

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE

présenté

à

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (EAU)

comme exigence partielle

de la

Maîtrise ès Sciences (eau)

par

Raymond Lemieux B.Sc. Biologie

et

Dominique Rancèze B.Sc. Chimie

"Etude de la faisabilité de l'utilisation de lacs
comme sources de protéines."

Décembre 1978

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement monsieur Jean-Louis Sasseville pour ses conseils, sa collaboration et sa disponibilité dans la direction de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à monsieur H. Gérard Jones qui nous a conseillé lors de la réalisation de ce travail et monsieur Richard Couture qui a accepté de corriger le texte.

Nous remercions aussi monsieur André Rochette pour l'élaboration des figures et graphiques, mesdemoiselles Andrée Baillargeon et Helen Scott pour le travail de dactylographie et monsieur Magella Cantin pour les travaux d'édition et tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés à réaliser ce travail.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIERES.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
INTRODUCTION.....	vii
CHAPITRE I - UN PALLIATIF A UNE EVENTUELLE CRISE ALIMENTAIRE: LA CULTURE DE LA TRUITE INDIGENE	1
CHAPITRE II - UNE LOCALITE LACUSTRE: UN SYSTEME SOCIO-ECONOMIQUE AUTOSUFFISANT HARMONISE A SON ENVIRONNEMENT	9
2.1 Perception du système homme-lac	10
2.1.1 Le sous-système lacustre	12
2.1.2 Le sous-système socio-économique	18
2.1.3 Les interrelations entre le sous-système lacustre et le sous-système socio-économique	21
2.1.4 Relations du système avec son environnement	23
2.2 Production naturelle du lac	26
2.3 Evaluation de la limite supérieure de production	32
2.4 Contribution de la pisciculture	42
2.5 Effets sur le milieu	46
2.5.1 Effets sur la qualité de l'eau et sur le biota	47
2.5.2 Effets sur les interrelations homme-lac	54
CHAPITRE III - PREAMBULES	57

	<u>Page</u>
CHAPITRE IV - ETUDE D'UN CAS PARTICULIER: LE LAC MONTJOIE	63
CHAPITRE V - DISCUSSION	68
CONCLUSION	73
BIBLIOGRAPHIE	74
ANNEXE I	80

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>
1. Contenu nutritif en protéine brute de différentes espèces de poissons d'eau douce et d'eau salée, faisant ressortir l'importance de la struite pour sa qualité protéique (Anonyme, 1976).....	7

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>
1. Représentation de l'accroissement du déficit entre la production et la consommation de céréales pour les pays en voie de développement (tiré et adapté de Wortman, 1976).....	3
2. Représentation schématique du système, composé du sous-système socio-économique (défini par le bassin versant) et par le sous-système lacustre (défini par les eaux superficielles).....	11
3. Principales voies énergétiques de la production dans le sous-système lacustre. Toutes les pertes en chaleur indiquées par le symbole du "puits de chaleur" constituent une partie de l'emmagasinement d'énergie thermique dans le système.....	14
4. Principaux sentiers énergétiques de la production primaire.	16
5. Le sous-système socio-économique.....	19
6. Principales relations d'échanges du système avec son environnement.....	24
7. Détermination de la production de poissons à l'aide de l'indice morphoédaphique pour 35 lacs. La droite de régression en trait plein (1) rassemble les points d'une famille de 23 lacs dont l'intensité de pêche a été de moyenne à intensive. La droite de régression pointillée (2) est pour 11 lacs dont l'activité de pêche fut restreinte ou dont les données sont incomplètes (tiré de Ryder, 1965).....	29

8.	Essai de classification de quelques lacs Québécois suivant leur niveau trophique mettant en relation la charge annuelle en phosphore et le rapport profondeur moyenne (\bar{z}) sur le temps de renouvellement (T_w) (tiré de Potvin, 1976)..	38
9.	Relation entre la production totale primaire et la charge annuelle en phosphore (tiré de Vollenweider et al., 1974).	40
10.	Exemple d'aérateur utilisé par Fast (1973) lors de l'oxygénation des couches hypolimniques du lac Hemlock (tiré de Fast, 1973).....	49
11.	Teneur en oxygène dissous en surface, au fond et moyenne pour le lac Hemlock au cours de l'été 1969 (non oxygéné artificiellement) et au cours de l'été 1970 (oxygéné), (tiré de Fast, 1973).....	51
12.	Distribution de la truite arc-en-ciel et courbes isothermes du lac Hemlock avant oxygénation (été 1969) et après oxygénation (été 1970). Chaque point représente un poisson alors que les isothermes sont en degrés Celcius (tiré de Fast, 1973).....	52

INTRODUCTION

Aujourd'hui, et depuis longtemps d'ailleurs, le problème de l'alimentation est évident: il se manifeste, entre autres malaises, par la disparition des terres arables, les migrations rurales vers les centres urbains, une population mal alimentée, et, plus généralement, par un manque flagrant de politiques globales visant une exploitation plus rationnelle des ressources orientée vers une rentabilité socio-environnementale accrue. A l'origine de ce problème, et particulièrement en Amérique du Nord, il y a cette espèce de complaisance utopique entretenue par l'homme croyant à la surabondance des ressources. Plus encore, la production alimentaire se verra, dans l'avenir, confrontée à des problèmes d'instabilité climatique. En effet, on a enregistré, en 1970 et 1972, des valeurs extrêmes de température jusque-là inconnues (Hare, 1977); les tendances passées ne peuvent expliquer le climat actuel et ne se portent pas garantes du climat futur.

Réchauffement ou refroidissement, quelles que soient les tendances, l'agriculture, telle que nous la connaissons, et malgré toute la technologie en place, n'est pas prête à répondre adéquatement à une modification importante des conditions climatiques. Des changements aussi mineurs que 1.5°C inférieur aux moyennes annuelles des quarante (40) dernières années, provoquaient aux Etats-Unis une diminution de vingt pour cent (20%) de la production (Sergent, 1976).

De par son caractère social, ce problème d'envergure nationale est loin de laisser froid le consommateur québécois. Ce dernier n'a certes pas oublié l'augmentation des coûts de la livre d'oranges et de café associée à

des conditions climatiques inhabituelles qui ont détruit les récoltes. Cette dépendance des pays étrangers, couplée à l'instabilité de la production alimentaire en raison de climats précaires, rend impérieux le besoin d'interventions correctives.

Une solution à ce problème résiderait dans la formulation et sub-séquemment dans l'application de nouvelles politiques globales de l'alimentation et de l'aménagement du territoire.

C'est dans cet esprit que nous avons tenté, dans les pages qui suivent, d'évaluer la faisabilité d'une politique de gestion de l'utilisation de lacs comme sources de protéines. Pour y parvenir, nous avons fait ressortir les principaux éléments du système lacustre, sa capacité de production, et, finalement, la factibilité d'application d'une telle politique.

CHAPITRE I

UN PALLIATIF A UNE EVENTUELLE CRISE ALIMENTAIRE:

LA CULTURE DE LA TRUITE INDIGENE

Le climat terrestre a connu, sur des périodes géologiques, de grands bouleversements qui se sont traduits par l'alternance de périodes glaciaires et de périodes de réchauffement. Cependant, les observations faites sur les températures moyennes annuelles montrent clairement que le climat change aussi sur de plus courtes périodes. Ainsi, aux variations de température sur de grandes échelles de temps se superposent des variations plus rapides qui semblent relativement imprévisibles.

Une agriculture de plus en plus difficile

Toute activité biologique est conditionnée par la température.

L'agriculture n'échappe pas à cette règle:

"L'année 1972, par exemple, au cours de laquelle la moyenne de température a été inférieure de 1.5°C aux moyennes annuelles enregistrées de 1928 à 1970 (12.5°C au lieu de 14°C), a connu des rendements agricoles inférieurs de 15 à 20% à la normale, c'est-à-dire au rendement escompté en fonction des variétés semées et de la technologie mise en oeuvre."

(Sergent, J.P., 1976)

Dans son ouvrage intitulé "The Genesis Strategy", Schneider (1976) fait une analyse du climat, de la technologie, de la survie de l'homme, des crises liées au climat, des changements climatiques, des crises socio-économiques, et, plus généralement, des perturbations mondiales. Il termine sa préface en disant:

"La probabilité que se produise un grand désastre mondial, bien qu'elle soit difficile à quantifier, peut être aussi grande que 10%. Alors, ceux qui s'attendent à ce que le futur soit nécessairement sécuritaire, même si les tendances actuelles se poursuivent, ou ceux qui préfèrent attendre et voir, avant d'intervenir, ceux-là ne sont pas plus optimistes que les joueurs qui se plaisent à jouer à la roulette russe avec le futur du monde."

La très grande dépendance de la majorité des pays envers les principaux producteurs de blé (Etats-Unis, Canada et Australie) accroît démesurément les risques de calamité engendrés par les facteurs climatiques. A l'effet causé par les fluctuations de température sur la production agricole, s'ajoute celui créé par l'augmentation de la population. En effet, Wortman (1976) prévoit, pour les régions en voie de développement, un accroissement du déficit entre la production (calculée à partir de la tendance des années 1960-1961) et la consommation de céréales (basée sur la demande économique, figure 1).

La nécessaire intervention de l'Etat

Il apparaît de plus en plus évident qu'il est nécessaire, sinon d'intervenir pour faire face à un problème qui confronte la société actuelle à la survie et à la garantie du mieux-être, au moins de constater qu'un tel scénario est plausible et même probable.

Toutefois, son éventuelle réalisation sera surtout conditionnée par le comportement de l'industrie agricole, lui-même fortement assujéti aux conditions du milieu. Au Québec, un pourcentage considérable de la production alimentaire provient de l'extérieur du pays. *Afin de minimiser l'importance des effets entraînés par une crise alimentaire internationale,*

Céréales
en millions
de tonnes
métriques

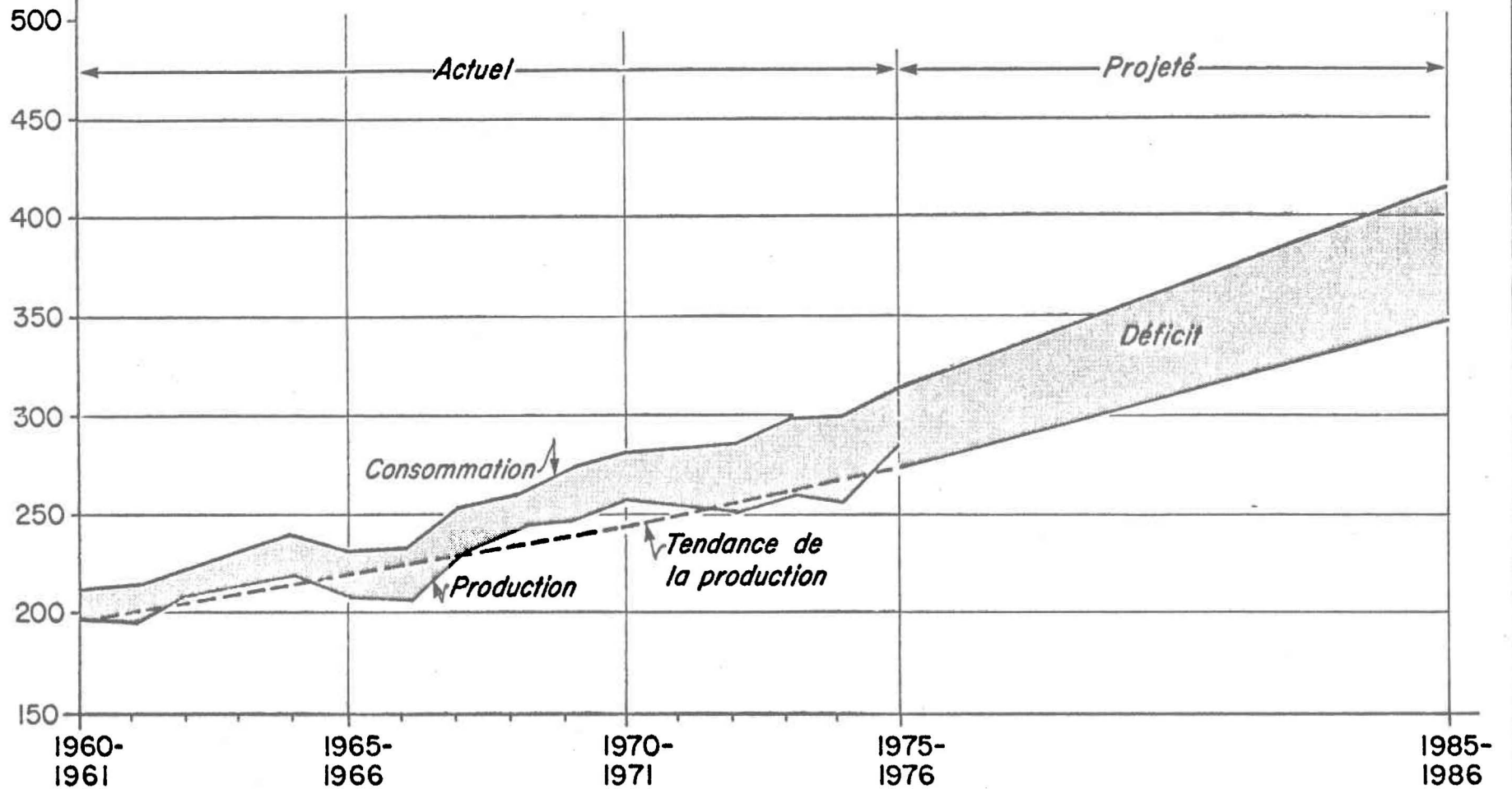


FIGURE 1. Représentation de l'accroissement du déficit entre la production et la consommation de céréales pour les pays en voie de développement, (Tiré et adapté de Wortman, 1976).

il apparaît essentiel d'intervenir rapidement de façon à s'engager sur la voie d'une plus grande autosuffisance dans la production de nos protéines.

Cette solution ne peut être envisagée si elle n'est pas accompagnée d'une sensibilisation de la population en matière de production, de conservation et de consommation qui sont à la base de l'activité humaine. L'intervention devrait donc viser à enrayer le gaspillage, véritable fléau des temps modernes, et accroître le potentiel de production par une mise en valeur rationnelle des richesses naturelles. Ici, évidemment, le souci du respect du milieu constituera un élément clé de la bonne administration des ressources.

L'acceptation de cet ensemble de principes fondamentaux permet d'envisager la nécessité d'une politique de gestion articulée sur la poursuite d'idéaux collectifs¹ et conçue de façon à être en mesure de contribuer à l'autosuffisance alimentaire, tant au plan local dans une première étape, qu'au plan national ultérieurement.

Dans ce contexte, une des contributions possibles du gestionnaire de l'eau nous apparaît être l'élaboration et l'opérationnalisation d'une stratégie de gestion des lacs, permettant entre autres choses l'obtention d'une protéine alimentaire.

¹ Ackoff et Emery (1972) décomposent l'idéal de qualité de vie en quatre sous-idéaux qui sont: l'Abondance, la Beauté, la Bonté et la Vérité. L'idéal d'abondance, sur lequel repose le système de valeurs de notre société contemporaine, représente l'acquisition de biens matériels et intellectuels. Cette notion, liée à celle de la propriété, existe depuis très longtemps chez l'homme. L'état de beauté réfère à l'esthétique du milieu environnant. Il est lié aux activités de récréation, loisirs, sports, arts, etc. La notion de bonté est prise au sens de justice sociale, dignité humaine et équité, alors que la recherche de la vérité s'applique dans le cadre de la poursuite des états de beauté, de bonté et d'abondance. Elle fait appel à la connaissance tant scientifique que sociale et environnementale.

Une protéine alimentaire adéquate multifonctionnelle: la truite

Le vivant est partagé en deux groupes: les organismes autotrophes (phytoplancton, macrophytes,...) et les organismes hétérotrophes (zooplankton, benthos, poissons,...). Ainsi, dans un lac, les flux énergétiques conduisent à la formation de deux types de protéines, l'une végétale, l'autre animale. Si la protéine animale, en l'occurrence le poisson, est un aliment qui constitue un mets fort convoité, à l'inverse, des recherches récentes ont montré que le goût de la population et les problèmes associés à la mécanisation sont deux obstacles à l'introduction de la protéine végétale dans l'alimentation.

Malgré que le rendement de la transformation énergétique dans le lac diminue lorsque l'on progresse dans la chaîne alimentaire, la protéine animale demeure avantageuse, sous certains aspects, à la protéine végétale. On peut mentionner, à titre d'exemple, que les céréales à grains sont en général déficientes en lysine, thréonine ou tryptophane, et certains légumes, pauvres en méthionine (Carlson et Polacco, 1975); ce type de déficience est généralement moins aigu dans la protéine animale. Ainsi, on ne peut condamner d'emblée tout effort visant à produire des protéines à des niveaux trophiques supérieurs.

Compte tenu du contexte actuel, et de la recherche continue de l'amélioration de la qualité de vie dans l'avenir, il apparaît essentiel qu'une politique de gestion de lacs comme sources de protéines s'oriente sur la production de protéines animales, et, en particulier, vers le poisson. Pour assurer le maintien du potentiel de production, l'ensemencement peut être envisagé comme type d'intervention.

Les seules espèces à être produites en pisciculture au Québec sont les suivantes: la truite brune (Salmo trutta L.), le maskinongé (Esox masquinongy M.), la truite arc-en-ciel (Salmo gairdneri R.), le saumon de l'Atlantique (Salmo salar L.), la ouananiche (Salmo salar L.), la truite mouchetée (Salvelinus fontinalis M.H.) et la truite grise (Salvelinus namaycush W.).

(Chevalier, R., 1977).

Parmi les principales espèces de poissons dont on fait l'élevage, il existe des variations dans le contenu protéique (tableau 1). On remarque que la truite présente le plus fort pourcentage en protéines et en portion comestible. Parmi les sept espèces mentionnées, les plus répandues sont la truite mouchetée et la truite arc-en-ciel. Toutes deux possèdent le même type d'habitat et se nourrissent des mêmes proies. La truite arc-en-ciel possède des facultés d'adaptation supérieures à celles de la truite mouchetée. Elle s'acclimata mieux à de plus fortes densités de population, à des variations élevées des conditions physico-chimiques, telles l'oxygène, la température, la salinité, etc.

Le comportement et la physiologie seuls ne permettent pas de distinguer avec suffisamment de certitude laquelle des deux espèces de salmonidés sera retenue dans le cadre d'une telle stratégie. Au Québec, la truite mouchetée est indigène, alors que la truite arc-en-ciel est originaire de la côte du Pacifique. Cette dernière est friande des oeufs du saumon de l'Atlantique et entre en compétition avec lui pour les sites de fraie. Pour ces raisons, elle ne peut être introduite au Québec.

En outre, de par sa grande capacité d'adaptation, elle serait en

TABEAU 1: Contenu nutritif en protéine brute de différentes espèces de poissons d'eau douce et d'eau salée, faisant ressortir l'importance de la truite pour sa qualité protéique (Anonyme, 1976).

ESPECES	PROTEINE BRUTE (% DU POIDS TOTAL)	PORTION COMESTIBLE (% DU POIDS TOTAL)
Carpe	10.3	53
Poissons chats	10.7	59
Chanos	14.2	69
Tilapia	7.1	38
Truite	14.4	70
Morue	9.7	57
Hareng	11.5	65

mesure de déplacer la truite mouchetée. L'aspect économique est le second point de distinction entre les deux espèces. La truite arc-en-ciel est commercialisée, alors que la truite mouchetée n'a pas été introduite sur le marché.

La truite mouchetée étant indigène, et la probabilité qu'elle soit introduite sur le marché supérieure à la probabilité que la truite arc-en-ciel soit répandue à travers le Québec, sont des raisons qui nous apparaissent suffisantes, dans un premier temps, pour sélectionner la truite mouchetée comme protéine luxueuse.

