

Université du Québec

Mémoire

présenté

à

l'Institut national de la recherche scientifique (Eau)

comme exigence partielle

de la

maîtrise ès Sciences (Eau)

par

Claude Bernard, agr. B.Sc.A. Bio-Agronomie

Revalorisation par l'alimentation animale de la biomasse issue du
traitement des eaux usées de l'industrie agro-alimentaire.

Octobre 1980

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement monsieur Denis Couillard pour ses conseils, sa collaboration et sa disponibilité dans la direction de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à monsieur Daniel Cluis qui a bien voulu accepter de corriger le texte.

Enfin, je ne saurais passer sous silence l'excellent travail de monsieur Magella Cantin pour l'édition finale du texte, monsieur André Parent pour la réalisation des figures et mademoiselle Lise Raymond pour la dactylographie du texte.

Résumé

En raison de l'ampleur des productions animales, l'agriculture québécoise doit compter sur d'importants approvisionnements en protéines, dont une grande partie lui provient des marchés extérieurs.

Par ailleurs, en raison même de la structure du secteur primaire, l'industrie agro-alimentaire de transformation des produits animaux a connu un important développement. Cependant, le traitement des effluents de ces industries, en plus d'être onéreux, pose un problème de gestion des boues.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons donc cherché à vérifier si la revalorisation dans l'alimentation animale des boues d'origine agro-alimentaire ne pourrait constituer une solution valable à ces problèmes qui se posent aux deux niveaux de l'activité agricole.

Une revue de la littérature nous a permis d'évaluer la valeur alimentaire des microorganismes purs, puis de boues de diverses origines.

Une analyse des boues provenant du traitement des effluents de la fromagerie d'Amqui nous a amené à constater que la teneur en protéines de ces boues et la composition des protéines en acides aminés se comparent à ce que divers auteurs rapportent.

Il est apparu enfin que le recyclage des boues par cette filière pourrait être avantageusement pratiqué, tant du point de vue de l'industrie agro-alimentaire, en réduisant les frais d'opération et en réglant le problème de la disposition des boues, que de celui de l'agriculture du Québec, en réduisant significativement sa dépendance des marchés extérieurs de protéines.

Table des matières

	Page
Remerciements	i
Résumé	ii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
1. INTRODUCTION	1
2. PROBLEMATIQUE	3
2.1 Productions animales et besoins en protéines	3
2.2 L'industrie agro-alimentaire au Québec	7
2.3 Rejets de l'industrie agro-alimentaire	9
2.3.1 Caractérisation des rejets	9
2.3.2 Impacts des rejets sur le milieu récepteur	9
2.4 Deux problèmes, une solution	16
3. VALEUR ALIMENTAIRE DES PROTEINES D'ORGANISMES UNICELLULAIRES	18
3.1 Qualités requises d'une protéine	18
3.2 Protéines de levures	22
3.3 Protéines d'algues	27
3.4 Protéines de bactéries	32
3.5 Protéines d'autres classes de microorganismes	36

4.	POTENTIEL DE RECYCLAGE DES BOUES PROVENANT DES USINES DE TRAITEMENT BIOLOGIQUE	38
4.1	Production de la boue	38
4.2	Composition du floc	41
4.3	Valeur alimentaire des boues	44
4.3.1	Teneur et composition des protéines dans les boues	44
4.3.2	Expériences de nutrition	46
4.3.3	Problème des métaux	55
4.4	Vers de meilleurs rendements en protéines	57
5.	ETUDE D'UN CAS: USINE LAITIERE	62
5.1	Description de l'usine	62
5.2	Traitement des eaux usées	62
5.3	Analyse des boues: méthodes	66
5.3.1	Teneur en protéines	66
5.3.2	Composition des protéines en acides aminés	67
5.4	Analyse des boues: résultats	68
5.5	Potentiel de production annuelle de protéines à l'usine d'Amqui	70
5.6	Potentiel de production annuelle de protéines au Québec	71
6.	CONCLUSIONS	74
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76

**ANNEXE: Tests pour mesurer la valeur alimentaire
d'une source protéique**

93

Liste des tableaux

	Page
2.1 Efficacité de conversion de l'énergie et des protéines consommées en protéines animales	4
2.2 Protéines nécessaires à l'alimentation du cheptel au Québec	5
2.3 Autosuffisance en protéines des productions animales	6
2.4 Industrie agro-alimentaire au Québec (1975)	8
2.5 Rejets de l'industrie agro-alimentaire (1975): transformation du lait	10
2.6 Rejets de l'industrie agro-alimentaire (1975): abattage et conditionnement de la viande	11
3.1 Besoins en acides aminés essentiels pour divers animaux	19
3.2 Composition en acides aminés essentiels de la protéine de référence de la Food and Agriculture Organization (FAO)	20
3.3 Composition en acides aminés essentiels de certaines sources protéiques	21
3.4 Composition cellulaire de quelques levures	23
3.5 Teneur en acides aminés des protéines de levures	25
3.6 Valeur alimentaire des protéines de levures comme source partielle ou unique d'azote protéique	26
3.7 Composition cellulaire de quelques algues	28

3.8	Teneur en acides aminés des protéines d'algues	29
3.9	Valeur alimentaire des protéines d'algues comme source partielle ou unique d'azote protéique	30
3.10	Composition cellulaire de quelques bactéries	33
3.11	Teneur en acides aminés des protéines de bactéries	34
3.12	Valeur alimentaire des protéines de bactéries comme source partielle ou unique d'azote protéique	35
4.1	Teneur en protéines de diverses boues	45
4.2	Profil en acides aminés de quelques boues	47
4.3	Valeur alimentaire de boues comme source d'azote protéique	48
4.4	Teneurs comparatives en métaux lourds de boues municipales et agro-alimentaire	56
5.1	Caractéristiques physico-chimiques de l'affluent et de l'effluent de l'usine de traitement des eaux usées de la fromagerie d'Amqui	65
5.2	Analyse des boues de l'usine d'Amqui. Teneur en protéines et composition des protéines en acides aminés	69

Liste des figures

	Page
2.1 Impacts d'un rejet de nature organique dans un cours d'eau fictif - Impacts physico-chimiques	14
2.2 Impacts d'un rejet de nature organique dans un cours d'eau fictif - Impacts biologiques	15
4.1 Croissance des microorganismes épurateurs et réduction de la DBO	40
4.2 Organisation du floc microbien	43
4.3 Influence du temps de séjour des cellules microbiennes dans le réacteur sur le rendement en boues	58
4.4 Modification des disques biologiques pour récolter la biomasse au stade désiré	61
5.1 Schéma de production de l'usine de la Coopérative du Bas St-Laurent, à Amqui	63
5.2 Schéma de fonctionnement de l'usine de traitement d'Amqui	64
5.3 Distribution des usines de transformation du lait et de la viande selon le nombre d'employés.	72

Introduction

Jusqu'à tout récemment, l'homme avait considéré la terre comme un réservoir inépuisable de ressources naturelles. Fort de cette conception et appuyé par un développement scientifique sans précédent, la production industrielle a fait un bond tel qu'au cours du dernier quart de siècle, elle a dépassé en quantité ce que l'humanité avait pu produire de ses origines jusqu'à la seconde Guerre mondiale.

Cette accélération s'est vite traduite, cependant, par une raréfaction de plusieurs ressources et au rejet dans l'environnement de quantités massives de sous-produits dont plusieurs sont inconnus de la nature et qui s'y accumulent plus vite que celle-ci ne peut les décomposer.

Des mots tels que pollution, environnement, écologie, rareté, etc. sont alors devenus familiers. C'est à la même époque qu'on a pris conscience de la nécessité d'épurer les rejets industriels et de recycler les sous-produits afin de réduire les besoins en épuration et de contrer la rareté et la hausse des coûts des facteurs de production.

Dans cette veine, en agriculture, on a pensé au recyclage des sous-produits par voie microbienne, par compostage d'abord ou, plus récemment, en utilisant ces sous-produits comme support à la production d'une biomasse microbienne. Cette dernière technique présente l'avantage, en plus

de la disposition des sous-produits, de produire une source protéique dans des conditions beaucoup plus facilement contrôlables que celles rencontrées en culture traditionnelle et avec des rendements incomparablement plus élevés.

Le présent mémoire s'inspire de toutes ces influences, en s'attardant au traitement des effluents de l'industrie agro-alimentaire et surtout, à la revalorisation des boues issues de ces traitements comme source protéique dans l'alimentation animale.

2. PROBLEMATIQUE

2.1 Productions animales et besoins en protéines

Les produits d'origine animale ont toujours occupé une place importante dans l'agriculture québécoise. En 1977, à l'échelle provinciale, 63.2% du revenu agricole moyen originait de ces productions (Agriculture Québec, 1978).

Or, les animaux sont d'inefficaces producteurs de protéines. Leur capacité à transformer les aliments végétaux en protéines comestibles est faible (Bowman, 1973; Winter, 1975), variant d'à peine 3% pour le mouton jusqu'à 23% pour la vache laitière (Tableau 2.1).

L'agriculture québécoise, tournée vers les productions animales, doit donc compter sur d'importants approvisionnements en protéines végétales. Ses besoins annuels, en 1977, se chiffraient à plus de 900,000 tonnes (Tableau 2.2).

