



SODIM

Société de développement de l'industrie maricole inc.

*Modélisation du potentiel d'épuration de la
moule bleue (*Mytilus spp.*) en eau froide et en
réaction à un choc thermique*

Rapport

Dossier n° 710.2

Rapport commandité par la SODIM

**Ministère de l'Agriculture,
des Pêcheries et de l'Alimentation**

**Direction de l'innovation
et des technologies**

Cahier d'information n° 143

**MODÉLISATION DU POTENTIEL D'ÉPURATION DE LA MOULE BLEUE
(*MYTILUS* SPP.) EN EAU FROIDE ET EN RÉACTION À UN CHOC THERMIQUE**

par

**Réjean Tremblay
Marcel Roussy
et
Mathieu Cusson**

Ce rapport est une production de la Direction de l'innovation et des technologies. Jusqu'à 1996, cette direction était connue sous l'appellation de Direction de la recherche scientifique et technique.

Des exemplaires de ce rapport peuvent être obtenus à l'adresse suivante :

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
Direction de l'innovation et des technologies
96, montée de Sandy Beach, bureau 205
Gaspé (Québec) G4X 2V6

Votre demande doit être accompagnée d'un chèque fait à l'ordre du ministre des Finances

Coût unitaire : 10\$

ISBN :
Dépôt légal - Bibliothèque nationale du

AVERTISSEMENT

L'utilisation ultérieure de toute méthode ou technique mentionnée dans ce document est sous l'entière responsabilité de l'utilisateur ou de l'utilisatrice et n'engage en aucune façon le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

ABSTRACT

In areas contaminated by coliforms, the Canadian Food Inspection Agency (CFIA) stipulated a depuration regime of 48 h at a minimum of 5 °C to complete purification for the majority of mollusc before being commercialised. This regulation limits the autumn and spring harvesting of *Mytilus* spp. L in Gaspesia without increasing water heating cost although this specie was able to maintain a relatively high rate of filtration below the recommended temperature of purification. The goals of this study were to estimate the depuration potential at low temperature by the measures of filtration rates and modelised the impact of thermal shock. The influence of thermal shock on *Mytilus* spp. filtration rate was measured in laboratory in order to estimate the required time to filtrate a volume of water necessarily to obtain a complete depuration. We acclimatised mussels for 3 weeks at 3 different temperatures (8, 4 and -1 °C) and proceed to all thermals shocks combinations including controls (transferred at same temperatures). Filtration estimated by clearance rates was measured after 2 h and 72 h of thermal shock using a coulter-counter. The results show a filtration rate of 2,33 l h⁻¹ g⁻¹ (dw) for the 8 °C control batch. According to CFIA depuration time, *Mytilus* spp. can filtrate a standard volume of 110 litres within 48h. We used both linear and exponential mathematical models to calculate the required time for each thermal shock batch to filter that standard volume of water. We found that the thermal shock have an important effect in the volume filtrate by a mussel in 48 h. In fact, mussels acclimatised at 8 °C filtrated the standard volume of 110 litres in 73 h at 4 °C.

RÉSUMÉ

Pour commercialiser des mollusques provenant de sites contaminés par les coliformes, l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA) stipulaient que ceux-ci devaient être soumis à un régime de dépuración de 48 heures à une température minimum de 5 °C. Cette réglementation limitait la collecte à l'automne et au printemps de moule bleue, *Mytilus spp*, en Gaspésie sans augmentation des coûts inhérents au chauffage de l'eau. Et ce, même si cette espèce peut maintenir des taux de filtrations relativement élevées à des températures inférieures à 5 °C. Les objectifs de cette étude sont d'estimer le potentiel de dépuración de cette espèce à base température par des mesures de taux de filtration et de modéliser l'impact d'un choc thermique. L'influence des chocs thermiques était mesurée en laboratoire afin d'estimer le temps requis pour filtrer le volume d'eau nécessaire à une dépuración complète. Nous avons acclimaté des moules durant 3 semaines à 3 températures différentes (8, 4 et - 1 °C) avant de procéder aux différentes combinaisons de choc thermique incluant les contrôles (transférés à la même température). Les taux de filtration étaient estimés après 2 et 72 h suivant le choc thermique et le contrôle à 8 °C exprimait un taux moyen de 2.33 l h⁻¹ g⁻¹ de poids sec. Ainsi, pour une épuration de 48 h les moules acclimatées à 8 °C filtreraient

110 litres. En utilisant des modèles mathématiques linéaires et exponentiels pour calculer le temps nécessaire pour filtrer 110 litres pour toutes les combinaisons de choc thermique, on observe un effet important du choc thermique sur le volume d'eau filtrée par une moule en 48 h. Par exemple, une moule acclimatée à 8 °C filtre un volume standard de 110 litres dans une moyenne de 73 h lorsque transférée à 4 °C.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT.....	iii
ABSTRACT	iv
RÉSUMÉ	iv
Liste des figures.....	vii
Listes des tableaux.....	viii
LISTES DES ANNEXES	ix
INTRODUCTION	1
Problématique régionale.....	1
Épuration	2
Thermosensibilité de la moule.....	3
Objectifs	7
MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.....	8
Acclimatation	8
Chocs thermiques.....	9
Modèle mathématique	10
Analyse de données	10
RÉSULTATS.....	11
Relations allométriques	11
Acclimatation	12
Facteur de température d'acclimatation.....	12
Facteur du temps suivant l'acclimatation	12
Chocs thermiques.....	14
Modèle mathématique	15
DISCUSSION ET CONCLUSION	16
REMERCIEMENTS	18
RÉFÉRENCES	19

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Élimination des bactéries par des moules contaminées.....	3
Figure 2 :	Élimination de poliovirus, d' <i>Escherichia coli</i> et de coliphage.....	4
Figure 3 :	Simulation de l'acclimatation thermique d'une moule vivante à 15 °C et transférée à 25 °C	5
Figure 4 :	Variations mensuelles du taux de filtration de la moule bleue.....	6
Figure 5 :	Variations saisonnières de la consommation d'oxygène chez la moule bleue	7
Figure 6 :	Relation allométrique entre (a) la consommation d'oxygène et la masse sèche et (B) le taux de filtration et la masse sèche pour les moules récoltées à 12 °C et maintenues en laboratoire durant une semaine à 12 °C.....	12
Figure 7 :	Efficacité d'assimilation (%), consommation d'oxygène, taux de filtration et potentiel de croissance exprimés en fonction du temps suivant l'acclimatation	13
Figure 8 :	Mesure du taux de filtration après 2 et 72 heures suite à un choc thermique en fonction des combinaisons de température d'acclimatation et de transfert	14

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : Schéma du protocole expérimental employé pour les mesures de chocs thermiques.....	9
TABLEAU 2 : Tableau présentant les résultats obtenus par le modèle mathématique du temps nécessaire à une moule pour filtrer un volume cible de 110 litres en fonction des différentes combinaisons de chocs thermiques.....	15

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Programmation du modèle mathématique, par Gaétan Daigle	23
--	----

INTRODUCTION

Problématique régionale

Dans la baie de Gaspé, la récolte et la vente sans traitement des moules en élevage sont permises seulement en hiver lorsqu'il y a un couvert de glace. Les causes interdisant la récolte sont variables selon les saisons. En période estivale l'interdiction est causée par la présence d'algues toxiques, tandis que durant le printemps et l'automne la récolte est limitée pour des raisons de salubrité, situation entraînée par la concentration de coliformes fécaux dans l'eau de culture (Desbiens *et al.*, 2000). Toutefois, comme les échantillons d'eau de culture présentent une médiane à moins de 88 coliformes fécaux / 100 ml et que moins de 10 % des échantillons contiennent des concentrations plus grandes que 260 c.f./100 ml, la récolte des mollusques est permise, en dehors des périodes d'apparition de toxicité, conditionnellement à l'épuration de ceux-ci en usine. Il devient donc prioritaire pour le développement de la mytiliculture dans la baie de Gaspé d'établir les bases techniques qui serviront à l'homologation d'une usine d'épuration selon les normes de l'Association Canadienne de l'Inspection des Aliments (ACIA). Le principe de l'épuration est simple; il s'appuie sur l'activité de filtration très importante des mollusques bivalves pour leur alimentation et leur respiration. Celle-ci a pour effet de concentrer la charge bactérienne lorsque l'animal est placé dans un milieu contaminé ou, inversement, de "laver" l'organisme et d'en éliminer les bactéries lorsque celui-ci est placé dans un milieu sain.

Les bases de l'épuration des mollusques sont bien établies et normées par le National Shellfish Sanitation Program établi par l'institution américaine United States Food and Drugs Administration. Le Programme Canadien de Contrôle de Salubrité des Mollusques (PCCSM) reprend les normes du programme américain et stipulait, jusqu'à tout récemment encore, que l'épuration des mollusques devait se faire dans l'eau exempte de coliformes dont la température est supérieure à 5 °C (PCCSM section 10.2.3). Cette norme était originalement fixée pour rencontrer les

conditions et températures existantes pour l'épuration des huîtres et des palourdes

et était basée en partie sur l'incapacité présumée des mollusques à filtrer efficacement aux basses températures. Ainsi, pour tous les mollusques vivant le long des côtes américaines une épuration de 48 heures dans une eau exempte de coliformes et à une température supérieure à 5 °C est suffisante pour permettre à l'animal de se ventiler, de filtrer et par conséquent de se libérer des coliformes qu'ils contiennent (Furfari, 1966).

Selon la norme des 5 °C, l'opération d'une usine d'épuration dans la région de Gaspé au printemps et à l'automne nécessiterait donc l'implantation d'un système de traitement et de chauffage de l'eau sophistiqué, qui engendrerait des coûts d'opération élevés. Toutefois, le PCCSM est enclin à modifier la norme des 5 °C si l'efficacité du système d'épuration est démontrée pour une température inférieure à 5 °C. Dans ce contexte, le développement d'une usine d'épuration dans la région de Gaspé doit passer par l'évaluation du potentiel d'épuration des moules à des températures inférieures à 5 °C.