CHAPITRE II

UNE LOCALITE LACUSTRE:

UN SYSTEME SOCIO-ECONOMIQUE

AUTOSUFFISANT HARMONISE A SON ENVIRONNEMENT

Dans une situation de crise éventuelle, l'élaboration d'une intervention adéquate est d'autant plus difficile lorsqu'il s'agit d'implanter rapidement une *stratégie* de gestion qui, parce qu'elle s'applique à de nouvelles formes d'exploitation des ressources naturelles, fait appel à de nouvelles perceptions des relations homme-milieu.

Pour contourner cette difficulté, et parce qu'il est possible de prévoir des situations de crises, il est essentiel, dès maintenant, d'évaluer l'applicabilité d'une telle stratégie, d'autant plus qu'elle nécessite souvent de longues périodes de rodage qu'il est impossible de consentir en période de crise. C'est dans ce contexte qu'il est important d'aborder le problème par une étude préliminaire de la faisabilité de la stratégie de gestion.

Dans le cadre du développement de l'utilisation des lacs comme sources de protéines, il est important de reconnaître la nécessité d'appliquer de nouveaux outils de perception qui utilisent les connaissances actuelles en les intégrant en processus.

Pour ce faire, les outils de perception doivent permettre une meilleure caractérisation du système homme-milieu ainsi que des nombreuses interactions entre les différentes composantes.

La sémantique de H.T. Odum (1971) (voir annexe I) semble répondre à ces critères:

"Pour comprendre tout un système et l'ensemble des interactions entre ses constituants, nous devons utiliser un dénominateur qui exprime tous les flux et les processus ensemble. La puissance est un dénominateur à tous les processus et matériaux."

(Odum, H.T., 1971).

2.1 Perception du système homme-lac

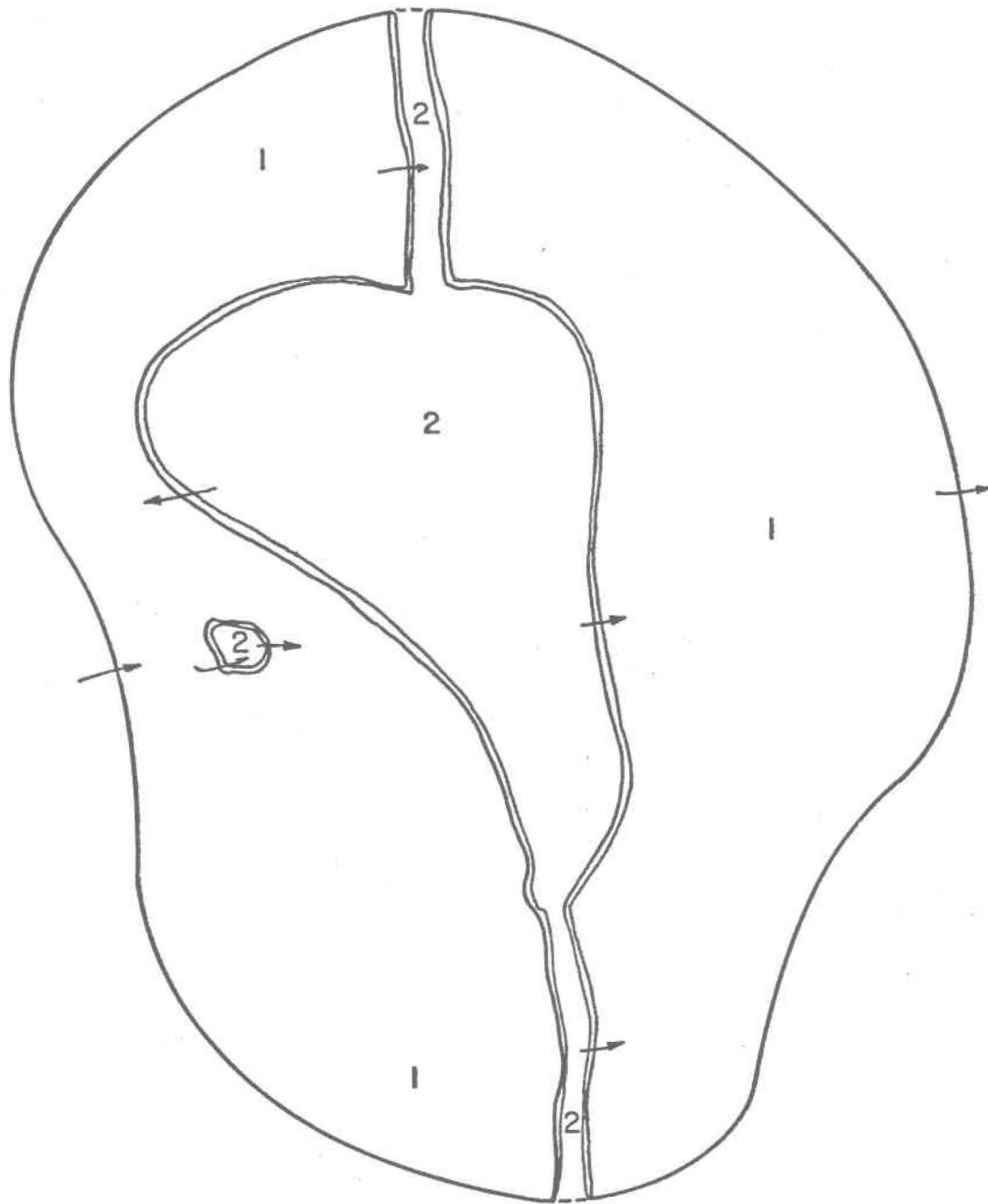
Le système envisagé ne se résume pas au seul instrument de transformation de l'énergie solaire en protéines que constitue le lac, mais comprend également la région avec laquelle il est en interaction, l'homme y puisant une partie des ressources nécessaires à ses activités. Les limites de la zone d'interaction évoquée précédemment seront réduites au périmètre du bassin versant du lac.

Afin de mieux percevoir la dynamique de l'ensemble "Bassin versant - Homme - Lac", le système sera divisé en deux sous-systèmes qui sont respectivement "le lac" et "l'homme + le bassin versant" auxquels la dénomination de "sous-système socio-économique" est attribuée.

Il existe pour chacun d'eux des relations d'échange qui peuvent être regroupées en deux classes (figure 2):

- interrelations entre les deux sous-systèmes,
- relations avec le milieu extérieur.

Pour bien percevoir le système, il paraît indispensable d'être en mesure de comprendre les comportements du sous-système lacustre et du sous-système socio-économique (homme + bassin versant) ainsi que de percevoir





-  Espace des échanges intrasystémiques
-  Espace des échanges extrasystémiques
- 1** Le sous-système socio-économique
- 2** Le sous-système lacustre

FIGURE 2. Représentation schématique du système, composé du sous-système socio-économique (défini par le bassin versant) et par le sous-système lacustre (défini par les eaux superficielles).

les interrelations entre eux et les relations avec le milieu extérieur qui définissent les contraintes appliquées sur chacun d'eux.

2.1.1 Le sous-système lacustre

Le choix du lac constitue un élément central de l'applicabilité de la *stratégie* de gestion. Mais avant de songer à récolter des protéines, il serait utile de savoir comment le lac les synthétise. De cette analyse se dégage l'ensemble des paramètres importants qui permettront de définir les critères de "bon fonctionnement".

Il est d'ores et déjà possible de les regrouper en trois classes distinctes:

- les facteurs sur lesquels aucune intervention humaine n'est envisageable aisément (classe 1): ce sont, par exemple, la morphométrie (forme, surface, volume, bathymétrie), le régime hydrologique, l'ensoleillement, la température de l'eau),
- les facteurs sur lesquels il est possible d'agir (classe 2): la qualité de l'eau (éléments nutritifs, pH, oxygène dissous), les espèces vivantes présentes,
- les facteurs présentant une moindre importance (classe 3): tenneurs en chlorure, sulfates, sodium.

Au cours d'une première analyse, les lacs retenus devront être naturellement compatibles avec les critères de "bon fonctionnement" de la classe 1.

Parmi les lacs choisis, les contraintes sociales, économiques et politiques seront prépondérantes sur les contraintes environnementales puisqu'il est possible d'envisager une *stratégie* d'intervention permettant de rehausser les facteurs de production (classe 2) au niveau des critères de "bon fonctionnement" du lac.

Les critères de "bon fonctionnement"

La sémantique développée par H.T. Odum (1971) permet une perception adéquate du système, car elle met en valeur le comportement des objets qui le composent en révélant les mécanismes d'interaction entre eux.

La figure 3 montre d'une façon très générale les principales relations existant à l'intérieur du sous-système étudié. Trois niveaux trophiques y sont représentés: les producteurs primaires (phytoplancton, macrophytes), les herbivores (zooplancton, poissons herbivores) et les carnivores (poissons). La source fondamentale d'énergie extérieure est le soleil, élément moteur du système. Les principaux contrôles se situent au niveau de la température et des éléments nutritifs.

Cette première représentation permet de dégager les paramètres qu'il est important de considérer pour évaluer la faisabilité de la stratégie.

Les relations entretenues par la truite avec son environnement sont d'ordre nutritionnel (source de nourriture) et métabolique (éléments non vivants assurant son maintien). D'une part, tous les organismes dans le lac, incluant la truite, dépendent directement ou indirectement des producteurs primaires. Malgré que les facteurs régulant la production primaire soient très nombreux, certains d'entre eux, tels l'intensité lumineuse, la température et les éléments nutritifs limitants jouent un rôle prépondérant. D'autre part, la température et l'oxygène dissous sont importants dans le métabolisme de la truite.

Lors de l'étude de la mise en place d'une *stratégie* de gestion des

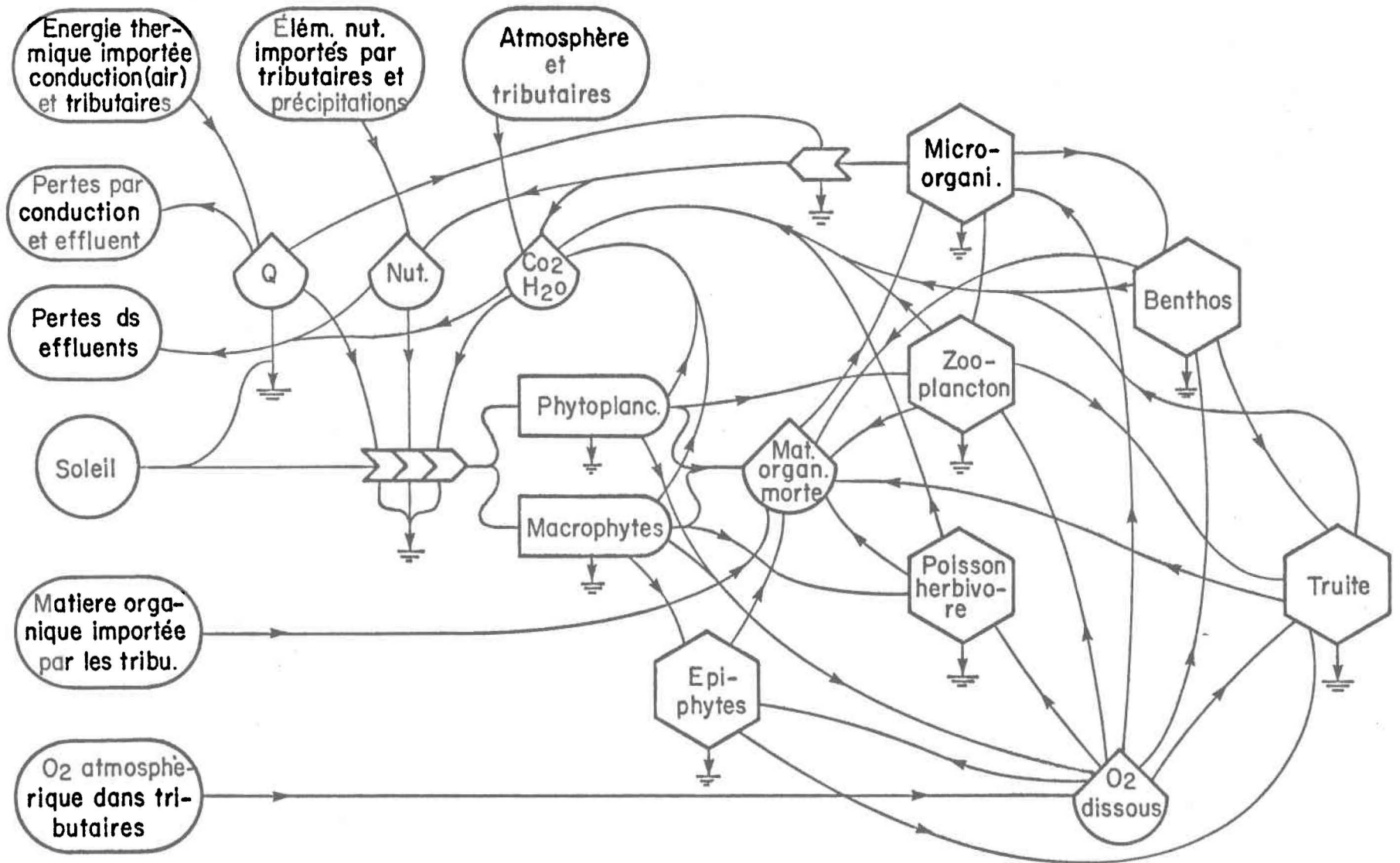


FIGURE 3. Principales voies énergétiques de la production dans le sous-système lacustre. Toutes les pertes en chaleur indiquées par le symbole du "puits de chaleur" constituent une partie de l'emmagasinement d'énergie thermique dans le système.

lacs comme sources de protéines, l'analyse des paramètres de base devra être poussée de façon à établir une meilleure rationalisation de l'usage des critères du choix du lac et à permettre l'élaboration d'une stratégie d'intervention en se référant à la biologie de la truite. Il serait fastidieux de décrire une telle méthodologie structurée permettant d'arriver "a priori" à un résultat hypothétique, et ceci au niveau d'une étude de faisabilité. Aussi, l'alternative est de traiter un des critères de "bon fonctionnement", tel, par exemple, la bathymétrie.

Le problème se pose ainsi: quelles caractéristiques bathymétriques doit posséder le lac type? Il est clair, à ce stade, qu'il n'est point question de donner des résultats numériques et encore moins sa morphométrie générale, mais plutôt d'essayer de comprendre comment la profondeur intervient dans les mécanismes de production biologique. La figure 4 est une représentation partielle de l'écosystème lacustre faite à l'aide de la sémantique de H.T. Odum (1971).

Le lac est divisé suivant la hauteur en strates fictives, chacune comprenant de la matière dissoute, de la matière vivante et non vivante en suspension et de l'énergie pure (énergie thermique, cinétique et potentielle). Chacune des strates entretient des relations énergétiques avec les sédiments constituant le lit du lac et avec lesquels elles sont en contact, de même qu'avec chacune des strates attenantes. La strate de surface (strate 1) est directement reliée au bassin versant (ruissellements, affluents, effluents,...) et à l'atmosphère (précipitations, vents,...).

Dans une strate donnée, la production primaire dépend essentiellement de l'énergie lumineuse y pénétrant, des quantités d'éléments nutritifs

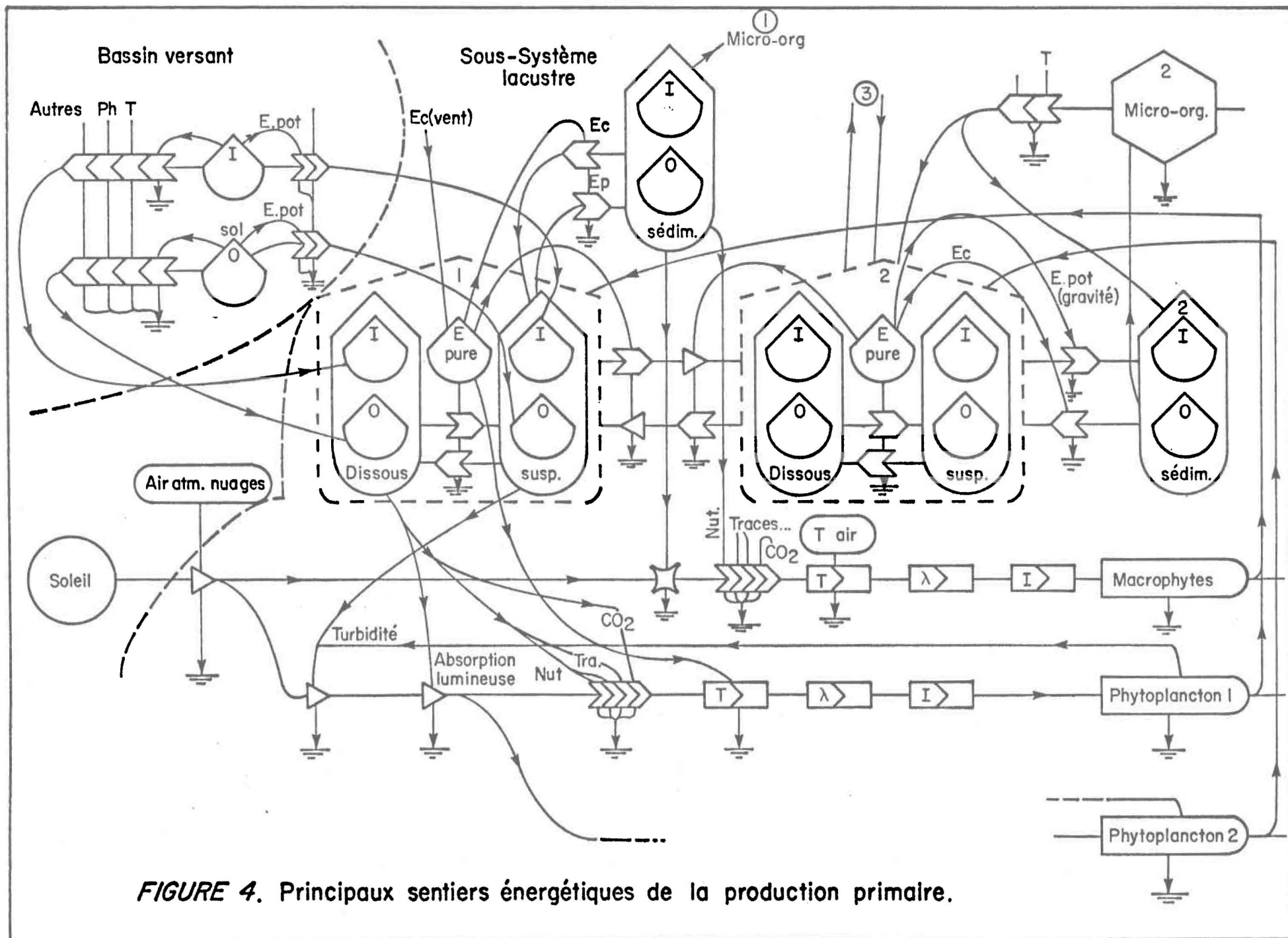


FIGURE 4. Principaux sentiers énergétiques de la production primaire.

disponibles et de la température.

L'énergie lumineuse entrant dans une strate est fonction de l'absorption, de la diffusion et de la réflexion intervenues dans chacune des strates précédemment traversées. Les solides en suspension contribuent à ces trois phénomènes, tandis que l'eau, la matière dissoute et les producteurs primaires agissent surtout au niveau de l'absorption. Il semble toutefois que les solides en suspension (organiques, inorganiques) soient les principaux responsables de la non-transparence de l'eau. Ceux-ci sont soumis à deux types de mouvements contraires: la sédimentation et la remise en suspension. Ce dernier a pour causes principales l'action du vent et les phénomènes thermiques de mélange.

A partir de la figure 4, on peut évaluer l'effet du vent sur les solides en suspension. L'accroissement d'énergie cinétique de la strate de surface (strate 1), occasionné par le vent, a pour conséquence l'ouverture de la vanne régulant le passage des sédiments constituant le lit du lac en contact avec la strate 1, vers l'état des solides en suspension. De plus, le vent a le même effet sur la vanne située entre cette même strate 1 et la strate 2 qui lui est adjacente, permettant ainsi un écoulement d'énergie cinétique de cette première vers cette deuxième. Pour les mêmes raisons que précédemment, les sédiments de fond en contact avec la strate 2 auront tendance à être mis en suspension.

