières organiques et peut accroître le volume de nutriments libéré par les sédiments (Grant et coll., sous presse), les effets sur les écosystèmes semblent mineurs. On peut atténuer partiellement l'impact visuel en employant des bouées peu voyantes, ou en les submergeant.

Le naissain peut temporairement conserver dans son intestin des cellules de phytoplancton toxique, et la cueillette de naissain dans des secteurs abritant des espèces d'algues toxiques (voir plus loin la section "Bio-encrassement") peut mener à la contamination de zones "saines" (Scarratt 1993). Aucun incident du genre n'a toutefois été signalé.

BIO-ENCRASSEMENT

Les moules sont une des principales causes du problème de bio-enrassement dans les régions côtières. Même si leur effet est négligeable sur les ouvrages côtiers tels que les quais et les ponts, elles peuvent diminuer la flottabilité et accroître la résistance à la friction des navires, obstruer les prises d'eau des bateaux, des centrales thermiques et de diverses industries, et encrasser les bouées. La moule est une des sources d'enrassement les plus difficiles à combattre sous les latitudes tempérées.

L'application de chaleur et de chlore, notamment de chlore gazeux et d'hypochlorite de sodium, est un traitement courant. On utilise également des peintures anti-salissures, dont la composition comprend souvent des métaux lourds (p. ex. l'oxyde de tributylétain).

ACCUMULATION DE TOXINES

M. edulis compte parmi les espèces de mollusques économiquement importantes qui peuvent accumuler des toxines algales. On a recensé dans la région trois principaux types de toxines dont la présence dans les moules a déjà affecté la santé humaine (Tableau 1). La moule bleue s'y expose en filtrant le phytoplancton toxique de la colonne d'eau; dans le cas de l'intoxication paralysante par les mollusques (IPM), la moule accumule les toxines des dinoflagellés en diapause dans les sédiments, qui peuvent être remis en suspension tout au long de l'année (White 1982; Hawryluk et coll. 1992). *M. edulis* est relativement insensible à l'IPM (quoique de fortes concentrations puissent bloquer les impulsions nerveuses et inhiber la formation du byssus) ainsi qu'aux toxines responsable de l'intoxication amnésique par les mollusques (IAM) et de l'intoxication diarrhéique par les mollusques (IDM); elle peut toutefois accumuler les toxines de l'IPM et de l'IAM dans ses tissus, particulièrement dans la glande digestive (Prakash et coll. 1971; Haya et coll. 1989). La toxine de l'IPM inhibe la formation du byssus chez la moule bleue (Shumway et coll. 1987). La présence de toxines dans l'ensemble du corps de la moule rend problématique la consommation par l'homme, puisque les gens mangent habituellement la moule au complet. Dans un secteur donné, les moules deviennent généralement plus toxiques que les myes. Leur consommation est le second facteur en importance pour le nombre de cas d'IPM, et elles causent 30% des décès (Prakash et coll. 1971). La récolte des moules dans la baie de Fundy est interdite, en raison des cas d'intoxication qu'on y signale chaque année (Eddy 1992).

Après une exposition de quelques semaines au phytoplancton toxique (*Alexandrium* sp.), les concentrations de toxines causant l'IPM atteignent dans les moules un point de saturation, puis subissent subitement en un jour une chute initiale et partielle (correspondant à l'évacuation du contenu des intestins), après quoi une exposition de plusieurs semaines à des eaux non contaminées fait retomber les concentrations (Cembella et coll. 1991). L'acide domoïque (toxine responsable de l'IAM) est hautement hydrosoluble et les moules en éliminent la plus grande partie et retrouvent des concentrations acceptables peu après la conclusion de la prolifération de *Nitzschia*,

soit en aussi peu de temps que 48 h à des températures normales, et plus lentement en eaux froides (Outerbridge et coll. 1992). L'intoxication diarrhéique par les mollusques (IDM) est une affection relativement nouvelle dans l'est du Canada, mais on ne signale encore aucun décès.

Tableau 1. Principales intoxications d'origine phytoplanctonique dans les eaux de l'est du Canada.

		Espèce responsable			
Type d'intoxication	Produit chimique en cause	Baie de Fundy	Estuaire et golfe du St-Laurent	Littoral atlantique de la Nouvelle-Écosse	Terre-Neuve
Intoxication paralysante par les mollusques (IPM)	Saxitoxine (STX)	<i>Alexandrium fundyense</i> (dinoflagellé)	<i>Alexandrium excavatum</i> *	Aucun cas d'intoxication	<i>Alexandrium</i> spp.
Intoxication amnésique par les mollusques (IAM)	Acide domoïque	<i>Nitzschia pseudodelicatissima</i> (diatomée)	<i>Nitzschia pungens</i> f. <i>multiseries</i> (diatomée)	Aucun cas d'intoxication**	Aucun cas d'intoxication
Intoxication diarrhéique par les mollusques (IDM)	Toxine-1 du dinophysis	<i>Dinophysis</i> spp.	<i>Dinophysis</i> spp.	<i>Dinophysis</i> spp.	<i>Dinophysis</i> spp.

*On estime qu'il n'y a pas d'IPM aux îles de la Madeleine, bien qu'*Alexandrium* y soit observé.

**Les espèces responsables de l'IAM sont présentes le long de la côte atlantique de la Nouvelle-Écosse, mais n'ont pas causé d'infestations.

On croit généralement que les cas d'IPM et d'autres intoxications imputables aux toxines algales augmentent en durée et en fréquence. Les risques posés à la santé publique par la culture des moules dans un secteur où il y a eu des cas d'IPM exigent qu'on y intensifie la surveillance (Scarratt 1993), et qu'on y teste régulièrement les moules pour détecter l'éventuelle présence de toxines causant l'IPM ou l'IAM.

La plupart des organismes responsables de la toxicité algale sont présents dans l'ensemble de la région de l'Atlantique, mais généralement en concentrations trop faibles pour causer des infestations. La majorité des cas d'IPM surviennent à l'intérieur du golfe du Saint-Laurent et dans la baie de Fundy. Des cas isolés d>IDM et d'IPM ont été signalés à Terre-Neuve et en Nouvelle-Écosse.

Occasionnellement, le cilié *Mesodinium rubrum* se développe en concentrations suffisamment importantes sur la côte de la Nouvelle-Écosse pour donner une coloration rougeâtre aux moules ("moules rouges"). Les moules ayant ingéré ces organismes

prennent donc une couleur rougeâtre et, fréquemment, acquièrent un goût poivré, mais elles ne sont pas toxiques (Scarratt 1993).

RÉACTIONS AUX ACTIVITÉS HUMAINES

CONTAMINANTS DE L'ENVIRONNEMENT ET POLLUTION

Réactions aux contaminants

Les moules sont couramment employées dans des études sur la contamination de l'environnement, et ce pour diverses raisons, dont leur grande abondance et leur vaste répartition, leur tolérance à de grands écarts de salinité et de température, leur sédentarité, leur résistance aux polluants et leur capacité de les concentrer. Organisme suspensivore qui filtre de forts volumes d'eau, *M. edulis* entre donc en contact avec des contaminants sous forme dissoute, en suspension ou remis en suspension. Soulignons toutefois que la contamination imputable à l'activité humaine a rarement des effets négatifs sur les moules, sauf dans des cas extrêmes (p. ex. eaux exposées à des sources ponctuelles de pollution, lieux gravement contaminés, eaux anoxiques). Les moules sont employées dans des programmes internationaux (*Mussel Watch*) de surveillance de la contamination des eaux côtières, où l'on mesure les concentrations de contaminants chimiques dans les tissus des moules (voir ci-dessous la section *Mussel Watch*), et servent à diverses activités thématiques de recherche et de surveillance. Plusieurs contaminants importants ont ainsi été étudiés, dont les hydrocarbures chlorés (p. ex. Risebrough et coll. 1976), les aromatiques (p. ex. Fossato et Canzonier 1976) et les métaux (p. ex. Lowe et Moore 1979). En outre, dans le cadre d'une étude sur l'emploi des antibiotiques dans une salmoniculture en enclos de filet (Tibbs et coll. 1989), on n'a constaté, après avoir ajouté durant dix jours de l'oxytétracycline à la nourriture de saumons coho, aucune accumulation chez les moules.

L'exposition à des contaminants peut avoir des effets physiologiques, tissulaires et cellulaires, miner la résistance aux maladies et modifier les paramètres d'engraissement, de reproduction et de population. Ainsi, la pollution est mise en cause (Farley 1988) dans des cas d'inflammation, d'anormalité des cellules muqueuses et d'infestation de ciliés sur les branchies de la moule. Il existe une corrélation entre l'incidence des tumeurs chez les moules des sites américains du programme *Mussel Watch* et l'incidence de divers contaminants organiques et inorganiques (Hillman et coll. 1992), mais l'incidence globale est faible. Le zinc cause une inflammation aiguë des branchies des moules, en plus d'autres affections (Hietanen et coll. 1988).

De nombreux facteurs déterminent le degré d'exposition aux contaminants et la gravité de ses effets tissulaires chez *M. edulis*, dont:

- l'éloignement des sources ponctuelles;
- la distribution verticale sur le littoral ou dans la colonne d'eau;
- le degré d'exposition tidale;

- la combinaison de contaminants;
- les caractéristiques de l'eau, dont la température et la salinité;
- le cycle saisonnier de croissance, de reproduction et de développement;
- le type de tissus.

Les contaminants et les autres facteurs de stress environnemental exercent des effets dont la gravité peut varier de niveaux sublétaux à une toxicité aiguë. Face aux contraintes environnementales, les moules peuvent mettre en œuvre plusieurs mécanismes d'adaptation. Les organismes marins - dont la moule bleue - produisent des métallothionéines (protéines à faible poids moléculaire) pour contrer l'accroissement des concentrations de métaux (Page et coll. 1984). Ces protéines lient les métaux, dont l'action néfaste sur les processus physiologiques se trouve alors diminuée.

On a également constaté qu'en présence de contaminants, *M. edulis* produit une catégorie de protéines normalement générées en réaction à un choc thermique (protéines de "choc thermique"), ce qui facilite la détection du stress causé à l'organisme par une teneur élevée en métaux (Sanders et coll. 1991).

À l'instar des vertébrés, les moules et les autres bivalves possèdent des systèmes enzymatiques leur permettant de détoxifier les produits chimiques organiques. Tous semblent disposer du système enzymatique d'oxydases à fonction mixte (OFM), qui a toutefois moins d'importance chez la moule comparativement aux vertébrés (Viarengo et Canesi 1991). Les systèmes OFM produisent souvent des intermédiaires pouvant s'avérer mutagènes, dont l'importance pour *M. edulis* est cependant considérée mineure.