Trois sources principales répondent à cette demande: les céréales, les fourrages et les suppléments protéiques (tourteaux, drèches de brasseries, criblures de minoteries, etc.) (Tableau 2.3).

Au niveau des céréales, le déficit est imposant. En effet, les importations des marchés de l'Ouest canadien totalisent 70% des quantités

Tableau 2.1: Efficacité de conversion de l'énergie et des protéines consommées en protéines animales

Production	<u>Prot. comestibles</u> <u>Energie consommée</u> (g/Mcal)	<u>Prot. comestibles</u> <u>Prot. ingérées</u> (%)
Vache laitière	5.4	23
Bovin de boucherie	1.5	6
Mouton	0.8	3
Porc	4.0	12
Poulet à griller	7.7	20
Poule pondeuse	8.0	18

Bowman, 1973

Tableau 2.2: Protéines nécessaires à l'alimentation du cheptel au Québec

Animal (1977)	Nombre de têtes ('000)	Protéines nécessaires (Kg/animal/an)	Quantité totale (t)
Taureau	46	363.69	16,730
Bouvillon	62	105.88	6,565
Veau	310	92.33	28,622
Vache laitière	825	556.55	459,154
Génisse laitière	197	214.80	42,316
Vache de boucherie	240	276.54	66,370
Génisse de boucherie	60	249.58	14,975
Porc (- de 6 mois)	1,689	80.68	136,269
Porc (+ de 6 mois)	177	86.72	15,349
Mouton	26	53.13	1,381
Agneau	17.5	3.26	57
Pondeuse	3,928	6.12	24,040
Poulette de remplacement	2,250	2.35	5,287
Poulet de grill	16,840	3.55	59,782
Chapon	1,465	3.96	5,801
Dinde	2,530	7.43	18,798
TOTAL			901,496

Agriculture Québec, 1978; Bureau de la statistique du Québec, 1977; Université Laval, Centre de recherche en nutrition, 1976).

Tableau 2.3: Autosuffisance en protéines des productions animales

	Sources (t)		
	Céréales	Fourrages	Suppléments
Besoins	183,110	467,491	250,895
Produit au Qué.	54,516	467,491	N.D.*
Importé	128,594	0	N.D.**
Autosuffisance	30%	100%	N.D.

*N.D.: Non déterminé

Une partie des besoins sous forme de drêches de brasserie et de distillerie, de farine de viande et de poisson est produite au Québec.

**N.D.: Non déterminé

Les quantités requises en tourteaux de soja et de colza: 200,000 t en 1969 (77,000 t de protéines), ainsi que des criblures de minoteries sont importées des marchés extérieurs au Québec.

Université Laval, Centre de recherches en nutrition, 1976.

requis. Les tourteaux et autres suppléments proviennent également en grande partie des marchés extérieurs. Par contre, l'autosuffisance est atteinte en totalité pour les fourrages (Université Laval, Centre de recherches en nutrition, 1976).

Ces importations de protéines se font à un coût sans cesse croissant et ont atteint la valeur de \$400,000,000 en 1978 (Bureau de la statistique du Québec, 1977; Gouvernement du Québec, 1979).

2.2 L'industrie agro-alimentaire au Québec

L'agro-alimentaire occupe une place assez importante dans l'industrie manufacturière québécoise. Ce secteur offre en effet, près de 10% des emplois et génère quelque 18.5% de la valeur globale des expéditions (Tableau 2.4).

L'importance des productions animales se reflète dans l'industrie agro-alimentaire (Tableau 2.4). C'est ainsi que 32.4% des emplois et 44.2% de la valeur des expéditions de ce secteur d'activité sont concentrés dans le domaine de la transformation des produits laitiers et de la viande (Agriculture, Québec, 1978).

Tableau 2.4: Industrie agro-alimentaire au Québec (1975).

	Etablissements nombre	Emplois nombre	Valeur des expéditions \$'000	Valeur ajoutée
Global	1303	37,084	4,431,495	1,263,424
% industrie manufacturière	13.9	9.4	18.5	12.7
Transformation du lait	135	4,940	1,035,465	178,597
% global	10.4	13.3	23.4	14.1
Abattage + conditionne- ment de la viande	144	7,092	919,363	180,735
% global	11.1	19.1	20.8	14.3
Lait + viande	279	12,032	1,954,828	359,332
% global	21.5	32.4	44.2	28.4

Agriculture Québec, 1978

2.3 Rejets de l'industrie agro-alimentaire

2.3.1 Caractérisation des rejets

Opérant dans 279 établissements, l'industrie de transformation du lait et de la viande produit chaque année des quantités importantes d'effluents qu'on peut estimer à plus de 27 milliards de litres d'eaux usées, 132,000 tonnes de DBO_5 , près de 160,000 tonnes de solides en suspension, plus de 3,200 tonnes d'azote et de 750 tonnes de phosphore (Tableaux 2.5 et 2.6).

Les quantités rejetées et les concentrations varient selon le produit, le type d'usine et d'équipements, le degré de contrôle des pertes et de réutilisation des résidus et des sous-produits (Environment Canada, 1974; Environment Canada, 1975). Les rejets de l'industrie laitière sont cependant les plus concentrés en DBO_5 et en solides en suspension.

2.3.2 Impacts des rejets sur le milieu récepteur

Ces eaux usées ne subissent que peu ou pas de traitement avant d'être déversées dans le milieu aquatique, contribuant ainsi à le dégrader de diverses façons.

Les eaux usées d'origine agro-alimentaire présentent fréquemment de fortes colorations, variant du rouge sombre dans le cas des abattoirs au

Tableau 2.5: Rejets de l'industrie agro-alimentaire (1975):
transformation du lait

Produit	Production (t)	Effluents					Rejets annuels				
		Q (l/kgprd)	DBO ₅ (mg/l)	S.S. (mg/l)	N _T (mg/l)	P _T (mg/l)	Q (10 ⁶ l)	DBO ₅ (t)	S.S. (t)	N _T (t)	P _T (t)
Beurre	65,635	11	62,000	-	-	-	722	44,763	-	-	-
Fromage	53,297	82	12,000	30,000	53	31	4,370	52,444	131,111	232	136
Lait concentré	176,175	20	1,900	-	-	-	3,524	6,695	-	-	-
Crème glacée	7,666	38	11,000	848	-	-	291	3,204	245	-	-
TOTAL	2,336	-	-	-	-	-	8,907	107,106	-	-	-

Agriculture Québec, 1978; Couillard et Cluis, 1974

Tableau 2.6: Rejets de l'industrie agro-alimentaire (1975):
abattage et conditionnement de la viande

	Produit	Production (têtes)	Effluents					Rejets annuels				
			Q (l/tête)	DBO ₅ (mg/l)	S.S. (mg/l)	N _T (mg/l)	P _T (mg/l)	Q (10 ⁶ l)	DBO ₅ (t)	S.S. (t)	N _T (t)	P _T (t)
ABATTAGE	Bêtes à cornes	270,300	2,400	1,600	2,200	200	8	649	1,038	1,427	130	5
	Veaux	429,700	2,400	1,600	2,200	200	8	1,031	1,650	2,269	206	8
	Porcs	2,632,500	2,400	1,600	2,200	200	8	6,318	10,109	13,900	1,264	51
	Moutons + agneaux	3,800	2,400	1,600	2,200	200	8	9	15	20	2	0.08
	Volaille	81,161	2,400	1,600	2,200	200	8	195	312	429	39	2
	SOUS-TOTAL	3,417,461	-	-	-	-	-	8,202	13,123	18,044	1,640	66
CONDITIONNEMENT DE LA VIANDE		Qté usinée (t)	Effluents					Rejets annuels				
			Q 1/t	DBO ₅ (mg/l)	S.S. (mg/l)	N _T (mg/l)	P _T (mg/l)	Q (10 ⁶ l)	DBO ₅ (t)	S.S. (t)	N _T (t)	P _T (t)
	SOUS-TOTAL	500,528	20,500	1,200	1,000	130	53	10,261	12,313	10,261	1,334	544
	TOTAL GLOBAL	-	-	-	-	-	-	18,463	25,436	28,305	2,974	610

Agriculture Québec, 1978; Bureau de la Statistique du Québec, 1977; Couillard et Cluis, 1974.

blanc des usines laitières (Nemerow, 1978). Ces eaux colorées atténuent la pénétration de la lumière dans l'eau, réduisant ainsi l'activité photosynthétique (Wetzel, 1975). Les réductions importantes des populations algales qui peuvent alors survenir, persistent jusqu'à ce que la coloration ait été suffisamment diluée (Mackentum, 1969).

Les solides en suspension introduits par les effluents contribuent à augmenter la turbidité des eaux réceptrices et à réduire la production primaire (Mackentum, 1969). Une partie de ces solides sédimentent, modifiant la texture des fonds. Cette sédimentation détruit les frayères et réduit le taux de survie des oeufs et alevins (Ritchie, 1972; Karr et Schlosser, 1978). La modification des fonds et la biodégradation des boues accumulées entraîne des changements majeurs dans la faune benthique. La faune de milieu non pollué, composée de représentants de divers groupes (plécoptères, mégaloptères, trichoptères, éphéméroptères, gastropodes à branchies) est alors remplacée par une faune tolérante à ces conditions dégradées. Cette population tolérante, beaucoup moins variée que la première, est principalement composée de Tubificidae et de Chironomidae (Bartsch, 1967; Bartsch et Ingram, 1967; Needham et Needham, 1962).