Cependant, au niveau de chaque couche interviennent des pertes énergétiques par friction qui entraînent une diminution des effets du vent à mesure que la profondeur augmente.

Si l'on ne considère que ces seuls effets du vent sur la distribution des solides en suspension, le lac dont la bathymétrie correspondrait le mieux aux critères de bon fonctionnement devrait ne présenter qu'une faible turbidité (utilisation accrue de l'énergie solaire par les producteurs primaires). Pour cela, l'effet du vent doit le moins possible se faire sentir au niveau des sédiments. Un lac relativement profond, dont les premières strates ne comportent que peu de sédiments (pentes à forte inclinaison), semble convenir.

En considérant les paramètres autres que l'intensité lumineuse (sels nutritifs, température...), les résultats peuvent être totalement différents (par exemple, on reconnaît généralement, en limnologie, l'importance des zones littorales de faible profondeur pour la production). Dans un tel contexte, il est donc essentiel de tenir compte des interactions entre les facteurs qui permettent un bon fonctionnement. On peut ainsi les analyser de façon séparée, puis les intégrer afin de répondre au problème posé à propos de la bathymétrie du lac type.

De la même façon, il est possible d'aborder tous les aspects importants du sous-système lacustre, et, connaissant la biologie de la truite, ainsi que les diverses contraintes appliquées au système, d'établir les critères décisionnels en fonction des objectifs de la *stratégie* de gestion.

2.1.2 Le sous-système socio-économique

L'avènement d'une crise ne modifiera pas les besoins alimentaires de l'homme, bien qu'elle agira sur les flux énergétiques dans le système de production de protéines. La figure 5, qui est une représentation globale des principaux flux énergétiques se rattachant à l'alimentation, schématise

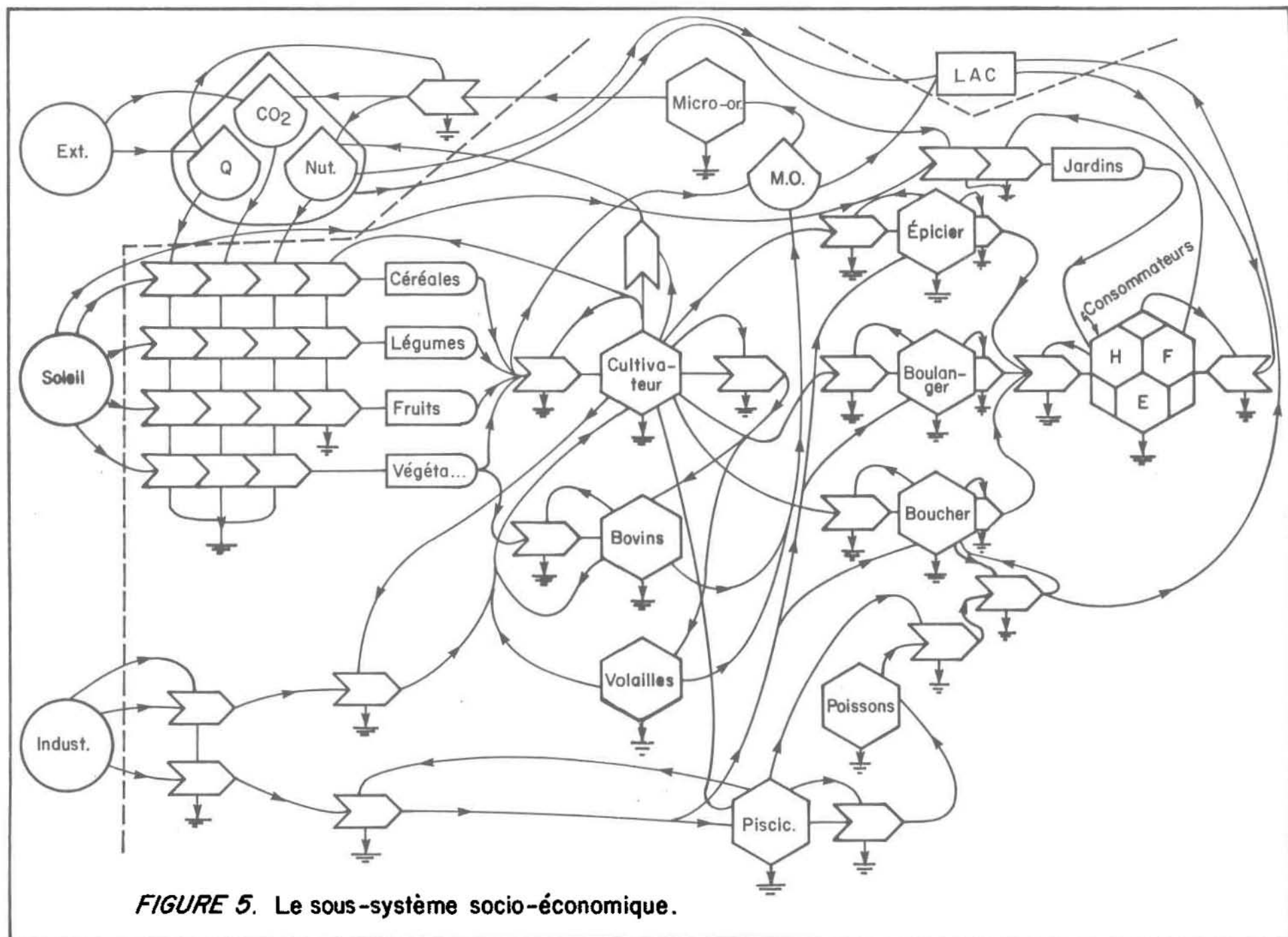


FIGURE 5. Le sous-système socio-économique.

la stratification de la distribution des sources alimentaires. McHale (1972) rapporte que la diète actuelle du Nord-Américain est essentiellement composée de protéines animales, de légumes, de céréales et sucre, de poisson et d'autres sources pour des apports respectifs de 58, 28, 20, 4 et 25 grammes de protéines per capita par jour.

En état de crise, certains de ces aliments, que l'on peut qualifier de "précieux" ou "luxueux", et provenant de l'extérieur du système, ne pourront plus être importés ou le seront à des prix inabordables. Les gens devront alors optimiser la production locale de protéines alimentaires. Petit à petit, ils adapteront leurs habitudes alimentaires aux ressources disponibles, soit en augmentant la consommation de certains aliments, soit en introduisant de nouveaux modes de production et de nouveaux produits.

C'est dans ce contexte que l'utilisation d'un lac comme source de protéines, surtout si la technologie est connue, pourra justifier l'ensemble des efforts et des investissements qui auront pu être consentis. La superficie et le volume d'un lac conditionneront la quantité d'apports en éléments nutritifs qu'il pourra recevoir, et, par voie de conséquence, le type d'utilisation de son bassin et du bassin situé en amont. Ceci nous amène à parler de l'utilisation du territoire. Dans l'optique d'une autosuffisance alimentaire, le rôle de l'agriculture locale sera revalorisé. Exception faite des importations de machinerie ou de tout autre produit de la technologie, elle constituera le siège de tous les échanges. L'habitant d'une telle région ira même jusqu'à entretenir des jardins ou intensifier la culture en serres, soit de façon individuelle ou par voie de coopérative. Malgré qu'il soit peu probable que des industries autres qu'artisanales ne viennent s'installer à l'intérieur du bassin versant, le développement de piscicultures,

même à grande échelle, est un élément important de bon fonctionnement du système envisagé.

Ce type d'entreprise (industrie agricole) sera exploité à des fins multiples, telles, par exemple: l'ensemencement du lac, si nécessaire, pour assurer le maintien de la biomasse, la production de poissons matures qui seront acheminés sur le marché local, régional ou même national. Il est évident que dans ce contexte, on doit envisager la production locale de moulée qui sera utilisée tant en pisciculture qu'en agriculture. De cette façon, non seulement on rentabilise davantage les opérations locales du système, mais on diminue les dépendances locales sur les fluctuations du marché extérieur. De façon générale, l'utilisation du territoire sera planifiée par un organisme local qui s'appuiera sur des politiques régionales, elles-mêmes établies à l'échelle nationale. On peut imaginer que la planification de l'utilisation du territoire se traduira par des zonages urbains, forestiers, etc.

En ce qui concerne les activités récréatives, elles ne seront limitées que lorsqu'elles nuiront à la vocation de production du lac. Au chapitre de la démographie, il est indispensable de s'interroger sur la population initiale qui pourra s'établir sur le territoire et les pratiques courantes de gestion servant à évaluer l'évolution de la population.¹

2.1.3 Les interrelations entre le sous-système lacustre et le sous-système socio-économique

La structure bio-géologique du bassin versant ainsi que son utilisation et l'utilisation du bassin versant en amont ont une influence consi-

¹ A titre d'exemple, pour les petits lacs, les embarcations motorisés seraient interdites alors que sur des lacs à superficie plus importante, on établirait des normes à respecter. Ceci accroît la nécessité d'avoir une certaine infrastructure administrative locale responsable de la surveillance et du contrôle des activités sur le lac, et plus généralement ayant un pouvoir d'intervention sur toute relation directe ou indirecte que l'homme entretient avec ce dernier.

dérable sur la composition physico-chimique du lac; à leur tour, le chimisme des eaux du lac, autant que sa structure morphologique, lui confèrent une potentialité de maintien d'une biomasse de producteurs primaires, d'herbivores et de carnivores.

Malgré la richesse du Québec en réserves d'eau douce, l'ichtyofaune y est très peu variée. Cependant, du point de vue du pêcheur, la qualité remplace la diversité. Malgré que l'abondance de poisson soit limitée par la rareté de sa nourriture, par la prédation, par sa mortalité naturelle, par le peu de sites de reproduction, par la rareté des abris, et, enfin, par les efforts de pêche soutenus, il est quand même possible d'en maintenir une biomasse supérieure à celle à laquelle on devrait normalement s'attendre en milieu naturel ou non-contrôlé. C'est en modifiant des relations déjà existantes et en en créant de nouvelles que l'on pourra parvenir à accroître la biomasse de poissons et à la maintenir dans le temps à un niveau désiré.

Dans le cadre de l'asservissement d'un lac comme source de protéines, la pêche demeurera une des activités les plus populaires, malgré les contraintes qui lui seront éventuellement imposées. L'alimentation en eau pour usage domestique pourra être faite à partir de la nappe phréatique ou à partir de nombreuses sources qui abondent généralement dans l'environnement des lacs. L'usage de l'eau du lac à cette fin pourra s'avérer, dans des régions où l'on prévoit un traitement, une garantie que l'homme verra au maintien de sa bonne qualité. Vu l'intensité de la culture, on peut envisager un arrosage et une irrigation. Toutefois, ces pratiques produisent généralement des eaux résiduaires riches en substances nutritives et en pesticides.

L'idéal d'abondance, qui, jusqu'à ce jour, se traduisait par la

jouissance de l'utilisation de la ressource eau en tant que bien de consommation et/ou par la jouissance de la pêche en tant qu'activité de loisirs, ne représente qu'une facette superficielle du lac et de son environnement. Il devra également être identifié aux composantes esthétiques. Ceci dans le but de faire davantage prendre conscience aux utilisateurs des "limites" des ressources dont ils jouissent.

2.1.4 Relation du système avec son environnement

Il n'est pas nécessaire d'entrevoir la totalité des voies d'échange entre le système et son environnement, mais plutôt celles présentant un intérêt plus immédiat dans le maintien d'une production alimentaire locale appropriée à la politique de gestion.

Trois types de relations sont à distinguer suivant qu'elles sont entretenues de façon privilégiée avec le sous-système socio-économique, lacustre ou au système entier (figure 6).

Les relations du sous-système socio-économique avec le milieu extérieur

Selon les spécialistes en perspectives démographiques, parmi les facteurs influençant l'évolution de la population, seule la mortalité peut être prévisible avec une certaine exactitude, alors que les migrations et la natalité varient en fonction de nombreux phénomènes qui sont de nature économique, sociale et politique, difficiles à anticiper.

Etant donné l'imprévisibilité de ces fluctuations, la méthode d'aménagement du lac, même s'elle doit être conçue à long terme, devra permettre beaucoup de souplesse dans les décisions qui seront rendues au cours de l'évolution du système.

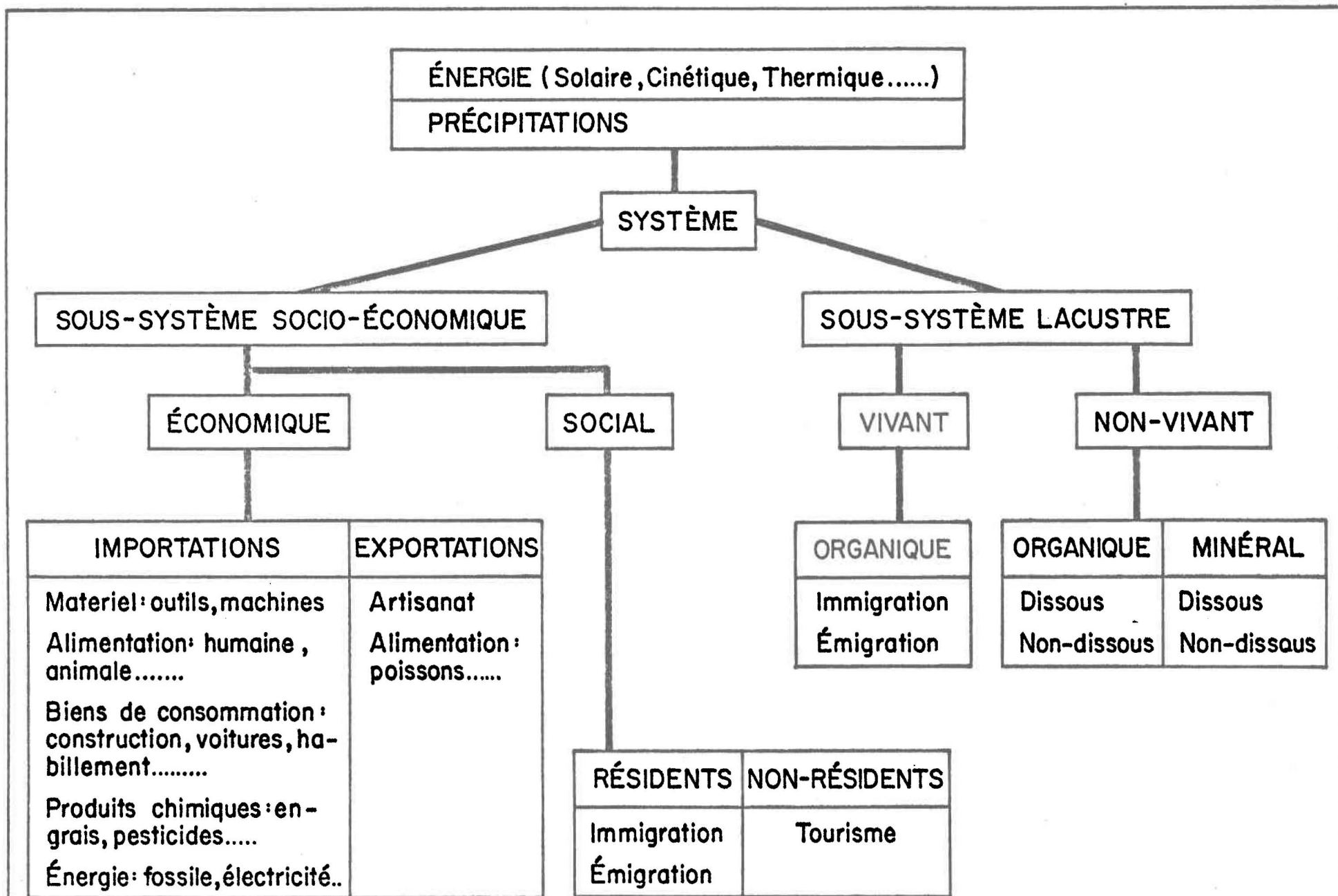


FIGURE 6. Principales relations d'échanges du système avec son environnement.

Toutefois, une évaluation de la croissance démographique est nécessaire, à la fois pour déterminer la fourchette de consommation et la pression exercée sur la biomasse de poisson.

Considérant la dépendance extrême du niveau de production du lac avec la population qu'il dessert, il apparaît dès maintenant indispensable d'imaginer certains types de contrôles démographiques, soit via un aménagement du territoire limitant la densité de population, soit via une politique de développement autocontrôlée par des mesures de taxation foncière adéquates.

De plus, il est important de considérer l'activité touristique dont la contribution à l'économie locale ne peut être mésestimée. Dans l'évaluation de la *consommation* de poisson par la population, ce facteur ne sera probablement pas négligeable.

Les importations et les exportations constituent une autre facette des relations existant entre le milieu extérieur et le sous-système socio-économique. La vocation de cette localité lacustre étant essentiellement au niveau de production piscicole, c'est par le biais de l'exportation qu'il est possible d'envisager une participation à l'autosuffisance à l'échelle nationale. Les importations alimentaires, d'outillage, d'énergie (fossile, électrique) sont d'autres facteurs qu'il faudra considérer pour mieux percevoir le fonctionnement du sous-système socio-économique.

Les relations du sous-système lacustre avec l'environnement du système

Les échanges de matière et d'énergie s'opérant entre le milieu extérieur et le lac conditionnent grandement sa qualité biologique, et, comme

il a déjà été mentionné, sa capacité de production. Ils s'opèrent via les effluents et affluents dont les caractéristiques hydrologiques devront être déterminées (crues, étiages,...). Les entrées au lac sont fonctions de la géologie, des activités humaines et biotiques de la partie amont au système considéré, les sorties influençant de façon prépondérante les parties en aval.

Les relations entretenues par le système entier et son environnement

Le système entretient des relations avec le milieu extérieur par le biais de l'atmosphère. Il s'agit en premier lieu de l'énergie pure. L'énergie solaire (lumineuse), cinétique (vents), thermique, sont de grande importance. L'énergie solaire conditionne toute activité photosynthétique à l'intérieur des deux sous-systèmes. Il en va de même pour l'énergie thermique qui elle, en plus, affecte la durée du couvert de glace, agissant ainsi sur la vie aquatique. En deuxième lieu, les échanges de matière (précipitations, évaporation,...) revêtent un grand intérêt, notamment dans les apports en substances nutritives dissoutes et en suspension au système.

2.2 Production naturelle du lac

Les différents types de production pour toute population reposent sur les caractéristiques physiques et chimiques de l'écosystème. A la base de production animale se trouve la production végétale. Elle est propre aux caractéristiques de l'espèce considérée ainsi que celles de son environnement. Ivlev (1966) définit la production comme la somme de toute matière organique ajoutée à un stock de produit par unité de temps, peu importe qu'elle demeure vivante ou non, à la fin de ce temps.

Pour donner un aperçu de la difficulté à évaluer de façon précise la production du poisson de quelque façon, voici quelques paramètres qui ont une influence:

- *la température* qui agit directement sur le métabolisme de l'animal et sur son activité biologique par le biais de gradients thermiques auxquels l'animal est soumis;
- *l'intensité lumineuse* qui, conditionnée par les solides en suspension, les solides dissous, etc., contrôle l'entrée d'énergie pour les producteurs primaires;
- *la morphologie* qui est une caractéristique morphométrique du lac pouvant exercer un contrôle sur la production. On pense alors à la présence ou l'absence de thermocline, trappe à éléments nutritifs, production riparienne, etc.;
- *le pH* qui exerce une influence sur la faune par le type de minéralisation et la disponibilité des matériaux.

La figure 4 met en évidence les relations qui existent entre ces différents paramètres. L'analyse nous permet de constater que la profondeur et les solides dissous présentent l'avantage d'intégrer plusieurs phénomènes se déroulant dans le lac.