Les réactions biochimiques des moules aux contaminants servent souvent à mesurer l'exposition à des contaminants et à évaluer des gradients de pollution. Ces réactions peuvent fournir des renseignements utiles même quand les effets au niveau de la population sont indétectables. Pour mesurer l'exposition de poissons et d'autres vertébrés aux hydrocarbures, aux HAP, à des matières organiques et à des pesticides, on s'est souvent basé sur la présence de système d'oxydases à fonction mixte, servant à détoxifier ces produits. Diverses enzymes de ce système peuvent jouer le rôle de marqueur ou d'indicateur d'une activité OFM.

Les indicateurs de stress biochimiques permettent également de détecter les effets des contaminants sur les moules. Voici quelques-uns des plus communs: la charge énergétique indiquée par l'adénylate, qui donne une mesure des substances chimiques métabolisables riches en énergie (Zaroogian et Johnson 1989); des tests de "stabilité lysosomale" sur les modifications enzymatiques des lysosomes (cellules sécrétant des enzymes digestives dans la glande digestive); le rapport entre les teneurs de deux acides aminés (taurine et glycine, ratio T/G [Bayne et coll. 1985]). Plusieurs indicateurs génétiques, dont "les aberrations chromosomiques," l'échange de chromatides soeurs et l'endommagement de l'ADN, servent également à détecter les effets des contaminants (Viarengo et Canesi 1991).

On peut également mesurer le stress en étudiant des paramètres du bilan métabolique et énergétique des moules. La quantité d'énergie disponible pour la croissance et la reproduction chez la moule et d'autres invertébrés a souvent été employée comme indicateur de stress (Bayne et coll. 1985), en partie parce qu'elle représente une mesure intégrée des effets sur l'organisme. Ainsi, Widdows et coll. (1981) ont constaté, chez des moules transplantées dans un gradient de pollution, que le potentiel de croissance diminuait avec l'augmentation des concentrations d'hydrocarbures et d'un métal. Le "ratio oxygène/azote" (O/N, rapport entre la consommation d'oxygène et l'excrétion d'azote) donne une mesure des types de composés employés par l'organisme comme sources d'énergie. En situation de stress, il y a hausse de la quantité de protéines employées dans le métabolisme, ce qui accroît la quantité d'azote excrétée et abaisse le ratio.

En général, dans l'est du Canada, on a peu recouru aux tests cytochimiques (chimie cellulaire) pour mesurer la pollution, mais leur application s'est révélée prometteuse dans plusieurs études. Pelletier et coll. (1991) ont employé divers indicateurs biochimiques pour évaluer la répartition des hydrocarbures de pétrole dans les sédiments, tandis que Ward (1990) a constaté une corrélation entre la stabilité lysosomale et les concentrations de zinc dans le port d'Halifax.

Selon Harding (1992), la mesure des métallothionéines et l'évaluation du potentiel de croissance chez les moules représentent les méthodes les plus appropriées pour le programme de surveillance environnementale appliquée par le Groupe mixte d'experts chargé d'étudier les aspects scientifiques de la pollution des mers.

Mussel Watch

Les moules sont utilisées dans des programmes de surveillance de la qualité de l'environnement marin aux échelles régionale et mondiale. L'idée du programme *Mussel Watch* a été avancée par Goldberg (1975), et concrétisée sous diverses formes. Les États-Unis se sont dotés, dans le cadre du programme National Status and Trends de la National Oceanic and Atmospheric Administration, d'un plan officiel de mesure d'une série de contaminants dans les eaux côtières. Le Groupe de travail canado-américain sur le golfe du Maine recourt actuellement aux moules comme indicateurs de qualité de l'environnement pour déterminer le degré de contamination du golfe. Malgré l'exactitude limitée des comparaisons faites dans le cadre de *Mussel Watch*, vu le grand nombre de sources de variation dans les concentrations des contaminants, les moules constituent habituellement de bons indicateurs de l'impact des principaux polluants. Par exemple, le programme *Mussel Watch* américain a révélé des baisses des concentrations de tributylétain dans les milieux côtiers à la suite de restrictions touchant l'usage de cette substance (O'Connor 1992).

Lobel et coll. (1990) ont souligné l'importance de bien établir le statut taxonomique de *M. edulis* dans les études de *Mussel Watch*. Il se peut qu'en milieu non pollué, *Mytilus trossulus* puisse mieux accumuler les métaux que *M. edulis*.

Métaux lourds

La pollution par les métaux suscite beaucoup d'inquiétude dans certains secteurs de l'est du Canada, quoique les effets soient confinés dans les zones urbaines, où sont émis des rejets d'égouts domestiques, et industrielles (mines, transport routier ou maritime, etc.). Les moules servent fréquemment d'indicateurs des concentrations de métaux en milieu marin, même si la présence de métaux n'affecte les populations de moules que dans les cas extrêmes. Pour mesurer la teneur en métaux des moules, on peut examiner des moules locales ou en transplanter pour des périodes variables à des sites d'étude où dans des gradients de pollution. Les particules ingérées représentent une importante source de contamination par les métaux chez la moule bleue.

La nocivité des métaux pour *M. edulis*, et pour les organismes marins en général, est d'abord attribuable à la perturbation de l'activité des enzymes et des processus de transfert ionique dont dépendent les processus physiologiques. Même en situation de pollution modérée, les concentrations environnementales ne sont généralement pas letales, mais des teneurs élevées peuvent être toxiques. Les moules peuvent accumuler des concentrations considérablement supérieures aux niveaux ambients, d'un facteur de 100 000 ou plus dans certains cas (Sturesson 1976; Phillips 1976). Un relevé mondial des concentrations de cadmium chez la moule bleue a indiqué une concentration de 10 000 à 20 000 fois supérieure au milieu ambiant (Cossa 1988).

Accumulation: L'étude des interactions entre les métaux et *M. edulis* a été centrée sur les métaux comme le zinc et le cuivre, qui exercent d'importantes fonctions biologiques, et sur le cadmium et le mercure, qui figurent parmi les contaminants marins les plus toxiques mais n'exercent aucune fonction biologique (Viarengo et coll. 1988). *M. edulis* peut accumuler les métaux dans ses tissus mous (où la plus grande partie est utilisée) et, à un moindre degré, dans sa coquille (Sturesson 1976; Bourgoин 1990). Le taux d'accumulation et la concentration finale dépendent du type de tissu; on a observé que les branchies et la glande digestive constituent les principales zones de concentration. Les métaux sont stockés sous différentes formes: en combinaison avec les protéines et les particules, dans le matériau de la coquille, comme précipités inorganiques, dans des compartiments cellulaires microscopiques (p. ex. les vésicules), à l'état dissous, ou encore liés aux protéines. Les métaux comme l'arsenic et le mercure peuvent être présents sous des formes organiques (p. ex. le mercure-méthyle), dont les propriétés diffèrent de celles des formes inorganiques; par ailleurs, l'arsenic est liposoluble. Davies et coll. (1979) ont constaté qu'en milieu non pollué, plus de la moitié du mercure chez *M. edulis* était sous forme méthylée, mais que cette proportion était moins élevée dans les eaux polluées.

L'accumulation chez *M. edulis* peut être influencée par la présence d'autres métaux (Elliott et coll. 1985; Popham et d'Auria 1982), la salinité, la température et la forme du métal (dissous ou particulaire). On croit que la présence d'engrais phosphatés dans les eaux du port de Belledune (Nouveau-Brunswick) y a freiné l'absorption de plomb par les moules bleues (Bourgoин et coll. 1989). Chez des moules exposées à des

concentrations de métaux fluctuantes, le taux d'accumulation est proportionnel à la durée d'exposition dans le cas de certains métaux (p. ex. le plomb et le cadmium [Elliott et coll. 1985]), mais pas pour d'autres (p. ex. le cuivre et le zinc).

On peut facilement dépurer les moules de leurs métaux en les exposant à de l'eau propre. Les moules semblent récupérer plus rapidement (si l'exposition n'est pas trop grave) d'une contamination au métal (cuivre) que d'une contamination à certaines substances organiques (le phénanthrène, un HAP) (Moore et coll. 1984).

Les variations dans la concentration de métal observée chez la moule bleue peuvent résulter de facteurs intrinsèques comme la taille, le sexe, l'âge, l'état, le métabolisme, le taux de croissance de la population et la maturité (Roberts et coll. 1986). Les variations des concentrations observées au fil des saisons correspondent aux changements dans le poids corporel et les gonades. Les moules dont le poids de tissu corporel est élevé dans une saison donnée (selon les cycles de croissance et de reproduction) peuvent présenter durant cette saison de faibles teneurs en métaux, mais la corrélation n'est pas toujours manifeste. L'inanition peut influencer les concentrations de métaux chez la moule bleue, selon le type de métal (Uthe et Chou 1986).

Effets: Les métaux causent à la moule des dommages physiologiques qui engendrent des effets très diversifiés. Ils peuvent présenter une toxicité de niveau aigu ou subletal et, souvent, ils inhibent ou perturbent les fonctions physiologiques. À titre d'exemple, *M. edulis* est, à tous les stades de son cycle vital, fortement sensible au cuivre (une exposition continue à une concentration aussi minime que 20 µg/L peut causer une mortalité de 100% en un mois); les véligères (premiers stades planctoniques) tolèrent mieux le cuivre que les juvéniles ou les adultes (Beaumont et coll. 1987). Le cuivre et l'argent peuvent freiner la croissance (p. ex. Strömgren 1986; Calabrese et coll. 1984), tandis que le cuivre réduit le potentiel de croissance (énergie disponible pour la croissance) (Moore et coll. 1984). Divers métaux, particulièrement le mercure, le cuivre et l'argent, causent un développement anormal de la coquille chez les larves de *M. edulis* (Martin et coll. 1981). Les métaux peuvent inhiber la coordination de l'activité et le battement spontané des cils, et modifier l'activité des premiers stades larvaires. L'accroissement de la teneur en cuivre cause la fermeture de la moule et inhibe autrement la filtration et la clairance (Strömgren 1986; Moore et coll. 1984), en plus d'altérer les tissus gastro-intestinaux (Lowe et Clarke 1989). Le cuivre et le zinc inhibent la respiration des spermatozoïdes, affectent positivement ou négativement la respiration des œufs (Aberkali et coll. 1985) et peuvent inhiber la formation des embryons et retarder le développement des œufs (Maung-Myint et Tyler 1982).