L'introduction d'effluents organiques dans un cours d'eau stimule la croissance de populations de bactéries hétérotrophes qui s'alimentent à même les rejets. Ces bactéries sont ensuite la proie de populations zooplanctoniques, de protozoaires ciliés, puis de rotifères et de petits crustacés (Bartsch et Ingram, 1967). Si la biodégradation des effluents organiques peut entraîner une baisse dans la teneur en oxygène dissous, son impact

majeur, sous nos conditions, est certes l'enrichissement des eaux réceptrices en nitrates et phosphates, contribuant ainsi au relèvement du niveau trophique de ces eaux (Nemerow, 1978; Vollenweider, 1968). Dans les eaux calmes, cet enrichissement stimule une croissance luxuriante d'algues et peut même provoquer la création de fleurs d'eau dominées par des chlorophytes et des cyanophytes (Brinley, 1967; Vollenweider, 1968).

L'altération des fonds et la modification des qualités physico-chimiques des eaux par les rejets organiques affectent la faune piscicole. Ainsi, suite à la dégradation du milieu, la population globale (Jones, 1964) et la diversité de la faune (Karr et Schlosser, 1978; Gorman et Karr, 1978) peuvent être réduites. Des poissons tels que les salmonidés peuvent alors céder la place à d'autres, tels que les cyprinidés, moins exigeants quant aux conditions du milieu, mais également de peu d'intérêt pour la pêche sportive (Ritchie, 1972; Jones, 1964).

Les figures 2.1 et 2.2 illustrent le cas théorique d'un cours d'eau recevant des eaux usées domestiques non traitées. Bien que chaque cours d'eau réagisse différemment selon ses caractéristiques propres, cet exemple démontre les divers impacts potentiels du rejet, sans traitement, d'effluents de nature organique, tant sur les caractéristiques physico-chimiques (figure 2.1) de l'eau que sur les organismes peuplant ce cours d'eau (figure 2.2).

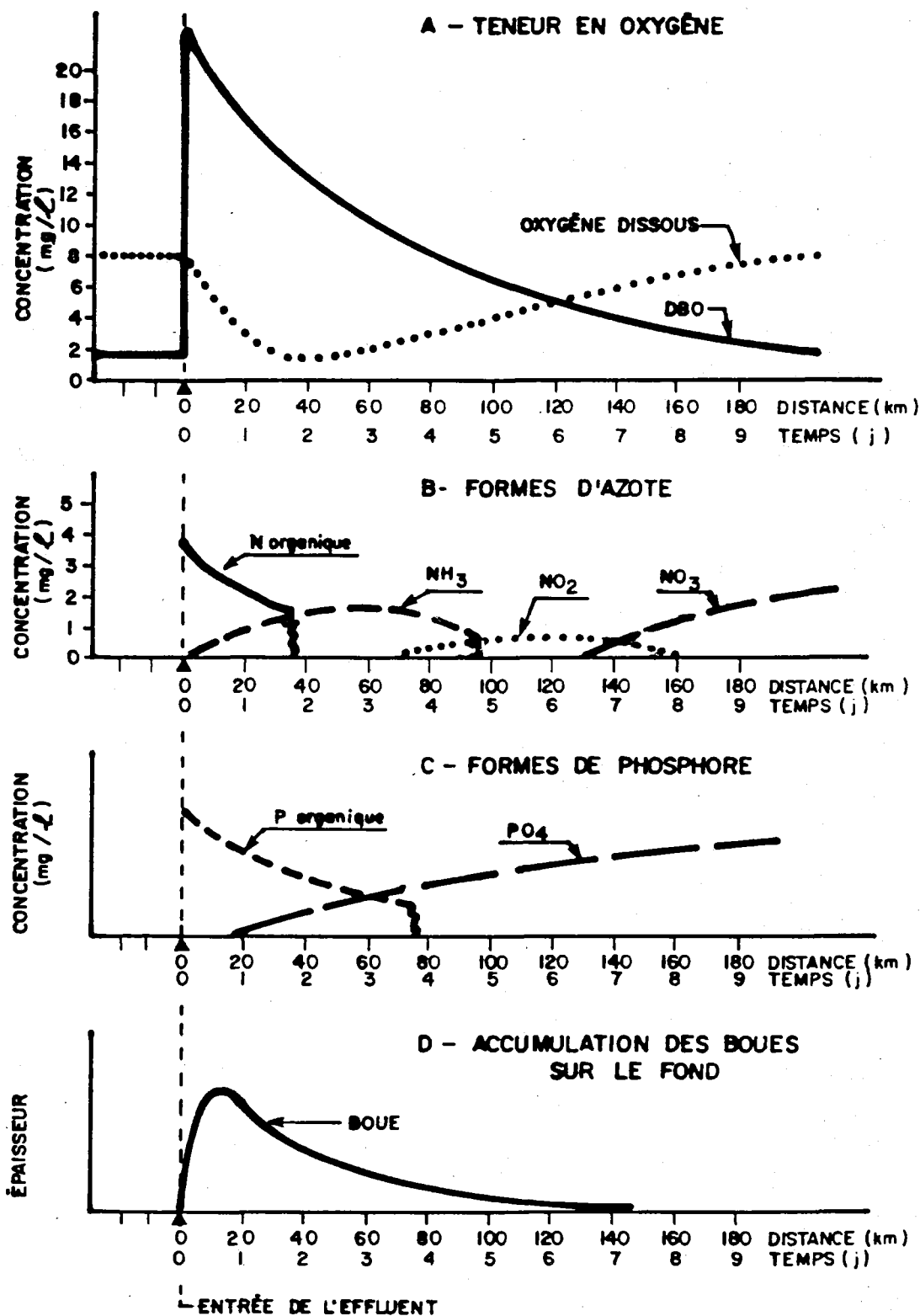


Figure 2.1 . Impacts d'un rejet de nature organique dans un cours d'eau fictif - Impacts physico-chimiques. (Bortsch et Ingram, 1967).

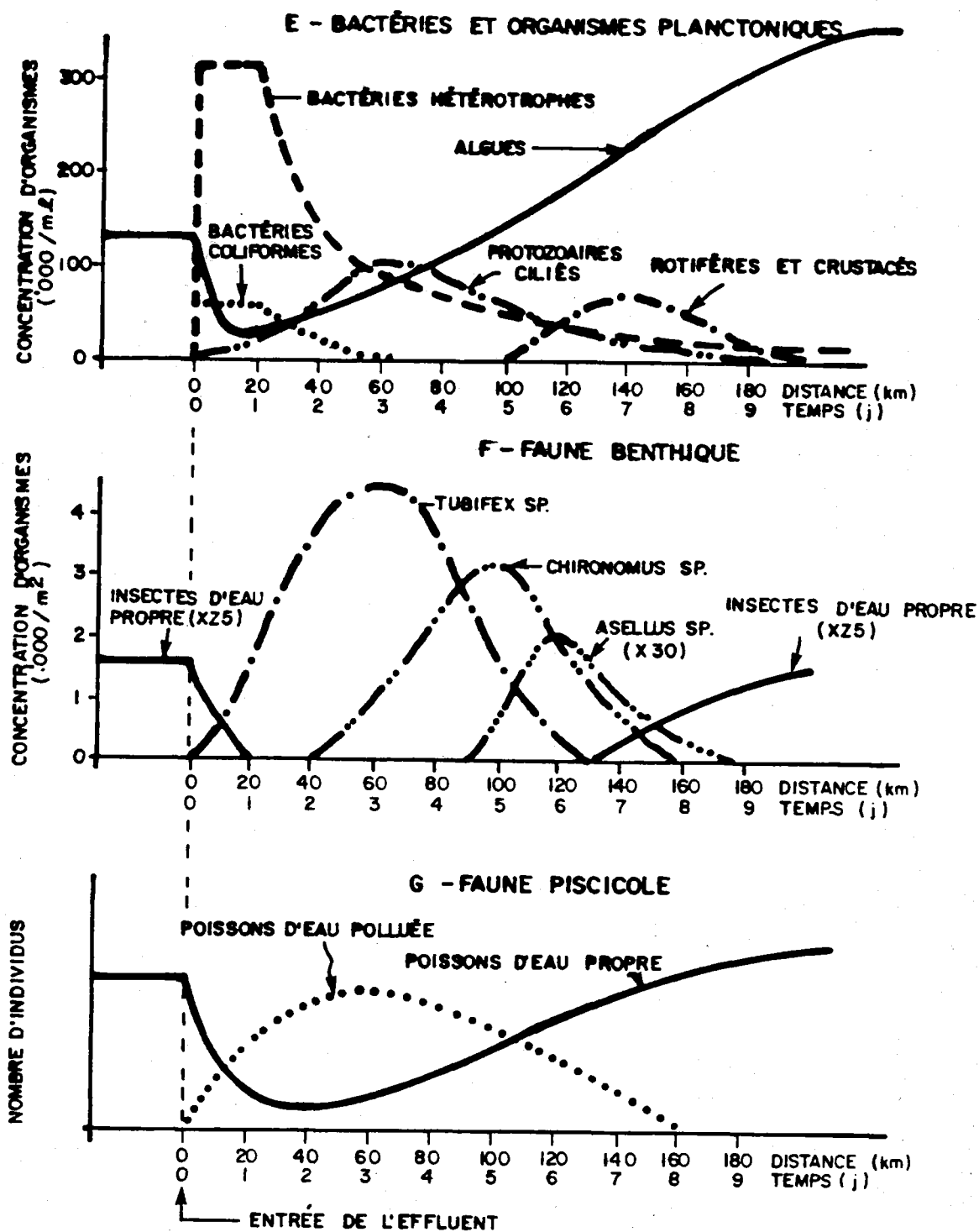


Figure 2.2 . Impacts d'un rejet de nature organique dans un cours d'eau fictif - Impacts biologiques (Bartsch et Ingram , 1967) .