De telles caractéristiques seraient très utiles si elles pouvaient être reliées à la production; des mesures simples pourraient alors permettre de façon empirique d'estimer la production à partir de paramètres tels la profondeur et les solides dissous totaux.

C'est dans ce sens que Ryder (1965) décrit une méthode servant à estimer la production potentielle de poissons pour les lacs tempérés du Nord. Le modèle développé par Ryder (1965) est basé sur l'utilisation d'un

"indice morphoédaphique" qui est défini comme étant le rapport des solides dissous totaux sur la profondeur moyenne ($\frac{SDT}{\bar{Z}}$).

Malgré le rôle important que jouent les conditions climatiques (ensoleillement, température, vent) dans la production lacustre, elles ne sont pas considérées car on les suppose à peu près constantes pour les lacs d'une même région. Tel que décrit par Ryder (1965), il s'agit de regrouper une série de lacs répondant aux critères d'utilisation de l'indice, de prendre des mesures des solides dissous totaux, de profondeur moyenne, et de tracer une droite de régression (voir figure 7). Les critères d'utilisation retenus par Ryder *et al.* (1974) sont:

1. Des conditions climatiques relativement homogènes à l'intérieur de la série de lacs;
2. Une stoéchiométrie constante (dont le spectre ionique résulte de rapports ioniques à peu près constants);
3. Des taux d'écoulement approximativement proportionnels par unité de volume de lac (incluant les variations de niveaux);
4. Une turbidité inorganique du même ordre de grandeur pour tous les lacs;
5. Un effort de pêche modéré à intensif sur un spectre d'espèces pour un nombre d'années.

La précision de l'estimation nécessite l'observation de chacun de ces critères. C'est en prenant une série de lacs homogènes (par rapport aux cinq critères) que l'on pourra, à l'aide des indices morphoédaphiques ($\frac{SDT}{\bar{Z}}$), tracer la droite de régression. Samson (1974) a utilisé l'indice pour les lacs du Québec où la truite dominait, sans tenir compte des pêches effectuées dans ces lacs. Pour obtenir une meilleure corrélation, il suggère l'indice modifié: $\frac{SDT}{(\bar{Z})^2}$. Après utilisation, il est d'avis qu'il s'agit d'un bon estimateur, et poursuit son utilisation¹.

¹ Samson (1977), Communication personnelle.

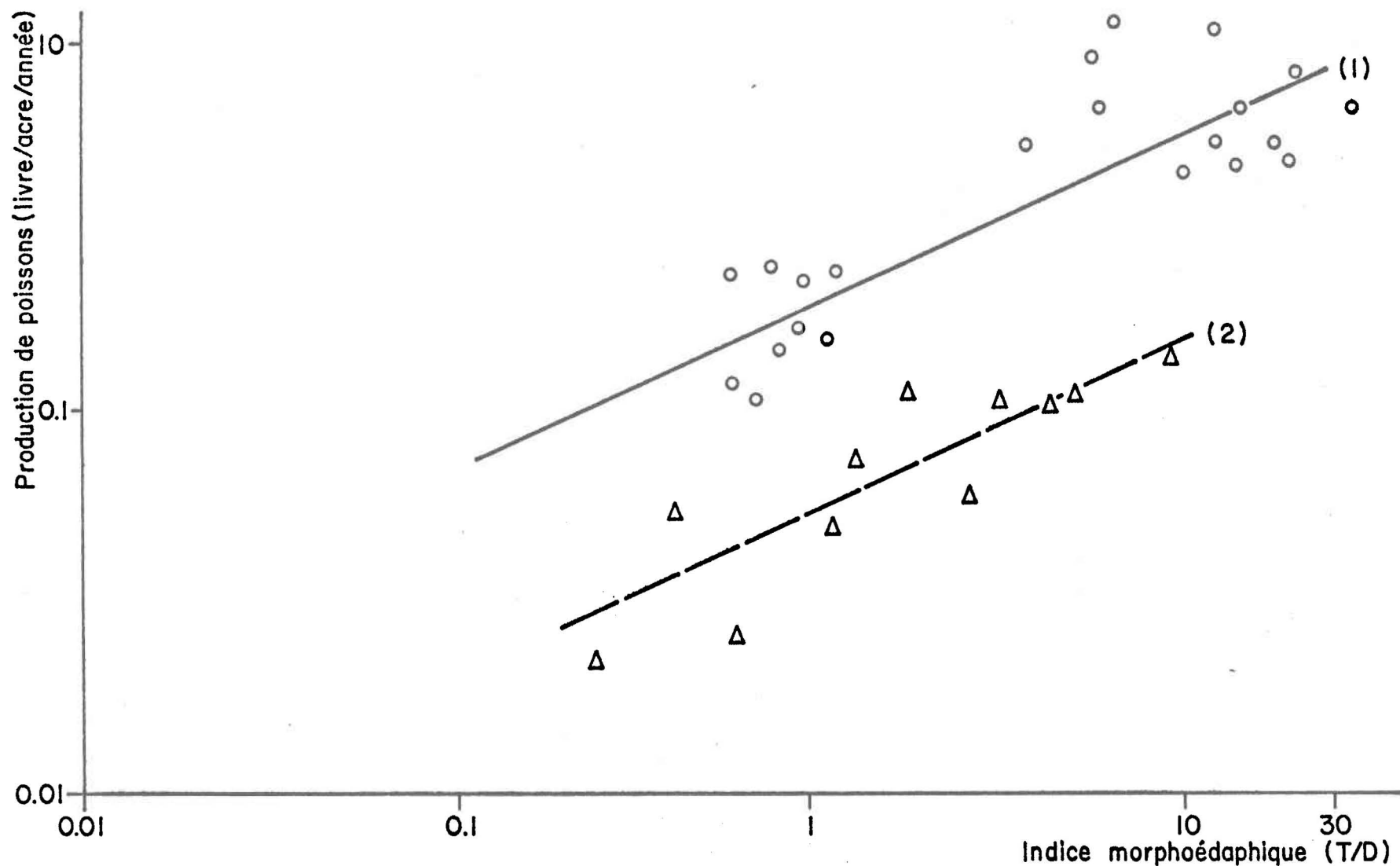


FIGURE 7. Détermination de la production de poissons à l'aide de l'indice morphoédaphique pour 34 lacs. La droite de régression en trait plein (1) rassemble les points d'une famille de 23 lacs dont l'intensité de pêche a été de moyenne à intensive. La droite de régression pointillée (2) est pour 11 lacs dont l'activité de pêche fut restreinte ou dont les données sont incomplètes (Tiré de Ryder, 1965).

Puisqu'il est possible, avec l'indice morphoédaphique, d'intégrer une diversité de phénomènes qui interagissent avec la production, cet indice est donc particulièrement bien adapté à des évaluations.

Les solides dissous totaux

La teneur des solides dissous totaux est d'un point de vue pratique, plus importante que la concentration de ses constituants pris séparément en ce qui touche la classification des eaux d'un point de vue piscicole. En effet, elle est moins sensible à la présence d'organismes vivants. Un changement majeur de la teneur en phosphore, par exemple, bien que mineur par rapport à la concentration de l'ensemble des solides dissous totaux (≈ 10 fois supérieur), ne passerait pas inaperçu à travers l'indice: en effet, que les raisons de ce changement soient d'ordre biotique ou abiotique, elles devront contribuer de façon significative et proportionnelle à un changement de concentration des solides dissous totaux. Le recyclage biologique du phosphore ou de tout autre élément nutritif limitant en général ne modifie pas leur concentration dans le milieu. Aussi, une faible valeur des concentrations en phosphore n'est pas nécessairement indicatrice d'une faible productivité, mais peut, quand le phosphore est hautement disponible, être rapidement assimilée et rendue par les organismes témoignant d'une productivité élevée.

Les solides dissous totaux tiennent aussi compte des caractéristiques édaphiques, c'est-à-dire des échanges en éléments nutritifs qui s'effectuent entre le bassin versant et le lac. La physiographie, le développement des berges, les effets qualitatifs et quantitatifs de la végétation du bassin versant, la contribution en éléments nutritifs de toute provenance

sont autant de phénomènes environnementaux associés aux solides dissous totaux. Cet indice tient donc compte de l'importance de ces différents phénomènes dans l'évaluation de la production qu'il serait impossible d'obtenir lorsque considérés individuellement.

La profondeur moyenne

La profondeur moyenne du lac est définie par le rapport volume-surface (Hutchinson, 1957). La profondeur moyenne représente d'autres caractéristiques morphométriques que la bathymétrie. Dans les lacs où la pente des berges est peu prononcée, la faible profondeur permet non seulement la pénétration de la lumière, mais permet la prolifération des macrophytes à des sites d'attachement. Colonisée par les organismes benthiques, et certes fréquentée par les poissons, cette zone riche en oxygène pourra être très productive.

En général, quand le développement des rives est très prononcé, on peut s'attendre à des profondeurs moyennes faibles pour une même famille de lacs. De plus, l'importance, dans la productivité, du volume des eaux ripariennes, est très grande par rapport au volume total du lac. Les échanges de matière et d'énergie au niveau du littoral jouent un grand rôle dans la production du lac. On observe que pendant la saison estivale les lacs peu profonds sont généralement moins froids que les lacs profonds. Si l'on se réfère à la figure 4, on peut voir les nombreuses pertes d'énergie qui doivent être consenties à chacune des strates dans le fonctionnement du système.

Les caractéristiques morphométriques d'un lac relativement profond entraîneront un rapport du volume hypolimnion/épilimnion élevé commun aux

lacs oligotrophes et influençant le recyclage des éléments nutritifs. Dans le même ordre d'idées, la profondeur moyenne peut être associée à l'épaisseur de l'épilimnion, couche supérieure du lac, plus ou moins chaude, en circulation, et particulièrement turbulente.

Relations entre la production et l'indice morphoédaphique

En somme, ces deux paramètres, solides dissous totaux et profondeur moyenne, se calculent pour une même famille de lacs et permettent de contourner la complexité des facteurs environnementaux et surtout la complexité des interrelations dans l'écosystème. Une fois l'indice morphoédaphique calculé pour une famille de lacs, il est facile d'estimer la production potentielle de poissons en localisant sa position sur la droite de régression, ou plus simplement en résolvant l'équation prédéterminée pour la série.

2.3 Evaluation de la limite supérieure de production

Il est possible que la production naturelle du lac ne suffise pas à la consommation envisagée. Dans le cas contraire, il est probable que l'évolution de cette dernière entraîne un déficit important entre la production du lac et la demande alimentaire.

Pour faire face à une telle situation, deux solutions se présentent: exploiter un plus grand nombre de lacs, ou bien intensifier la production piscicole de ceux susceptibles d'être utilisés.

La prolifération d'unités de production n'apparaît pas "a priori" comme pouvant être justifiée, compte tenu du rôle que l'on entend donner à ce type de production. Ainsi, l'éloignement géographique par rapport aux

centres urbains, la complexification de la gestion et l'agressivité à l'intégrité environnementale québécoise d'une politique de prolifération sont des raisons suffisantes pour opter pour l'accroissement de production d'un nombre peu élevé de lacs.

Pour tenter de résoudre ce problème, il est indispensable de connaître les facteurs influençant la production de truites. Ce sont, entre autres, les prédateurs, la quantité de nourriture disponible, l'aptitude à la reproduction, la qualité de l'eau et les caractéristiques physiques du lac.

La disponibilité en nourriture et la reproduction sont intimement liées à la qualité de l'eau. De plus, la reproduction dépend des caractéristiques physiques du milieu (sites de reproduction) qui témoignent également de la qualité et la quantité des abris nécessaires au poisson.

Ainsi, on peut dégager trois (3) facteurs importants: la *prédation*, la *structure morphologique* du lac et le *chimisme* de l'eau. En ce qui concerne la prédation, qui sera envisagée ultérieurement, on peut affirmer qu'une diminution du nombre de prédateurs directs pour la truite pourra être bénéfique dans le cadre de la politique de gestion. De leur côté, les caractéristiques physiques sont difficilement modifiables. Toutefois, il est possible d'aménager des sites de reproduction dans les tributaires et effluents du lac, ainsi que dans la zone littorale de celui-ci, en fonction des exigences de la truite (oxygène dissous, intensité du courant, etc.). De plus, il semble être possible d'aménager des abris en quantité et qualité suffisantes, qui favoriseront à peu de frais le maintien d'une biomasse élevée.

La migration, pouvant, dans certaines conditions, être un facteur important, il y aurait éventuellement lieu de contrôler, au niveau des tributaires et des effluents, le passage de la truite.

Cependant, l'élément majeur est la quantité de nourriture disponible. La diète de la truite se compose essentiellement d'insectes aquatiques, de zooplancton, d'organismes benthiques et d'autres poissons.

Dans le cas où l'on n'envisage pas une augmentation des quantités de nourriture, une des possibilités serait d'accroître l'efficacité entre les différents niveaux trophiques. En effet, il semble que pour la truite, l'efficacité¹ diminue lorsqu'elle avance en âge (Allen, 1951). Au moyen d'ensemencements, il est dès lors possible d'adapter la structure d'âge de la population, de façon à obtenir des transferts d'énergie qui soient maximisés. Evidemment, il est nécessaire de déterminer la taille minimale à partir de laquelle la truite devient attrayante pour la consommation. De plus, la température joue un rôle important dans l'efficacité. Balwin (1956) rapporte que la truite mouchetée (Salvelinus fontinalis M.) consomme plus de nourriture et a une meilleure croissance à 13°C, et que, passé cette valeur, l'efficacité diminue quand la température augmente. Si l'on envisage une intervention qui a pour conséquence de modifier la valeur de ce paramètre dans le lac, il faudra tenir compte du fait que d'autres organismes nécessitent des températures plus élevées pour leur assurer une pleine croissance.

La deuxième possibilité, pouvant toutefois se combiner à la première, serait d'augmenter les quantités de nourriture présentes dans le lac.

¹ L'efficacité est ici prise au sens du rapport de l'accroissement du poids de l'organisme par la quantité de nourriture ingérée, la même unité énergétique étant utilisée pour ces deux valeurs.

Sur la figure 4, on peut visualiser facilement que la vie aquatique est conditionnée par les producteurs primaires; c'est donc un niveau privilégié pour stimuler la production lacustre totale.

La production primaire dépend en premier lieu de l'énergie lumineuse disponible. Elle dépend également de la disponibilité en éléments nutritifs (azote, phosphore), du dioxyde de carbone (CO_2) et de la température pour les principaux.

L'énergie solaire disponible dépend des conditions météorologiques, de la turbidité de l'eau, mais également du pouvoir absorbant de celle-ci. Généralement, les éléments traces et de dioxyde de carbone (pris au sens de CO_2 dissous, l'acide carbonique H_2CO_3 , l'ion bicarbonate HCO_3^- et l'ion carbonate CO_3^{2-}) ne sont pas considérés comme des facteurs limitants.

Les aspects les plus importants dans la croissance du phytoplancton et des macrophytes se réduisent aux seuls éléments nutritifs, l'azote et le phosphore. Généralement, on reconnaît que le phosphore est l'élément limitant (Schindler, 1977).

Pour stimuler artificiellement la production du lac, une fertilisation par le phosphore peut être envisagée. Notons toutefois qu'un tel type d'intervention, sans précautions, risque d'entraîner de graves conséquences. Cet aspect sera considéré ultérieurement dans l'évaluation des effets sur le milieu.

Une revue de la littérature montre que de telles expériences ont déjà été effectuées dans le passé. Gross *et al.* (1944), par exemple, ont fertilisé un petit "loch" d'Ecosse durant trois (3) années successives, en

utilisant du nitrate de sodium (NaNO_3) et un superphosphate. Les auteurs ont observé que les fertilisants étaient rapidement utilisés par le phytoplancton, que la faune benthique augmentait en quantité et que la croissance des poissons y était plus rapide que dans les régions voisines.

L'expérience la plus intéressante semble être celle rapportée par Smith ((1948a), (1952), (1955), (1968)) à propos de la fertilisation du lac Crecy, au Nouveau-Brunswick.

Le lac Crecy, d'une superficie de 20.4 hectares et d'une profondeur moyenne de 2.4 mètres, produisait, avant toute fertilisation, 0.9 kg/ha de truite mouchetée. Après une première expérience, en 1946, il produisait 5.5 kg/ha. Par un contrôle accru des prédateurs et une deuxième fertilisation, en 1951, cette valeur passait à 9.7 kg/ha.

Chaque année, le lac étaitensemencé en truitelles de un an, et en fretins, la reproduction naturelle y étant limitée.

Généralement, on remarque que dans les lacs fertilisés et ensemencés, la vitesse de croissance des truites augmente jusqu'à atteindre un certain niveau pour diminuer par la suite. Ceci est dû à une augmentation de la compétition intraspécifique, suite à l'accroissement du nombre d'individus à l'intérieur de la population. Or, parce qu'il est plus intéressant de conserver une vitesse de croissance élevée, il faut viser à soutirer du lac le maximum d'individus ayant atteint leur taille optimale, que l'on peut évaluer par des méthodes telles que celle de Goh (1977).

Evaluation de la limite supérieure de production

La meilleure période pour procéder à la fertilisation correspond à

celle du mélange des eaux, soit au printemps, car elle marque le début d'une grande activité synthétique.

Il est possible d'estimer les quantités de phosphore à introduire. En effet, Vollenweider (1973) a développé un modèle de classification des lacs selon leur niveau trophique (oligotrophe, mésotrophe, eutrophe), en mettant en relation la charge annuelle en phosphore entrant dans un lac avec le rapport profondeur-moyenne (\bar{z} en mètres) sur temps de résidence de l'eau (T_w en années) (figure 8).

Connaissant le rapport \bar{z}/T_w , et en évaluant le niveau de trophie que l'on est prêt à concéder, on peut estimer la charge annuelle en phosphore admise. Par un modèle d'apport adéquat, il est possible d'évaluer les quantités de phosphore provenant du bassin versant et des tributaires (d'origine humaine, animale, agricole) et de déduire ainsi les quantités à rajouter par fertilisation.