L'environnement local a un effet majeur et prolongé sur le phénotype physiologique exprimé par les moules (Bayne et Widdows, 1978; Widdows, 1978). Ainsi, nous suggérons que les moules présentes dans nos régions sont adaptées aux conditions rencontrées à nos latitudes et qu'elles ont la capacité de se ventiler, de filtrer et de se nourrir aux faibles températures automnales, hivernales et printanières (-1 à 5 °C). Par conséquent, les moules en Gaspésie devraient avoir la capacité de s'épurer à des températures inférieures à 5 °C. Comme l'épuration des mollusques est basée sur le temps de résidence des coliformes dans les tissus (tube digestif, branchies, manteau, etc), le potentiel d'épuration d'une moule acclimatée à des températures inférieures à 5 °C peut-être estimé par des mesures physiologiques (Boulter et Wilson 1998). Nous supposons que le temps de résidence des coliformes dans le manteau et les branchies est directement relié au taux de filtration (nombre de particules filtrées par les moules par heure). Quant au temps de résidence des coliformes dans le tube digestif il pourrait être estimé par des mesures de consommation d'oxygène afin d'évaluer le métabolisme. En effet, un métabolisme ralenti devrait résulter en un temps d'élimination plus long des coliformes dans le tube digestif.

L'épuration

Les bivalves filtreurs retiennent les petites particules par leur activité de filtration grâce à la présence de cils et de mucus (mécanisme mucociliaire) sur leurs branchies (plus correctement appelées cténidies). Ce système permet à la moule bleue de retenir 100 % des particules de 4 μm et plus et jusqu'à 20-30 % des particules de moins de 1 μm (voir revue de Hawkins et Bayne, 1992). Les coliformes bactériens (0,5 μm) devraient donc être faiblement retenus. Cependant des processus d'agrégation ou d'attachement des coliformes à des particules plus grosses favorisent leur assimilation par les moules (Bernard, 1989). Ainsi, les moules, comme les autres mollusques filtreurs, accumulent les bactéries et les virus

que l'on retrouve dans l'eau environnante. Ces bactéries et ces virus se retrouvent principalement au niveau du système digestif, bien qu'ils soient présents au niveau des branchies, des palpes labiaux, du pied, des muscles, du manteau et de l'hémolymphe mais à des concentrations près de 100 fois inférieure (Perkins *et al.*, 1980; Power et Collins, 1990). Nous pouvons donc en déduire que l'ingestion des contaminant est directement liée à la physiologie alimentaire de la moule (Minet *et al.*, 1987). Les bactéries ingérées par les moules peuvent être, soit rejetées de la cavité palléale sous forme de pseudofèces, soit transiter dans le système digestif tout en restant viables (Prieur, 1990), ou tout simplement être digérées. En effet, l'activité bactériolytique a été démontrée chez les bivalves et l'activité du lysosyme (enzyme dégradant les parois bactériennes) a été observée dans la glande digestive et dans différents autres tissus, dont le manteau (McHenery *et al.*, 1979; McHenery et Birkbeck, 1982; Conway, 1987).

En conséquence, tel que décrit par Deslous-Paoli (1993), les bivalves lamellibranches sont des organismes parfaitement adaptés à la microphagie. Ils peuvent filtrer de grandes quantités d'eau et retenir des particules de très petite taille, en plus de leur capacité à utiliser même les éléments dissous. Sachant que la plupart des polluants sont soit adsorbés sur des particules organiques, soit solubles dans l'eau, il est aisé d'imaginer que lorsque ces organismes vivent dans des milieux même faiblement pollués, ils en sont le reflet. C'est donc le cas des milieux pollués par les coliformes fécaux.

Pour épurer une moule contaminée par les coliformes fécaux, il suffit donc d'utiliser sa physiologie alimentaire. En plaçant celle-ci dans un réservoir où circule de l'eau exempte de bactérie et de virus, les processus de défécation et de digestion extracellulaire finissent par éliminer les bactéries après un certain temps (Furfari, 1966; Haven *et al.*, 1978; Lewis et Loutit, 1986; Bernard, 1989; Power et Collins, 1989; 1990; Plusquellec *et al.*, 1990; Wilson *et al.*, 1992). Le temps nécessaire à une moule pour éliminer près de 100 % de *Escherichia coli* est généralement de 48 heures (Furfari, 1966; Trollope et Webber, 1977; Figure 1). Toutefois, il semble que les processus de défécation et de digestion extracellulaire ne sont pas les principaux mécanismes responsables lors de l'élimination des virus chez la moule, ce qui entraîne une élimination beaucoup plus lente, donc un besoin d'épuration plus long (Power et Collins, 1989, 1990; Figure 2).

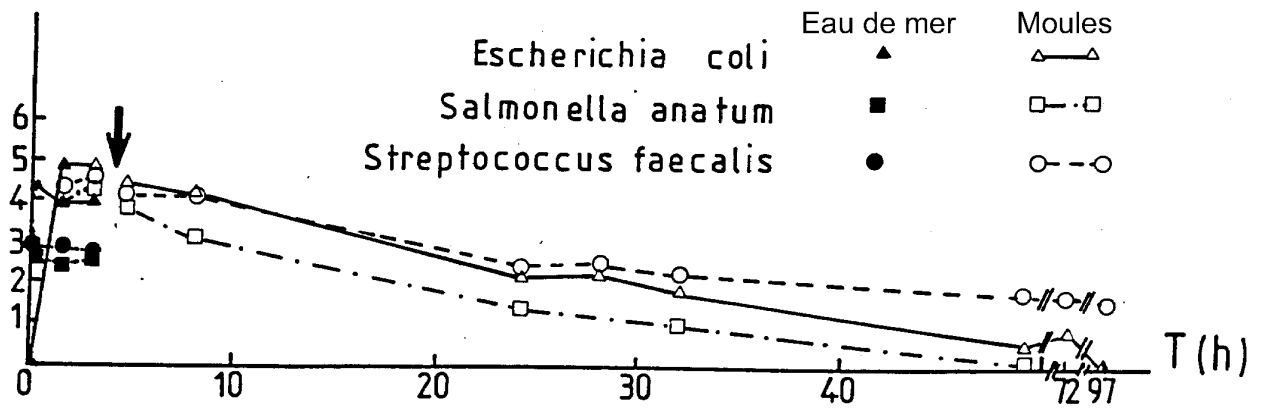


Figure 1 : Élimination des bactéries par des moules bleues contaminées. La flèche indique le transfert dans une eau pure (exempte de bactérie) en circuit ouvert. Tiré de Trollope et Webber (1977).

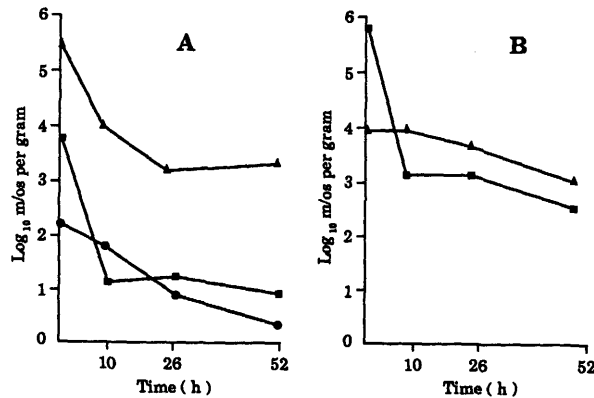


Figure 2 : A) Élimination de poliovirus (▲), d'*Escherichia coli* 4A (■) (et du coliphage ØA1-5a (■)). Le coliphage ØA1-5 est utilisé pour simuler un virus étant donné sa petite taille (22 nm) et sa forme similaire à la taille et la forme des entérovirus. Épuration dans un système en laboratoire (15,5- 19,5 °C, 27-29,3 ppm, >60 % de saturation en O₂ et pH 7,4-8,3). B) Épuration d'*Escherichia coli* 4A (▲) et du coliphage ØA1-5a (■) dans un système commercial à Cork en Irlande (15,5 °C -19,5°C, 27 ppm - 29,3 ppm, > 60 % de saturation en O₂ et pH 7,4-8,3). Tiré de Power et Collins (1989).

Contrairement à l'épuration des virus, l'épuration des coliformes fécaux est essentiellement un processus physiologique, donc toute perturbation physiologique durant l'épuration peut en modifier la durée. Power et Collins (1989) ont observé qu'en période de ponte, considérée comme une période de stress physiologique chez les bivalves, le taux et le patron d'élimination de la bactérie *E. coli* sont dramatiquement modifié en condition d'épuration.

Thermosensibilité de la moule

La température est un facteur qui, pour tout être vivant, présente un optimum et des valeurs létales. Chez les ectothermes (poikilothermes), tels que les bivalves, la température corporelle correspond à peu près à celle de l'environnement. Ainsi, les variations de température ambiante influencent directement les processus biochimiques qui sont à la base du métabolisme. Il en résulte qu'une hausse de température entraîne généralement une hausse du métabolisme et qu'une baisse de température entraîne généralement une baisse du métabolisme. Ces changements peuvent se produire jusqu'aux limites d'action des enzymes et des transporteurs cellulaires. Lorsque ces limites sont excédées, les enzymes sont inhibés et même dénaturés. En plus, certaines structures biologiques, telles que les membranes peuvent être modifiées par des températures extrêmes. Ces changements entraînent à leur tour des modifications dans les processus physiologiques. Dans ces conditions, la relation température – intensité métabolique peut être inversée et une hausse de température peut entraîner une baisse du métabolisme.

Les organismes peuvent s'adapter et s'acclimater à des changements de température lorsque les variations demeurent à l'intérieur de leurs limites de tolérance. L'adaptation se définit par une modification phénotypique, suite à un changement environnemental, permettant d'effectuer une fonction vitale avec une meilleure efficacité dans des conditions particulières. L'acclimatation est plutôt identifiée comme un ajustement temporaire permettant de contrecarrer l'effet nuisible d'un changement environnemental afin de rétablir l'homéostasie (Blackstock, 1984). Dans le processus de l'acclimatation, la réponse immédiate à un changement de température est suivie par une période de stabilisation, puis par un nouvel état stable (Figure 3).