Par ailleurs, on peut présumer que les usines agro-alimentaires ne soient, dans un avenir rapproché, contraintes d'épurer leurs effluents avant de les rejeter. Or, en raison de leur teneur élevée en matières organiques dissoutes, ce type d'effluents se prête parfaitement aux traitements biologiques (Nemerow, 1978). L'implantation d'équipements de traitement occasionnent cependant des frais supplémentaires pour l'industrie agro-alimentaires.

2.4 Deux problèmes, une solution

Ainsi, d'une part l'agriculture québécoise fortement tournée vers les productions animales est déficitaire en protéines et doit s'approvisionner à grands frais aux marchés extérieurs, et d'autre part, l'industrie de transformation des produits animaux devra sans doute, dans un proche avenir, faire face à des frais supplémentaires pour traiter ses effluents avant de les rejeter aux cours d'eau.

Une façon de résoudre ce double problème pourrait être le recyclage, dans l'alimentation animale, de la biomasse produite lors du traitement biologique des effluents d'usines agro-alimentaires.

En effet, le floc microbien produit au cours du processus de boues activées est un mélange hétérogène de particules minérales ou organiques, et de divers microorganismes, morts ou vivants (bactéries, champignons, algues, protozoaires, rotifères, etc.) (Eckenfelder et O'Connor, 1961).

Or, les microorganismes confèrent aux boues une certaine valeur alimentaire, en raison de leur contenu cellulaire riche en enzymes. La biomasse produite lors d'un traitement biologique pourrait donc servir de source de protéines pour le cheptel. On s'intéresse d'ailleurs depuis plusieurs années à l'utilisation des microorganismes comme source éventuelle de protéines pour tenter de faire face à la crise alimentaire mondiale que plusieurs spécialistes appréhendent pour le tournant du siècle (Mateles et Tannenbaum, 1968; Lipinsky et Litchfield, 1970; Snyder, 1970; Kihlberg, 1972; Waslien, 1975).

Ces apports de protéines pourraient éventuellement permettre aux producteurs d'animaux de devenir un peu plus indépendants des marchés extérieurs. Pour les usines agro-alimentaires, la vente de ce produit éponge-rait une partie des frais encourus pour le traitement de leurs effluents, tout en solutionnant leur problème de gestion des boues.

Dans le cadre de ce mémoire, nous voulons donc étudier:

- 1) le potentiel de production et la valeur alimentaire des protéines d'organismes unicellulaires de façon générale;
- 2) le potentiel de production et la qualité des protéines dans le cadre du traitement biologique des effluents d'usines agro-alimentaires impliquées dans la transformation des produits animaux (lait, viande);
- 3) le potentiel de production de protéines par cette filière, à l'échelle du Québec.

3. VALEUR ALIMENTAIRE DES PROTEINES D'ORGANISMES UNICELLULAIRES

3.1 Qualités requises d'une protéine

Les protéines sont une des composantes essentielles de tout être vivant. Suite aux processus cataboliques continuellement en cours, les organismes doivent pouvoir renouveler leur stock protéique pour préserver leur intégrité et assurer leur bon fonctionnement. Pour ce faire, ils doivent donc synthétiser de nouvelles protéines à partir d'acides aminés provenant de la digestion des aliments ingérés, ou encore de synthèses *in vivo* (Lehninger, 1975).

Or, certains acides aminés ne sont pas synthétisés par les non-ruminants, ou encore le sont, mais en quantités insuffisantes pour les besoins de l'animal. De tels acides aminés sont dits essentiels puisqu'ils doivent forcément être fournis à l'animal par le biais de son alimentation. Ces besoins varient d'un animal à l'autre et sont présentés au tableau 3.1.

La valeur alimentaire d'une protéine est donc d'autant plus élevée qu'on y retrouve les acides aminés essentiels en quantité et en proportion se rapprochant des normes de la Food and Agriculture Organization (FAO) (Tableau 3.2). Le tableau 3.3 indique d'ailleurs la teneur en acides aminés essentiels de quelques sources protéiques courantes.

TABLEAU 3.1 Besoins en acides aminés essentiels pour divers animaux

Acide aminé	Animal					
	Humain ^a adulte bébé		Rat ^b	Poulet ^b	Porc ^b	Poisson ^b
Phénylalanine + Tyrosine*	16	132	0.8	1.34	0.88	2.1
Isoleucine	12	80	0.5	0.8	0.63	0.9
Lysine	12	97	0.7	1.2	0.95	2
Leucine	16	128	0.75	1.35	0.75	1.6
Méthionine + Cystine**	10	45	0.6	0.93	0.56	1.6
Thréonine	8	63	0.5	0.75	0.56	0.9
Valine	14	89	0.6	0.82	0.63	1.3
Tryptophane	3	19	0.15	0.23	0.15	0.2
Arginine	-	-	0.6 ^c	1.44	0.25 ^c	2.4
Histidine	-	33	0.3	0.35	0.23	0.7
Glycine + Sérine	-	-	-	1.5	-	-
Proline	-	-	0.4	0.2	-	-

Maynard et al., 1979a: mg Kg⁻¹ poids corporel j⁻¹

b: % diète (base sèche)

c: en croissance seulement

*: peut remplacer en partie la phénylalanine

**: peut remplacer en partie la méthionine

Tableau 3.2: Composition en acides aminés essentiels de la protéine de référence de la Food and Agriculture Organization (FAO)

Acide aminé	% dans la protéine
Isoleucine	4.0
Leucine	7.0
Lysine	5.5
Méthionine + cystine	3.5
Phénylalanine + tyrosine	6.0
Thréonine	4.0
Tryptophane	1.0
Valine	5.0

Organisation mondiale de la santé, 1973.

Tableau 3.3: Composition en acides aminés essentiels de certaines sources protéiques

Acide aminé	Teneur (g/16g N)					
	FAO	Lait écrémé	Farine de soja	Farine de lin	Farine de poisson	Farine de viande
Lysine	5.5	7.1	6.1	3.6	6.9	3.6
Tryptophane	1.0	1.9	1.2	1.8	1.0	0.8
Phenylalanine + tyrosine	6.0	7.1	7.7	6.7	6.5	8.6
Méthionine + cystine	3.5	2.8	3.2	2.6	3.7	5.4
Thréonine	4.0	4.1	3.9	3.8	3.9	5.4
Leucine	7.8	9.0	6.8	6.0	6.5	9.5
Isoleucine	4.0	7.1	4.5	4.6	3.7	5.5
Valine	5.0	5.9	5.3	4.9	4.3	8.5

McDonald et al., 1973

La digestibilité constitue un deuxième critère de qualité pour toute source protéique. En effet, une protéine doit être digestible par l'animal pour lui être de quelque valeur biologique.

Enfin, l'azote protéique, une fois digéré, doit être retenu par l'animal pour participer aux réactions anaboliques (McDonald et al., 1973).

Afin de pouvoir quantifier la valeur alimentaire des protéines et de les comparer entre elles, on a développé divers tests pour mesurer jusqu'à quel point les qualités désirables chez une protéine sont présentes dans une source quelconque (voir Annexe). Les principaux sont l'indice chimique, le coefficient d'efficacité protéique, le pourcentage de digestibilité et la valeur biologique.

3.2 Protéines de levures

L'homme utilise les levures depuis des siècles dans la confection du pain ainsi que d'aliments et de boissons fermentés. Suite à cette association qui existe déjà entre les levures et l'alimentation, on comprend que ce type de microorganisme soit le mieux connu et accepté comme source non conventionnelle de protéines.

L'analyse de la composition cellulaire de quelques levures (Tableau 3.4) révèle une teneur brute en protéines variant entre 42% et 66%. Cette valeur inclut cependant une fraction azotée de nature non protéique composée de purines, pyrimidines, glucosamines, etc. En fait, on estime

Tableau 3.4: Composition cellulaire de quelques levures

Levure	Composition (% base sèche)				Références
	Azote	Protéi- nes bru- tes (Nx6.25)	Lipides	Minéraux	
<i>Candida intermedia</i>	7.0	43.8	5.4	-	Miller <u>et al.</u> , 1964
<i>Candida tropicalis</i>	7.3	45.6	6.6	-	Yamada <u>et al.</u> , 1968
<i>Candida lipolytica</i>	10.3	64.4	4.3	6.6	Evans, 1968
<i>Candida utilis</i>	8.8	55.0	5.0	8.0	Peppler, 1968
<i>Saccharomyces fragilis</i>	8.6	54.0	1.0	9.0	Lipinsky et Litchfield, 1970
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	8.0	50.0	6.0	7.0	Lipinsky et Litchfield, 1970

qu'environ 80% de l'azote total des cellules de levures est réellement protéique (Université Laval, Centre de recherches en nutrition, 1975).