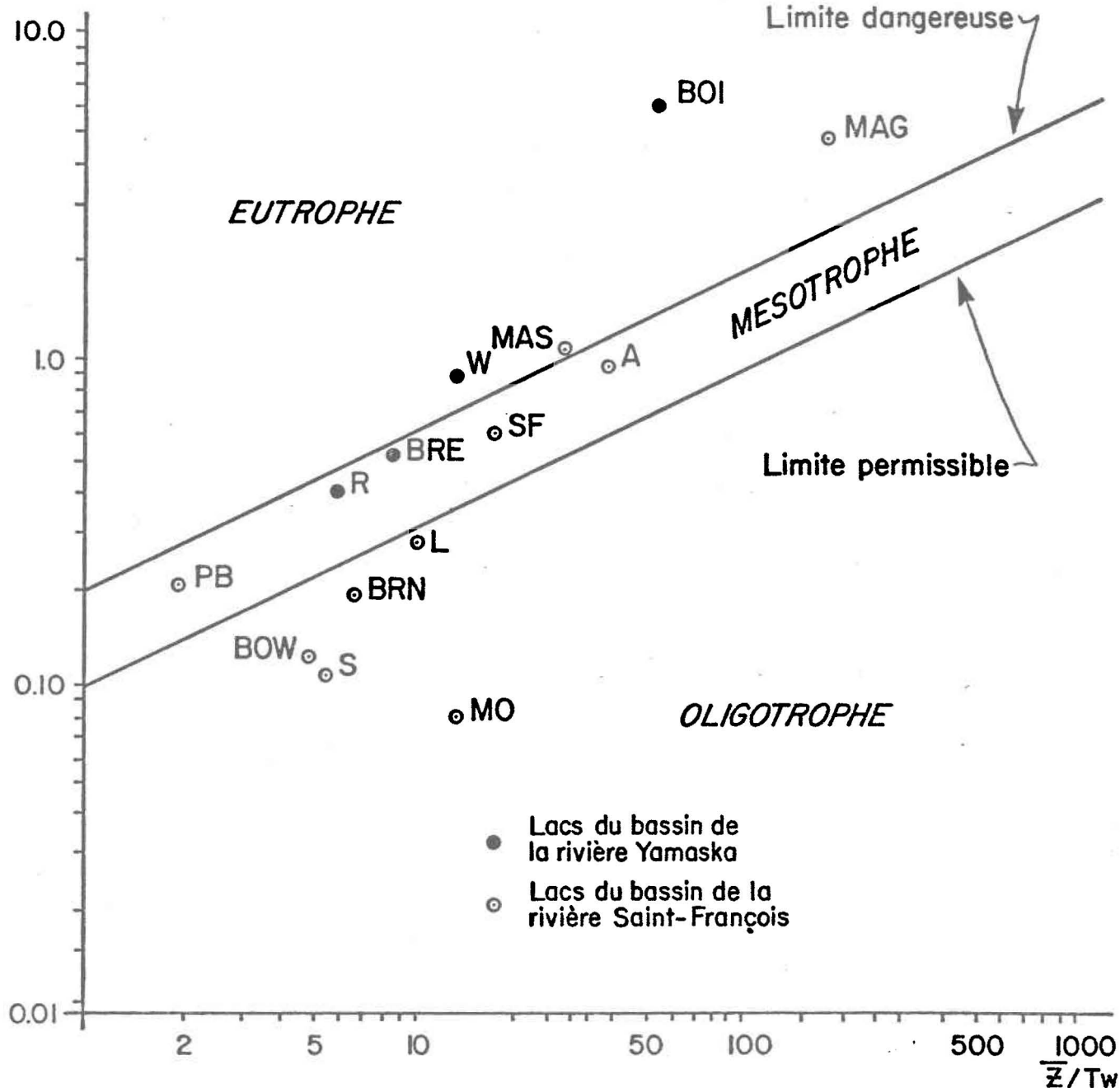
$$L_p = Q_a + Q_f \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} Q_a = \text{quantité de phosphore}^1 \text{ dû} \\ \text{activités sur le bassin} \\ \text{versant} \\ Q_f = \text{quantité rajoutée par fer-} \\ \text{tilisation} \\ L_p = \text{charge totale en phosphore}^1 \end{array}$$

Il serait intéressant d'évaluer la production nette² en truites au cours d'une année, qui représente approximativement la quantité limite supérieure que l'homme peut espérer retirer du lac. Pour ce faire, on considère

¹ Phosphore total

² $NP = A - R = I - Df - R \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} A = \text{assimilation} \\ I = \text{ingestion} \\ R = \text{respiration} \\ Df = \text{défécation} \end{array}$

Charge
spécifique
(L_p (gP/m²/an))



A	Aylmer	L	Lovering	R	Roxton
BOI	Boivin	MAG	Magog	S	Stukely
BOW	Bowker	MAS	Massawippi	SF	Saint-François
BRE	Brome	MO	Montjoie	W	Waterloo
BRN	Brompton	PB	Petit Brompton		

FIGURE 8. Essai de classification de quelques lacs Québécois suivant leur niveau trophique mettant en relation la charge annuelle en phosphore et le rapport profondeur moyenne (\bar{Z}) sur le temps de renouvellement (T_w), (Tiré de Potvin, 1976).

trois niveaux dans une chaîne trophique simplifiée: les producteurs primaires (algues et macrophytes), les herbivores (poissons, zooplancton, insectes) et les carnivores. On fait l'hypothèse que dans ce dernier niveau, la seule espèce présente est la truite; en effet, si des ensemencements sont effectués régulièrement, il est probable qu'elle déplace toute espèce compétitrice.

La production totale primaire (GPP_1)¹ sera évaluée par une méthode développée par Vollenweider *et al.* (1974). La production totale primaire est reliée à la charge en phosphore annuelle par une fonction de la forme $ax/(b + x)$ (figure 9).

$$GPP_1 = \frac{a P}{b + p} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} P \text{ est la charge annuelle en phosphore,} \\ GPP_1 \text{ la production totale primaire,} \\ \text{et "a" et "b" deux coefficients.} \end{array}$$

On peut donc schématiser la chaîne trophique de la façon suivante:



" I_i " est la quantité de nourriture ingérée par le niveau " i ",

NP_i est la production nette du niveau " i ".

Connaissant les différents rapports d'efficacité $\frac{NP_i}{I_i}$ et $\frac{I_i}{NP_{i-1}}$,

¹ GPP_1 (Gross Primary Production) = A

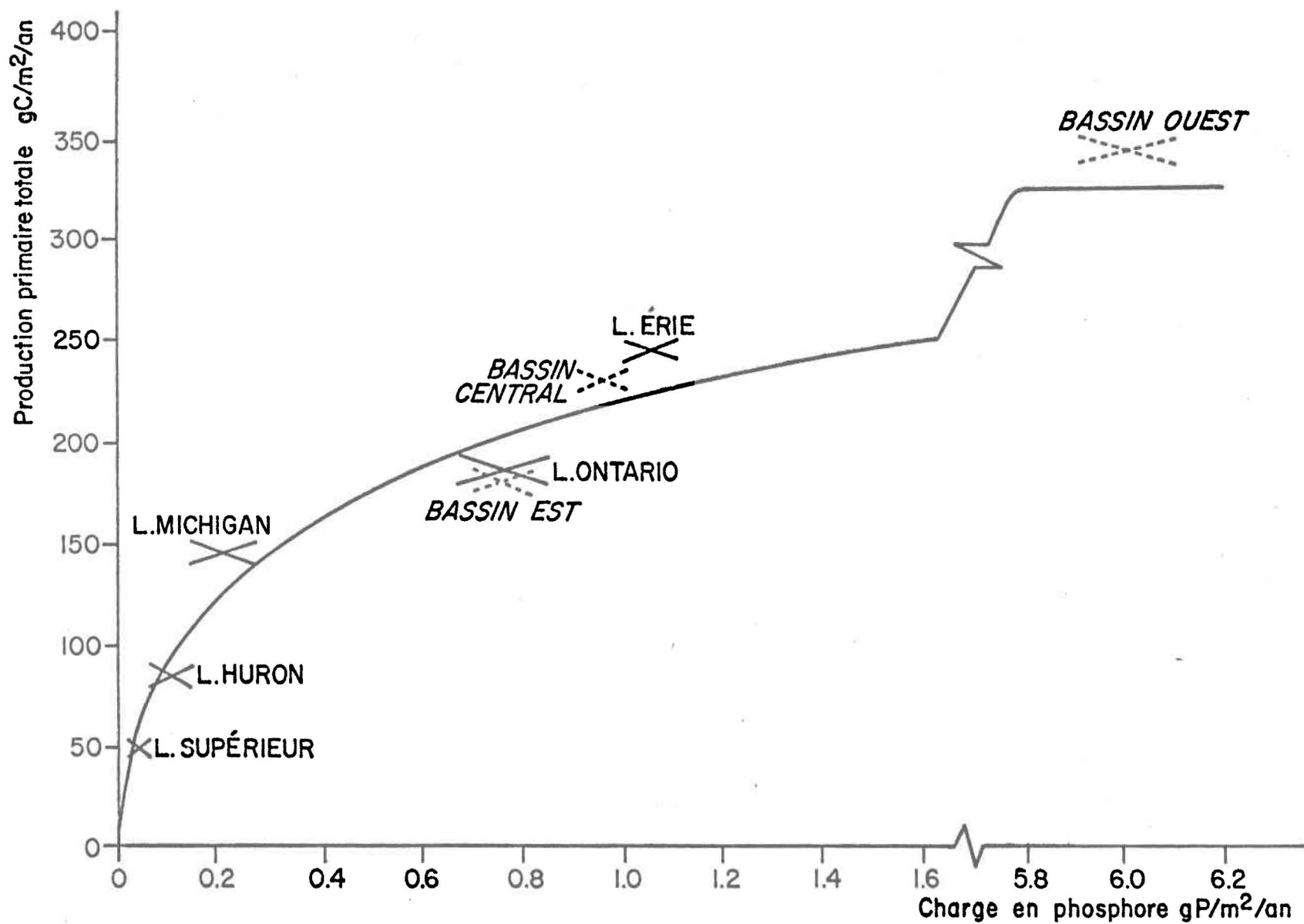


FIGURE 9. Relation entre la production totale primaire et la charge annuelle en phosphore (Tiré de Vollenweider et al., 1974).

on peut ainsi estimer la production nette du troisième niveau (truite) par l'équation suivante:

$$NP_3 = \frac{NP_3}{I_3} \frac{I_3}{NP_2} \frac{NP_2}{I_2} \frac{I_2}{NP_1} NP_1$$

et si l'on connaît le rapport $\frac{NP_1}{GPP_1}$, on peut écrire

$$NP_3 = \frac{NP_3}{I_3} \frac{I_3}{NP_2} \frac{NP_2}{I_2} \frac{I_2}{NP_1} \frac{NP_1}{GPP_1} GPP_1$$

Kozlovsky (1968) a rassemblé les différents rapports d'efficacité les plus fréquemment retrouvés dans la littérature. Il donne:

$$NP_3/I_3 \# 40\%$$

$$I_3/NP_2 \# 10 - 15\%$$

$$NP_2/I_2 \# 40\%$$

$$I_2/NP_1 \# 10 - 20\%$$

$$NP_1/GPP_1 \# 65 - 70\%$$

pour un écosystème lacustre, ce qui donne:

$$(0.4 \times 0.1 \times 0.4 \times 0.1 \times 0.65)GPP_1 \leq NP_3 \leq (0.4 \times 0.15 \times 0.4 \times 0.2 \times 0.7)GPP_1$$

$$\text{ce qui fait: } NP_3 \# 10^{-3}GPP_1 \text{ à } 3 \times 10^{-3}GPP_1$$

Ainsi, à l'aide de l'équation ci-dessus, il est probable de prévoir globalement des quantités de truites que l'on serait en droit d'attendre suite à une fertilisation. Cependant, comme on l'a vu précédemment, une telle intervention doit être jumelée à des ensemencements réguliers, eux-mêmes rattachés à une entreprise de pisciculture.

2.4 Contribution de la pisciculture

Malgré les richesses piscicoles québécoises, celles-ci ne sauraient régulièrement assurer des récoltes suffisantes, régulières, pour satisfaire aux nécessités d'une autosuffisance alimentaire. La production du lac est naturellement limitée. Toutefois, comme il est possible d'agir sur la disponibilité de la nourriture par la stimulation de la production primaire, sur la reproduction et la prédation par l'aménagement d'abris, sur les migrations et la pression de pêche par un contrôle soutenu, et sur la biomasse même par des techniques d'ensemencement, il est facile d'imaginer que plusieurs lacs puissent apporter un stock de poissons bien supérieur à celui qu'il présente de façon naturelle. Dans une telle situation, l'ensemencement jouera un rôle primordial sur l'accroissement du stock de truites. Cet ensemencement ne peut être envisagé sans l'apport d'une industrie piscicole locale ou régionale. En effet, partie intégrante du sous-système socio-économique, la pisciculture, en plus d'assurer un travail à un certain nombre de personnes, et de garantir une qualité génétique chez la truite, contribuera pour une large part à la production piscicole du système envisagé.

Une importante précaution doit être prise dans l'établissement de piscicultures d'appoint à la production:

- garantir une eau de bonne qualité en quantité suffisante.

La disponibilité en eau constitue un facteur important dans l'exploitation d'un grand nombre de piscicultures.

En effet, par exemple, en période d'étiage, en hiver, les débits minimum pour une petite pisciculture est d'environ

23,000 l/heure. En général, le pisciculteur n'a pas grand recours face à une pénurie d'eau. Toutefois, si la pisciculture est située à proximité d'un lac, et surtout si ce lac est celui qui est à ensemercer, il bénéficiera de toute l'eau nécessaire à la culture et ceci en autant qu'il puisse s'assurer un certain contrôle de la qualité. Les facteurs les plus importants qu'il doit considérer sont: *la disponibilité d'oxygène, la température et son pH et la présence de substances toxiques.*

L'oxygène dissous

La truite est très sensible à la $[O_2]$ dissous; en effet, elle ne peut tolérer des $[O_2]$ à 4 ou 5 p.p.m. et même dans ces conditions, elle ne peut la supporter pendant une longue période; de basses $[O_2]$ (4 ou 5 p.p.m.) diminuent la résistance de la truite aux toxiques et à l'infection. La quantité d'oxygène minimale exigée pour la production de la truite est de sept (7) p.p.m., alors que le niveau maximal est obtenu à saturation; des basses températures favorisent évidemment des $[O_2]$ élevées.

La température de l'eau

La température de l'eau exerce un contrôle qui aura un effet sur le métabolisme du poisson à tous les stades du développement. L'augmentation de la température, par conséquent du métabolisme, élèvera la consommation d'oxygène. Cette augmentation de l'activité métabolique se traduira par une quantité accrue de déchets à éliminer. Pour les oeufs, de même que pour les très jeunes alevins, la température optimale se situe entre neuf (9) et douze (12) degrés Celsius. Des températures supérieures diminuent à la fois la croissance et la viabilité de ceux-ci. La croissance de la truite sera optimale à 13°C (Balwin, 1956).

La qualité de l'eau et les toxiques

Le contrôle de la qualité de l'eau et des toxiques est d'autant plus important que l'on se situe à des stades précoces de développement. Il est néanmoins nécessaire d'être en mesure de disposer d'eau à pH neutre, relativement alcaline, sans toxiques, spécialement métaux lourds, pesticides et contaminants bactériologiques, compatible avec un développement équilibré des organismes cultivés.

L'ensemencement du poisson produit en pisciculture, malgré la simplicité apparente d'une telle méthode, ne s'est pas toujours avéré, dans le passé, rehausser la production du lac à des niveaux auxquels on était en droit de s'attendre. Les raisons de ces succès relatifs sont mal connues et l'utilisation de cet outil d'aménagement ne doit pas être prise à la légère. Considérant qu'aujourd'hui il est possible de produire une truite d'un âge donné, à n'importe quel mois de l'année, il est essentiel d'exploiter cet avantage dans la stratégie. Claude Bernard¹, du M.T.C.P. (communication personnelle), suggère que l'ensemencement des alevins soit fait au printemps, et celui du fretin et des truitelles au cours du mois de juin; pour ces dernières, on peut dire que les ensemencements effectués aux mois de septembre, octobre et novembre se sont avérés fructueux. Cependant, l'ensemencement de fretins (fingerlings) ou de truites de un an (yearlings) présente des avantages et des désavantages. L'ensemencement du fretin, par exemple, beaucoup moins onéreux que celui de la truitelle, dans un lac où il est susceptible de devenir une proie, risque de s'avérer parfaitement improductif. L'alternative est l'ensemencement de certains tributaires du lac,

¹ Claude Bernard, M.T.C.P. (communication personnelle), 1977.

où la prédation est beaucoup moins abondante et la densité d'abris élevée. L'ensemencement des tributaires a l'inconvénient de présenter une capacité limitée. Il est donc important de tenter d'introduire simultanément le fre-tin dans le tributaire ou dans le lac où on s'assure ainsi le maintien d'une classe d'âge qui n'aura pas à subir les fluctuations climatiques telles que des périodes de sécheresse ou de froid. Malgré leur sensibilité aux stress et aux maladies qui accroît le taux de mortalité des alevins par rapport aux truitelles, certaines expériences ont démontré que l'ensemencement d'alevins présentait certains avantages sur celui de la truitelle. Smith (1955) affirme que l'introduction d'alevins assure une capture sur des périodes plus étendues. Si la stratégie d'ensemencement s'avère capitale pour accroître la production du lac, les techniques de pêche, de leur côté, peuvent avoir un effet désastreux sur la production. Shetter (1947) rapporte que pour des lacs de l'état du Michigan (E.-U.), 80 à 94% du total des truites pêchées en saison de pêche avaient été capturées le jour de l'ouverture, et ce sur des lacs où l'ensemencement avait été fait à l'automne précédent, avec des poissons âgés d'un (1) an (yearlings).

L'ensemencement est indubitablement lié à une stratégie de pêche

La stimulation de production d'un lac est assujettie à trois (3) opérations qui doivent être contrôlées dans le cadre d'une même stratégie. Ainsi pour

1. assurer une biomasse de poisson dans le système,
2. maintenir une structure d'âge voulue,
3. donner accès à la truite via la pêche sportive, et, finalement, commercialiser cette protéine de qualité.

Il est important de rendre compatible la stratégie de culture du poisson, de l'ensemencement, de pêche sportive et celle de la production commerciale.

Toutes ces actions pourront être soutenues par des aménagements du milieu, tels des abris pour les poissons, l'addition de frayères artificielles (lits de graviers déposés sur la glace). Le ministère du Tourisme, de la chasse et de la pêche a déjà expérimenté avec succès de telles frayères. Doublée d'un contrôle de la prédation et de l'aménagement possible d'aires (mares et autres) propices à colonisation d'insectes, la croissance des truites pourra se faire dans des conditions optimales.

2.5 Effets sur le milieu

Toute forme d'intervention sur le milieu entraîne un ensemble d'effets attendus, et dans tous les cas des modifications allant à l'encontre du souhaité. Il est donc essentiel de minimiser les dommages au milieu physique, humain et économique.

A ce stade de l'étude de faisabilité, il est logique d'élucider les effets à court et à long terme sur le milieu pour tenter d'évaluer s'il est possible de contourner les obstacles à l'implantation de la stratégie de gestion, ou de récupérer les problèmes qu'elle risque d'engendrer.

Ainsi, une grande importance sera donnée au respect du milieu naturel, dans des conditions acceptables par tous, et répondant aux aspirations de chacun dans le but d'une amélioration de la qualité de vie.

2.5.1 Effets sur la qualité de l'eau et sur le biota

Lors des observations préliminaires faites sur la fertilisation du lac Crecy, au Nouveau-Brunswick, Smith (1948) constate, immédiatement après l'introduction d'éléments nutritifs, une forte augmentation de la biomasse de phytoplancton qui se manifeste durant les deux premières semaines et atteint une certaine valeur qui se maintient durant les deux (2) mois suivants. Puis, vers la fin du premier été, un "bloom" d'algues bleu-vert, du genre Anabaena, a été observé dans ce lac.

Les algues bleu-vert présentent des dangers pour la vie aquatique. A ce sujet, Presscott (1948) rapporte que, lors de leur décomposition, certains sous-produits toxiques, comme l'hydroxylamine ($H_2N - OH$) et l'anhydride sulfureux (H_2S), peuvent atteindre rapidement des concentrations létales pour le poisson.

Les "blooms" d'algues bleu-vert sont caractéristiques d'eaux relativement riches en phosphore et pauvres en azote. Dans les eaux où "N" est le facteur limitant, ce type d'algues est favorisé par rapport aux autres espèces, parce que capable de fixer l'azote gazeux (N_2). Schindler (1977) indique que lorsque le rapport des concentrations massiques $[N]/[P]$ se situe en-deçà d'une certaine limite, il y a prédominance d'algues bleu-vert. Ainsi, lors de la fertilisation du lac 227 durant six (6) années successives, tout en maintenant un rapport massique $[N]/[P]$ de 14, l'espèce dominante était une algue verte, Scenedesmus, et les autres espèces abondantes étaient incapables de fixer l'azote gazeux (N_2) (Schindler, 1977).

Dans le lac Crecy, la valeur du rapport $[N]/[P]$, après la fertilisation de juin 1946, était de 0.53 (0.21 mg/l/0.39 mg/l) (Smith, 1948). Dans

ces conditions, on devait s'attendre à la prédominance d'algues bleu-vert.

De son côté, Christie (1974), lors d'expériences analogues sur le lac Kushog (comté d'Haliburton), a utilisé un rapport égal à 20, et obtenu le même genre de résultats que Schindler.

Ainsi, la première précaution à prendre lors de toute fertilisation sera de maintenir le rapport $[N]/[P]$ suffisamment élevé (15 à 20).