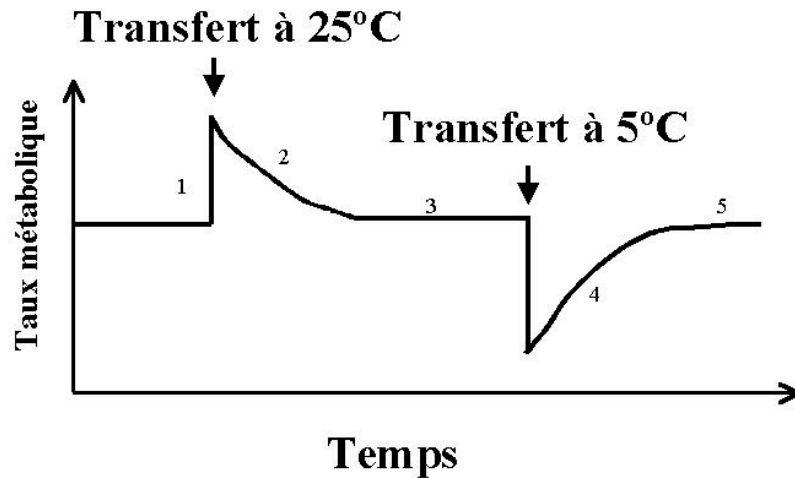


Figure 3 : Simulation de l'acclimatation thermique d'une moule vivante à 15 °C et transférée à 25 °C. Suite à un tel changement de température le taux métabolique augmente abruptement (point 1), puis diminue graduellement (2) et se stabilise après plusieurs jours ou semaines (3). A ce point la moule est acclimatée à une nouvelle condition thermique, suite à une compensation totale ou partielle du taux métabolique. Si la moule est de nouveau transférée dans des eaux plus froides, une réponse intense du taux métabolique sera de nouveau observée (4), avant que la moule se ré-acclimate graduellement aux nouvelles conditions thermiques (5). Le taux métabolique acclimaté après un choc thermique (3 et 5) n'est pas nécessairement égale à celui avant le choc (1).

Il a été largement démontré dans la littérature que la moule est un organisme qui s'acclimate bien à des variations de température de 5 °C à 25 °C. Cependant, les conditions froides (<5 °C) rencontrées de l'automne au printemps dans les régions maritimes du Québec, il y a peu de résultats disponibles. Dans les Pays-Bas, des mesures physiologiques mensuelles semblent suggérer que les moules sont généralement bien acclimatées aux variations environnementales annuelles, dont les variations de température entre 0 °C et 20 °C (Smaal *et al.*, 1997; Figure 4).

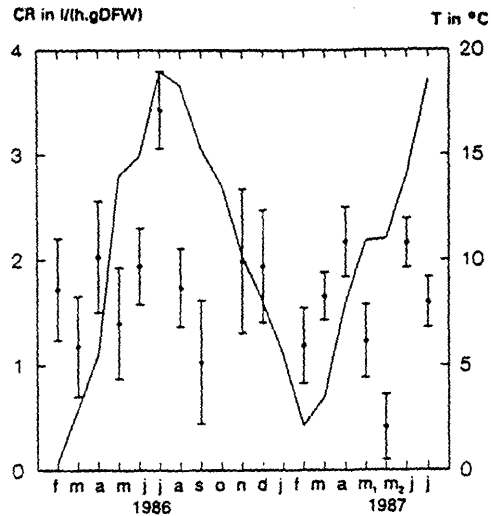


Figure 4 : Variations mensuelles du taux de filtration (·) de la moule bleue, *Mytilus edulis* (l/h/g poids sec) en relation avec la température de l'eau de mer (-). Tiré de Small *et al.* (1997).

Cependant des résultats obtenus en Nouvelle-Écosse démontrent que le métabolisme des moules en hiver (sous couvert de glace) est nettement inférieur au métabolisme des moules au printemps et à l'été (Figure 5). Les taux métaboliques observés en hiver sont près ou sous le métabolisme de maintien (métabolisme relié aux dépenses énergétiques minimales pour couvrir les besoins de bases de l'animal). Toutefois, des mesures de chlorophylle ont démontré que durant cette période les moules subissaient un stress nutritionnel important qui pourrait être le principal responsable de cette baisse du métabolisme (Hatcher *et al.*, 1997).

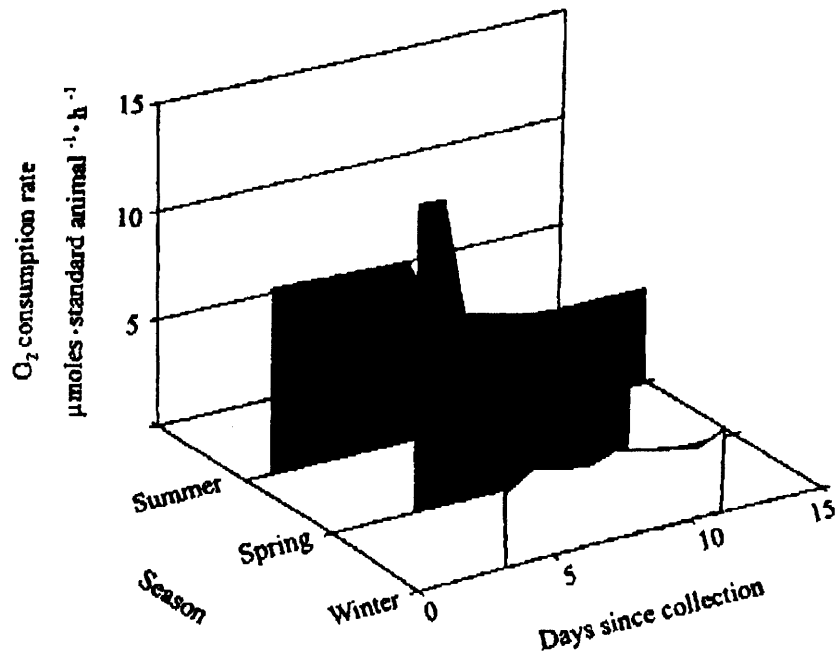


Figure 5 : Variations saisonnières de la consommation d'oxygène (μ moles/animal standard/h) chez la moule bleue, *Mytilus edulis*. Tiré de Hatcher *et al.* (1997)

Ainsi, si la moule est acclimatée aux basses températures (<5 °C), son métabolisme devrait être sensiblement le même que celui qu'elle afficherait à des températures supérieures, ce qui ne devrait pas affecter le patron et le temps d'épuration. D'ailleurs Plusquellec *et al.* (1990) observaient qu'en hiver (4 °C à 9 °C à Concarneau, France) le taux d'accumulation de bactéries (coliformes fécaux) ne semble pas affecté par les faibles températures. Wood (1957) a également démontré que les moules continuaient à purger des coliformes fécaux à des températures de 1 °C à 2 °C. Toutefois, si en période d'épuration la moule subit un choc thermique ou un stress nutritionnel, le temps d'épuration peut être sensiblement modifié.

Objectifs

L'industrie mytilicole opérant dans la baie de Gaspé compte épurer les moules en usine à l'automne et au printemps afin d'accroître la durée de la période de récolte. Elle compte procéder à l'épuration à la température ambiante de l'eau, donc en eau plus froide que le seuil de 5 °C. L'industrie compte également installer l'usine d'épuration à un site différent (Rivière-au-Renard) de celui d'élevage (baie de Gaspé). Ainsi, il est possible que les moules subissent un choc thermique durant le processus d'épuration (température d'épuration différente de la température de l'eau sur le site de récolte). Notre objectif principal est donc de déterminer l'impact des basses températures et des chocs thermiques sur le temps nécessaire à une épuration réglementaire.

Nous avons utilisé les mesures physiologiques comme moyen d'estimer le taux d'épuration (Boulter et Wilson, 1998) selon différentes conditions de température et de chocs thermiques. Nous avons mesuré la capacité d'acclimatation physiologique des moules aux températures froides (assimilation, filtration, respiration et potentiel de croissance), mesuré la capacité de filtration suite à un choc thermique et finalement évalué, à l'aide d'un modèle mathématique, le temps de filtration nécessaire à une épuration complète (basé sur le taux de filtration de moules témoins qui n'ont pas subi de choc thermique).

Le postulat important sur lequel l'expérience se pose est, que la capacité d'épuration des moules est directement proportionnelle au taux de filtration, donc à un volume d'eau filtré en un temps donné.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Acclimatation

Nous avons mesuré la capacité d'acclimatation des moules en examinant l'effet de la température sur les paramètres physiologiques, ce qui permet de caractériser le potentiel de croissance, qui est un indice sensible évaluant le statut énergétique d'un organisme sous différentes conditions environnementales (Bayne, 1976; Widdows et Jonhson, 1988). Le potentiel de croissance fournit le moyen d'intégrer tous les processus physiologiques de base (alimentation, absorption de la nourriture, respiration, excrétion) et donc d'évaluer clairement que les moules sont complètement acclimatées aux variations thermiques. En effet, la seule mesure du taux de filtration pourrait démontrer une acclimatation qui ne serait pas réalisée par les autres processus physiologiques. L'analyse du potentiel de croissance et des différents paramètres physiologiques fournit donc un bon indice du niveau d'acclimatation atteint par les moules et par conséquent de leur potentiel d'épuration. Le potentiel de croissance se mesure comme suit :

$$P = A - (R + U)$$

P	=	Potentiel de croissance
A	=	Énergie absorbée de la nourriture
R	=	Énergie respirée
U	=	Énergie excrétée

Comme chez la moule l'énergie excrétée représente moins de 5 % du budget énergétique total (Tremblay *et al.*, 1998), cette composante physiologique sera ignorée dans cette étude, tel que suggéré par Bayne (1998) et Bayne *et al.* (1999).