D'autres métaux peuvent avoir des effets similaires à ceux du cuivre. Le cadmium inhibe la maturation des tissus reproducteurs mais augmente la fréquence de ponte (Kluytmans et coll. 1988). De fortes concentrations de nickel et de zinc peuvent inhiber la formation du byssus (Friedrich et Filice [1976] et Hietanen et coll. [1988], respectivement).

Les métaux peuvent également perturber les systèmes enzymatiques, par exemple en amenant le système d'oxydases à fonction mixte (normalement réservé à la détoxicification des produits organiques) à détoxifier d'autres produits chimiques (Moore et coll. 1984). On croit que cela expliquerait le phénomène synergique qui se produit quand les moules se trouvent simultanément exposées à des métaux et à des matières organiques: dans de telles conditions, l'impact des substances organiques se trouve amplifié par la présence de métal.

Les effets des métaux sont modérés par la capacité des organismes à produire des métallothionéines. D'autres enzymes comportant normalement des constituants métalliques (métalloenzymes) peuvent conférer un certain degré de protection, et l'exposition de *M. edulis* à des métaux-traces induit la production de protéines "de choc thermique" (qui assurent une résistance ou une tolérance générale au stress).

Contaminants organiques

Biphényles polychlorés (BPC): Les milieux côtiers, notamment les sédiments et les matières draguées qu'on y trouve, sont souvent contaminés par les biphényles polychlorés (BPC), substances liposolubles pouvant s'accumuler dans les moules. *M. edulis* a été un indicateur utile pour repérer les sources de pollution aux BPC dans la baie des Anglais, un secteur fortement contaminé près de Baie-Comeau (Québec), mais les concentrations observées chez la moule n'étaient pas nettement corrélées avec les concentrations locales de BPC dans les sédiments (Bertrand et coll. 1988). Les BPC sont liposolubles et ne se métabolisent que lentement, ce qui leur confère une tendance à la bioaccumulation.

Les concentrations de certains BPC dans les moules peuvent varier selon la saison (déclin en automne) et dépendent de la teneur des moules en lipides et du type de BPC. Les principaux facteurs entrant en jeu dans la répartition des BPC chez les moules semblent être les concentrations des divers contaminants dans le milieu aquatique ambiant ainsi que les différences dans leur partage entre les organismes et l'eau et la variabilité saisonnière de la teneur lipidique (Capuzzo et coll. 1989).

Les moules accumulent rapidement les HAP et les BPC des sédiments contaminés mis en suspension, et une concentration d'équilibre est atteinte en une vingtaine de jours (Pruell et coll. 1986). Les moules se déparent des BPC comparativement lentement (demi-vie de 16 à 46 jours selon le type de BPC).

Pesticides: Les moules accumulent rarement assez de pesticides pour en souffrir, mais elles servent fréquemment à détecter la présence de pesticides dans l'environnement (Phillips 1978; Zitko 1981). Le recours aux moules dans de telles études exige la prise en considération de la variabilité potentielle des mesures, puisque les teneurs sont influencées par des facteurs intrinsèques (âge, sexe, cycle saisonnier, contenu lipidique, etc.) et extrinsèques (salinité, température, interactions chimiques avant l'ingestion)

(Phillips 1978). Même vers la fin des années 1960, les concentrations de DDT chez les moules et divers poissons et invertébrés de la côte atlantique ne présentaient pas de danger pour la santé humaine (Sprague et Duffy 1971).

M. edulis semble avoir la capacité de détoxifier divers pesticides, y compris le paraquat et le diquat (Wenning et DiGiulio 1988), et les organophosphates (Noellgen 1990), et peut métaboliser l'hexachlorobenzène (un fongicide et un déchet industriel). *M. edulis* n'accumule pas de façon appréciable l'aminocarbe (un insecticide forestier), dont on n'a détecté aucune concentration chez des moules prélevées dans des estuaires du Nouveau-Brunswick jusqu'à deux semaines après la pulvérisation du produit. Un autre insecticide forestier (le fénitrothion) a toutefois été détecté chez divers mollusques et crustacés (y compris *M. Edulis*) du havre et de la baie de Buctouche (Nouveau-Brunswick) (Lord et coll. 1978). Enfin, *M. edulis* est relativement insensible au dichlorvos, un agent d'épouillage du poisson (Cusack et Johnson 1989; McHenery et coll. 1991).

Hydrocarbures pétroliers: En général, le pétrole n'est pas très toxique pour les moules. Une exposition prolongée au pétrole et à ses composants - ensemble ou séparément - peut entraîner divers effets, de niveau aigu à sublétal, notamment sur le bilan énergétique et les processus cellulaires et subcellulaires. Selon Stickle et coll. 1985, les stades juvéniles semblent davantage sensibles à l'exposition au pétrole; les hydrocarbures aromatiques peuvent être plus toxiques que les hydrocarbures aliphatiques; et le potentiel de croissance, dans certaines situations d'exposition à long terme, est corrélé négativement avec la concentration d'hydrocarbures aromatiques totaux mais non avec la concentration d'hydrocarbures aliphatiques totaux. Les hydrocarbures pétroliers activent les OFM chez divers organismes, probablement chez *Mytilus* aussi.

Les branchies captent rapidement les hydrocarbures et de fortes concentrations peuvent s'accumuler dans le système digestif, particulièrement dans la glande digestive (Roberts 1976). Les moules bleues exposées à des concentrations sublétales d'hydrocarbures les concentrent dans les lipides et accumulent de plus grandes quantités d'hydrocarbures paraffiniques (huile minérale et heptadécane) que d'hydrocarbures aromatiques.

Les populations de moules survivent généralement au mazoutage, comme on a pu l'observer à l'occasion de certains déversements importants d'hydrocarbures. Le déversement de West Falmouth sur la côte est américaine a stérilisé les populations de moules pour au moins un an (Blumer et coll. 1970).

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP): Les HAP sont une catégorie de produits chimiques organiques que l'on trouve dans les dérivés des hydrocarbures, notamment du pétrole, et, à l'état naturel dans la nature, comme sous-produit de la combustion, ainsi que dans le créosote, un préservatif du bois. Les HAP à faible poids

moléculaire (p. ex. le naphtalène) sont généralement hydrosolubles et d'une toxicité aiguë pour divers organismes, tandis que ceux à poids moléculaire élevé sont plutôt liposolubles et en général carcinogènes (p. ex. le benzo[*a*]pyrène). En concentrations normales, ils sont peu toxiques pour la moule bleue (les concentrations de HAP totaux sont généralement inférieures à 0.01 $\mu\text{g}/\text{L}$ dans les eaux portuaires du Canada atlantique, et inférieures à 0.1 $\mu\text{g}/\text{L}$ dans les ports pollués [O'Neill et Kieley 1992]). Les HAP peuvent toutefois causer des réactions biochimiques, telle l'induction du système OFM, phénomène qui peut être utilisé pour la détection de ces composés. En concentrations élevées (10 à 100 $\mu\text{g}/\text{L}$), ils peuvent affecter la stabilité lysosomale des moules (un signe de stress [Moore et coll. 1978]), mais ils ne modifient pas nécessairement le potentiel de croissance (phénanthrène [Moore et coll. 1984]). Le benzo(*a*)pyrène peut causer l'apparition de désordres semblables à des tumeurs (Wong et coll. 1984).

Les moules ont une capacité limitée de détoxifier les HAP par leurs systèmes OFM, même si le niveau d'activité de leurs OFM est faible par rapport à celui des vertébrés (Viarengo et Canesi 1991). Jusqu'à récemment, on jugeait *M. edulis* incapable de détoxifier les HAP (Eaton et coll. 1986), et l'on expliquait ainsi la bioconcentration. On a toutefois observé que les moules pouvaient se dépurer assez facilement des HAP (p. ex. Pruell et coll. 1986).

Dans l'est du Canada, les concentrations de HAP dans les moules ont été utilisées dans de nombreux travaux de surveillance des concentrations de HAP dans l'environnement. Sirota et coll. (1984) et Matheson et coll. (1983) ont examiné les gradients de pollution dans le voisinage des étangs bitumineux de Sydney, alors que Cossa et coll. (1983) ont utilisé les moules à titre d'indicateur des concentrations de HAP dans le cadre d'un vaste relevé effectué dans l'estuaire du Saint-Laurent et le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent. Eaton et Zitko (1978) ont détecté des gradients de HAP en analysant les tissus de moules réparties dans le voisinage de quais de bois créosoté. Le 3,4-benzopyrène (un HAP) n'est pas détectable dans les moules de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, sauf à l'embouchure du Saguenay, alors que des transplantations de moules ont révélé qu'à une époque tout le fjord du Saguenay était contaminé par cet HAP (Picard-Bérubé et coll. 1983). Dans une étude sur la contamination des eaux de Terre-Neuve, Hellou et coll. (1993) n'ont constaté que de faibles concentrations de HAP dans les tissus des moules. On croit que les concentrations de HAP détectées dans les moules fluctuent de façon saisonnière, selon la teneur des moules en lipides (les HAP sont liposolubles) et le poids de leurs tissus, qui varie avec le développement des gonades. Les concentrations de HAP (phénanthrène) sont généralement supérieures dans la glande digestive et le manteau (Moore et coll. 1984), où les lipides sont habituellement plus concentrés. En raison de leur association avec les lipides présents dans les oeufs et le sperme, une grande partie des HAP peut être évacuée durant la ponte (Hummel et coll. 1989).

Autres composés organiques: Plusieurs autres composés organiques peuvent être présents dans l'environnement marin de l'est du Canada et affecter les moules. Le

pentachlorophénol (autrefois utilisé comme préservatif du bois) influe certains systèmes métaboliques de *M. edulis*, dont il modifie la consommation d'oxygène quand la concentration ambiante d'oxygène est élevée ou faible (Wang et Widdows 1993). Les moules peuvent détoxifier les amines aromatiques (une catégorie de composés employés dans les hydrocarbures de combustion et les teintures synthétiques) et s'en dépurier par les voies biochimiques normales, généralement sans produire d'intermédiaires susceptibles de causer des anomalies génétiques (Knezovich et coll. 1988). Diverses N-nitrosoamines peuvent endommager les tissus si elles sont injectées dans *M. edulis* (Rasmussen 1982). La moule bleue a peut-être la capacité de détoxifier certaines substances comme les composés phénoliques, les quinones, les nitroaromatiques, les colorants azoïques et des composés tels que les pesticides paraquat et diquat (Wenning et DiGiulio 1988).