L'accroissement de la production peut entraîner une diminution d'oxygène dans les couches profondes du lac. Ces conditions anoxiques peuvent se retrouver en été dans l'hypolimnion, par exemple après la dénatura-tion de "blooms" d'algues pouvant s'être formés. Cependant, elles se ren-contrent également vers la fin de l'automne et en hiver, période où la con-sommation d'oxygène par les microorganismes est beaucoup plus élevée que les apports par production photosynthétique et par dissolution mécanique (couvert de glace). De faibles tensions d'oxygène, menaçant la survie de la truite, sont effectivement apparues dans le lac Crecy (Nouveau-Brunswick) et ont eu une influence sur sa mortalité (Smith, 1948).

Tanner (1960) signale également que les teneurs en oxygène dissous étaient plus faibles après fertilisation, et ceci même en été, dans les cou-ches profondes de cinq (5) lacs de l'état du Michigan (E.-U.).

Toutefois, Fast (1973) indique qu'il est relativement aisé de réoxygéner les parties hypolimniques au moyen d'aérateurs mécaniques (fi-gure 10). Il révèle en outre que l'utilisation de cette technique sur le lac Hemlock (état du Michigan, E.-U.) avait accru sensiblement la tempé-rature dans l'hypolimnion en été, mais qu'un tel problème peut cependant être

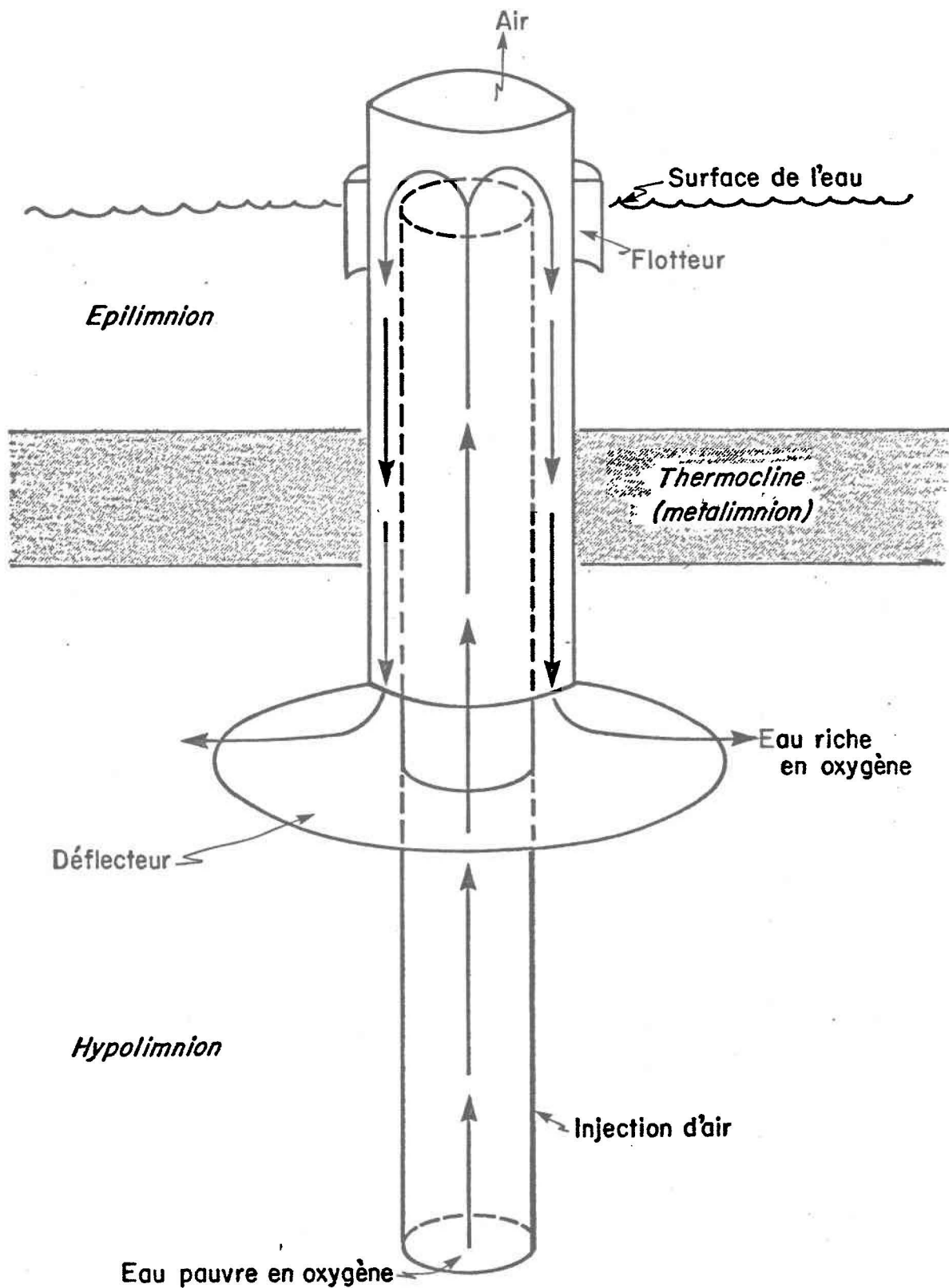


FIGURE 10. Exemple d'aérateur utilisé par Fast (1973) lors de l'oxygénation des couches hypolimniques du lac Hemlock (Tiré de Fast, 1973).

facilement surmonté en modifiant la conception de ce type d'appareil. Les résultats obtenus par Fast (1973) sont, dans cet ordre d'idées, des plus encourageants (figure 11 et figure 12). Il est donc possible de minimiser l'effet de la carence en oxygène sur la production de truites.

D'autre part, si le milieu est faiblement tamponné, il est possible qu'en période d'intense activité photosynthétique le pH subisse d'importantes variations. Ainsi, dans le lac Crecy (Nouveau-Brunswick), lors de la formation d'un "bloom" d'algues, vers la fin de l'été 1946, Smith (1948) a observé un accroissement de pH de 6.6 à 8.2, échelonné sur une période de trente (30) jours. Ceci était la conséquence d'une rapide assimilation du CO_2^1 présent dans l'eau.

D'une façon plus générale, Tanner (1960) observa une très nette diminution de l'alcalinité lors de la fertilisation de cinq (5) lacs dans l'état du Michigan (E.-U.). Lui aussi attribue cette tendance à l'accroissement de l'activité biologique.

Par addition dans le milieu d'une substance carbonatée, telle le carbonate de calcium (CaCO_3), il est possible, comme le signale Cuinat (1971), d'augmenter la minéralisation des substances humiques; cette dernière transformation pouvant être favorisée par une bonne oxygénation de l'hypolimnion, tel qu'envisagée précédemment. Peut-être même le seul apport d'oxygène dans les couches profondes fournirait-il suffisamment de CO_2 (décomposition aérobie de la matière organique) pour remédier de lui-même à

¹ CO_2 pris au sens large de: $\text{CO}_2(\text{g})$ dissous, l'acide carbonique (H_2CO_3), l'ion bicarbonate (HCO_3^-) et l'ion carbonate (CO_3^{2-}).

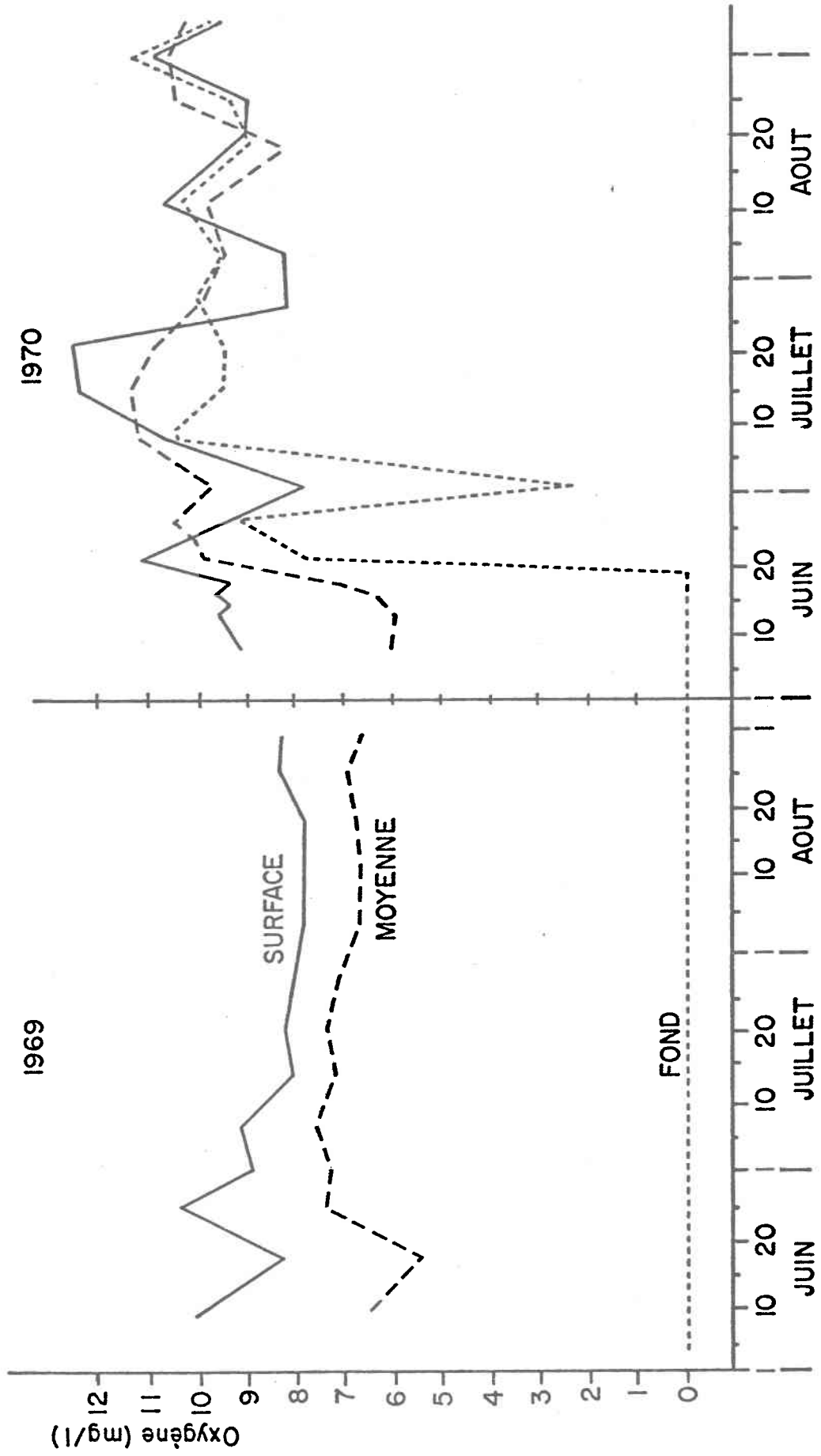


FIGURE 11. Teneur en oxygène dissous en surface, au fond et moyenne pour le lac Hemlock au cours de l'été 1969 (non oxygéné artificiellement) et au cours de l'été 1970 (oxygéné), (Tiré de Fast, 1973).

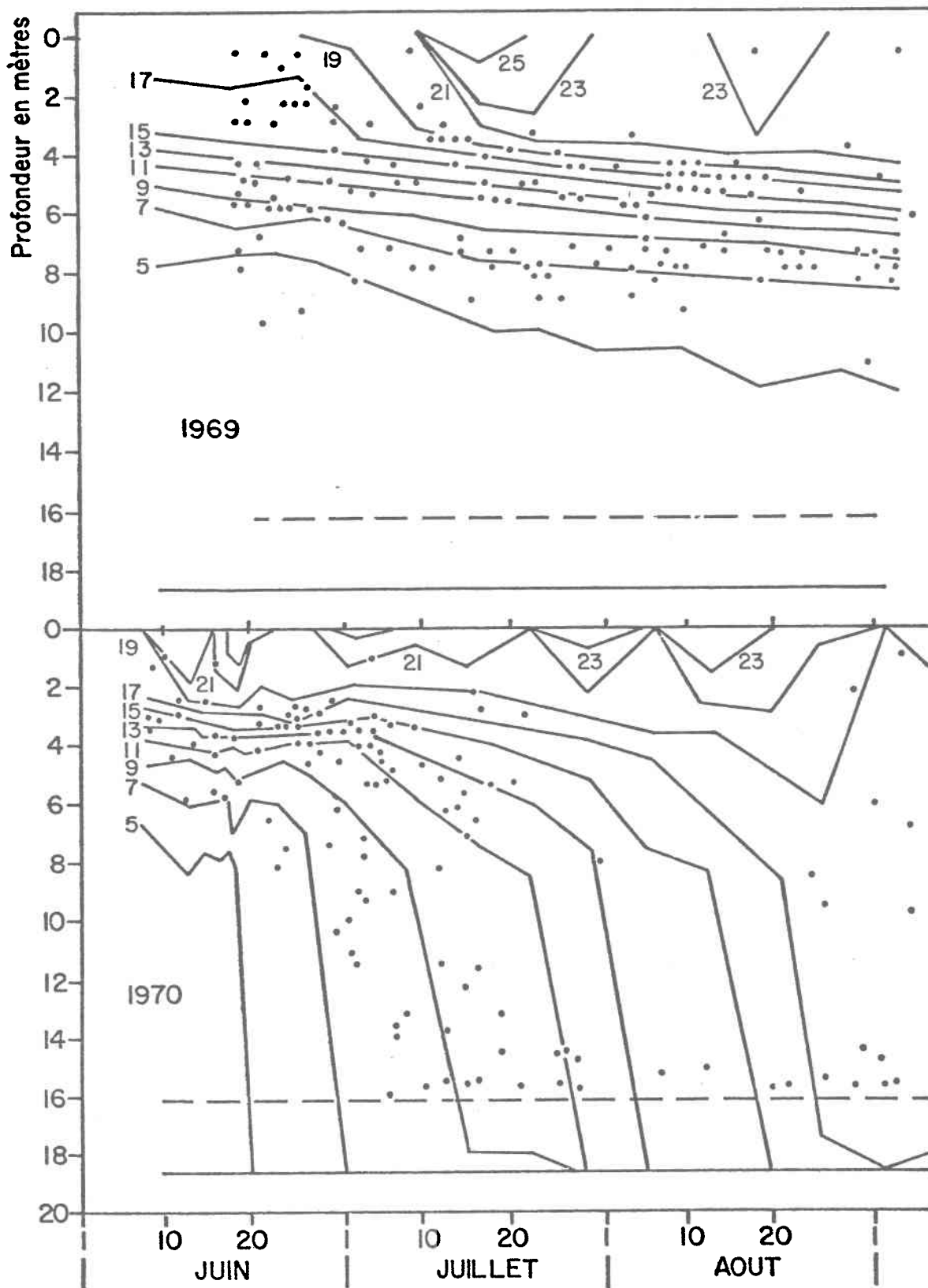


FIGURE 12. Distribution de la truite arc-en-ciel et courbes isothermes du lac Hemlock avant oxygénation (été 1969) et après oxygénation (été 1970). Chaque point représente un poisson alors que les isothermes sont en degrés Celsius (Tiré de Fast, 1973).

ce problème.¹

Comme il a été mentionné, l'effet principal de la fertilisation sur les producteurs primaires est l'accroissement de leur biomasse. A son tour, le zooplancton, quand il n'est pas incommodé par certains stress environnementaux (diminution d'oxygène dissous, variations de pH, etc.), suit, avec un certain délai, les mêmes tendances. De plus, il semble que cet effet s'accompagne d'une augmentation du nombre d'organismes benthiques, ainsi que l'apparition de nouvelles espèces sans pour cela que les pionnières ne disparaissent (Smith, 1948).

Si l'on maintient une population de truites au moyen d'ensemencements réguliers, les espèces compétitrices de celle-ci seront fort vraisemblablement déplacées, tel que Smith (1948) l'a observé pour le lac Crecy (Nouveau-Brunswick).

Par contre, les espèces herbivores et détritivores risquent d'être favorisées et d'interférer avec la production de truites par compétition spatiale et par prédation des oeufs.

Une des conséquences, et non des moindres, qu'aura l'augmentation

¹ Bien que certains organismes benthiques et planctoniques soient sensibles à de faibles variations de pH, il ne semble pas en être de même pour la truite. Daye et Garside (1975) signalent que des truites mouchetées (*Salvelinus fontinalis* M.) juvéniles soumises à des stress aigus et chroniques d'une durée maximale de 10,000 minutes, à des températures de 10°C et 20°C, enregistraient une mortalité en-dessous de pH = 3.5 et en-dessus de pH = 9.8.

pH = 3.6	20% mortalité	t =	T = 10°C
pH = 3.6	10% mortalité	t = 5,700 min.	T = 20°C
pH = 4.2	0% mortalité	t = 10,000 min.	T = 10°C et 20°C
pH = 9.5	0% mortalité	t = 10,000 min.	T = 10°C et 20°C
pH = 10.0	100% mortalité	t = 1,000 min.	T = 10°C et 20°C

de la production de truites sera une recrudescence de sa prédation, ses prédateurs pouvant être aquatiques (poissons) ou terrestres (oiseaux, mammifères). Si le cas se présente, il y aura lieu de réduire le nombre de prédateurs aquatiques par des pêches sélectives, des sélections migratoires aux entrées et sorties du lac. Dans le cas où la zone riveraine est relativement peuplée, la prédation par voie terrestre ou aérienne ne sera pas un facteur important. Dans le cas contraire, des moyens efficaces devront être envisagés (chasse, pièges, etc.).

Cette analyse préliminaire permet d'affirmer que les effets sur le milieu aquatique ne sont pas tels qu'ils constituent un critère de "non faisabilité" de la stratégie de gestion.

2.5.2 Effets sur les interrelations Homme-Lac

Dans des conditions naturelles, les deux sous-systèmes échangent de la matière et de l'énergie. L'opérationnalisation de politiques de gestion entraînera des modifications profondes au sein des échanges existants et engendreront de nouveaux types d'interrelations.

Parmi les activités déjà pratiquées, la pêche sera davantage encouragée et contrôlée. Toutes les interventions sur le milieu convergent vers la production d'une protéine précieuse. Il est normal que la durée de la saison de pêche et que l'effort de pêche soient imposés par les autorités mandatées, afin de maximiser l'utilisation de la ressource dans la finalité fixée.

Les lacs utilisés à de telles fins deviendront vite le point de mire des amateurs de la pêche, qu'ils soient d'origine locale, régionale ou autre. Pour pouvoir accueillir ces nouveaux utilisateurs, une nouvelle planification

de l'utilisation du territoire s'impose. Il faut éviter, par exemple, que le lac devienne le carrefour d'un système routier. Pour cela, les voies d'accès devront être limitées. Les habitations et commerces du système socio-économique se concentreront dans un secteur ayant, de préférence, un accès facile avec le milieu extérieur. D'autres résidences, localisées à proximité de la ceinture du lac, accueilleront les vacanciers.

Une quantité restreinte de quais sera permise afin d'éviter de couper les voies d'échange entre le lac et le bassin versant. D'autres loisirs, tels la baignade, la voile, sont à envisager. Suite à la remontée de la popularité de tels sites, les activités sportives attireront davantage la population. Tant qu'elles demeurent compatibles avec la finalité, cela ne présente aucun inconvénient. Les besoins en eau pour usage domestique vont fluctuer selon la population présente. A toute utilisation d'une ressource sont associés des rejets. Comme celle-ci vaudra se faire croissante, il faudra prévoir l'élimination des rejets qui, eux aussi, s'accroîtront. D'un autre côté, vu la participation des gens autochtones à la réalisation des objectifs, il y aura peu d'efforts à consacrer à l'éducation de la population sur la protection de l'environnement.