Les moules ont été récoltées en mai 2000 et maintenues dans l'eau de mer (> 90 % de saturation en oxygène) à 3 conditions thermiques (-1 °C, 4 °C et 8 °C) pour une période de 21 jours dans les installations du Centre aquacole marin de Grande-Rivière. Pour chaque température, les moules étaient subdivisées en 18 groupes de 8 moules chacun. Chaque groupe de moules était disposé dans un bocal de 15 litres avec de l'aération. Les bocaux étaient disposés dans deux aquariums par température (bain-marie). Les moules étaient nourries de 10 000 cellules / ml avec un mélange 50 :50 de T-Iso et Chagra afin de mesurer l'acclimatation thermique du métabolisme maximum (Thompson et Bayne, 1972; Foster-Smith, 1975). Des mesures physiologiques ont été prises avant (environnement à 12 °C) et à 1 jour, 14 jours et 21 jours après le début de l'acclimatation. Le pas d'échantillonnage avait pour but d'évaluer le niveau d'acclimatation des moules. Dans la littérature, il est démontré que les moules s'acclimatent normalement après 14 jours suite à un choc thermique (Bayne 1976). Les mesures physiologiques étaient prises sur 24 moules par température provenant de seulement 9 bocaux par température (les 9 autres bocaux étaient utilisés pour acclimater les moules pour l'expérience des chocs thermiques). Des blancs, constitués de coquilles de moules vides, furent utilisés à chaque série de mesures physiologiques. À la fin de chaque série de mesures, les moules étaient sacrifiées pour la mesure de poids sec. Ainsi, les mesures obtenues à chaque semaine étaient réalisées sur différents individus.

Afin qu'elles s'habituent à leur nouvel environnement, les moules étaient laissées dans leur chambre métabolique en circuit fermé une heure avant le début des mesures physiologiques. La consommation d'oxygène a été déterminée grâce à des micro-oxymètres YSI et à des électrodes polarigraphiques YSI (5331). Le taux de filtration était caractérisé indirectement en déterminant au compteur de particules électroniques le nombre de particules ingérées par les moules. Finalement, le taux d'efficacité d'assimilation était mesuré par le ratio de Conover (1966) qui consiste principalement à faire le rapport entre le poids sec et de cendre de la nourriture sur le poids sec et de cendre des fèces. Le poids sec de chaque moule était déterminé pour pondérer les taux physiologiques pour un individu de masse standard à l'aide d'une équation allométrique. Afin de déterminer cette équation allométrique pour le stock de moules que nous utilisons, les mesures physiologiques ont été effectuées sur 90 moules entre 15,2 mm et 72,7 mm de longueur une semaine après la récolte. Pour cette analyse allométrique, les moules ont été laissées à la même température que celle de l'eau de mer au moment de la récolte, soit 12 °C.

Chocs thermiques

À la fin de la période d'acclimatation (21 jours), les moules provenant des 3 conditions de température (-1 °C, 4 °C et 8 °C) étaient transférées réciproquement dans chacune des conditions thermiques (Tableau 1). Pour chaque combinaison de transfert, les mesures de filtration étaient effectuées sur 16 moules. Les taux de filtration étaient mesurés sur la même moule à 2 heures et 72 heures après le choc

thermique. Le taux de filtration servait de mesure d'estimation du potentiel d'épuration.

Tableau 1 : Schéma du protocole expérimental employé pour les mesures de choc thermique

		Températures finales		
		-1 °C	4 °C	8 °C
Températures initiales	-1 °C	Témoins		
	4 °C		Témoins	
	8 °C			Témoins

Modèle mathématique

L'objectif de ce volet est de déterminer le temps nécessaire à une moule pour s'épurer complètement quel que soit le choc thermique subi. Nous considérons que le taux de filtration d'une moule témoin acclimatée à 8 °C et transférée à la même température, qui a subi les mêmes manipulations que les autres moules à toutes les combinaisons de choc thermique, fournit un volume cible de filtration indiquant une épuration complète après 48 heures. Ce volume cible sert de base pour déterminer combien de temps les moules des autres traitements prendront pour filtrer un volume d'eau équivalent.

Nous avons utilisé un programme mathématique permettant de calculer le temps nécessaire à une moule pour filtrer le volume cible eu égard aux divers traitements de choc thermique selon l'équation CR (t,m) avec $CR = am^b$, avec a variable dans le temps selon deux modèles, soit $a=b_0+b_1*t$ (modèle linéaire), soit $a= a_1*(1-b_2*exp(-kt))$ (modèle logarithmique). CR= taux de filtration. En connaissant le taux de filtration à 2 heures, celui à 72 heures ainsi que le taux de filtration témoin à la température finale, il est possible de résoudre l'aire sous la courbe en utilisant un modèle linéaire ou un modèle logarithmique (selon l'équation de von Bertalanffy). Cette dernière fonction est souvent utilisée pour décrire les modèles biologiques dynamiques et serait plus représentative, selon nous, d'une récupération ou accélération métabolique après un choc thermique. Le programme utilisé ainsi que la procédure à suivre pour obtenir des résultats avec le logiciel SAS® se retrouvent en annexe 1.

Analyse des données

Des analyses de régression simple ont été utilisées pour évaluer les relations entre les variables de poids secs avec les variables de la consommation d'oxygène, du taux de filtration, de la taille et du taux d'assimilation. Pour les trois premières variables, une transformation par la racine carrée a été nécessaire afin de répondre aux postulats de base de normalité et d'homogénéité des variances.

Une analyse de variance simple a été utilisée afin de vérifier si les variables de poids sec et de taille étaient réparties uniformément entre les températures d'acclimatation. Des transformations logarithmiques et de l'inverse (X^{-1}) ont été appliquées respectivement aux variables de poids sec et de taille afin de répondre aux postulats de base de normalité et d'homogénéité des variances.

Des analyses de variance de type hiérarchique (« *nested* ») ont été utilisées afin d'évaluer l'effet des facteurs de température d'acclimatation et de date suivant le début de l'acclimatation sur les variables du taux d'assimilation, de la consommation d'oxygène, du taux de filtration et du potentiel de croissance. Des transformations à la puissance carrée (X^2) au taux d'assimilation et par la racine carrée pour les trois autres variables [$(X+19)^{0,5}$, pour le potentiel de croissance] ont été appliquées afin de répondre aux postulats de base de normalité et d'homogénéité des variances. Le terme d'erreur approprié pour chaque source de variation a été utilisé.

Les résultats des taux de filtration suite aux chocs thermiques ont été comparés avec des comparaisons multiples LSmeans avec un seuil ajusté correspondant au nombre de comparaisons d'intérêt (12, soit $\alpha = 0,0041$).

Les postulats de base (normalité, homogénéité des variances) pour ces types d'analyses ont été respectés, après les transformations suggérées par un test Box-Cox, dans la majorité des analyses. Cependant, les variances n'étaient pas homogènes dans certains cas. Toutefois, l'analyse de variance est relativement robuste à l'hétéroscédaticité (Underwood, 1981), particulièrement lorsqu'il y a plusieurs répétitions et que le modèle est équilibré (Milliken et Johnson, 1992). La normalité des résidus a été vérifiée avec un test de Shapiro-Wilks (Zar, 1984). L'homogénéité de la variance a été vérifiée visuellement sur les résidus (Scherrer, 1984; Montgomery, 1991). Lorsqu'une source de variation était significative, des tests de comparaisons multiples *a posteriori* [LSmeans; (SAS® 1988)] ont été effectués au seuil ajusté α/dl (où dl est le degré de liberté associé au facteur testé) pour identifier les différences (correction de Bonferroni).

RÉSULTATS

Relations allométriques

Les résultats montrent des relations allométriques positives significatives entre le poids sec et la consommation d'oxygène ($p < 0,0001$; $R^2 = 0,4355$; Figure 6A), avec le taux de filtration ($p < 0,0001$; $R^2 = 0,5114$; Figure 6B) ainsi qu'avec la taille ($p < 0,0001$; $R^2 = 0,8631$). Il n'y a pas de relation significative entre le taux d'assimilation et le poids sec ($p = 0,6119$). Pour la consommation d'oxygène nous

avons utilisé une pente de 0,4973 (basée sur les mesures individuelles versus la masse sèche) pour la correction allométrique (Figure 6A). Pour la mesure de filtration nous avons utilisé une pente de 0,792 tel que déterminée par les mesures individuelles obtenues (Figure 6B).

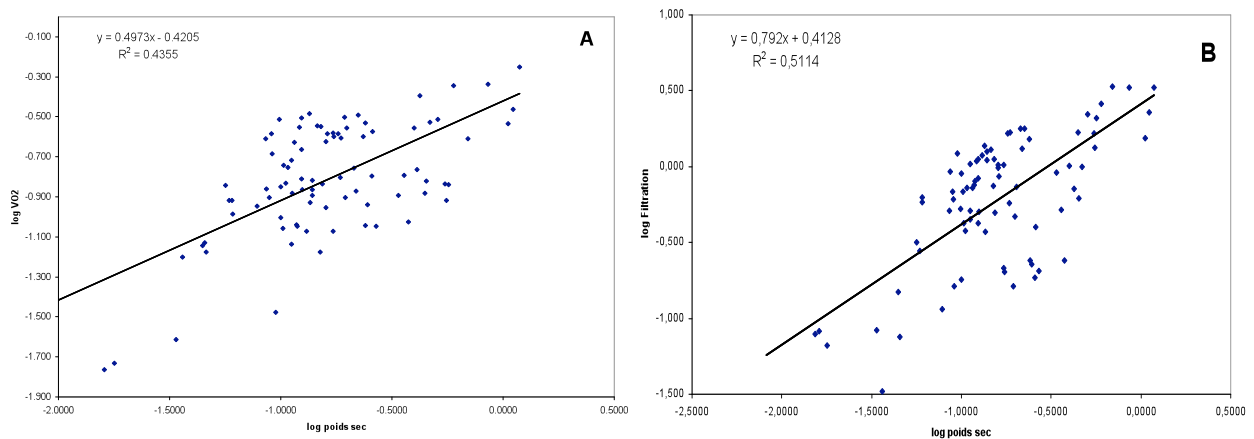


Figure 6 : Relation allométrique entre (A) la consommation d’oxygène et la masse sèche et (B) le taux de filtration et la masse sèche pour des moules récoltées à 12 °C et maintenues en laboratoire durant une semaine à 12 °C.

Acclimatation

Les résultats ont été récoltés sur un total de 269 moules de 51,2 mm à 70,9 mm. Pour chacun des traitements de température, les moyennes individuelles de poids secs et des tailles n’étaient pas significativement différentes ($p = 0,3768$; $p = 0,4446$ respectivement).