Tributylétain: L'oxyde de tributylétain était largement employé dans les peintures anti-salissures et pour le traitement des filets et des casiers à homards, jusqu'à ce qu'on en détecte des concentrations dans l'environnement marin. On en a mesuré de fortes concentrations dans les ports de l'Est canadien (Maguire et coll. 1986) et à bien des endroits dans les régions côtières des États-Unis. Ce produit se décompose en dérivés moins toxiques (dibutyl- et monobutylétain) et, par suite de restrictions touchant son usage, on semble assister actuellement à une baisse ou à une stabilisation des concentrations présentes dans les organismes marins (Uhler et coll. 1993). Le tributylétain présente une toxicité aiguë pour les larves des bivalves (Beaumont et Budd 1984) et réduit le taux de croissance des juvéniles (Strömgren et Bongard 1987); chez la moule adulte, il accroît la consommation d'oxygène et freine la clairance, en plus d'inhiber gravement le grossissement (Widdows et Page 1993). La moule se dépure rapidement de l'étain organique et total.

PERTURBATIONS PHYSIQUES

Dragage

Le dragage a un effet minime, voire nul, sur les moules. Les opérations de dragage se déroulent surtout dans des secteurs où il y a un apport fluvial élevé et un fort transport côtier de sédiments, et elles sont étroitement réglementées par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. Dans un endroit dragué, la population de moules sauvages ne peut être affectée que par l'exposition à des concentrations élevées de particules en suspension et aux contaminants libérés par les sédiments, mais les effets au niveau de la populations sont négligeables.

Il est arrivé que des travaux de dragage aient été effectués dans des zones où l'on pratique la mytiliculture. Une lagune des îles de la Madeleine a récemment été draguée sans problème; on avait toutefois exiger que les travaux soient réalisés par mer calme. Le déversement de déblais de dragage à 2,5 km de l'entreprise mytilicole de la baie des Chaleurs n'a pas nui aux moules, selon des mesures du taux de filtration, de la

croissance et de la mortalité des moules transplantées qui y sont cultivées, mesures qui avaient été prises tout de suite après le déversement et longtemps après (Bergeron et coll. 1990). Les concentrations maximales des sédiments en suspension provenant de l'immersion de déchets en mer sont généralement inférieures et de plus courte durée que celles des sédiments de fond mis en suspension par les tempêtes (Bohlen et coll. 1979). Les moules peuvent toutefois accumuler les contaminants des matériaux de dragage en suspension (Pruell et coll. 1986), et l'éventuelle remise en suspension de matières contaminées après leur déversement en mer pourrait mener à une contamination.

Les grands travaux nécessitant des activités de dragage peuvent susciter l'opposition du public. Ainsi, un mytiliculteur de Neguac (Nouveau-Brunswick) a récemment eu gain de cause devant les tribunaux et obtenu une indemnisation pour les effets néfastes présumés d'un lieu d'immersion de déchets en mer, situé à plusieurs kilomètres de son entreprise.

Ouvrages côtiers et hauturiers

Les structures côtières créent un habitat propice pour la moule dans des endroits qui, souvent, ne lui conviendraient normalement pas. Les brise-lames, les jetées et les autres ouvrages côtiers faits de roche résistante sont un bon substrat pour la moule. Le bois créosoté des quais et des brise-lames a accru les concentrations de HAP chez les moules, ce qui, croit-on, augmenterait aussi les concentrations aux échelons supérieurs du réseau alimentaire.

CONTAMINATION INDUSTRIELLE

Pâtes et papiers

En général, les usines de pâtes et papiers réduisent la teneur en oxygène dissous des eaux adjacentes (en raison de la demande biologique en oxygène élevée de leurs effluents); les usines plus anciennes causent une contamination par les dioxines et les furanes (sous-produits du blanchiment au chlore). Les effluents des usines de pâtes forment un panache sombre de faible salinité, pouvant altérer la production primaire de la colonne d'eau. À Pictou en Nouvelle-Écosse, Scarratt (1969) a constaté l'absence quasi-complète de vie intertidale en bordure de l'exutoire du principal bassin de décantation (Boat Harbour) de l'usine de pâte kraft de la Scott Maritimes. Les moules peuvent coloniser les débris de bois des usines de pâte (p. ex. au port de Saint John [Wildish et Thomas 1985]).

Mines et fonderies

Les principaux problèmes causés à l'environnement marin par l'industrie minière sont les effluents des fonderies et les fuites des installations de chargement, ainsi que les contaminants issus des procédés de combustion. Voici quelques exemples: à Belledune (Nouveau-Brunswick), le traitement du zinc et du plomb par la Brunswick Mining and Smelting a contaminé les bancs de moules à proximité de l'exutoire (Ray et coll. 1980); les opérations de cokéfaction de la Sydney Steel Corporation, à son usine d'acier de Sydney (Nouvelle-Écosse), ont accru les concentrations de HAP dans le ruisseau Muggah qui jouxte l'usine, et les homards et les moules présentaient de fortes teneurs en HAP, qui diminuaient graduellement dans le gradient s'étendant depuis la tête du havre jusqu'à la mer libre; les alumineries bordant la rivière Saguenay ont donné lieu à une contamination par les HAP et à de fortes concentrations de ces substances dans les moules et autres organismes marins du fleuve Saint-Laurent.

Chloration

La chloration est un des principaux traitements employés pour lutter contre l'encrassement par les moules. Le chlore affaiblit l'attachement du byssus, surtout en réprimant l'activité du pied, mais aussi en perturbant le processus de tannage (Roberts 1976). On peut exposer les moules au chlore de façon continue ou intermittente pour lutter contre l'accumulation de larves et d'adultes et contrer le développement de viscosités d'origine algale et bactérienne.

L'encrassement par ces organismes perturbe le fonctionnement des dispositifs de refroidissement tels que les condensateurs en bloquant la circulation d'eau, en altérant les propriétés de transfert thermique et en accélérant la corrosion. Les traitements de chloration introduisent dans l'environnement surtout des oxydants que produit le chlore, mais aussi, en faibles concentrations, des contaminants organohalogénés (p. ex. le bromoforme). Appliqué sous forme gazeuse (ce qui produit des oxydants comme l'hypochlorite dans l'eau de mer) ou directement sous la forme d'une solution d'hypochlorite, le chlore cause une forte mortalité, réduit la fixation du naissain, détache le naissain fixé, exerce des effets pathologiques sur les tissus, réduit les taux de pompage et d'alimentation et freine la croissance (Khalanski et Bordet 1983).

L'hypochlorite a une très courte durée de vie dans l'eau de mer, principalement en raison d'interactions chimiques avec le brome et l'iode. Les concentrations déclinent avec la quantité de matières organiques oxydables. Un des principaux problèmes de la chloration réside dans le fait que la concentration du chlore dans l'eau de mer chute rapidement. Les traitements efficaces appliqués dans diverses conditions n'arrivent généralement pas à dépasser des concentrations finales d'environ 1 mg/L d'oxydant produit par le chlore. Dans la conception d'un processus de chloration pour combattre la formation des moules, les principaux critères à considérer sont les suivants:

- 1) caractéristiques biologiques de l'eau (p. ex. richesse phytoplanctonique) et apport de

particules organiques; 2) rythme de croissance des populations locales de moules; 3) caractéristiques chimiques de l'eau de mer.

Saumures

Les moules sont peu souvent exposées à des salinités anormalement élevées. Une telle exposition pourrait être causée par le rejet en mer des saumures résiduelles d'une mine de potasse. Dans une étude sur les effluents saumâtres d'une mine de potasse du Nouveau-Brunswick, *M. edulis* a toléré des salinités de 40 ppt et accumulé des métaux provenant des saumures résiduelles, mais les concentrations n'étaient pas supérieures à celles qu'on observe chez les moules des secteurs normalement industrialisés de l'Amérique du Nord. Une salinité de 55 ppt peut être toxique et freiner l'activité ciliaire branchiale de *M. edulis* (Hutcheson 1983).

Pollution thermique

L'eau de refroidissement des centrales thermiques et nucléaires a une température élevée qui peut réduire les populations locales de moules. Généralement, les exutoires sont conçus de façon qu'il y ait un brassage suffisant de l'eau, que les températures demeurent à un niveau acceptable pour les principales espèces vivant sur place et que les extrêmes de température soient réduits au minimum. Par conséquent, la température des eaux réceptrices aux exutoires des centrales thermiques du Canada atlantique ne dépasse généralement pas 14°C (Swiss 1984). La moule bleue ne peut croître de façon optimale à des températures dépassant 20°C, et elle est gravement menacée à plus de 25°C (Bayne et coll. 1985). En général, une telle fourchette de température n'existe qu'à proximité des exutoires, ce qui n'est pas susceptible de menacer les populations de moules sauvages. Des travaux de recherche ont montré qu'en hiver, près d'une centrale thermique, la température élevée de l'eau et le peu de nourriture dans le milieu avaient réduit le nombre d'oeufs et la fréquence de la ponte, par rapport à une population témoin située non loin (Bayne et Widdows 1978; Bayne et Worrall 1980). L'application à *M. edulis* d'un traitement thermique à 20° ou 30°C peut perturber la division cellulaire dans les oeufs et réduire le nombre et l'activité des larves (Beaumont et Kelly 1989). Les extrêmes de température causés par les centrales thermiques peuvent altérer physiquement les moules et entraîner directement une mortalité. À plus de 25°C, *M. edulis* cesse de s'alimenter et les branchies s'endommagent. Gonzalez et Yevich (1976) ont constaté la destruction d'un gisement complet de moules bleues dans le chenal de refroidissement d'une usine thermique dont l'eau avait atteint 27°C. Dans le Maine, près d'une centrale nucléaire, des températures supérieures à 20°C ont entraîné une mortalité élevée chez les moules d'une culture en suspension utilisant des radeaux, surtout après la période de ponte (Newell et Lutz 1991).

Industrie des hydrocarbures

Comme les moules ne s'établissent habituellement pas au large des côtes, seuls les déversements accidentels et les rejets industriels en secteur côtier peuvent constituer une menace. Diverses situations peuvent avoir des effets négatifs pour les moules: déversements accidentels de pétrole ou exposition à des rejets industriels d'hydrocarbures en phase dissoute ou solide; pompage de l'eau de cale des pétroliers océaniques; contamination par les hydrocarbures et les graisses entraînés par le ruissellement des eaux pluviales ou provenant des effluents d'industries comme les raffineries de pétrole. Le mazoutage peut avoir des effets toxiques, ou encore altérer le goût ou l'odeur des moules cultivées ou sauvages.