De nouvelles interrelations se sont ajoutées à celles déjà identifiées dans le système naturel. L'équilibre doit demeurer pour assurer la persistance des relations entre les deux sous-systèmes. Les deux principales interventions, la fertilisation et l'ensemencement, associées à une surveillance adéquate de l'évolution du lac, augmenteront la production naturelle de celle-ci, ayant pour résultat final le déplacement de l'équilibre actuel vers un nouvel équilibre plus élevé.

Enfin, les gens vont davantage profiter de la nature, vont diversifier leur alimentation et acquièreront une meilleure perception de la ressource eau.

CHAPITRE III

PREAMBULES

Le principal défi de la stratégie en matière de production de protéines lacustres est son adoption et son utilisation à une échelle nationale, puis, idéalement, une intervention de l'Etat qui induirait une autoregénération de la politique au niveau local.

- considérant l'instabilité des conditions climatiques, ainsi que la prévision d'une période de refroidissement ayant des conséquences néfastes sur l'efficacité de la production agricole,
- considérant la situation actuelle de dépendance du Canada vis-à-vis des pays étrangers en matière d'alimentation, par exemple,
- considérant la mauvaise exploitation (sous-exploitation et sur-exploitation des ressources),
- considérant la "non-inépuisabilité" des ressources,
- considérant la croissance démographique qui crée de nouveaux besoins,
- considérant la volonté de la société d'améliorer la qualité de la vie,

Principe et énoncé de politique

La formulation de l'énoncé de la politique générale sera: "Viser l'optimisation de la production lacustre, en produisant une protéine précieuse

de façon relativement naturelle, laquelle contribuera à la diversification de l'alimentation des québécois."

Problématique

L'étude de la "faisabilité" de cette *politique* de production de protéines précieuses à partir de milieux lacustres doit situer en tout premier lieu le cadre de l'action stratégique et tactique qui permettra la réalisation des objectifs de cette politique. Le cadre stratégique des activités interventionnistes est la production de protéines précieuses (Abondance) en même temps que la recherche et le maintien de la qualité de la vie (Beauté, Bonté et Vérité).

Les principales interventions projetées sont une fertilisation et un ensemencement de lacs. Cependant, plusieurs inconvénients sont prévisibles tels la désoxygénation des couches hypolimniques, la présence de substances toxiques naturelles (produits de décomposition d'algues bleu-vert) ou introduites par l'activité humaine (pesticides, métaux lourds, etc.), la variation du pH et la diminution de l'alcalinité. Toutefois, il apparaît qu'à ces problèmes il existe des solutions technologiques permettant d'envisager le caractère réaliste de la stratégie envisagée.

L'aspect purement technologique étant contourné, il demeure à préciser si d'un point de vue économique, une telle *politique* se présente en étant de force. L'analyse de la rentabilité permet d'apporter un élément de la réponse à cette question.

On a estimé¹ que la production nette du troisième niveau (NP_3) se situait approximativement entre $10^3 GPP_1$ et $3 \times 10^3 GPP_1$ où GPP_1 est la production totale primaire.

On estime que pour le Québec, le rapport profondeur moyenne sur temps de renouvellement (\bar{Z}/Tw) est de l'ordre de 2 à 200 m/an.² Si, en considérant les apports en phosphore au lac (processus naturel + activité humaine + fertilisation), on se situe près de la limite permmissible établie par le modèle de Vollenweider (1973) (figure 8), on calcule facilement que pour l'écart des apports \bar{Z}/Tw établis (2 à 200 m/an) on devrait les situer entre 0.1 et 1.0 gP/m²/an. On peut dès lors estimer, à l'aide de la figure 9, que les quantités de carbone fixées sont de 125 gC/m²/an (pour $\bar{Z}/Tw = 2$ m/an) et de 200 gC/m²/an (pour $\bar{Z}/Tw = 200$ m/an), ce qui correspond à la production primaire totale GPP_1 . On peut écrire:

$$GPP_1 = 125 \text{ à } 200 \text{ gC/m}^2/\text{an}$$

De l'équation précédemment établie, la production nette truite (NP_3) peut être estimée comme comprise entre:

$$NP_3 = 125 \times 10^{-3} \text{ gC/m}^2/\text{an} \text{ (pour } \bar{Z}/Tw = 2 \text{ m/an) et}$$

$$NP_3 = 600 \times 10^{-3} \text{ gC/m}^2/\text{an} \text{ (pour } \bar{Z}/Tw = 200 \text{ m/an).}$$

¹ c.f. paragraphe 2.3: Evaluation de la limite supérieure de production.

² \bar{Z}/Tw faible → Lacs peu profonds (\bar{Z} faible) et faible hydraulicité (Tw élevé),

\bar{Z}/Tw fort → Lacs profonds (\bar{Z} élevé) et forte hydraulicité (Tw élevé),
Faible hydraulicité (peu d'apports) caractéristique de lacs ayant des bassins de drainage de faible superficie (lac de tête).

Si l'on admet que, d'une part, un (1) gramme de carbone correspond à dix (10) kilocalories, que un (1) gramme de poisson (poids sec) correspond à cinq (5) kilocalories, et que, d'autre part, le rapport poids sec sur poids humide est, chez le poisson, de l'ordre de 20%, on peut déduire que un (1) gramme de carbone est équivalent à dix (10) grammes de poisson évalué en poids humide (Anonyme, 1971).

Ainsi, NP_3 se situe entre 125×10^{-2} g.poisson/m²/an et 600×10^{-2} g.poisson/m²/an, soit une production de truite estimée de:

$NP_3 \# 10$ kg/ha/an pour de faibles valeurs de \bar{Z}/Tw

ou

$NP_3 \quad 60$ kg/ha/an pour de fortes valeurs de \bar{Z}/Tw ,

et ceci, rappelons-le, pour des charges en phosphore ne dépassant pas la limite permmissible établie selon le modèle de Vollenweider (1973). A la lumière de ces résultats, on entrevoit la nécessité d'utiliser des lacs dont le rapport \bar{Z}/Tw est aussi élevé que possible, la charge en phosphore admise, et par le fait même, la production spécifique y étant plus importante.

Le Nord-Américain moyen consomme environ 25 grammes de poisson par jour (McHale, 1972), soit approximativement 10 kg/an. Ainsi, en supposant que la nourriture en poisson ne soit constituée que de truites, la capacité par hectare de lac serait de une à six (1 à 6) personnes.

Supposons que l'on fixe à 20 kg la quantité de poissons retirés par hectare de lac et par an, que le nombre de poissons retirés par rapport au nombre ensemencé soit de 50% (Smith (1968) a obtenu des rapports de 20% pour des ensemencements en fretin, et 90% pour des ensemencements en trui-

telles de 1 an), que les poissons ensemencés ont un poids moyen de 0.15 kg (20 - 22 cm), que les poissons pêchés pèsent en moyenne 0.40 kg.

si n_s nombre de poissons pêchés/ha de lac/an

n_e nombre de poissons ensemencés/ha de lac/an,

nous avons

$$n_s \times 0.4 = 20 \text{ kg} \quad \text{d'où} \quad n_s = 50 \text{ poissons/ha/an}$$

$$n_e = 100 \text{ poissons/ha/an}$$

Il est également admis que le coût de production d'un poisson de 0.15 kg élevé en pisciculture est de 0.50 à 0.60¢, nourriture, main-d'oeuvre, amortissements, etc. compris (Samson, L., (1977), communication personnelle). Le prix de revient à l'hectare de lac peut donc être évalué entre \$50.00 et \$60.00 par an.

Pour une famille se composant en moyenne de quatre (4) personnes, le coût annuel sera d'environ \$100.00 à \$120.00, puisque deux (2) hectares seront utilisés par elle.

Tous ces résultats, résumés dans le tableau suivant, montrent qu'une telle entreprise est réalisable:

\bar{Z}/Tw pour le Québec	2 - 200 m/an
L_d = apport en phosphore permmissible	0.1 - 1.0 gP/m ² /an
Production totale primaire (GPP ₁)	125 - 200 gC/m ² /an
Production nette de truite	10 - 60 kg/ha/an
Nombre de personnes à l'hectare de lac	1 - 6 personnes/ha

Pour

Quantité pêchée	20 kg/ha/an
Poids de capture	0.4 kg
Poids à l'ensemencement	0.15 kg
Coût à l'hectare de lac	\$50.00 - \$60.00/an
Coût par famille	\$100.00 - \$120.00/an

CHAPITRE IV

ETUDE D'UN CAS PARTICULIER:

LE LAC MONTJOIE

Dans le but d'apporter de nouveaux éléments à la tentative de quantification effectuée dans le chapitre précédent, il serait intéressant d'appliquer les résultats obtenus à un cas particulier. La principale orientation de cette étude sera d'ordre économique.

Le lac envisagé est le lac Montjoie, situé sur le bassin de la rivière Saint-François. Ses principales caractéristiques sont données dans le tableau suivant (Potvin, 1976):

Latitude	45°24'
Longitude	72°05'
Profondeur moyenne	7.9 m
Profondeur maximale	22.2 m
Superficie	3.3 km ²
Volume	26.4 x 10 ⁶ m ³
Périmètre	11.3 km
Temps de renouvellement	0.60 années

Le lac Montjoie est un lac de tête, le ruisseau de la clef, affluent de la Saint-François, y prenant naissance. Il est, dans le modèle de Voltenweider (1973), considéré comme oligotrophe (figure 8) et les quantités annuelles de phosphore qu'il reçoit sont évaluées à 0.08 g.P/m²/an (Potvin, 1976).

Le tableau suivant réunit les principales caractéristiques physiques et socio-économiques de son bassin versant:

Superficie du bassin versant BV (sans le lac)	10.6 km ²
Population totale	240 personnes
Population saisonnière	230 personnes
Population permanente	10 personnes

UTILISATION DU TERRITOIRE

Zones agricoles	0.3 km ²	(2.5% du BV)
Zones improductives	0.6 km ²	(6.2% du BV)
Surface d'eau (s.-s. lac Montjoie)	0.06 km ²	(0.6% du BV)
Forêt avec substrat igné	2.9 km ²	(27.2% du BV)
Forêt avec substrat sédimentaire	6.8 km ²	(63.5% du BV)
Affectation urbaine	-----	

TABLEAU 3: Caractéristiques du sous-système socio-économique du lac Montjoie (tiré de Potvin, 1976).

A partir de cet ensemble de données, nous allons déterminer successivement les quantités de phosphore à rajouter annuellement pour fertiliser le lac, la production nette de truite en résultant, les quantités de truite à ensemercer et le coût de l'opération.

La fertilisation

Le rapport profondeur moyenne sur temps de renouvellement est, pour le lac Montjoie, de 13.1 m/an (7.9 m/0.6 an). Pour une telle valeur, la limite permmissible établie par le modèle de Vollenweider (1973) correspond à un apport spécifique en phosphore de 0.35 g.P/m²/an. Les apports actuels

étant de $0.08 \text{ g.P/m}^2/\text{an}$, les quantités à introduire artificiellement sont de $0.35 - 0.08 = 0.27 \text{ g.P/m}^2/\text{an}$, soit, pour une superficie de lac de $3.3 \cdot 10^6 \text{ m}^2$, $0.27 \times 3.3 \cdot 10^6 \approx 900 \text{ kg}$ de phosphore.

Malheureusement, les données d'apports en azote ne sont pas disponibles; il est donc difficile de prévoir les quantités nécessaires pour la fertilisation. On peut toutefois les estimer comme étant 14 fois celles de phosphore, soit 12,600 kg. En résumé:

quantité de phosphore 900 kg/an

quantité d'azote 1,2600 kg/an

Production de truites

A une charge spécifique en phosphore de $0.35 \text{ g.P/m}^2/\text{an}$, correspond une production totale primaire (GPP_1) de $150 \text{ g.C/m}^2/\text{an}$ (figure 12). Il a été estimé que la production nette en truite (NP_3) variait entre 10^{-3}GPP_1 et $3 \times 10^{-3} \text{GPP}_1$, soit, dans le cas étudié, entre $150 \cdot 10^{-3}$ et $450 \cdot 10^{-3} \text{ g.C/m}^2/\text{an}$, ce qui correspond respectivement à 15 kg/ha/an et 45 kg/ha/an de truites.¹

Pour une superficie de lac de 3.3 km^2 (330 ha), la production annuelle serait donc située entre 5 tonnes et 15 tonnes correspondant à une *capacité de support* de 500 à 1,500 personnes.²

Ensemencement

La population totale vivant³ sur le bassin versant du lac est de

¹ Il a été vu, dans le chapitre consacré à la politique de gestion, que un (1) gramme de carbone équivalait à 10 g. de poisson (poids humide).

² Le Nord-Américain moyen consommant en moyenne 25 g. de poisson par jour.

³ L'on admettra que les saisonniers sont vis-à-vis de l'utilisation du lac, similaires aux résidents.

240 individus. Les quantités de poissons consommés par ces derniers sont approximativement de 2,400 kg annuellement. Le plus mauvais rendement enregistré serait le cas où tous les poissons ensemencés atteignent la taille de 0.4 kg, mais où 50% d'entre eux seraient retirés du lac.¹ Dans ces conditions, la production nette s'écrit:

$$NP_3 = n_e (0.40 - 0.15) = 5,000 \text{ kg à } 15,000 \text{ kg}$$

où n_e est le nombre d'individus ensemencés

ce qui donne $n_e = 20,000$ à $60,000$ poissons ensemencés

d'où $n_p = 10,000$ à $30,000$ poissons pêchés

Coût approximatif de l'opération

Le coût de production d'une truite de 0.15 kg en pisciculture est de \$0.50 environ (cf. chapitre 3). Ainsi, le coût de l'opération (à l'exclusion de la fertilisation) serait de \$10,000 à \$30,000 par année.

La masse de poissons pêchés (mais non produite) est de

$$0.4 \times 10,000 = 4,000 \text{ kg/an}$$

$$\text{à } 0.4 \times 30,000 = 12,000 \text{ kg/an}$$

On peut donc espérer nourrir 400 à 1,200 personnes², et ce dans les hypothèses établies précédemment. Le coût per capita sera donc de:

$$\frac{10,000}{400} = \frac{30,000}{1,200} = \$25.00/\text{capita}$$

¹ Par opposition, et pour les mêmes données de base, le meilleur rendement correspondrait au cas où 50% des truitelles ensemencées mourraient immédiatement après introduction dans le lac.

² La capacité de support potentielle n'étant pas atteinte.

Le surplus de production, soit 3,600 kg à 11,600 kg (puisque 2,400 kg consommés localement) sera exporté. Le coût du kilogramme de truite exploité peut être évalué de la façon suivante: puisque le coût total est de \$10,000 à \$30,000, que la participation de la population locale est de \$6,000, \$4,000 à \$24,000 doivent être récupérés par les ventes à l'extérieur du système. Les quantités exploitables étant de 3,600 kg à 11,600 kg, le coût du kilogramme de truite vaudra, à l'exportation:

$$\frac{4,000}{3,600} = \$1.1 \quad \text{à} \quad \frac{24,000}{11,600} = \$2.00$$

les frais de transport et de gestion n'étant pas inclus. Cet ensemble de résultats peut être réuni dans le tableau suivant:

Coût d'ensemencement	\$10,000 à \$30,000
Taxes locales	\$25.00 per capita
Prix de vente du kg de truite	\$1.00 à \$2.00

Pour faire une évaluation plus rigoureuse, il aurait fallu introduire les frais engendrés par toutes les interventions prévues pour produire la protéine précieuse dans de bonnes conditions. Il est évident que répandre 900 kg¹ de phosphore et 12,600 kg¹ d'azote n'est pas une simple opération, de même que toutes les activités associées à l'exploitation (transport, personnel, gestion, etc.).

D'une façon générale, il est quand même possible d'estimer à environ \$3.00 le kg de truite pour l'exportation, et à \$25.00 - \$30.00 les taxes locales engendrées par ce type d'exploitation, par habitant.

¹ Qui correspondent en fait à des masses de beaucoup supérieures en engrais réels, car elles sont ici ramenées aux seuls éléments P et N.

CHAPITRE V

DISCUSSION

Il est facile d'entrevoir les difficultés inhérentes au choix des milieux qui pourront être récupérés dans le cadre de la politique.

Généralement, les lacs les plus productifs sont situés dans des zones où l'influence humaine se fait sentir. Le territoire, souvent sous-utilisé, l'infrastructure économique et sociale établie, il apparaît être difficile d'implanter la stratégie dans ce contexte où les traditions se manifestent déjà. D'autre part, les lacs oligotrophes sont généralement situés à des distances considérables des grands centres urbains. Ils offrent en conséquence peu d'attraits, et ceci dans le contexte social actuel, pour la population active qu'il serait nécessaire de disposer pour établir l'infrastructure socio-économique permettant le bon fonctionnement du lac comme source de protéine.

A priori, l'utilisation simultanée de la fertilisation et de l'ensemencement n'apparaît être utilisable que pour des lacs peu productifs. En effet, introduire artificiellement des éléments nutritifs dans des lacs considérés mésotrophes ou même eutrophes risque d'accélérer le processus de vieillissement à un point tel qu'il entraînerait une perte sèche de ressource. De plus, compte tenu du taux de transfert en éléments nutritifs élevés, d'une biomasse et d'une flore bactérienne importantes, de tels lacs risquent d'être inutilisables pour l'homme, pour des fins qu'il apparaît être essentiel de maintenir (pêche, récréation, etc.).

La fertilisation

Les stratégies de fertilisation peuvent être très variées; ainsi, par exemple, elle peut se limiter au contrôle du rapport [N]/[P].

Dans d'autres cas, l'oxygénation artificielle du milieu devant être maintenue pour avoir des concentrations en oxygène dissous satisfaisantes, celle-ci entraînera une remise en solution d'éléments nutritifs (minéralisation accrue) et pourra s'avérer être une "technique de fertilisation".

Toutefois, dans des milieux excessivement riches en substances nutritives, on peut envisager qu'une fertilisation adéquate exige que soient retirés du milieu les éléments nutritifs associés à la genèse des sédiments qui se sont accumulés au cours des années (dragage par suction).

La fertilisation peut se réduire aux seuls apports en éléments nutritifs provenant des rejets (humains, élevage, agriculture, etc.) associés évidemment à un contrôle du rapport [N]/[P] dans le lac.

Cependant, à ce stade de l'étude de faisabilité, il est important de mentionner que, dans la pratique, une infinité de problèmes non prévus augmenteront les difficultés d'opérationnalisation de la stratégie. On admet ainsi que la faisabilité d'un tel programme soit apparue clairement, mais qu'il est nécessaire d'entreprendre ou de poursuivre des recherches poussées dans les domaines de la fertilisation, l'oxygénation, la récupération de lacs eutrophes.

La pisciculture

L'implantation de piscicultures sur une base commerciale, au Québec,

remonte à quelques années seulement. L'entreprise gouvernementale, entre autres le ministère de l'Agriculture et le ministère du Tourisme, chasse et pêche, comme l'entreprise privée (195 piscicultures) s'y intéressent. Pendant que la première tente de faire le point sur les premières expériences dans le domaine, l'entreprise privée se garde bien de divulguer publiquement l'état de leurs entreprises. A ses débuts, l'ensemencement de poissons pour des fins d'aménagement des lacs était directement relié à l'expansion de l'élevage des truites en pisciculture.

Peu de recherches de qualité scientifique adéquate ont été réalisées sur les stratégies de culture et d'ensemencement. Est-il indispensable que des progrès soient faits dans ce sens? Par exemple, à ce jour, peu de piscicultures produisent elles-mêmes leur propre moulée (on estime son coût à 50% de l'ensemble des coûts encourus dans le fonctionnement d'une pisciculture, incluant les coûts d'installation, de terrains, d'entretien et de main-d'oeuvre). L'élevage de la truite pour fin d'ensemencement diffère de l'élevage de la truite pour fin de consommation. Dans le premier cas, on doit se soucier d'abord de sa croissance mais aussi de la qualité du milieu récepteur, de la prédation et de la pathogénicité. Dans le second cas, on se soucie de la croissance du produit puis de son introduction sur le marché.