Facteur de température d’acclimatation

Les températures d’acclimatation des moules influencent significativement les valeurs d’assimilation, de taux de filtration et du potentiel de croissance. En effet, pour ces variables physiologiques, on retrouve des valeurs moins élevées à -1 °C, intermédiaires à 4 °C et les plus élevées à 8 °C (Figure 7C, 7I, 7L).

Facteur du temps suivant l’acclimatation

De façon générale, il y a une baisse des niveaux d’assimilation, du taux de filtration et du potentiel de croissance suite au début de l’acclimatation (Figure 7B, 7H, 7K). En effet, un jour après le début de l’acclimatation les variables affichent des valeurs

significativement inférieures aux autres dates, soit avant le transfert (environnement à 12 °C) et après 14 et 21 jours. Les résultats montrent qu'il y a récupération du taux d'assimilation et du potentiel de croissance après 14 jours suivant le début de l'acclimatation. Pour le taux de filtration, la récupération semble prendre au moins 21 jours.

Seule la consommation d'oxygène affiche une interaction significative (Figure 7D) entre la température d'acclimatation et le temps suivant le transfert. Les taux de consommation d'oxygène semblent généralement moins élevés un jour après le début de l'acclimatation et la récupération semble prendre plus de temps (21 jours) pour les moules transférées à 4 °C alors que 14 jours suffisent pour les moules aux autres températures.

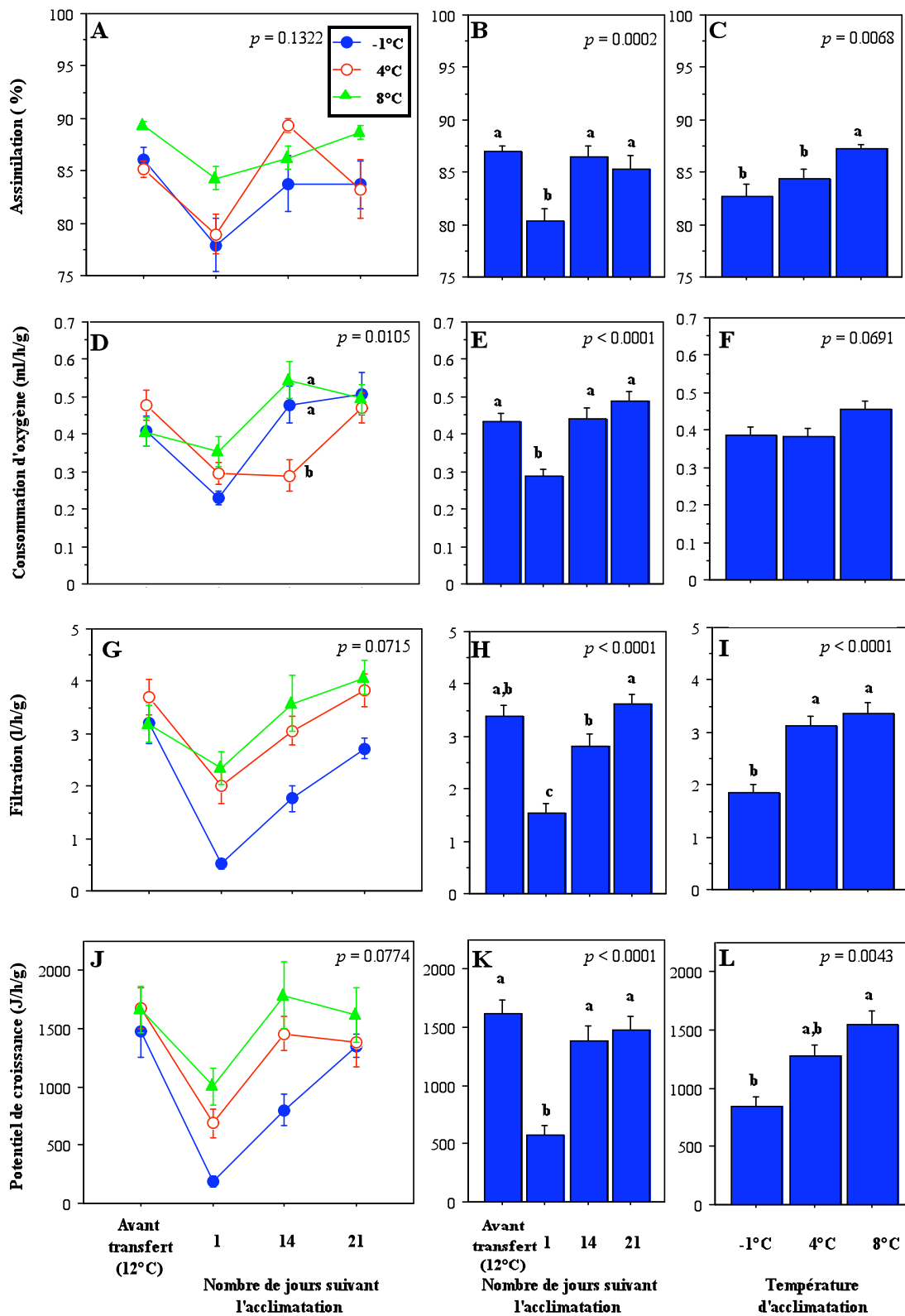


Figure 7 : Efficacité d'assimilation (%), consommation d'oxygène (ml d'O₂/ h / g), du taux de filtration (l/ h/ g) et potentiel de croissance (J/ h/ g) exprimés en fonction du temps suivant l'acclimation (avant le transfert et 1 jour, 14 jours et 21 jours d'acclimation) et de la température (T°C) d'acclimation (-1 °C, 4 °C et 8 °C) selon l'interaction temps * T °C (A,

D, G, J) et les variables seules du temps (B, E, H, K) et de la T°C (C, F, I, L). Pour les facteurs et/ou interactions significatifs, des lettres distinctes indiquent des valeurs statistiquement différentes, à un seuil de 5 %.

Chocs thermiques

Les résultats démontrent clairement, dans tous les cas, qu'un choc thermique positif (passage à une température plus élevée) entraîne une augmentation du taux de filtration. Inversement, un choc thermique négatif (passage à une température plus basse) engendre une baisse du taux de filtration (Figure 8). Des comparaisons multiples montrent qu'il n'y a pas de différence de taux de filtration entre 2 et 72 h des témoins (transférés à la même température) pour les trois températures -1 °C, 4 °C et 8 °C ($p = 0,6529$; $p = 0,5483$ et $p = 0,9861$ respectivement). Cependant, les moules acclimatées à -1 °C démontrent un taux de filtration plus bas comparativement aux moules acclimatées aux deux autres températures, soit 4 °C et 8 °C ($p = 0,0001$). Pour toutes les mesures physiologiques autre que les témoins (température initiale égale à la température finale de transfert), le transfert à -1 °C, 4 °C et 8 °C a entraîné une baisse significative des taux après 2 heures (Figure 8).

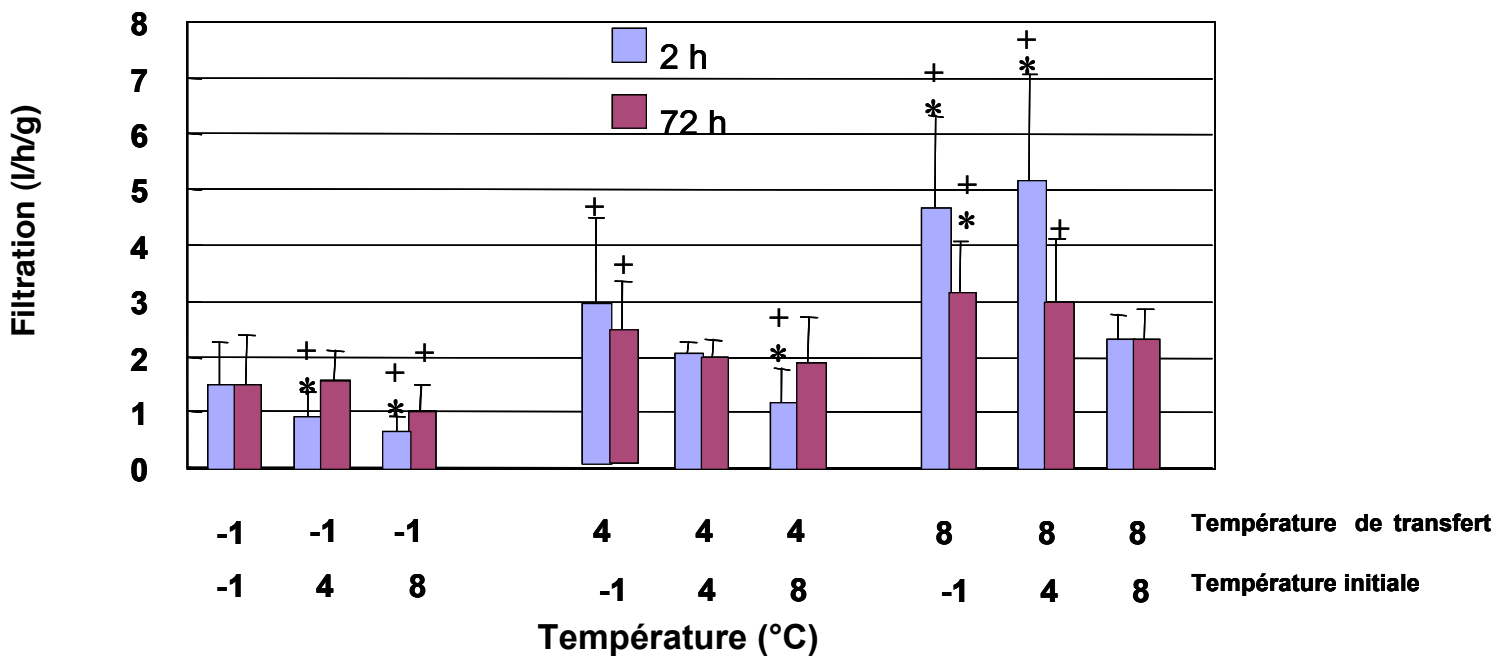


Figure 8 : Mesure du taux de filtration après 2 heures et 72 heures suite à un choc thermique en fonction des combinaisons de températures d'acclimation et de transfert. Un astérisque (*) au-dessus des barres indique des valeurs significativement différentes à un seuil de 5 %, suite à des comparaisons multiples, par rapport à la valeur témoin de la température






correspondante de transfert. Par exemple un transfert de -1 °C à -1 °C comparé à un transfert de 8 °C à -1 °C. Une croix (+) indique des différences significatives par rapport à la température correspondante d'acclimatation, soit la température initiale. Par exemple un transfert de 8 °C à -1 °C comparé à un transfert de 8 °C à 8 °C.