Par ailleurs, la teneur des protéines de levures en acides aminés essentiels se compare avantageusement aux normes de la FAO (Tableau 3.5). En effet, plusieurs de ces acides aminés s'y retrouvent en concentration supérieures aux exigences minimales. Les principales carences qu'on y relève se situent généralement au niveau des acides aminés soufrés, la méthionine et la cystine.

Divers chercheurs ont réalisé des expériences dans le but de vérifier la valeur alimentaire des protéines de levure en les utilisant comme source unique ou partielle de protéines dans la diète d'animaux de laboratoire. Les résultats de quelques-unes de ces expériences sont présentées au tableau 3.6.

Ces divers résultats démontrent que les levures, lorsque données comme seule source de protéine, produisent des rendements inférieurs à ceux obtenus avec des protéines complètes comme la caséine (Harris et al., 1951; Waslein, 1975). Ces faibles résultats s'expliquent par la déficience des protéines de levures en méthionine. C'est pourquoi, des ajouts, mêmes faibles, de cet acide aminé rendent les protéines de levures comparables à d'autres plus riches. Les animaux qui s'en nourrissent affichent alors une croissance tout-à-fait normale (Université Laval, Centre de recherches en nutrition, 1975; Harris et al., 1951).

Tableau 3.5: Teneur en acides aminés des protéines de levures

Acide aminé	Teneur (g/16 g N)					
	Candida lipolytica	Candida tropicalis	Candida utilis	Saccharomyces fragilis	Saccharomyces cerevisiae	FAO
Alanine	6.6	6.1	3.4	5.8	-	-
Arginine	4.9	3.4	5.4	4.9	5.0	-
Acide aspartique	5.1	8.8	4.7	9.4	-	-
Acide glutamique	11.7	9.2	15.0	13.8	-	-
Glycine	4.7	5.4	4.8	3.7	-	-
Histidine	2.1	2.1	1.9	2.0	4.0	-
Isoleucine	4.9	5.7	5.3	4.8	5.5	4.0
Leucine	7.4	6.9	7.0	8.1	7.9	7.0
Lysine	7.4	8.7	6.7	8.0	8.2	5.5
Méthionine + cystine	2.7	1.5	1.9	3.2	2.5	3.5
Phénylalanine + tyrosine	8.0	7.0	7.6	8.1	4.5	6.0
Proline	4.1	3.5	3.5	4.2	-	-
Sérine	5.0	9.3	5.5	4.7	-	-
Thréonine	5.2	6.2	5.5	5.3	4.8	4.0
Tryptophane	1.4	0.6	1.2	1.7	1.2	1.0
Valine	5.6	6.6	6.3	5.6	5.5	5.0
Référence	Evans 1968	Yamada et al. 1968	Lipinsky et Litch- field	De laney et al. 1975	Lipinsky et Litchfield 1970	OMS 1973

Tableau 3.6: Valeur alimentaire des protéines de levures comme source potentielle ou unique d'azote protéique

Levure	Animal expérimental	Azote de la diète			Valeur alimentaire				Références
		% diète totale	% provenant de levures	Autres sources	Coefficient d'efficacité protéique	Digestibilité	Valeur biologique	Gain poids (g/j)	
Candida albicans	Rats	13.1	0	Caséine	0.9			1.1	Harris <u>et al.</u> , 1951
		7.6	100	Aucune	0.6			0.8	
		7.9	93	Méthionine	1.0			1.3	
Candida lipolytica	Rats	13.1	0	Caséine	0.9			1.1	Harris <u>et al.</u> , 1951
		7.4	100	Aucune	0.6			0.7	
		7.6	93	Méthionine	1.0			1.3	
Saccharomyces cerevisiae	Rats	18.0	0.0	Soja	0.98			0.63	Dwivedi <u>et al.</u> , 1972
		18.0	25.0	Soja	0.89			0.53	
		18.0	50.0	Soja	0.96			0.55	
		18.0	75.0	Soja	0.82			0.49	
		18.0	100.0	Aucune	0.86			0.52	
Saccharomyces cerevisiae	Rats	13.1	0	Caséine	0.9			1.1	Harris <u>et al.</u> , 1951
		8.1	100	Aucune	0.6			0.7	
		8.4	93	Méthionine	1.0			1.2	
Levure de brasserie	Rats	1.3	100	Aucune	2.1	80	58	0.6	Waslein, 1975
Levure de brasserie	Rats	1.3	100	Aucune		86	69	1.1	Waslein, 1975
Saccharomyces fragilis	Rats	2.7	0	Caséine	1.3			2.6	Booth <u>et al.</u> , 1962
		2.8	42	Ration commerciale	1.3			2.9	
		2.8	68	Ration commerciale	1.2			2.5	
		2.8	68	Ration commerciale + méthionine	1.2			2.6	
Torulopsis utilis	Rats	2.9	100	Aucune	1.2			1.2	Waslein, 1975
		3.0	98	0.5% méthionine	2.1			2.8	
		3.0	95	1% méthionine	2.7			3.8	
		3.2	90	2% méthionine	2.5			3.0	
		2.9	100	Aucune	1.2			1.1	
		2.9	100	Aucune	1.3			1.7	
		2.9	100	Aucune	1.6			1.4	
		3.0	98	0.5% méthionine	2.5			4.8	

D'autre part, en raison de leur richesse en lysine, les protéines de levures constituent un excellent complément aux céréales et aux rations commerciales normalement utilisées en productions animales. On obtient alors des rendements semblables à ceux obtenus avec la caséine (Dwivedi et al., 1972; Bressani, 1968; Booth et al., 1962).

3.3 Protéines d'algues

La composition cellulaire des algues se rapproche de celle des levures (Tableau 3.7). La teneur brute en protéines se situe généralement aux environs de 50% à 60%. Cependant, environ 20% de l'azote total mesuré n'est pas protéique (Université Laval, Centre de recherches en nutrition 1975).

Le profil des acides aminés essentiels (Tableau 3.8) révèle une protéine assez riche en comparaison des normes de la FAO. Les limitations majeures, comme pour les levures, proviennent principalement des acides aminés soufrés, la méthionine et la cystine. A l'occasion, on peut également trouver des carences en isoleucine.

Au tableau 3.9, on présente les résultats d'expériences de nutrition avec des protéines algales. On y démontre qu'en général les cellules d'algues sont moins digestibles, ont un coefficient d'efficacité protéique (CEP) plus faible et permettent une croissance inférieure des animaux expérimentaux en comparaison des protéines complètes comme la caséine. Par

Tableau 3.7: Composition cellulaire de quelques algues

Algue	Azote	Composition (% , base sèche)			Références
		Protéines brutes (Nx6.25)	Lipides	Minéraux	
Chlorella pyrenoisoda	9.55	59.7	8.07	8.88	Lubitz, 1963
Chlorella ellipsoïda	9.7	61	19.5	13.4	Powell <u>et al.</u> , 1961
Scenedesmus acutus	8.0 - 8.9	50 - 56	-	6 - 10	Anonyme, 1970
Spirulina maxima	9.9	62	2 - 3	-	Clement <u>et al.</u> , 1967

Tableau 3.8: Teneur en acides aminés des protéines d'algues

Acide aminé	Teneur (g/16 g N))			
	Chlorella pyrenoidosa	Chlorella vulgaris	Spirulina maxima	FAO
Alanine	5.9	-	6.8	-
Arginine	5.6	8.1	6.5	-
Acide aspartique	5.9	-	8.6	-
Acide glutamique	9.3	-	12.6	-
Glycine	4.8	-	4.8	-
Histidine	1.4	1.9	1.8	-
Isoleucine	3.4	5.2	6.0	4.0
Leucine	4.0	9.1	8.0	7.0
Lysine	7.9	8.6	4.6	5.5
Méthionine + cystine	1.8	2.4	1.8	3.5
Phénylalanine + tyrosine	7.2	5.3	9.0	6.0
Proline	4.0	-	3.9	-
Serine	2.2	-	4.2	-
Thréonine	3.2	4.0	4.6	4.0
Tryptophane	1.4	2.5	1.4	1.0
Valine	5.1	7.4	6.5	5.0
Référence:	Lubitz, 1963	Waslein, 1975	Clement <u>et al.</u> , 1967	OMS, 1973

Tableau 3.9: Valeur alimentaire des protéines d'algues comme source potentielle ou unique d'azote protéique