De par leur situation dans les zones intertidale et infralittorale supérieure, les organismes intertidaux comme *M. edulis* sont exposés, en cas de déversement, à de fortes concentrations d'hydrocarbures. Les hydrocarbures en particules fines (qui peuvent être ingérées par la moule) semblent (d'après la réduction du rythme de croissance) davantage toxiques que les fractions hydrosolubles. Ainsi, les dispersants peuvent accroître l'effet toxique d'un déversement en créant de fines particules pouvant être ingérées, mais dont la toxicité inhérente est plus faible. Malgré cela, il se peut que les moules des secteurs traités aux dispersants récupèrent plus rapidement que celles exposées à des émulsions naturelles de pétrole dans l'eau de mer (Strömgren 1987). À la suite d'un déversement d'hydrocarbures, le fait de nettoyer les zones intertidales avec de l'eau de mer chauffée entraîne une forte élévation des concentrations d'hydrocarbures dans les tissus des moules (Ganning et coll. 1983). Dans le cas de l'accident de l'*Exxon Valdez* dans le golfe du Prince-William, en Alaska, l'emploi de puissants jets d'eau chauffée a peut-être causé une plus forte mortalité intertidale que ne l'aurait fait l'absence d'intervention. L'exposition aux hydrocarbures, notamment aux boues de forage hydrocarburées, peut altérer le goût ou l'odeur des moules. Dans l'est du Canada, un déversement de pétrole à proximité d'entreprises mytilicoles pourrait avoir de graves conséquences.

Les grands déversements qui se sont produits dans les eaux de l'Est canadien (*Arrow*, 1970; *Kurdistan*, 1979) ont eu des effets à court terme, qui sont disparus après quelques années. La vaste répartition de *M. edulis* permet aux populations affectées par les hydrocarbures de se reconstituer à partir des moules des populations voisines.

IMPACTS DES PRATIQUES AGRICOLES ET FORESTIÈRES

Les activités agricoles et forestières introduisent dans les eaux côtières des sédiments en suspension pouvant contenir des pesticides et des coliformes fécaux. Dans bon nombre de régions, en période de fort ruissellement, les coliformes fécaux issus des exploitations d'élevage de bétail sont lessivés dans les eaux côtières et causent une interdiction temporaire de la récolte des mollusques. Il se peut que diverses conditions (p. ex. charges élevées de nutriments, modification du régime des eaux douces, accroissement des charges de sédiments) créées par l'activité agricole, forestière ou

autre contribuent à faire en sorte que la présence de toxines dans les mollusques soit plus répandue. On a détecté du fénitrothion (insecticide épandu en forêt) dans les mollusques du port et de l'estuaire de Buctouche, au Nouveau-Brunswick (Lord et coll. 1978).

DÉCHETS DOMESTIQUES

La majorité des régions de l'est du Canada sont aux prises avec un grave problème de contamination des eaux côtières par les coliformes fécaux, qui restreint la récolte des moules et des autres espèces de mollusques. Dans les provinces de l'Atlantique, environ la moitié des zones de récolte des mollusques sont fermées (Nouveau-Brunswick, 43%; Nouvelle-Écosse, 35%; Île-du-Prince-Édouard, 15%; Terre-Neuve, 51% [Menon 1988]). En plus de limiter la récolte commerciale et récréative, ces fermetures restreignent généralement la mytiliculture aux seules zones où la récolte est permise. Les zones de récolte peuvent faire l'objet d'une fermeture conditionnelle si les conditions le justifient, comme c'est fréquemment le cas en période de haute pluviosité lorsque les concentrations de coliformes fécaux sont susceptibles d'être élevées.

À Terre-Neuve, une grande partie des demandes de permis d'aquiculture (de mytiliculture dans la plupart des cas) ont été refusées en raison d'une contamination fécale (Harding 1992).

DÉBLAIS

La réglementation sur l'immersion de déchets en mer interdit généralement une telle pratique dans les endroits abritant d'importantes populations biologiques. Les roches, le remblai et les autres matières rejetées près des côtes peuvent servir de substrat pour la colonisation de populations de moules, ce qui compense partiellement la destruction ou l'enfouissement de gisements de moules que peut éventuellement causer ce genre de travaux.

AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES

Les dérivations faites pour la production d'hydro-électricité réduisent l'écoulement vers certaines zones côtières et peuvent éventuellement accroître l'écoulement vers d'autres zones côtières. En réduisant la salinité, l'écoulement accru que peut causer ces dérivations pourrait réduire les populations de moules situées dans le voisinage immédiat.

REMERCIEMENTS

Ce rapport technique a été préparé en vertu d'un contrat passé avec *Envirosphere Consultants Limited* par la Division de l'écologie des habitats, du ministère des Pêches et des Océans. L'auteur aimerait remercier MM. H. Brian Nicholls, Donald C. Gordon, Marcel Fréchette, Tom Sephton, Jerry Payne, Ken Freeman et Randy Penney, tous du MPO, ainsi que M. Bruno Myrand, du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Mille mercis également à M^{mes} Sarah Arnold et Patty Kendrick, qui ont contribué à la collecte et à la gestion des informations de base.

RÉFÉRENCES CHOISIES

Généralités et aquiculture:

Bayne, B.L. 1976. Marine mussels: Their ecology and physiology. IBP 10. Cambridge University Press, London. 506 p.

Myrand, B., and J. Richard. 1987. La moule bleue. Conseil des Productions Animales du Québec. AGDEX 485. 107 p.

Newell, R.I.E. 1989. Species profiles: Life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (North and Mid-Atlantic). Biol. Rep. 82 (11.102), TR EL-82-4. United States Army Corps of Engineers, Coastal Ecology Group, Waterways Experimental Station, and United States Department of the Interior, Fish and Wildlife Service.

Scarratt, D.J. 1993. A handbook of northern mussel culture. Island Press, Montague, P.E.I. 167 p.

Ecologie et physiologie:

Freeman, K.R. 1974. Growth, mortality and seasonal cycle of *Mytilus edulis* in two Nova Scotian embayments. Fish. Mar. Serv. Tech. Rep. 500.

Freeman, K.R., K.L. Perry, and T.G. Dibacco. 1992. Morphology, condition and reproduction of two co-occurring species of *Mytilus* at a Nova Scotia mussel farm. Bull. Aquacult. Assoc. Can. 92(3): 1-3.

McGladdery, S.E., R.E. Drinnan, and M.F. Stephenson. 1993. A manual of parasites, pests and diseases of Canadian Atlantic bivalves. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1931.

Myrand, B. [ed.]. 1991. Proceedings of a workshop on summer mortality of mussels on the Magdalen Islands (Atelier de travail sur la mortalité estivale des moules aux Iles-de-la-Madeleine). 23-25 Avril 1991. Conseil de l'Aquiculture et des Pêches du Québec. 196 p.

Thompson, R.J. 1984. The reproductive cycle and physiological ecology of the mussel *Mytilus edulis* in a subarctic, non-estuarine environment. Mar. Biol. 79: 277-288.

Ward, J.E., B.A. MacDonald, and R.J. Thompson. 1993. Mechanisms of suspension feeding in bivalves: Resolution of current controversies by means of endoscopy. Limnol. Oceanogr. 38: 265-272.

Toxines des mollusques:

Prakash, A., J.A. Medcof, and A.D. Tennant. 1971. Paralytic shellfish poisoning in eastern Canada. Bull. Fish. Res. Board Can. 177: 87 p.

Theriault, J.-C., and M. Levasseur [ed.]. 1992. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Maurice Lamontagne Institute, Mont-Joli, Québec, May 12-14, 1992. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.

Dragage:

Bergeron, P., M. Fréchette, L. Pagé, Y. Lavergne, and G. Walsh. 1990. Sedimentation et dispersion des déblais de dragage en mer et effets sur la moule bleue (*Mytilus edulis*) en élevage dans la Baie des Chaleurs. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1746.

Seakem Oceanography Limited. 1991. Assessment of the effects of suspended dredge material on aquaculture organisms. Ocean Dumping Rep. 8. Environment Canada, Atlantic Region.

Activités industrielles:

Khalanski, M., and F. Bordet. 1983. Effects of chlorination on marine mussels, p. 557-567. In R.L. Jolley, W.A. Brungs, J.A. Cotruvo, R.B. Cumming, J.S. Mattice, and V.A. Jacobs [ed.]. Water Chlorination. Environmental Impact and Health Effects 4, Chapt. 49. Proc. 4th Conference on Water Chlorination. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich. 1491 p.

Swiss, J. 1984. The effects of heated effluents on marine water quality in the Atlantic Region, p. 138-144. In R.C.H. Wilson and R.F. Addison [ed.]. Health of the Northwest Atlantic. Can. Dept. Environ., Dept. Fish. Oceans, Dept. Energy, Mines and Resources. 174 p.

Contaminants de l'environnement - généralités:

Bayne, B.L., D.A. Brown, K. Burns, D.R. Dixon, A. Ivanovici, D.R. Livingstone, D.M. Lowe, M.N. Moore, A.R.D. Stebbing, and J. Widdows. 1985. The effects of stress and pollution on marine animals. Praeger, New York. 384 p.

Roberts, D. 1976. Mussels and pollution. In B.L. Bayne [ed.]. Marine mussels: Their ecology and physiology, Chapt. 3. IBP 10. Cambridge University Press, London. 506 p.

Viarengo, A., and L. Canesi. 1991. Mussels as biological indicators of pollution. Aquaculture 94: 225-243.

BPC et HAP:

Bertrand, P., G. Verreault, Y. Vigneault, and G. Walsh. 1988. Biphenyles polychlorés dans les sédiments et les organismes marin de la Baie-des-Anglais (Côte-Nord du golfe Saint-Laurent). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1669: 1x + 42 p.

Capuzzo, J.M., J.W. Farrington, P. Rantamaki, C.H. Clifford, B.A. Lancaster, D.F. Leavitt, and X. Jia. 1989. The relationship between lipid composition and seasonal differences in the distribution of PCBs in *Mytilus edulis* L. Mar. Environ. Res. 28: 259-264.