Modèle mathématique

Pour chacun des traitements de température initiale, les moules affichaient des valeurs légèrement différentes de moyennes individuelles de poids secs (-1 °C : 0,49 g; 4 °C : 0,56 g; 8 °C : 0,53 g; $p = 0,0025$) et de tailles (-1 °C : 59,1 mm; 4 °C : 60,8 mm; 8 °C : 59,6 mm; $p = 0,0001$). Même si ces différences sont significatives, elles restent minimales et ne peuvent influencer les réponses au niveau des taux de filtration après un choc thermique.

La valeur du taux de filtration dit « normal », suite à un transfert témoin de 8 à 8 °C, est de 2,3 l/h/g. Ainsi, ces moules sont en mesure de filtrer un volume de 110 litres durant une période de 48 heures (soit, $2,3 \times 48 \approx 110$). Ce volume sert de valeur cible pour toutes les autres moules et est utilisé dans le modèle afin d'estimer le temps nécessaire pour une épuration complète. Les résultats obtenus par le modèle mathématique sont présentés ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 : Tableau présentant les résultats obtenus par le modèle mathématique du temps en heure nécessaire à une moule pour filtrer un volume cible de 110 litres en fonction des différentes combinaisons de chocs thermiques. Les valeurs entre parenthèses représentent l'intervalle de confiance (± 1 l'erreur-type, soit de 68,26 %) obtenu du taux de filtration témoin de 8 à 8 °C.

		Températures de transfert				
		-1°C	4°C	8°C		
Températures d'origine	-1°C	73.4 (58.7 - 90.8)	40.5 (32 - 50.8)	25.7 (19.8 - 31.9)		< 1 jour
	4°C	87.5 (linéaire) (73 - 105)	54.1 (43.3 - 68.9)	23.5 (18.4 - 30)		1-2 jours
	8°C	115.3 (97 - 137.6)	68.8 (56.9 - 82.6)	47.5 (38 - 58.7)		2-3 jours
						3-4 jours
					> 4 jours	

DISCUSSION ET CONCLUSION

Nos résultats démontrent que les moules d'élevage de la baie de Gaspé s'adaptent généralement bien aux températures froides rencontrées l'automne et le printemps dans les eaux du Golfe du Saint-Laurent, période qui est visée pour l'exploitation de l'usine d'épuration de moule. Ainsi, une période de 14 jours est généralement suffisante pour permettre aux moules de s'acclimater à un changement de température (Figure 7), ce qui correspond à la description obtenue dans la littérature (voir revue de Bayne, 1976). Cependant, les mesures physiologiques prises à la température hivernale de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ indiquent que l'acclimation n'est pas complète après 21 jours. Il en résulte un taux de filtration et un potentiel de croissance significativement moins élevés pour les moules à $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ comparativement aux moules à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. En conclusion, pour des températures entre $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ le temps d'épuration devrait être le même, soit environ 48 heures. Toutefois, à des températures de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ le temps d'épuration via les processus de défécation et de digestion extracellulaire, estimé dans cette étude par le taux de filtration et le potentiel de croissance, devrait être plus long et devrait être estimé, avec le modèle mathématique, à 73,4 h au lieu de 48 h, soit une augmentation de 54 %.

Nous observons également que les chocs thermiques ont un impact direct sur le taux de filtration des moules et donc probablement sur leur potentiel d'épuration aux coliformes fécaux. On remarquera que, pour un transfert vers une température plus élevée, le temps pour filtrer un volume ciblé de 110 litres est inférieur à 2 jours. À titre d'exemple, un transfert de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ fournit un temps de filtration du volume cible de 43 % du temps d'un transfert témoin à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit seulement 23,5 heures. Inversement, on notera que pour un transfert vers une température plus basse, le temps pour filtrer le volume cible est considérablement augmenté. Ainsi, pour une moule à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, un transfert vers une eau à $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ induit une augmentation de 62 % du temps de filtration du volume cible nécessaire pour une épuration complète, soit 87,5 heures.

Ainsi, si la moule subit un choc thermique négatif de quelques degrés, entraîné par des variations de la température de l'eau entre le site de récolte et le site d'épuration, le temps nécessaire pour une épuration complète peut être considérablement plus long. On estime que pour un passage de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ le temps nécessaire à une moule pour filtrer le même volume d'eau qu'une moule restant 48 heures à $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de 68,8 h. Inversement une moule subissant un choc thermique positif devrait s'épurer à un taux significativement plus élevé (démonstré également par Boulter et Wilson, 1998). Ces résultats nous indiquent clairement que lors de l'opération commerciale d'une usine d'épuration les chocs thermiques subis par les moules doivent être pris en compte dans la gestion des opérations.

L'opération d'épuration ou de purification contrôlée à l'échelle commerciale augmente les coûts de production de l'ordre de 16-20 % (Cerebral Marine

Research, 1990). Dans une production où les profits sont marginaux, telle que la mytiliculture, le choix de chauffer l'eau ou d'attendre une période d'épuration adéquate devra donc être évalué avec précaution.

Les mesures prises lors de cette expérience ont été effectuées sur des moules qui ont été nourries durant la totalité de l'expérience. Comme le taux de filtration est également dépendant de la quantité de nourriture disponible dans l'eau, l'épuration des moules dans des conditions de stress nutritionnel (concentration de chlorophylle $< 1 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) pourrait entraîner des baisses importantes du métabolisme qui ralentiraient dramatiquement le temps d'épuration. Toutefois, des mesures si faibles de chlorophylle sont habituellement observées seulement l'hiver sous couvert de glace (Hatcher *et al.*, 1997).

Finalement, nous recommandons que les résultats obtenus par l'application de ce modèle mathématique soient validés par des essais d'épuration de moules contaminées, de façon à tenir compte de la cinétique bactérienne.

REMERCIEMENTS

Les personnes suivantes doivent être remerciées :

M. Marc-André Roy et Mme Arianne Savoie, responsables des mesures physiologiques effectuées sur les moules;

M Gaétan Daigle, du Service de consultation statistique de l'Université Laval, pour son implication au niveau de l'élaboration du modèle mathématique;

M. Stéphane Morrissette, de Moules Forillon, pour avoir gracieusement fourni les moules nécessaires à l'expérimentation;

Mme Suzanne Bourget, technicienne en algologie, pour la production de phytoplancton nécessaire à l'alimentation des moules;

M. Réjean Boudreault, technicien en métrologie au Centre aquacole marin de Grande-Rivière, pour l'aide apportée à la conception et à la réalisation du montage expérimental.

RÉFÉRENCES

- Bayne, B. L. 1976. Physiology 1. Marine mussels: Their ecology and physiology. B. L. Bayne. New York, Cambridge University Press: 121-207.
- Bayne, B. L. 1998. The physiology of suspension feeding by bivalve molluscs: an introduction to the Plymouth " TROPHEE" workshop. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 219: 1-19.
- Bayne, B. L., Hedgecock, D. McGoldrick et R. Rees. 1999. Feeding behaviour and metabolic efficiency contribute to growth heterosis in Pacific oysters [*Crassostrea gigas* (Thunberg)]. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 233: 115-130.
- Bayne, B. L. et J. Widdows. 1978. The physiological ecology of two populations of *Mytilus edulis* L. Oecologia 37: 137-162.
- Bernard, F. R. 1989. Uptake and elimination of coliform bacteria by four marine bivalve mollusks. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 46: 1592-1599.
- Blackstock, J. 1984. Biochemical metabolic regulatory responses of marine invertebrates to natural environmental change and marine pollution. Oceanogr. Mar. Biol. Ass. Rev. 22: 263-313.
- Boulter, M. et P. Wilson. 1998. The use physiological assessment techniques for determining the relative activity rates of bivalve shellfish during simulated depuration. J. Shell. Res. 17: 1627-1631.
- Cerebral Marine Research. 1990. A guide to the design, construction & operation of a bivalve shellfish depuration facility for British Columbia, Ministry of Agriculture and Fisheries, Aquaculture and Commercial Fisheries Branch, Province of British Columbia, Canada.
- Conover, R. J. 1966. Assimilation of organic matter by zooplankton. Limnol. Oceanogr. 338-355.
- Conway, N. 1987. Occurrence of lysozyme in the common cockle *Cerastoderma edule* and the effect of the tidal cycle on lysozyme activity. Mar. Biol. 95: 231-235.
- Desbiens, M., G. Imbeault et S. Thibault. 2000. Relevés de population microbiologique dans la baie de Gaspé 1998-1999. MAPA - Pêcheries DIT - Doc. rech. 2000/01: 1-19.