Algue	Animal expérimental	Azote de la diète			Coefficient d'efficacité protéique	Valeur alimentaire			Références
		% diète totale	% provenant d'algues	Autres sources		Digestibilité	Valeur biologique	Gain poids (g/j)	
1. <i>Spirulina maxima</i>	Rats	1.6	0	Caséine	2.5	100	62	1.8	Clement <u>et al.</u> 1967
		1.6	100	Aucune	2.3	76	51	0.2	
		1.6	100	Aucune	-	74	-	-0.3	
2. <i>Spongicoccum excentricum</i>	Rats	2.4	0	Caséine	2.5			5.3	Léveillé <u>et al.</u> , 1962
		2.4	100	Aucune	0.3			0.4	
		2.4	98	Méthionine	1.2			2.1	
3. <i>Chlorophyta</i> sp.	Rats	1.9	9	Caséine	2.4	100	-	2.8	Cook, 1962
		1.9	100	Aucune	1.2	65	54	1.6	
		1.9	100	Aucune	1.5	73	56	1.8	
		1.9	100	Aucune	1.5	70	49	1.5	
		1.9	99	Méthionine	1.5	-	-	1.5	
		1.9	100	Aucune	0.7	65	54	0.6	
		1.9	100	Aucune	1.4	-	-	1.6	
		1.9	75	Caséine	2.0	-	-	2.3	
		1.9	50	Caséine	2.1	-	-	2.5	
		1.9	25	Caséine	2.6	-	-	3.0	
4. <i>Chlorophyta</i>	Rats	1.7	0	Caséine	2.6	97	79	3.0	Ershul et Isenberg, 1968
		2.5	0	Soja-Poisson-Maïs	3.2			4.8	
		2.5	100	Aucune	1.7	65	73	2.8	
		2.5	60	Poisson-Maïs	2.3			3.5	
		2.5	100	Aucune	2.1	75	76	5.0	
		2.5	100	Aucune	1.7	69	71	1.4	
		1.6	100	Aucune	1.8			3.8	
5. <i>Chlorella</i>	Rats	2.4	0	Caséine		95			Casey et Lubitz, 1963
		2.4	100	Aucune		85			
6. <i>Chlorella</i>	Rats	2.1	0	Caséine	1.4			2.7	Waslein, 1975
		2.1	100	Aucune	1.0	60		1.9	
		2.1	100	Aucune	1.2	67		2.4	
7. <i>Scenedesmus quadricauda</i>	Rats	1.7	0	Caséine	2.6	98	79	3.0	Ershul et Isenberg, 1968
		2.5	100	Aucune	0.9	51	60	1.3	

contre, la supplémentation de ces protéines en acides aminés soufrés augmente considérablement leur CEP et les gains de poids journaliers permis (Léveillé et al., 1962; Lubitz, 1963).

D'autre part, les algues constituent un excellent complément à d'autres sources protéiques. En effet, données en mélange avec du soja, de la farine de poisson et du maïs (Ershul et Isenberg, 1968) ou encore avec de la farine d'avoine, de blé concassé et de la poudre de lait (Cook et al., 1963), les protéines d'algues ont démontré un CEP et permis des gains de poids égaux ou même supérieurs à ceux enregistrés avec la caséine.

De la même façon, le remplacement de 75% de la farine de poisson, dans une diète orge-farine de poisson, par des cellules d'algues, n'a pas diminué le taux de croissance des porcs qui s'en nourrissaient (Hintz et al., 1966). Cook (1962) rapporte également qu'un mélange caséine-protéines algales produit des rendements égaux à ceux de la caséine seule.

Par ailleurs, Hintz et ses collaborateurs (1966) ont trouvé que les ruminants profitent mieux des protéines algales que les non-ruminants. Ainsi, un mélange de trois algues a démontré une digestibilité de 73% chez le mouton et de 74% chez les bovins, alors qu'elle n'était que de 53%-55% chez le porc.

Suite à leurs travaux, Oswald et Golueke (1968) concluent également à une meilleure utilisation des protéines algales par les ruminants.

Le fait de détruire les cellules avant d'en nourrir les animaux peut augmenter la digestibilité et la valeur biologique des protéines d'algues, comme l'indiquent les travaux de Casey et Lubitz (1963) et ceux de Cook (1962).

3.4 Protéines de bactéries

La teneur brute en protéines des cellules bactériennes est généralement plus élevée que chez les autres classes de microorganismes, pouvant atteindre jusqu'à 80% (Tableau 3.10). Waslein (1975) mentionne que ce pourcentage est maximal lorsque les cellules sont récoltées en phase de croissance logarithmique.

Le profil en acides aminés essentiels de ce type de protéines est également mieux équilibré et plus conforme aux normes de la FAO que celui des protéines d'algues ou de levures (Tableau 3.11). Cependant, comme pour les autres types de protéines d'unicellulaires, les principales carences des protéines bactériennes se situent au niveau des acides aminés soufrés et, à l'occasion, du tryptophane.

Certaines expériences d'alimentation (Tableau 3.12) ont démontré que les protéines bactériennes présentent une valeur alimentaire intéressante. La digestibilité et la valeur biologique de ces protéines, quoiqu'étant généralement plus faibles que celles des protéines animales (caséine, boeuf), sont très satisfaisantes (Zimmerman et Tegbe, 1977; Hackler et al., 1957). Des cellules de Hydrogenomonas eutropha ont démontré un coefficient

Tableau 3.10: Composition cellulaire de quelques bactéries

Bactérie	Composition (% , base sèche)				Références
	Azote	Protéines brutes (Nx6.25)	Lipides	Minéraux	
Bacillus sp.	5.1-5.8	32-36	2.8-5.2	2.4-2.8	Wolnak <u>et al.</u> , 1967
Hydrogenomonas eutropha	11.9	74.2	1.8	6.9	Foster et Litchfield, 1964
Pseudomonas # 5401	12.8	80	1.7	5.6	Ko et Yu, 1968

Tableau 3.11: Teneur en acides aminés des protéines de bactéries

Acide aminé	Teneur (g/16 g N)			
	Pseudomonas # 5401	Cellulomonas sp.	Bacillus megaterium	FAO
Alanine	6.37	-	8.4	-
Arginine	4.68	6.46	3.9	-
Acide aspartique	8.47	-	7.4	-
Acide glutamique	10.05	-	16.9	-
Glycine	4.26	-	5.8	-
Histidine	1.87	7.84	1.8	-
Isoleucine	4.33	5.37	3.4	4.0
Leucine	6.74	7.36	5.4	7.0
Lysine	9.06	7.60	6.3	5.5
Méthionine + cystine	1.24	2.01	3.55	3.5
Phénylalanine + tyrosine	5.69	4.69	5.5	6.0
Proline	2.36	-	3.8	-
Sérine	3.07	-	2.4	-
Thréonine	3.77	5.45	3.2	4.0
Tryptophane	0.91	-	0.52	1.0
Valine	5.08	7.10	4.2	5.0
Référence	Ko et Yu, 1968	Han et al., 1971	Bough et al., 1972	OMS, 1973

Tableau 3.12: Valeur alimentaire des protéines de bactéries comme source partielle ou unique d'azote protéique

Bactérie	Animal expérimental	Azote de la diète			Valeur alimentaire			Références
		% diète totale	% provenant de bactéries	Autres sources	Coefficient d'efficacité protéique	Digestibilité	Valeur biologique	
1. Diverses, de boues activées	Rat	1.6	0	Boeuf		89	76	Hackler <u>et al.</u> , 1957
		1.6	100	Aucune		52	51	
2. Diverses, de boues activées	Mouton	1.9	0	Soja		66	60	Hackler <u>et al.</u> , 1957
		1.8	18	Soja		55	69	
3. Bacillus megaterium	Rat	1.6	0	Caséine + Méthionine		88	89	Tannenbaum et Miller, 1967
		1.6	100	Aucune		56	60	
		1.6	100	Aucune		67	70	
4. Flavobacterium sp.	Rat	2.9	0	Boeuf		99	62	Abdo <u>et al.</u> , 1964
		2.9	100	Aucune		82	41	
5. Diverses, du rumen	Rat		0	Soja	1.0	92	28	Neidhart, 1963
			100	Aucune	3.6	77	41	
			100	Aucune	2.1	73	28	

d'efficacité protéique (Neidhart, 1963) et une valeur biologique (Calloway et Kumar, 1969) pratiquement égaux à ceux de la caséine, lorsqu'introduite dans la ration alimentaire de rats de laboratoire.

On ne rapporte aucun effet adverse lors de l'introduction de cellules de Pseudomonas dans la diète de souris, de poulets et de porcs (Ko et Yu, 1968) ou dans celle de souris, de chiens, de porcs et de singes (Waslein et al., 1969).

Ainsi, les protéines bactériennes, en raison de leur composition en acides aminés, font un excellent complément aux rations alimentaires courantes telles que la maïs, le soja et le petit lait. De tels mélanges produisent d'aussi bons résultats que les diètes classiques.

3.5 Protéines d'autres classes de microorganismes

Bien qu'on leur ait accordé beaucoup moins d'importance qu'aux algues, levures et bactéries, quelques auteurs ont souligné la valeur des champignons et des actinomycètes comme source de protéines non conventionnelles.

Les champignons ont une teneur brute en protéines qui varie de 30% à 60% (Dabbah, 1970). De 15% à 20% de cette valeur est cependant constitué d'azote non protéique (Université Laval, Centre de Recherches en nutrition, 1975).

La composition en acides aminés reflète, comme chez les autres microorganismes, une carence en acides aminés soufrés (Thatcher, 1954; Litchfield et al., 1963).

En raison de cette carence, les protéines de champignons ne peuvent subvenir seules aux besoins protéiques des animaux. Cependant, leur digestibilité (93%) et leur utilisation protéique nette (70% à 75%) se compare avantageusement aux protéines animales. Leur supplémentation en méthionine porte cette utilisation protéique à 100%, soit l'équivalent de l'oeuf entier (Spicer, 1971).