Moore, M.N., J. Widdows, J.J. Cleary, R.K. Pipe, P.N. Salkeld, P. Donkin, S.V. Farrar, S.V. Evans, and P.E. Thomson. 1984. Responses of the mussel *Mytilus edulis* to copper and phenanthrene: Interactive effects. Mar. Environ. Res. 14: 167-183.

Pesticides:

Phillips, D.J.H. 1978. Use of biological indicator organisms to quantitate organochlorine pollutants in aquatic environments - a review. Environ. Pollut. 16: 167-189.

Hydrocarbures:

- Ganning, B., D.Broman, and C. Lindblad. 1983. Uptake of petroleum hydrocarbons by the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) after experimental oiling and high pressure, hot water shore cleaning. *Mar. Environ. Res.* 10: 245-254.
- National Research Council. 1985. Oil in the sea. Inputs, fates and effects. National Academy Press, Washington, D.C. 601 p.
- Strömgren, T. 1986. The combined effect of copper and hydrocarbons on the length growth of *Mytilus edulis*. *Mar. Environ. Res.* 19: 251-258.
- 1987. Effect of oil and dispersants on the growth of mussels. *Mar. Environ. Res.* 21: 239-246.

Widdows, J., T. Bakke, B.L. Bayne, P. Donkin, D.R. Livingstone, D.M. Lowe, M.N. Moore, S.V. Evans, and S.L. Moore. 1982. Responses of *Mytilus edulis* L. on exposure to the water-accommodated fraction of North Sea oil. *Mar. Biol.* 67: 15-31.

Métaux:

- Bourgoin, B.P. 1990. *Mytilus edulis* shell as a bioindicator of lead pollution: Considerations on bioavailability and variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 61: 253-262.
- Cossa, D., and J.-G. Rondeau. 1985. Seasonal, geographical and size-induced variability in mercury content of *Mytilus edulis* in an estuarine environment: A re-assessment of mercury pollution level in the estuary and Gulf of St. Lawrence. *Mar. Biol.* 88: 43-49.
- Cossa, D. 1988. Cadmium in *Mytilus* spp.: Worldwide survey and relationship between seawater and mussel content. *Mar. Environ. Res.* 26: 265-284.
- Elliott, N.G., R. Swain, and D.A. Ritz. 1985. The influence of cyclic exposure on the accumulation of heavy metals by *Mytilus edulis planulatus* (Lamarck). *Mar. Environ. Res.* 15: 17-30.

Eaux usées:

- Johnson, D., and T.J. Lack. 1985. Some responses of transplanted *Mytilus edulis* to metal-enriched sediments and sewage sludge. *Mar. Environ. Res.* 17: 277-280.

Menon, A. 1988. Molluscan shellfish and water quality problems in Atlantic Canada.
Tox. Assess. 3: 679-686.

SPÉCIALISTES DU MINISTÈRE DES PÊCHES ET DES OCÉANS

Écologie et répartition	Ken Freeman ¹ Robert Miller ¹	(902) 423-7360 (902) 426-8108
Toxines algales	Tom Sephton ² John Smith ²	(902) 851-2053 (506) 851-3827
Aquiculture et pêche	Randy Penney ³ Marcel Fréchette ⁴ Thomas Landry ²	(709) 772-4704 (418) 775-0625 (506) 851-6219
Contaminants	Jack Uthe ¹ Vlado Zitko ⁵	(902) 426-6277 (506) 529-8854
Parasites	Sharon McGladdery ²	(506) 851-2018
Salubrité des mollusques et crustacés	Michael Gilgan ¹	(902) 426-6284

¹Ministère des Pêches et des Océans
Laboratoire de recherche sur les pêches de Halifax
C.P. 550
Halifax (N-É) B3J 2S7
Canada

²Ministère des Pêches et des Océans
Centre des pêches du Golfe
C.P. 5030
Moncton (N-B) E1C 9B6
Canada

³Ministère des Pêches et des Océans
Centre des pêches de l'Atlantique nord-ouest
C.P. 5667
St. John's (T-N) A1C 5X1
Canada

⁴Ministère des Pêches et des Océans
Institut Maurice-Lamontagne
C.P. 1000
Mont-Joli (Qc) G5H 3Z4
Canada

⁵Ministère des Pêches et des Océans
Station biologique de St. Andrews
Brandy Cove Road
St. Andrews (N-B) E0G 2X0
Canada

BIBLIOGRAPHIE

- Akberali, H.B., M.J. Earnshaw, and K.R.M. Marriott. 1985. The action of heavy metals on the gametes of the marine mussel, *Mytilus edulis* (L.). II. Uptake of copper and zinc and their effect on respiration in the sperm and unfertilized egg. Mar. Environ. Res. 16: 37-59.
- Ambariyanto, and R. Seed. 1991. The infestation of *Mytilus edulis* Linnaeus by *Polydora ciliata* (Johnston) in the Conway Estuary, North Wales. J. Molluscan Stud. 57: 413-424.
- Anuass, T., J.P. Denstad, and K.E. Zachariassen. 1988. Ecophysiological importance of the isolation response of hibernating blue mussels (*Mytilus edulis*). Mar. Biol. 98: 415-419.
- Bayne, B.L., and J. Widdows. 1978. The physiological ecology of two populations of *Mytilus edulis* L. Oecologia Berlin 37: 137-162.
- Bayne, B.L., and C.M. Worrall. 1980. Growth and production of mussels *Mytilus edulis* from two populations. Mar. Ecol. Prog. Ser. 3: 317-328.
- Bayne, B.L., D.A. Brown, K. Burns, D.R. Dixon, A. Ivanovici, D.R. Livingstone, D.M. Lowe, M.N. Moore, A.R.D. Stebbing, and J. Widdows. 1985. The effects of stress and pollution on marine animals. Praeger, New York. 384 p.
- Beaumont, A.R., and M.D. Budd. 1984. High mortality of the larvae of the common mussel at low concentrations of tributyltin. Mar. Poll. Bull. 15: 402-405.
- Beaumont, A.R., G. Tserpes, and M.D. Budd. 1987. Some effects of copper on the veliger larvae of the mussel *Mytilus edulis* and the scallop *Pecten maximus* (Mollusca, Bivalvia). Mar. Environ. Res. 21: 299-309.
- Beaumont, A.R., and K.S. Kelly. 1989. Production and growth of triploid *Mytilus edulis* larvae. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 132: 69-84.
- Bergeron, P., M. Fréchette, L. Pagé, Y. Lavergne, and G. Walsh. 1990. Sedimentation et dispersion des déblais de dragage en mer et effets sur la moule bleue (*Mytilus edulis*) en élevage dans la Baie des Chaleurs. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1746.
- Bertrand, P., G. Verreault, Y. Vigneault, and G. Walsh. 1988. Biphenyles polychlorés dans les sédiments et les organismes marin de la Baie-des-Anglais (Côte-Nord du golfe Saint-Laurent). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1669: 1x + 42 p.

- Blumer, M., G. Souza, and J. Sass. 1970. Hydrocarbon pollution of edible shellfish by an oil spill (Buzzard's Bay, Massachusetts). *Mar. Biol.* 5: 195-202.
- Bohlen, W.F., D.F. Cundy, and J.M. Tramontano. 1979. Suspended material distributions in the wake of estuarine channel dredging operations. *Estuarine Coastal Mar. Sci.* 9: 699-711.
- Bourgoin, B.P. 1990. *Mytilus edulis* shell as a bioindicator of lead pollution: Considerations on bioavailability and variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 61: 253-262.
- Bourgoin, B.P., M.J. Risk, and A.E. Aitken. 1989. Possible effect of sedimentary phosphorus on the accumulation of lead in *Mytilus edulis*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 43: 635-640.
- Calabrese, A., J.R. MacInnes, D.A. Nelson, R.A. Greig, and P.P. Yevich. 1984. Effects of long-term exposure to silver or copper on growth, bioaccumulation and histopathology in the blue mussel *Mytilus edulis*. *Mar. Environ. Res.* 11: 253-274.
- Capuzzo, J.M., J.W. Farrington, P. Rantamaki, C.H. Clifford, B.A. Lancaster, D.F. Leavitt, and X. Jia. 1989. The relationship between lipid composition and seasonal differences in the distribution of PCBs in *Mytilus edulis* L. *Mar. Environ. Res.* 28: 259-264.
- Cembella, A., M. Bricelj, and J. Lee. 1991. Kinetics of paralytic shellfish toxin uptake and detoxification in bivalve molluscs, p. 7. In D.C. Gordon, Jr. [ed.]. Proceedings of the Second Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, N.S., October 2-4, 1990. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1799: 66 p.
- Cossa, D., M. Picard-Berubé, and J.-P. Gouygou. 1983. Polynuclear aromatic hydrocarbons in mussels from the estuary and northwestern Gulf of St. Lawrence, Canada. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 31: 41-47.
- Cossa, D. 1988. Cadmium in *Mytilus* spp.: Worldwide survey and relationship between seawater and mussel content. *Mar. Environ. Res.* 26: 265-284.
- Dahlgaard, H. 1986. Effects of season and temperature on long-term in situ loss rates of Pu, Am, Np, Ce, Ag, Tc, Zn, Co and Mn in a Baltic *Mytilus edulis* population. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 33: 157-165.
- Davies, I.M., W.C. Graham, and J.M. Pirie. 1979. A tentative determination of methyl mercury in sea-water. *Mar. Chem.* 7: 111-116.

- Eaton, P., and V. Zitko. 1978. Polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments and shellfish near creosoted wharf structures in eastern Canada. Int. Counc. Explor. Sea C.M.1978/E:25.
- Eaton, P., L.P. Hildebrand, and A.A. d'Entremont. 1986. Environmental quality in the Atlantic Region. 1985. Environ. Can., Environ. Prot. Serv., Atl. Region.
- Eddy, S. 1992. Temporal and spatial variation in PSP in southwestern N.B. 1943 to the present, p. 34. In J.-C. Therriault and M. Levasseur [ed.]. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.
- Elliott, N.G., R. Swain, and D.A. Ritz. 1985. The influence of cyclic exposure on the accumulation of heavy metals by *Mytilus edulis planulatus* (Lamarck). Mar. Environ. Res. 15: 17-30.
- Farley, C.A. 1988. A computerized coding system for organs, tissues, lesions, and parasites of bivalve mollusks and its application in pollution monitoring with *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 24: 243-249.
- Fossato, V.U., and W.J. Canzonier. 1976. Hydrocarbon uptake and loss by the mussel *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 36: 243-250.
- Freeman, K.R. 1974. Growth, mortality and seasonal cycle of *Mytilus edulis* in two Nova Scotian embayments. Fish. Mar. Serv. Tech. Rep. 500.
- Freeman, K.R., K.L. Perry, and T.G. Dibacco. 1992. Morphology, condition and reproduction of two co-occurring species of *Mytilus* at a Nova Scotia mussel farm. Bull. Aquacul. Assoc. Can. 92(3): 1-3.
- Friedrich, A.R., and F.P. Filice. 1976. Uptake and accumulation of the nickle ion by *Mytilus edulis*. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 16: 750-755.
- Ganning, B., D. Broman, and C. Lindblad. 1983. Uptake of petroleum hydrocarbons by the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) after experimental oiling and high pressure, hot water shore cleaning. Mar. Environ. Res. 10: 245-254.
- Goldberg, E.D. 1975. The mussel watch - a first step in global marine monitoring. Mar. Poll. Bull. 6: 111.
- Gonzalez, J.G., and P. Yevich. 1976. Responses of an estuarine population of the blue mussel *Mytilus edulis* to heated water from a steam generating plant. Mar. Biol. 34: 177-189.