- Deslous-Paoli, J.-M. 1993. Physiologie alimentaire des coquillages:conséquences sanitaires. Dans Coquillage. Éditeur : P. Elziere-Papayanni. Paris, Information techniques des services vétérinaires français: 208-220.
- Foster-Smith, R. L. 1975. The effect of concentration of suspension on the filtration rates and pseudofaecal production for *Mytilus edulis* L., *Cerastoderma edule* (L.) and *Venerupis pullastra*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 17: 1-22.
- Furfari, S. A. 1966. Depuration plant design. Washington,D.C :Public health service, division of environmental engineering and food protection: 119.
- Hatcher, A., J. Grant et B. Schofield. 1997. Seasonal changes in the metabolism of cultured mussels (*Mytilus edulis*) from a Nova Scotian inlet : the effects of winter ice cover and nutritive stress. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 217: 63-78.
- Haven, D. S., F. O. Perkins, et al. 1978. Bacterial depuration by the american oyster under controlled conditions. Gulf regional library. Fisheries and Oceans.
- Hawkins, J. S. et B. L. Bayne. 1992. Physiological interrelations, and the regulation of production. In, the mussel *Mytilus*: ecology, physiology, genetics and culture. E. G. Elsevier. New York. Development in aquaculture and fisheries science. 25: 171-222.
- Lewis, G. et M. W. Loutit. 1986. Enteroviruses in mussels and marine sediments and depuration of naturally accumulated viruses by green lipped mussels (*Perna canaliculus*). New Zeland journal of marine and Freswater research 20: 431-437.
- McHenery, J. G., T.H. Birkbeck et J.A. Allen. 1979. The occurrence of lysozyme in marine bivalves. Comp. Biochem. Physiol. 63B: 25-28.
- McHenery, J. G. et T. H. Birkbeck. 1982. Characterization of the lysozyme of *Mytilus edulis* (L). Comp. Biochem. Physiol. 71B: 583-589.
- Milliken G.A. et D.E. Johnson DE. 1992. Analylis of messy data. Van Nostrand Reihold, New York
- Minet, J., T. Barbosa, D. Prieur et M. Cormier. 1987. The nature of the bacteria concentration process by the mussel, *Mytilus edulis* (L). C.R. Acad. Sci. 305: 351-354.
- Montgomery, D.C. 1991. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, Toronto

- Perkins, F. O., D.S. Haven, R. Morales-Alamo et M.W. Rhodes. 1980. Uptake and elimination of bacteria in shellfish. *J. Food Pro.* 43: 124-126.
- Plusquellec, A., M. Beucher, D.Prieur, et Y. Le gal. 1990. Contamination of the mussels, *Mytilus edulis* linnaeus,1758, by enteric bacteria. *J. Shelfish Res.* 9 : 95-101.
- Power, U. F., et J.K. Collins. 1989. Differential depuration of poliovirus, *Escherichia coli*, and a coliphage by the Common Mussel, *Mytilus edulis*. *Appl. Environ. Microbiol.*: 1386-1390.
- Power, U. F., et J.K. Collins. 1990. Tissue distribution of a coliphage and *Escherichia coli* in mussels after contamination and depuration. *Appl. Environ. Microbiol.*: 803-807.
- Prieur, D., G. Mevel, J.-L. Nicolas, A. Plusquellec et M. Vigneulle. 1990. Interractions between bivalve molluscs and bacteria in the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 28: 277-352.
- SAS. 1988. SAS/STAT User's Guide. SAS Institute Inc, Cary, NC
- Scherrer, B. 1984. Biostatistique. Gaëtan Morin, Montréal
- Smaal, A.C., A.P.M.A. Vonck and M. Bakke. 1997. Seasonal variation in physiological energetics of *Mytilus edulis* and *Cerastoderma edule* of different size classes. *J. Mar. Biol. Ass.U.K* 77: 817-838.
- Thompson, R. J. et. B. L. Bayne. 1972. Active metabolism associated with feeding in the mussel *Mytilus edulis* L. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 9: 111-124.
- Tremblay, R., B. Myrand, J-M. Sévigny et H. Guderley. 1998. Bioenergetic and genetic parameters in relation to susceptibility of blue mussels, *Mytilus edulis* (L.) to summer mortality. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 221: 27-58.
- Trollope, D. R., et D.L. Webber. 1977. Shellfish bacteriology: coliform and marine bacteria in cockles (*Cardium edule*), mussels (*Mytilus edulis*) and *Scrobicularia plana*. Dans *Problems of a small estuary*. Éditeur : A. Nelson-Smith and E.M. Bridges. U.K., Swansea University College: 1-18.
- Underwood, A.J. 1981. Techniques of analysis of variance in experimental marine biology and ecology. Dans *Oceanography and marine biology: an annual review*. Éditeur : M-Barnes Aberdeen University Press, p 513-605

Widdows, J. 1978. Combined effects of body size, food concentration and season on the physiology of *Mytilus edulis*. J. Mar. Biol. Ass. 58: 109-124.

Widdows, J. et. D. Johnson. 1988. Physiological energetics of *Mytilus edulis*: Scope for growth. Mar. Ecol. Prog. Ser. 46: 113-121.

Wilson, P., D. Lees et W. Doré. 1992. Artificial dosing of bivalve molluscs with *E. coli* for the testing of purification tanks. Seafish report 413: 15.

Wood, P. C. 1957. Factors affecting the pollution and self-purification of molluscan shellfish. J. Cons. Int. Explor. Mer 22: 200-208.

Zar, J.H. 1984. Biostatistical analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

Annexe 1 : Programmation du modèle mathématique, par Gaétan Daigle (département de Mathématique et statistiques de l'Université Laval)

Le programme ci-bas, pour son utilisation, doit être exécuté (de la première à la dernière ligne) une première fois dans le logiciel statistique SAS®. Par la suite, pour obtenir un résultat, il faut soumettre une ligne dans laquelle, on doit indiquer les taux de filtration obtenus après 2 heures (en **X**), 72 heures (en **Y**), le taux de filtration témoin à la température de transfert (en **Z**) et le volume à filtrer (en **A**).

- **Le programme débute ici :**

```
options nodate nonumber;
%macro analyse(taux2=, taux72=, limite=, volfiltr=);
data lecture;
  taux2=&taux2; taux72=&taux72; limite=&limite; volfiltr=&volfiltr;
  k = -log((limite-taux72)/(limite-taux2))/70;
  b = (1-taux2/limite)/exp(-2*k);
  a = limite;
run;

data graph;
set lecture;
do temps=0 to 504 by 1;
  predite=limite*(1-b*exp(-k*temps));
  if temps=2 then taux=taux2;
  else if temps=72 then taux=taux72;
  else taux=.;
  output;
end;
run;

symbol1 v=square i=none cv=black ci=black;
symbol2 v=none i=join ci=black;
proc gplot data=graph;
  title "Equation de la courbe: y=a*(1-b*exp(-kt))";
  plot taux*temps PREDITE*temps/overlay vref=&limite cvref=red lvref=2;
run;

*** Calcul du temps pour filter un certain volume d eau (v);
data volume;
set lecture;
t0=0; v0=0; deltat=1; maxiter=500;
do i=1 to maxiter;
  t1=t0+deltat;
  deltav = limite*(k*deltat+b*(exp(-k*t1)-exp(-k*t0)))/k;
  v1 = v0 + deltav;
  if abs(v1-volfiltr)<1e-8 then goto stop;
  if v1<volfiltr then do;
    t0 = t1; v0 = v1;
  end;
  else deltat=deltat/2;
end;
stop: volume=limite*(k*t1+b*exp(-k*t1)-b)/k;
run;

proc print data=volume label noobs;
title "Equation de la courbe: y=a*(1-b*exp(-kt))";
label t1="# heures nécessaire"
  volume="Volume d'eau filtré"
  a="a" b="b" k="k";
```

```

var taux2 taux72 a b k t1 volume;
run;

**** Estimation par deux segments de droite ****;
data droite;
  set lecture;
  b1 = (taux72-taux2)/70; b0=(36*taux2-taux72)/35;
  x = (limite-b0)/b1;
run;

data graph2;
  set droite;
  do temps=0 to 504 by 1;
    if temps<=x then predite=b0 + b1*temps;
    else predite=a;
    if temps=2 then taux=taux2;
    else if temps=72 then taux=taux72;
    else taux=.;
    output;
  end;
run;

symbol1 v=square i=none cv=black ci=black;
symbol2 v=none i=join ci=black;
proc gplot data=graph2;
  title "Equation de la droite";
  title2 "y = b0 + b1*t, si t<=x";
  title3 "y = a , si t >x";
  plot taux*temps PREDITE*temps/overlay vref=&limite cvref=red lvref=2;
run;

**** Calcul du nombre heures pour un certain volume ****;
data volume2;
  set droite;
  volumex = b0*x + b1*x*x/2;
  if volfiltr <= volumex then temps=(-b0+sqrt(b0*b0 + 2*b1*volfiltr))/b1;
  else temps = (volfiltr-volumex)/a + x;
run;

proc print data=volume2 label noobs;
  title "Equation des droites: y=b0 + b1*t, t<=x et y=a, t>x";
  label temps="# heures nécessaire"
        volfiltr="Volume d'eau filtré"
        b0="b0" b1="b1" x="x" volumex="Volume(x)";
  var taux2 taux72 b0 b1 x a volumex temps volfiltr;
run;
% mend;

```

- **Le programme s'arrête ici**

- **Ligne à soumettre pour obtenir un résultat :**

```
% analyse(taux2=X, taux72=Y, limite=Z, volfiltr=A);
```

Par exemple, si on veut obtenir le temps que prendra une moule pour filtrer 110 litres suite à un transfert de -1 à 8 °C on soumettra la ligne suivante :

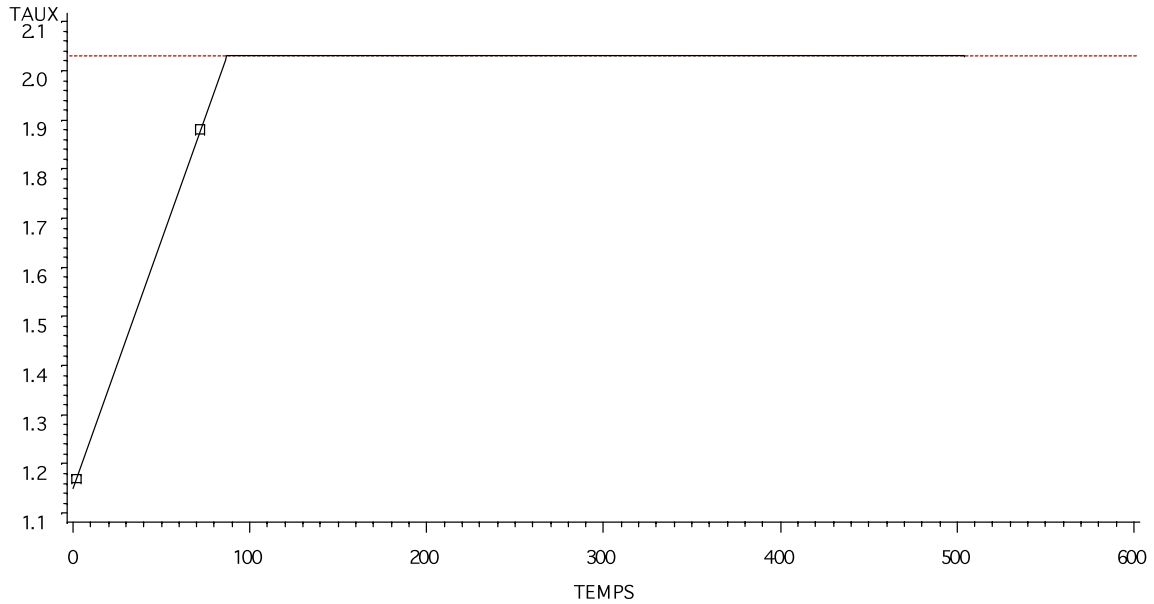
```
% analyse(taux2=4.6, taux72=3.2, limite=2.3, volfiltr=110);
```

Après l'exécution de la ligne, on obtient deux graphiques, l'un pour un modèle avec une droite et un autre avec un modèle avec une courbe.