Il semble également que la palatabilité des protéines de champignons soit supérieure à celle des levures. Elles devraient donc être acceptées plus facilement par les animaux.

Wagner et al. (1969) ont mesuré des teneurs brutes en protéines variant de 35% à 61% chez les actinomycètes Nocardia sp. et Mycobacterium phlei. La composition de ces protéines en acides aminés s'est révélée adéquate en méthionine et plus comparable aux protéines animales que celle des autres types de protéines d'organismes unicellulaires. Des poulets, dont 25% de la diète protéique était composée de protéines d'actinomycètes, ont démontré des gains de poids égaux aux groupes témoins (Crawford et al., 1973).

4. POTENTIEL DE RECYCLAGE DES BOUES PROVENANT DES USINES DE TRAITEMENT BIOLOGIQUE

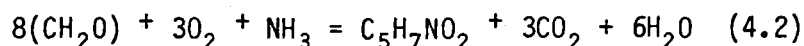
4.1 Production de la boue

L'épuration biologique des eaux usées résulte de l'action de microorganismes qui utilisent les substances organiques dissoutes des effluents comme source d'énergie et de nutriments. Il en résulte une croissance de ces microorganismes et une réduction parallèle de la DBO de l'eau à traiter (Couillard, 1972,a). Les équations (4.1) et (4.2) décrivent ces deux phénomènes:

Oxydation de la matière organique comme source d'énergie



Synthèse cellulaire



De façon générale lors de la dégradation biologique de divers substrats organiques, la proportion de DBO enlevée qui est complètement oxydée varie de 25% à 50%, alors que de 50% à 75% de cette DBO contribue à la synthèse de nouvelles cellules (Eckenfelder et O'Connor, 1961).

La croissance des microorganismes épurateurs s'effectue suivant une courbe sigmoïdale (fig. 4.1) et comporte typiquement trois phases principales (Couillard, 1972). La phase I correspond à une période de croissance logarithmique très rapide, en raison de l'abondance de nutriments et de

l'absence de facteurs inhibiteurs. Durant cette phase, les cellules sont de petites tailles, la paroi cellulaire est mince et l'activité métabolique maximale. Pendant la phase II, le milieu devient moins clément: épuisement du substrat, présence de produits d'excrétion, variations du pH. Il en résulte une réduction du taux de croissance de la population microbienne jusqu'à l'atteinte d'un plateau. A la phase III, se produit le phénomène de respiration endogène, où les cellules doivent consommer leur propre substance en raison de l'appauvrissement du milieu. Il en résulte une réduction de la biomasse et une minéralisation des cellules (Frobisher et al., 1974).

L'agglomération des microorganismes qui se développent avec des particules inertes résiduelles constitue ce qu'il est convenu d'appeler la boue, ou floc biologique. La croissance des microorganismes épurateurs détermine donc la croissance du volume de boues produites.

La croissance du floc peut alors être décrite par l'équation (4.3):

Croissance du floc biologique

$$\Delta S = aL_r - bS_a + I + aL_r - bS_a + I \quad (4.3)$$

où ΔS : augmentation du volume de boues (Kg/j)

a : fraction de la DBO convertie en boue (%)

b : taux de respiration endogène (j^{-1})

L_r : quantité de DBO enlevée (Kg/j)

S_a : quantité de MLVSS (Kg)

I : matières inertes résiduelles (Kg/j)

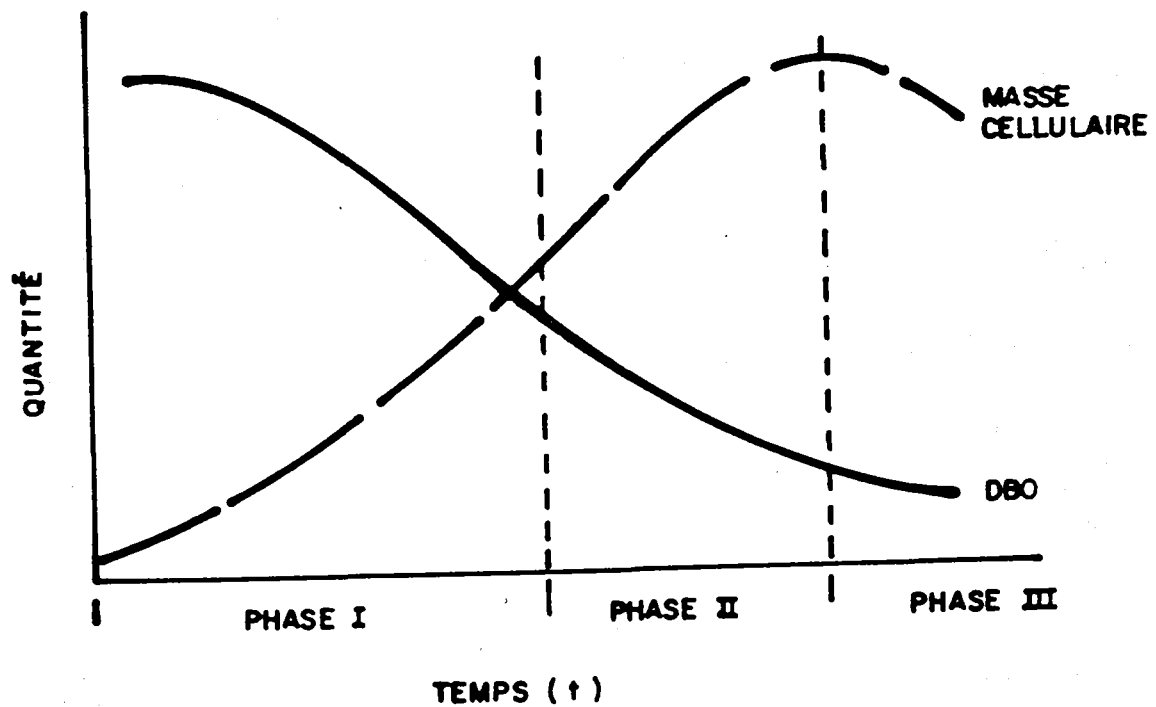


Figure 4.1. Croissance des microorganismes épurateurs et réduction de la DBO (Eckenfelder et O'Connor, 1961).

4.2 Composition du floc

Le floc biologique rassemble des représentants des principaux groupes de microorganismes (Hawkes, 1963).

Les bactéries constituent le groupe principal des floccs, tant du point de vue du nombre d'individus que de l'importance des activités de bio-dégradation. Les genres les plus fréquemment rencontrés sont:

Zooglea	Sphaerotilus
Achromobacter	Bacillus
Flavobacterium	Micrococcus
Pseudomonas	Nitrosomonas
	Nitrobacter

Les champignons se rencontrent plus souvent dans les lits bactériens que dans les boues activées. Les genres présent sont:

Geotrichum	Phoma
Pullularia	Oospora

Les algues, en raison de leurs exigences pour la lumière, s'établissent rarement lors du procédé des boues activées. On peut cependant en retrouver en surface des lits bactériens. Les espèces les plus courantes sont alors:

ChlorophytesCyanophytes

Ulothrix

Phormidium

Stigeoclonium

Monostroma

Chez les protozoaires, les ciliés sont les plus communs. On y retrouve:

VerticillésLibres

Vorticella

Paramecium

Opercularia

Linosira

Epistylis

Trichoda

On peut également rencontrer des flagellés et des rhizopodes (amibes).

Les microorganismes du floc sont organisés suivant une pyramide alimentaire, tel qu'illustré à la figure 4.2 (Hawkes, 1963). Les consommateurs primaires (bactéries hétérotrophes et/ou autotrophes) ainsi que les protozoaires saprobiques constituent la première strate de la pyramide. Ces microorganismes dégradent les substances organiques de l'affluent. Les protozoaires holozoïques, moins nombreux que le groupe précédent forment la strate suivante. Ce sont des consommateurs secondaires qui se nourrissent des consommateurs primaires. Les rotifères et les nématodes, enfin, constituent le groupe numériquement le moins important. Installés au sommet de la pyramide alimentaire, ils s'alimentent aux dépens des représentants des deux groupes précédents.