- Grant, J., A. Hatcher, D.B. Scott, P. Pocklington, C.T. Schafer, and G.V. Winters. In press. A multidisciplinary approach to evaluating benthic impacts of shellfish aquaculture.
- Harding, L. 1992. Measures of marine environmental quality. Mar. Poll. Bull. 25: 23-27.
- Hawryluk, M., P. Schwinghamer, C. Powell, and C.H. Mackenzie. 1992. Winter occurrence of PSP in inshore Newfoundland waters is caused by resuspended hypnozygotes of *Alexandrium fundyense*, p. 13. In J.-C. Therriault and M. Levasseur [ed.]. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.
- Haya, K., J.L. Martin, B.A. Waiwood, and L.E. Burridge. 1989. Distribution of PSP toxins in mussels cultured in Deadman's Harbour, New Brunswick, p. 15-16. In S.S. Bates and J. Worms [ed.]. Proceedings of the First Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Gulf Fisheries Centre, Moncton, N.B., September 27-28, 1989. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1712: 58 p.
- Hellou, J., C. Upshall, J.P. Payne, S. Naidu, and M.A. Paranjape. 1993. Total unsaturated compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in molluscs collected from waters around Newfoundland. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 24: 249-257.
- Hietanen, B., I. Sunila, and R. Kristoffersson. 1988. Toxic effects of zinc on the common mussel *Mytilus edulis* L. (Bivalvia) in brackish water. 1. Physiological and histopathological studies. Ann. Zool. Fenn. 25: 341-347.
- Hillman, R.E., R.A Lordo, R.G. Menton, C.S. Peven, A.D. Uhler, E. Crecelius, and W.G. Steinhauer. 1992. Relationship of environmental contaminants to occurrence of neoplasia in mussels (*Mytilus edulis*) from East and West Coast Mussel Watch sites, p. 230-239. In Proceedings of the MTS '92, Global Ocean Partnership Conference, Washington, D.C., 19-21 Oct. 1992.
- Hummel, H., J.P. UitOudeGroeneveld, J. Nieuwenhuize, J.M. van Liere, R.H. Bogaards, and L. de Wolf. 1989. Relationship between PCB concentration and reproduction in mussels *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 28: 489-493.
- Huteson, M.S. 1983. Toxicological effects of potash brine on Bay of Fundy marine organisms. Mar. Environ. Res. 9: 237-255.
- Khalanski, M., and F. Bordet. 1983. Effects of chlorination on marine mussels, p. 557-567. In R.L. Jolley, W.A. Brungs, J.A. Cotruvo, R.B. Cumming, J.S. Mattice, and V.A. Jacobs [ed.]. Water Chlorination. Environmental Impact and Health Effects 4, Chapt. 49. Proc. 4th Conference on Water Chlorination. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich. 1491 p.

- Kiorboe, T., F. Mohlenberg, and O. Nohr. 1981. Effect of suspended bottom material on growth and energetics in *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 61: 283-288.
- Kluytmans, J.H., F. Brands, and D.I. Zandee. 1988. Interactions of cadmium with the reproductive cycle of *Mytilus edulis* L. Mar. Environ. Res. 24: 189-192.
- Knezovich, J.P., M.P. Lawton, and F.L. Harrison. 1988. *In vivo* metabolism of aromatic amines by the bay mussel, *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 24: 89-91.
- Lee, C.Y., S.S.L. Lim, and M. Dowen. 1990. The rate and strength of byssal reattachment by the blue mussels (*Mytilus edulis* L.). Can. J. Zool. 68: 2005-2009.
- Lobel, P.B., S.P. Belkhode, S.E. Jackson, and H.P. Longerich. 1990. Recent taxonomic discoveries concerning the mussel *Mytilus*: Implications for biomonitoring. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 19: 508-512.
- Loo, L. 1992. Filtration, assimilation, respiration and growth of *Mytilus edulis* L. at low temperatures. Ophelia 35: 123-131.
- Lord, D.A., R.A.F. Matheson, L. Stuart, J.J. Swiss, and P.G. Wells. 1978. Environmental monitoring of the 1976 spruce budworm spray program in New Brunswick, Canada. Environ. Can., Environ. Prot. Serv., Surveill. Rep. EPS-5-AR-78-3. 161 p.
- Lowe, D.M., and M.N. Moore. 1979. The cytochemical distributions of zinc (Zn II) and Iron (Fe III) in the common mussel, *Mytilus edulis*, and their relationship with lysosomes. J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 59: 851-858.
- Lowe, D.M., and K.R. Clarke. 1989. Contaminant-induced changes in the structure of the digestive epithelium of *Mytilus edulis*. Aquat. Toxicol. 15: 345-358.
- Maguire, R.J., R.J.Tkacz, Y.K. Chau, G.A. Gengert, and P.T.S. Wong. 1986. Occurrence of organotin compounds in water and sediment in Canada. Chemosphere 15: 253-274.
- Mallet, A.L., C.E.A. Carver, and K.R. Freeman. 1990. Summer mortality of the blue mussel in eastern Canada: Spatial, temporal, stock and age variation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 67: 35-41.
- Martin, M., K.E. Osborn, P. Billig, and N. Glickstein. 1981. Toxicities of ten metals to *Crassostrea gigas* and *Mytilus edulis* embryos and *Cancer magister* larvae. Mar. Poll. Bull. 12: 305-308.

- Matheson, R.A.F., G.L. Trider, W.R. Ernst, K.G. Hamilton, and P.A. Hennigar. 1983. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination of Sydney Harbour, Nova Scotia. Environ. Can., Environ. Prot. Serv., Atl. Region. EPS-5-AR-83-6.
- Maung-Myint, U., and P.A. Tyler. 1982. Effects of temperature, nutritive and metal stressors on the reproductive biology of *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 67: 209-223.
- McGladdery, S.E., R.E. Drinnan, and M.F. Stephenson. 1993. A manual of parasites, pests and diseases of Canadian Atlantic bivalves. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1931.
- McHener, J.G., D. Saward, and D.D. Seaton. 1991. Lethal and sub-lethal effects of the salmon delousing agent dichlorvos on the larvae of the lobster (*Homarus gammarus* L.) and herring (*Clupea harengus* L.). Aquaculture 98: 331-347.
- Menon, A. 1988. Molluscan shellfish and water quality problems in Atlantic Canada. Tox. Assess. 3: 679-686.
- Moore, M.N., D.M. Lowe, and P.E.M. Fieth. 1978. Lysozomal responses to experimentally injected anthracene in the digestive cells of *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 48: 297-302.
- Moore, M.N., J. Widdows, J.J. Cleary, R.K. Pipe, P.N. Salkeld, P. Donkin, S.V. Farrar, S.V. Evans, and P.E. Thomson. 1984. Responses of the mussel *Mytilus edulis* to copper and phenanthrene: Interactive effects. Mar. Environ. Res. 14: 167-183.
- Myrand, B., and J. Richard. 1987. La moule bleue. Conseil des Productions Animales du Québec. AGDEX 485. 107 p.
- Myrand, B. [ed.]. 1991. Proceedings of a Workshop on summer mortality of mussels on the Magdalen Islands (Atelier de travail sur la mortalité estivale des moules aux Iles-de-la-Madeleine). 23-25 Avril 1991. Conseil de l'Aquiculture et des Pêches du Québec. 196 p.
- Newell, C.R., and R.A. Lutz. 1991. Growth and survival of cultured mussels in Maine. Bull. Aquacult. Assoc. Can. 91: 47-53.
- Noellgen, R.M. 1990. Organophosphate-hydrolyzing activity in *Mytilus edulis*, p. 1139-1142. In P. Chapman, F. Bishay, E. Power, K. Hall, L. Harding, D. McLeay, M. Nassichuk, and W. Knapp [ed.]. Proceedings of the Seventeenth Annual Aquatic Toxicity Workshop, November 5-7, Vancouver, B.C. Volumes 1 and 2. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1774.

- O'Connor, T.P. 1992. Recent trends in coastal environmental quality: Results from the first five years of the NOAA Mussel Watch Project. U.S. National Status and Trends Program, NOAA Coastal Monitoring Branch. 46 p.
- O'Neill, H.J., and K.M. Kieley. 1992. Polynuclear aromatic hydrocarbons: Atlantic Region data summary and review. Environ. Can., Conserv. Prot., Atl. Region Tech. Rep. Ser. 92-01.
- Outerbridge, G., A.M. Renata, and D.J. Scarratt. 1992. Uptake and elimination of domoic acid by mussels (*Mytilus* sp.) in various experimental conditions, p. 21. In J.-C. Therriault and M. Levasseur [ed.]. Proceedings of the Third Canadian Workshop on Harmful Marine Algae. Maurice Lamontagne Institute, Mont-Joli, Québec, May 12-14, 1992. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1893: 154 p.
- Owens, E.H. 1977. Coastal environments of Canada: The impact and cleanup of oil spills. Rep. to Can., Dept. Fish. Environ., Environ. Prot. Serv., Ottawa. EPS-3-EC-77-13. 413 p.
- Page, D.S., E.S. Gilfillan, S.A. Hanson, J.R. Hotham, and J.C. Foster. 1984. Correlation of body burden of heavy metals with physiological stress indicators in *Mytilus edulis* and *Mya arenaria* exposed to heavy metals in the field. Mar. Environ. Res. 14: 505.
- Pelletier, E., S. Ouellet, and M. Paquet. 1991. Long-term chemical and cytochemical assessment of oil contamination in estuarine intertidal sediments. Mar. Poll. Bull. 22: 273-281.
- Phillips, D.J.H. 1976. The common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of pollution by zinc, cadmium, lead and copper. II. Relationship of metals in the mussel to those discharged by industry. Mar. Biol. 38: 71-80.
- Phillips, D.J.H. 1978. Use of biological indicator organisms to quantitate organochlorine pollutants in aquatic environments - a review. Environ. Pollut. 16: 167-187.
- Picard-Bérubé, M., D. Cossa, and J. Piuze. 1983. Teneurs en benzo 3,4 pyrene chez *Mytilus edulis* L. de l'Estuaire et du Golfe du Saint-Laurent. Mar. Environ. Res. 10: 63-71.
- Popham, J.D., and J. D'Auria. 1982. Effects of season and seawater concentrations on trace metals in organs of *Mytilus edulis*. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 11: 273-282.
- Prakash, A., J.A. Medcof, and A.D. Tennant. 1971. Paralytic shellfish poisoning in eastern Canada. Bull. Fish. Res. Board Can. 177: 87 p.