Exemple pour un transfert de 8 à 4 °C, modèle de calcul par une droite.

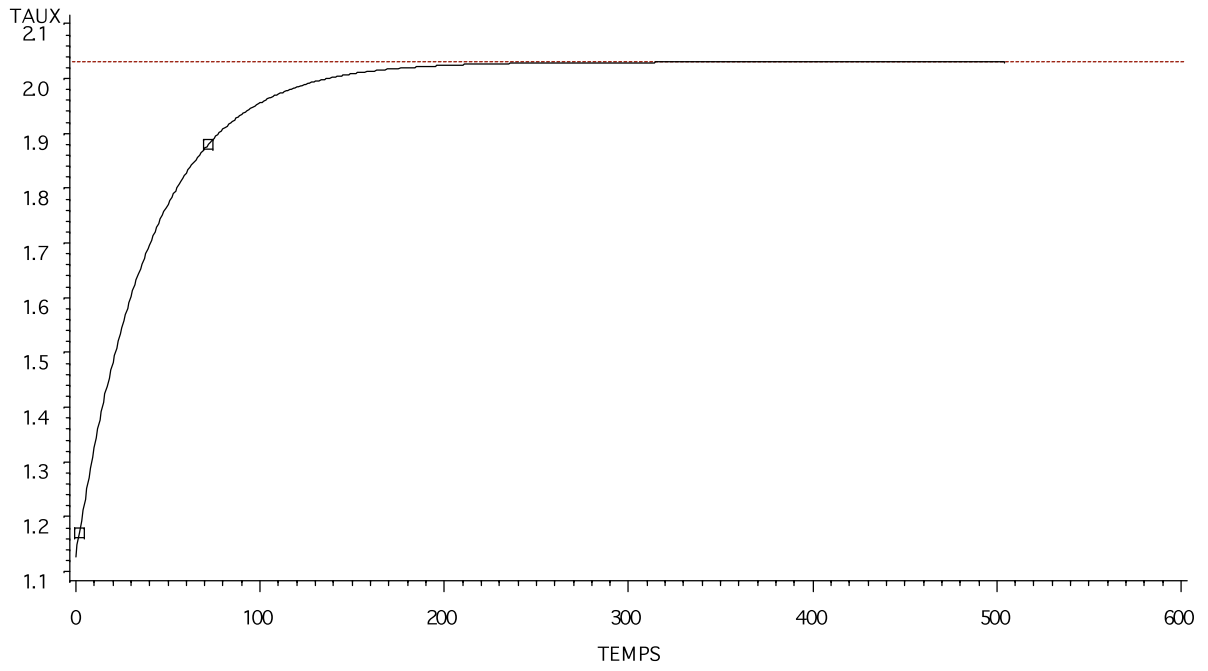
Equation de la droite

$$y = b_0 + b_1 \cdot t, \text{ si } t \leq x$$
$$y = a, \text{ si } t > x$$



Exemple pour un transfert de 8 à 4 °C, modèle de calcul par une courbe.

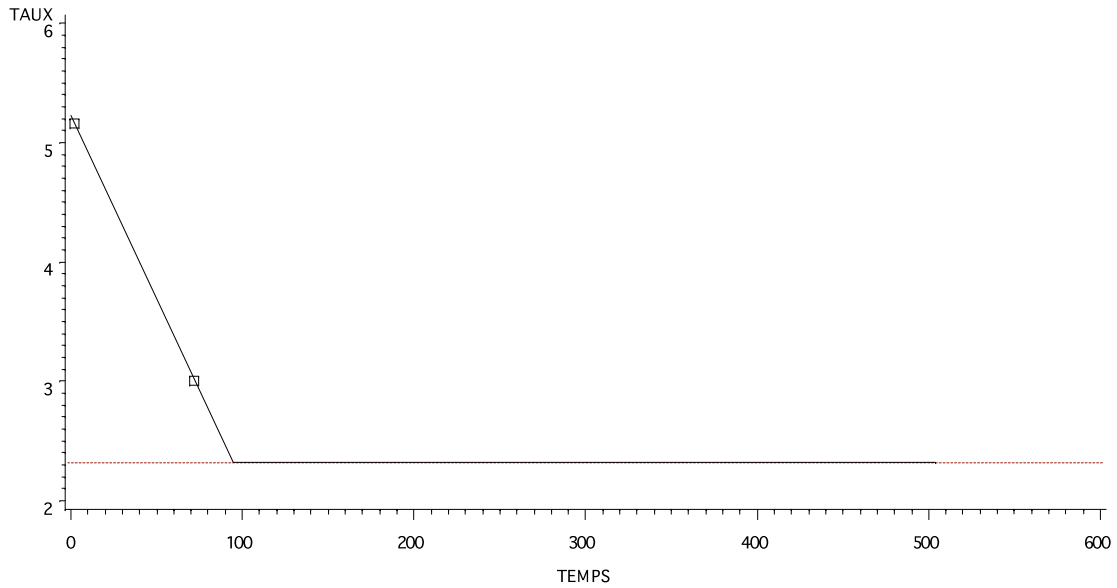
Equation de la courbe: $y = a \cdot (1 - b \cdot \exp(-kt))$



Exemple pour un transfert de 4 à 8 °C, modèle de calcul par une droite.

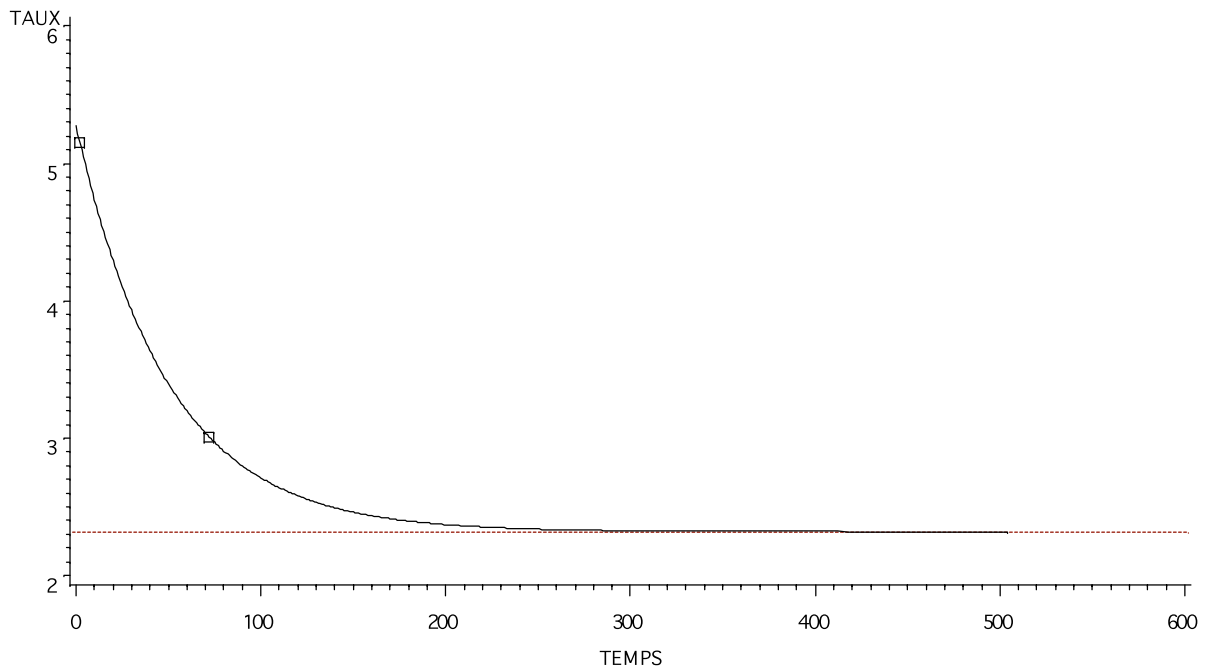
Equation de la droite

$$y = b_0 + b_1 \cdot t, \text{ si } t \leq x$$
$$y = a, \text{ si } t > x$$



Exemple pour un transfert de 4 à 8 °C, modèle de calcul par une courbe.

Equation de la courbe: $y = a \cdot (1 - b \cdot \exp(-kt))$



Exemple de tableau généré par le programme (avec transfert de 4 à 8 °C) :

Equation de la courbe: $y=a*(1-b*\exp(-kt))$

TAUX2	TAUX72	a	b	k	# heures nécessaire	Volume d'eau filtré
5.16	3.01	2.32	-1.27464	0.020212	23.5387	110.000

Equation des droites: $y=b_0 + b_1*t, t \leq x$ et $y=a, t > x$

Volume d'eau TAUX2 filtré	TAUX72	b0	b1	x	A	Volume(x)	# heures nécessaire
5.16 110	3.01	5.22143	-0.030714	94.4651	2.32	356.201	22.5646

Nous pouvons donc obtenir une estimation du temps nécessaire à une moule pour filtrer un volume de 110 litres. Ainsi, avec ces résultats, dépendamment des modèles avec une courbe ou avec des droites, les moules prendront respectivement 23, 5 à 22, 6 heures pour filtrer un volume de 110 litres.