Dans le but d'éviter le plus possible le stress à l'ensemencement, une acclimatation à l'eau du lac pourrait précéder l'introduction du poisson dans ce milieu. Les coûts de production sont assez élevés et justifient un maximum de précautions. Idéalement, une partie de la croissance du poisson peut se faire dans le lac même, en milieu isolé, avec toutes les attentions que cela comporte. Du même coup, les dangers de maladies ou d'infections pourront être minimisés. Evidemment, des truites élevées dans une eau

quasi pure ne peuvent que subir un certain stress à leur relâchement dans le milieu naturel. Ainsi, plusieurs éléments d'amélioration pourront être apportés à la pisciculture, tant sur des aspects de génie que de biologie.

Le succès des ensemencements est intimement lié à la qualité du produit en provenance de la pisciculture. Aussi, pour rendre justice à cette qualité, il est important de voir à améliorer la méthodologie utilisée. Les pratiques traditionnelles, souvent menées pour des raisons économiques, se faisaient par la voie des airs. Il apparaît probable que dans ces conditions, les stress subis au cours de l'opération soient la raison de stress des organismes et entraînent un fort taux de mortalité.

Le choix de la truite mouchetée, fait surtout pour des raisons de zonage, n'est certes pas un choix définitif. La truite arc-en-ciel pourrait être l'organisme choisi d'une telle politique de gestion: en plus de constituer, elle aussi, une protéine précieuse, elle présente des avantages à l'élevage en pisciculture, pour sa croissance rapide, pour ses tolérances dans le milieu naturel, et pour ses débouchés sur le marché, qui favorisent sa distribution.

Alternative en temps de crise

De plus, bien que la production de plusieurs espèces de poissons pour servir les fins de la population n'a pas été envisagée, il semble qu'une étude plus poussée avec plusieurs autres espèces, en les considérant en fonction de leurs compatibilités dans le milieu (espèces), puisse être envisagée. Enfin, si on ignore le goût des gens pour la truite, à titre de protéine précieuse (la qualité de la chair et du sport), si on ignore aussi le souci d'aménager nos ressources aquatiques, il est possible d'envisager la production

d'un autre type de protéines qui ne viserait qu'à satisfaire des besoins alimentaires. La perchaude et la carpe sont des exemples de cette solution alternative. Ces poissons s'adaptent à presque n'importe quelle qualité d'eau, se nourrissent autant de phytoplancton, de zooplancton, que d'organismes benthiques ou autres, ils croissent très rapidement et leur chair est de bonne qualité. De plus, pour ne pas déplacer la truite, et éviter les pertes d'énergie, l'élevage de ces poissons dans les étangs s'est avéré donner de très bons résultats. Ils offrent des facilités à la récolte que l'on ne retrouve pas avec la truite.

CONCLUSION

La sémantique énergétique développée par H.T. Odum (1972) s'est avérée un outil utile pour la perception des phénomènes environnementaux aussi complexes que la production biologique.

Il a été possible de faire ressortir l'importance de paramètres tels que les solides dissous totaux et la profondeur dans la production de protéines lacustres.

La faisabilité de l'utilisation des lacs comme sources de protéines repose sur le soin apporté à la réalisation de chacune des étapes nécessaires telles la sélection des lacs admissibles, l'organisation du milieu socio-économique et des opérations de fertilisation et d'ensemencement.

Suite à l'étude des effets de ces interventions sur le milieu, de la factibilité économique d'une telle politique, il apparaît que la faisabilité tient surtout à un contrôle adéquat du rapport $[N]/[P]$, d'une part, et à la volonté de la population, d'autre part.

Bien que le Québec soit privilégié pour l'application d'une telle politique, il se doit de résoudre et d'améliorer les aspects techniques (oxygénateurs, piscicultures, etc.) qui méritent une attention toute particulière.

Si l'éventualité de fléaux climatiques se concrétisait dans un avenir rapproché, ceci laisserait peu de temps pour mettre en place les structures nécessaires à l'exploitation des lacs. Aussi, les chercheurs et gestionnaires sont invités à unir leurs efforts pour la réalisation d'un tel projet.

BIBLIOGRAPHIE

ACKOFF, R.L. et EMERY, F.E. (1972).

On Purposeful Systems. Aldin Press, Chicago, 288 pp.

ALLEN, K.R. (1951).

The Harokiwi Stream, a Study of a Trout Population.

N.Z. Mar. Dept. Fish. Bull., 10: 236 pp.

ANONYME (1971).

Symbols Unity and Conversion Factors in Studies of Freshwater Productivity. Cable Printing Services Ltd., London, 23 pp.

ANONYME (1976).

Energy Demands of Aquaculture. Fish Farming International, 3(4): 10-13.

BALWIN, N.S. (1956).

Food Consumption and Growth of Brook Trout (Salvelinus fontinalis, M.) at Different Temperatures. Trans. Am. Fish. Soc., 86: 323-328.

CARLSON, P.S. et POLACCO, J.C. (1975).

Plant Cells Cultures: Generic Aspects of Crops Improvement. Science, 188(4188): 622-625.

CHEVALIER, R. (1977).

Problématique de l'aquaculture au Québec. Thèse de Maîtrise INRS (EAU), Québec, 1977.

CHRISTIE, A.E. (1974).

Fertilization Studies in a Precambrian Shield Lake: Kushog Lake, Haliburton County. Ontario Environment Research Report, W51: 55 pp.

CUINAT, R. (1971).

Diagnoses écologiques dans quatre rivières à truites de Normandie.

Ann. Hydrobiol., 2(1): 69-134.

DAYE, P.G. et GARSIDE, E.T. (1975).

Lethal Levels of pH for Brook Trout (Salvelinus fontinalis M.).

Can. J. Zool., 53(5): 639-641.

FAST, A.W. (1973).

Effects of Artificial Hypolimnion Aeration on Rainbow Trout

(Salmo Gairdneri R.) Depth Distribution. Trans. Am. Fish. Soc.,

102(4): 715-722.

GOH, B.S. (1977).

Optimum Size Limit for a Fishery with a Limited Fishing Season.

Ecological Modelling., 3: 3-15.

GROSS, R., MARSHALL, J.E.G. et ORR, H.P. (1944).

A Fish Farming Experiment in a Sea Loch. Nature, 153: 483-485.

HARE, F.K. (1977).

Is the climate changing? Mazingira, 1: 19-29.

HUTCHINSON, G.E. (1957).

A Treatise on Limnology. Vol. I. Chapman and Hall, London,

1,015 pp.

IVLEV, V.S. (1966).

The Biological Productivity of Waters. J. Fish. Res. Bd. Canada,

23(11): 1,727 - 1,759. (Traduit de Ivlev (1945), Uspekhi

Sovremennoi Biol., 19: 98 - 120.

KOZLOVSKY, D.G. (1968).

A Critical Evaluation of the Trophic Concept I Ecological Efficiencies. Ecology, 49: 48-60.

McHALE, J. (1972).

World Facts and Trends. MacMillan Company, New York, 95 pp.

ODUM, H.T. (1971).

Environment Power and Society. Wiley Interscience, a Division of Wiley and Sons Inc., New York, London, Sidney, Toronto, 331 pp.

ODUM, H.T. (1972a).

An Energy Circuit Language for Ecological and Social Systems: its Physical Basis. In: System Analysis and Simulation in Ecology. E.J.B.C. Pollen, Vol. II. Academic Press, New York, London, 139-211.

ODUM, H.T. (1972b).

Chemical Cycles with Energy Circuit Models. In: The Changing Chemistry of the Oceans. Ed.: D. Dyrssen and D. Jagner, Almqvist et Wiksell Stockholm. John Wiley and Sons Inc., New York, London, Sydney, 223-259.

POTVIN, P. (1976).

Relation entre l'état trophique d'un lac et l'utilisation du territoire de son bassin versant. Thèse de Maîtrise INRS (EAU), Québec, 137 pp.

PRESSCOTT, G.W. (1948).

Objectionable Algae with Reference to the Killing of Fish and Other Animals. Hydrobiologia, 1: 1-12.

RYDER, R.A. (1965).

A Method for Estimating the Potential Fish Production of North-Temperate Lakes. Trans. Am. Fish. Soc., 94: 214-218.

RYDER, R.A., KERR, S.R., LAFTUS, K.H. et REGIER, H.A. (1974).

The Morphoedaphic Index, a Fish Yield Estimator - Review and Evaluation. J. Fish. Res. Bd. Canada, 31: 663-688.

SAMSON, L. (1974).

Méthode de contrôle du taux d'exploitation de la truite mouchetée (Salvelinus fontinalis M.) dans le parc des Laurentides. Rapport No 8, Services de la Faune du Québec, M.T.C.P., Québec, 115-126.

SASSEVILLE, J.L. (1976).

Vers une nouvelle génération de méthodes d'évaluation des répercussions environnementales. Rapport d'étape 1975-1976, version préliminaire, INRS (EAU), Québec, 184 pp.

SCHINDLER, D.W. (1977).

Evolution of Phosphorous Limitation in Lakes. Science, 195: 260-262.

SCHNEIDER, S.H. (1976).

The Genesis Strategy. Plenum Press, New York, 419 pp.

SERGENT, J.P. (1976).

Le temps change, cycle ou accident? Science et Vie, 708: 14-20.

SHETTER, D.A. (1947).

Further Results from Spring and Fall Plannings of Legal-sized, Hatchery-reared Trout in Streams and Lakes of Michigan. Trans. Am. Fish. Soc., 74: 35-38.

SMITH, M.W. (1948a).

Fertilization of a Lake to Improve Trout Angling. Fish. Res. Bd., Canada, Atl. Prog. Dept., 43: 3-7.

SMITH, M.W. (1948).

Preliminary Observations upon the Fertilization of Crecy Lake, New-Brunswick. Trans. Am. Fish. Soc., 75: 165-174.

SMITH, M.W. (1952).

Fertilization and Predator Control to Improve Trout Production
in Crecy Lake. Canadian Fish Culturist, 13: 33-39.

SMITH, M.W. (1955).

Fertilization and Predator Control to Improve Trout Angling in
Natural Lakes. J. Fish. Res. Bd. Canada, 12(2): 210-232.

SMITH, M.W. (1968).

Fertilization and Predator Control to Increase Growth Rate and
Yield of Trout in a Natural Lake. J. Fish. Res. Bd. Canada, 25(10):
2,011 - 2,036.

TANNER, H.A. (1960).

Some Consequences of Adding Fertilizer to Five Michigan Trout Lakes.
Trans. Am. Fish. Soc., 89(2): 198-205.

VOLLENWEIDER, R.A. (1973).

Input-Output Models. Schweiz, 2, Hydrol. (Cit  dans Vollenweider et
Dillon, 1974).

VOLLENWEIDER, R.A. et DILLON, P.J. (1974).

The Application of the Phosphorous Loading Concept to Eutrophication
Research. National Research Council of Canada, N.R.C.C. No 13690:
42 pp.

VOLLENWEIDER, R.A., MUNAWAR, M. et STADELMAN, P. (1974).

A Comparative Review of Phytoplankton and Primary Production in the
Laurentian Great Lakes. J. Fish. Res. Bd. Canada, 31: 739-762.

WARREN, C.E. (1971).

Biology and Water Pollution Control. W.B. Saunders Company,
Philadelphia, London, Toronto, 434 pp.

WORTMAN, S. (1976).

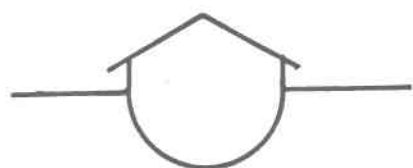
Food and Agriculture. Scientific American, 235(3): 31-39.

ANNEXE 1

LA DEFINITION DES SYMBOLES ⁽¹⁾

Source d'énergie

Représente une source d'énergie (énergie solaire, fossile, gravitationnelle, cinétique, etc.). Cette source d'énergie est normalement décrite par ses caractéristiques: intensité des flux maxima, fluctuation de la force de résistance interne, forme sous laquelle l'énergie est disponible, etc.



Réserve passive

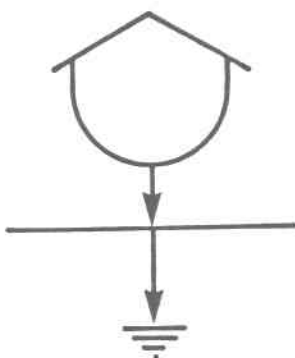
Indique la présence dans un système d'une composante nécessaire pour stocker momentanément l'énergie, ou pour permettre à d'autres composantes de jouer un rôle précis au sein de l'ensemble du système; ainsi en est-il du réservoir d'essence d'une auto et de l'habitacle permettant au conducteur de la piloter. Généralement, dans un système, une réserve passive est utilisable aux dépens d'une certaine quantité d'énergie, sans pour cela créer une nouvelle forme d'énergie potentielle.

(1) Sasseville (1976).



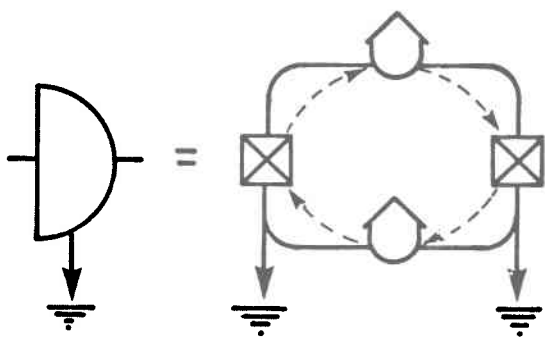
Engouffrement d'énergie:
perte en chaleur

Indique une perte d'énergie irrécupérable, absolument nécessaire, selon la deuxième (2e) loi de la thermodynamique, pour tout processus réel et spontané.



Transformation d'énergie

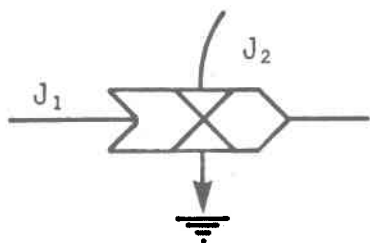
Refère à une transformation d'énergie ou à la création d'une nouvelle forme d'énergie potentielle; cette transformation nécessite un travail accompagné évidemment d'une perte en chaleur. Ainsi en est-il de la transformation de l'énergie potentielle d'une lame d'eau en énergie électrique et des pertes en friction occasionnées par la transformation.



Récepteur d'énergie cyclique

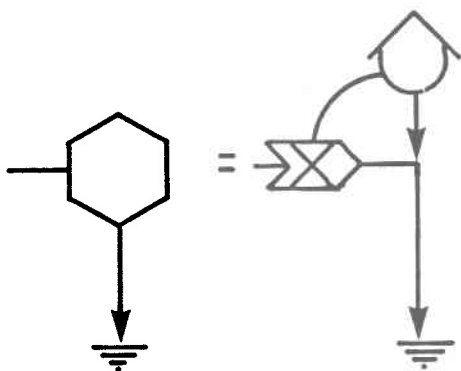
Indique que la transformation de l'énergie sous une autre forme se fait par l'intermédiaire d'un récepteur qui rend cette transformation possible; en effet, le récepteur capte l'énergie incidente et entre dans un état d'excitation correspondant à l'énergie captée moins l'énergie dissipée (perte en chaleur) puis libère cette énergie en quittant son état d'excitation et

en reprenant son état initial. Ce symbole est utilisé au sens large; il est utilisé pour représenter la transformation d'énergie radiante (lumière, vibration sonore, etc.) en une autre forme récupérable par le système.



Valve de contrôle du travail

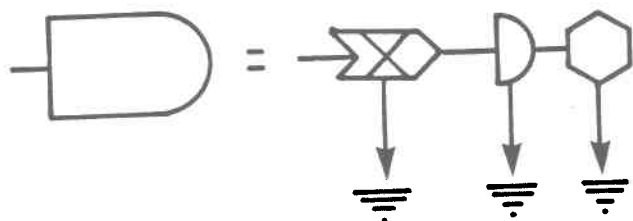
Ce module indique que le flux J_1 ne peut se manifester qu'en présence d'un flux d'énergie J_2 qui agit d'une façon telle qu'il permet à J_1 de s'écouler: par exemple, il en est ainsi lorsque l'on ouvre une valve qui contrôle le débit d'eau dans une conduite. Cette valve de contrôle a un effet multiplicatif: en effet, le flux d'eau dans la conduite est proportionnel à la pression d'une part, et, d'autre part, à la section libérée par l'ouverture de la vanne.



Auto-maintenance

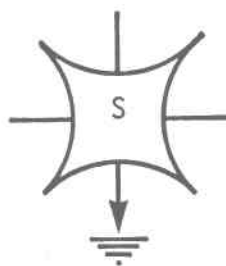
Représente la fonction systémique de maintenance où une partie de l'énergie emmagasinée sert à maintenir un certain écoulement d'énergie dans le système. A l'équilibre, le taux d'emmagasinement de l'énergie

est égal au taux d'utilisation à la valve de contrôle du travail: dans ces conditions, la réserve d'énergie demeure constante.



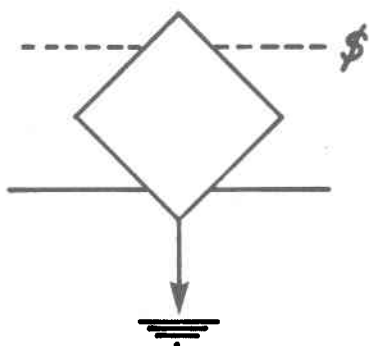
Auto-synthèse (photo-synthèse)

Ce symbole est utilisé pour représenter une fonction où l'énergie, captée par un récepteur cyclique, est transmise à une unité capable de l'utiliser tout en augmentant ou en maintenant la capacité de transfert de l'énergie via la valve de contrôle du travail à l'intrant: ce contrôle s'effectue en fournissant le matériel ou l'énergie nécessaire au maintien ou à l'accroissement du nombre de récepteurs. La plante verte en est un exemple.



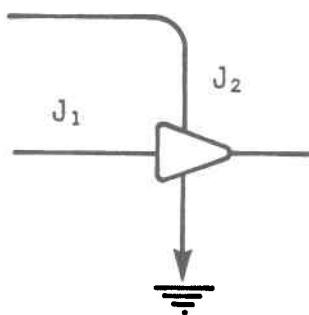
Relais

Ce symbole est utilisé pour les flux d'énergie dont la seule fonction est de contrôler un relais binaire (ouvert-fermé) autorisant ou non le passage d'un autre flux d'énergie: ainsi en est-il d'un interrupteur et de l'ampoule électrique qu'il contrôle.



Transaction

Ce symbole peut être utilisé pour représenter dans un système une circulation monétaire qui est inversée par rapport aux flux d'énergie et qui s'ajustent mutuellement l'un par rapport à l'autre. Evidemment, pour qu'il y ait une circulation monétaire (flux monétaire), il faut qu'il y ait une transaction: à chaque transaction, il y a une augmentation du flux monétaire correspondant à la perte en chaleur (énergie) inévitable pour que l'écoulement d'énergie se produise.



Amplificateur à gain constant

Dans ce module, un flux d'énergie (J_2) contrôlant le passage d'un autre flux est utilisé pour l'amplifier par un facteur constant. Ainsi, une espèce se reproduisant en 10 spécimens aura un gain de 10 aussi longtemps que le flux (J_2) sera suffisant pour maintenir un tel taux de reproduction.



Indépendance active

Ce symbole représente une propriété très répandue. En effet, lorsqu'une force croissante est appliquée à un système, ce dernier a tendance à développer une force contraire et ceci aussi longtemps que la force appliquée augmente. Quand la force appliquée cesse, l'unité modulaire permet un écoulement d'énergie proportionnel à l'impulsion. Ce module introduit généralement un délai dans le flux d'énergie.



Valve uni-directionnelle

Cette valve permet à l'écoulement de se faire dans une direction seulement même si des forces contraires peuvent se développer en aval.



Addition des flux

Deux flux d'énergie de forme similaire peuvent s'additionner à un point de jonction dans un diagramme sans qu'il y ait perte d'énergie dans l'opération.