- Pruell, R.J., J.L. Lake, W.R. Davis, and J.G. Quinn. 1986. Uptake and depuration of organic contaminants by blue mussels, (*Mytilus edulis*) exposed to environmentally contaminated sediment. *Mar. Biol.* 91: 497-507.
- Rasmussen, L. 1982. Light microscopical studies of the acute toxic effects of N-nitrosodimethylamine on the marine mussel, *Mytilus edulis*. *J. Invertebr. Pathol.* 39: 66-80.
- Ray, S., D.W. McLeese, L.E. Burridge, and B.A. Waiwood. 1980. Distribution of cadmium in marine biota in the vicinity of Belledune, p. 11-34. In J.F. Uthe and V. Zitko [ed.]. Cadmium contamination of Belledune Harbour, New Brunswick, Canada. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 963: v + 107 p.
- Rieman, B., and E. Hoffman. 1991. Ecological consequences of dredging and bottom trawling in the Limfjord, Denmark. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 69: 171-178.
- Risebrough, R.W., B.W. DeLappe, and T.T. Schmidt. 1976. Bioaccumulation factors of chlorinated hydrocarbons between mussels and seawater. *Mar. Poll. Bull.* 7: 225-228.
- Roberts, D. 1976. Mussels and pollution. In B.L. Bayne [ed.]. *Marine mussels: Their ecology and physiology*, Chapt. 3. IBP 10. Cambridge University Press, London. 506 p.
- Roberts, D.F., M. Elliott, and P.A. Reid. 1986. Cadmium contamination, accumulation and some effects of this metal in mussels from a polluted marine environment. *Mar. Environ. Res.* 18: 165-183.
- Sanders, B.M., L.S. Martin, W.G. Nelson, D.K. Phelps, and W. Welch. 1991. Relationships between accumulation of a 60 kDa stress protein and scope-for-growth in *Mytilus edulis* exposed to a range of copper concentrations. *Mar. Environ. Res.* 31: 81-97.
- Scarratt, D.J. 1969. Bleached kraft mill effluent near Pictou, N.S., and its effect on the marine flora and fauna with a note on the Pictou Co. lobster landings. *Fish. Res. Board Can. Manuscr. Rep.* 1037.
- Scarratt, D.J. 1993. A handbook of northern mussel culture. Island Press, Montague, P.E.I. 167 p.
- Scarratt, A.M., D.J. Scarratt, and M.G. Scarratt. 1993. Survival of live *Alexandrium tamarense* cells in mussel and scallop spat under simulated transfer conditions. *J. Shellfish Res.* 12(2): in press.

- Shumway, S.E., F.C. Pierce, and K. Knowlton. 1987. The effect of *Protogonyaulax tamarensis* on byssus production in *Mytilus edulis* L., *Modiolus modiolus* Linnaeus, 1758 and *Geukensia demissa* Dillwyn. Comp. Biochem. Physiol. 87A: 1021-1023.
- Sirota, G.R., J.F. Uthe, D.G. Robinson, and C.J. Musial. 1984. Polycyclic aromatic hydrocarbons in American lobster (*Homarus americanus*) and blue mussel (*Mytilus edulis*) collected in the area of Sydney Harbour, Nova Scotia. Can. Manusc. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1758.
- Sprague, J.B., and J.R. Duffy. 1971. DDT residues in Canadian Atlantic fishes and shellfishes in 1967. J. Fish. Res. Board Can. 28: 59-64.
- Stickle, W.B., Jr., S.D. Rice, C. Villars, and W. Metcalf. 1985. Bioenergetics and survival of the marine mussel *Mytilus edulis* L. during long-term exposure to the water-soluble fraction of Cook Inlet crude oil, p. 427-446. In F.J. Vernberg, F.P. Thurberg, A. Calabrese, and W.B. Vernberg [ed.]. Marine pollution and physiology: Recent advances. Belle W. Baruch Library in Marine Science 13. Univ. South Carolina Press.
- Strömgren, T. 1986. The combined effect of copper and hydrocarbons on the length growth of *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 19: 251-258.
- 1987. Effect of oil and dispersants on the growth of mussels. Mar. Environ. Res. 21: 239-246.
- Strömgren, T., and T. Bongard. 1987. The effect of tributyltin oxide on growth of *Mytilus edulis*. Mar. Poll. Bull. 18: 30-31.
- Sturesson, U. 1976. Lead enrichment in shells in *Mytilus edulis*. Ambio 5: 253-256.
- Svane, I., and M. Ompi. 1993. Patch dynamics in beds of the blue mussel *Mytilus edulis* L.: Effects of site, patch size, and position within a patch. Ophelia 37: 187-202.
- Swiss, J. 1984. The effects of heated effluents on marine water quality in the Atlantic Region, p. 138-144. In R.C.H. Wilson and R.F. Addison [ed.]. Health of the Northwest Atlantic. Can. Dept. Environ., Dept. Fish. Oceans, Dept. Energy, Mines and Resources. 174 p.
- Thompson, R.J. 1984. The reproductive cycle and physiological ecology of the mussel *Mytilus edulis* in a subarctic, non-estuarine environment. Mar. Biol. 79: 277-288.
- Tibbs, J.F., R.A. Elston, R.W. Dickey, and A.M. Guarino. 1989. Studies on the accumulation of antibiotics in shellfish. Northwest Environ. J. 5: 161-162.

- Uhler, A.D., G.S. Durell, W.G. Steinhauer, and A.M. Spellacy. 1993. Tributyltin levels in bivalve mollusks from the east and west coasts of the United States: Results from the 1988-1990 National Status and Trends Mussel Watch Project. Environ. Toxicol. Chem. 12: 139-153.
- Uthe, J.F., and C.L. Chou. 1986. The effects of prolonged starvation on concentrations and tissue burdens of a number of divalent trace metals in mussels (*Mytilus edulis*). Int. Counc. Explor. Sea C.M.1986/E:28: 4 p.
- Viarengo, A., G. Mancinelli, G. Martino, M. Pertica, L. Canesi, and A. Mazzucotelli. 1988. Integrated cellular stress indices in trace metal contamination: Critical evaluation in a field study. Mar. Ecol. Prog. Ser. 46: 65-70.
- Viarengo, A., and L. Canesi. 1991. Mussels as biological indicators of pollution. Aquaculture 94: 225-243.
- Wang, W.K., and J. Widdows. 1993. Interactive effects of pentachlorophenol (PCP) and hypoxia on the energy metabolism of the mussel, *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 35: 109-113.
- Ward, R.E. 1990. Metal concentrations and digestive gland lysosomal stability in mussels from Halifax Inlet, Canada. Mar. Poll. Bull. 21: 237-240.
- Ward, J.E., B.A. MacDonald, and R.J. Thompson. 1993. Mechanisms of suspension feeding in bivalves: Resolution of current controversies by means of endoscopy. Limnol. Oceanogr. 38: 265-272.
- Weber, R.E., A. de-Zwaan, and A. Bang. 1992. Interactive effects of ambient copper and anoxia, temperature and salinity stress on survival and hemolymph and muscle tissue osmotic effectors in *Mytilus edulis*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 159: 135-156.
- Wells, H.W., and I.E. Gray. 1960. The seasonal occurrence of *Mytilus edulis* on the Carolina coast as a result of transport around Cape Hatteras. Biol. Bull. Mar. Biol. Lab., Woods Hole 119: 550-559.
- Wenning, R.J., and R.T. DiGiulio. 1988. The effects of paraquat on microsomal oxygen reduction and antioxidant defenses in ribbed mussels (*Geukensia demissa*) and wedge clams (*Rangia cuneata*). Mar. Environ. Res. 24: 301-305.
- White, A.W. 1982. Intensification of *Gonyaulax* blooms and shellfish toxicity in the Bay of Fundy. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1064: 12 p.
- Widdows, J., D.K. Phelps, and W. Galloway. 1981. Measurement of physiological condition of mussels transplanted along a pollution gradient in Narragansett Bay. Mar. Environ. Res. 4: 181-194.

- Widdows, J., and D.S. Page. 1993. Effects of tributyltin and dibutyltin on the physiological energetics of the mussel, *Mytilus edulis*. Mar. Environ. Res. 35: 233-249.
- Wildish, D.J., and M.L.H. Thomas. 1985. Effects of dredging and dumping on benthos of Saint John Harbour, Canada. Mar. Environ. Res. 15: 45-57.
- Wildish, D.J. and M.P. Miyares. 1990. Filtration rate of blue mussels as a function of flow velocity: Preliminary experiments. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 142: 213-219.
- Wong, C.S., W.J. Cretney, M.A. Cosson-Mannev. 1984. Putative neoplastic disorders in mussels (*Mytilus edulis*) from southern Vancouver Island waters, British Columbia. J. Invertebr. Pathol. 44: 151-160.
- Young, G.A. 1985. Byssus-thread formation by the mussel *Mytilus edulis*: Effects of environmental factors. Mar. Ecol. Prog. Ser. 24: 261-271.
- Zaroogian, G.E., and M. Johnson. 1989. Adenylate energy charge and adenine nucleotide measurements as indicators of stress in the mussel, *Mytilus edulis*, treated with dredged material under laboratory conditions. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 43: 635-640.
- Zitko, V. 1981. Monitoring program for major Atlantic coast fisheries. Can. Manusc. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1615: iii + 15 p.