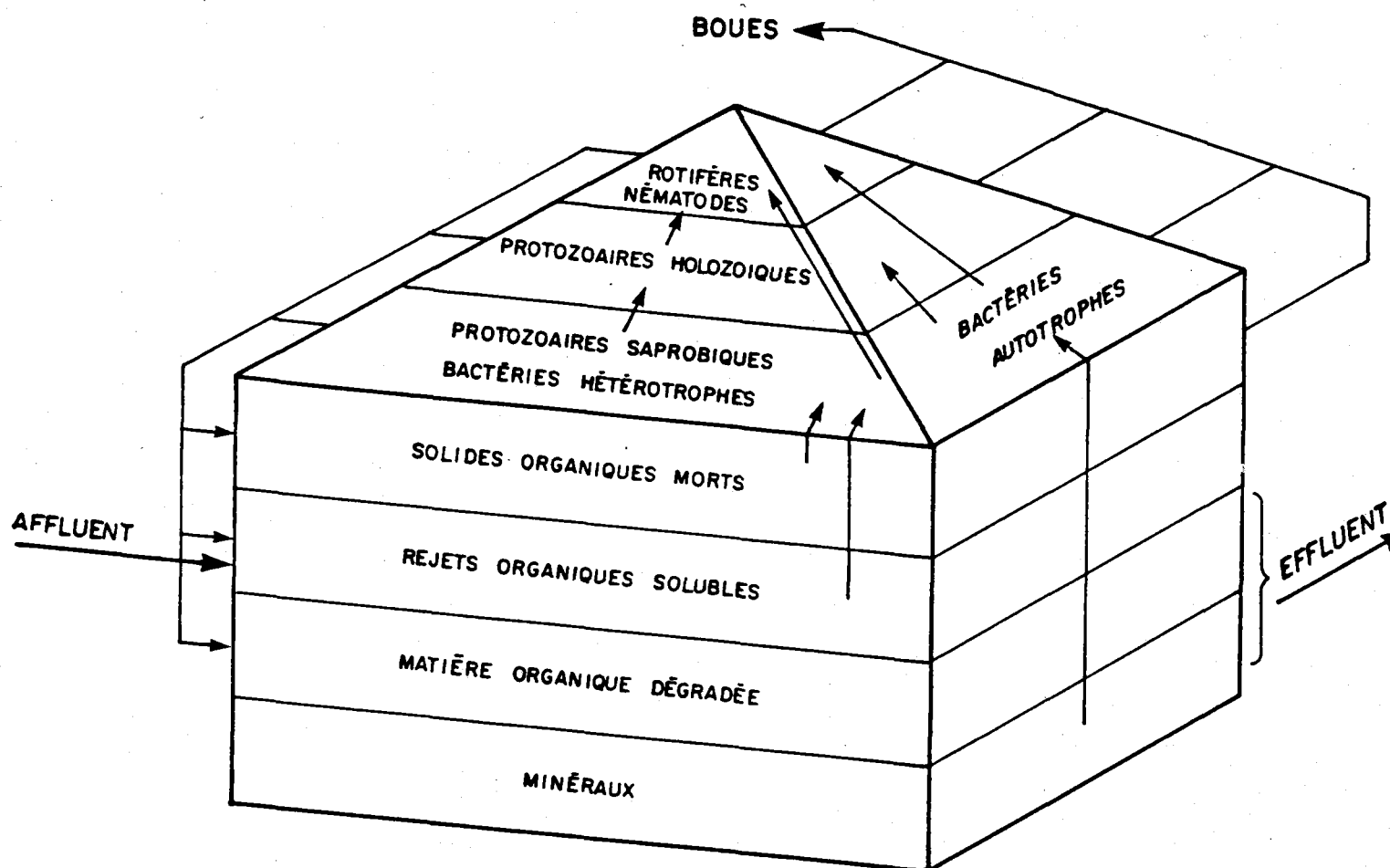


Figure 4 . 2 . Organisation du floc microbien (Hawkes , 1963) .

4.3 Valeur alimentaire des boues

Jusqu'à ce jour, le potentiel de production de protéines d'organismes unicellulaires à partir de rejets agricoles ou agro-alimentaires, fut considéré principalement en fonction de la culture d'un organisme en particulier, sous des conditions contrôlées se rapprochant des conditions de laboratoire (Birch et al., 1976; Litchfield, 1977).

De telles productions exigent cependant une maîtrise très poussée des conditions de culture, telles la température, le pH, la stérilité du milieu (Surucu et al., 1975). En évitant ces contraintes, les traitements biologiques classiques et le recyclage des boues formées deviennent donc une alternative intéressante pour la production de protéines microbiennes.

Peu d'auteurs, cependant, se sont intéressés au potentiel alimentaire de ces boues.

4.3.1 Teneur et composition des protéines dans les boues

Le tableau 4.1 résume les mesures de contenu en protéines de diverses boues, telles que rapportées par certains auteurs.

La teneur brute en protéines se situe habituellement entre 30% et 45%, sur une base sèche, exception faite des résultats de Lomova et al. (1977) qui obtiennent une valeur aussi élevée que 65.6%. La teneur véritable en protéines s'est toujours avérée inférieure à la valeur brute. Elle

Tableau 4.1: Teneur en protéines de diverses boues

Boue	Origine	Teneur en protéines (%)		Références
		Brute (Nx6.25)	Vraie	
Activée	Municipale	30-35	-	Day et Harmon, 1974
Activée	Municipale	41.3	34.0	Christiansen et Mitchell, 1978
Activée	Municipale	32.0	-	Cheeke et Myer, 1973
Activée	Laboratoire*	44.8	43.1	Sridhar et Pillai, 1973
Activée	Laboratoire*	48.3	-	Subrahmanyam <u>et al.</u> , 1960
Activée	Conserverie	39.1	-	Esvelt <u>et al.</u> , 1976
Activée	Citrus	36.1-43.8	-	Dougherty et McNary, 1958
Activée	Citrus	38.6	-	Damron <u>et al.</u> , 1974
Activée	Pâtes et papier	65.6	40.4	Lomova <u>et al.</u> , 1977
Activée	-	-	40.0	Thomanetz et Bardtke, 1978
Activée	-	32.9	-	Hackler <u>et al.</u> , 1957
Canal d'oxy- dation	Agricole	27.7	-	Harmon <u>et al.</u> , 1972

* A partir d'eaux usées municipales

n'en demeure pas moins appréciable, s'élevant jusqu'à 43%. Elle se compare ainsi avantageusement aux concentrés protéiques normalement utilisés en production animale.

Les données du tableau 4.2 révèlent des protéines généralement riches en acides aminés, et dont la composition se rapproche des normes de la FAO. Les principales carences qu'on y décèle se situent de façon constante, au niveau des acides aminés soufrés (méthionine et cystine). Occasionnellement, d'autres carences, moins sévères cependant, peuvent survenir, notamment pour la lysine ou le tryptophane.

Par ailleurs, les valeurs du tableau 4.2 sont en accord avec les analyses des protéines de microorganismes où on retrouve les mêmes types de carence.

4.3.2 Expériences de nutrition

Le tableau 4.3 résume les principaux résultats d'expériences de nutrition où des boues fournissaient une partie de la diète azotée des animaux expérimentaux.

Chez le mouton, l'introduction de boues diminue significativement la digestibilité de la ration. Hackler et al. (1957) obtiennent alors une digestibilité de 54.6% et Ammerman et Block (1964), une de 62.1%. Par contre, Hackler et al. (1957) observent une meilleure rétention par l'animal de l'azote absorbé dans le cas d'une ration additionnée de boue. C'est ainsi

Tableau 4.2: Profil en acides aminés de quelques boues

Acide aminé	Teneur (g/16 g N)			
	Activée	Activée municipale	Activée municipale	Norme FAO
Arginine	3.35	5.0	3.20-3.88	
Glycine	4.71	5.67	4.77-5.26	
Ac. glutamique	8.80	11.98	8.89	
Histidine	1.34	2.19	1.26-1.54	
Isoleucine	4.26	5.29	2.80-6.77	4.0
Leucine	5.48	8.63	4.86-6.25	7.0
Lysine	3.95	6.65	2.83-4.09	5.5
Méthionine + cystine	2.13	2.90	1.93-2.55	3.5
Phénylalanine + tyrosine	4.87	5.83	3.69-6.15	6.0
Thréonine	4.56	5.72	3.54-6.77	4.0
Tryptophane	0.76	2.72	0.68-1.05	1.0
Valine	6.08	6.33	3.63-8.52	5.0
Références	Hackler et al., 1957	Christiansen et Mitchell, 1978	Day et Harmon 1974	OMS, 1973

Tableau 4.3: Valeur alimentaire des boues comme source d'azote protéique

Origine de la boue	Animal expérimental	Azote de la diète			Valeur alimentaire					Références
		% diète totale	% provenant de boues	Autres sources	Coefficient efficacité protéique	Digestibilité	Valeur biologique	Gain poids (g/j)	Coefficient utilisation nette	
1. Activée	Mouton	11.5	18.0	Céréales-Soja		54.6	69		38	Hackler et al. 1957
		11.9	0.0	Céréales-Soja-Urée		66.8	60		40	
		12.1	0.0	Céréales-Soja		66.4	60		40	
2. Lit bactérien	Mouton	14.5	0.0	Tourteau Coton - Foin		72.2		195		Ammerman et Block, 1964
		16.2	19.0	Tourteau Coton		66.9		154		
		16.8	16.0	Tourteau Coton		62.1		210		
3. Activée conservée	Boeuf	13.0	0.0	Luzerne-Concentré	1.1	74		1,200		Esvelt et al. 1976
		13.8	6.5	Luzerne-Concentré	1.0	74		1,250		
		14.7	12.2	Luzerne-Concentré	0.88	74		1,200		
		16.5	21.1	Luzerne-Concentré	0.79	74		1,200		
4. Activée municipale	Porc	27.5	0.0		2.58			250		Firth et Johnson, 1955
		27.5	4.8		2.23			225		
		27.5	7.2		1.84			146		
		27.5	9.6		2.05			195		
5. Activée municipale	Rat	16.0	0.0	Maïs	2.22			6.1		Cheeke et Myer, 1973
		16.0	0.0	Maïs-Tourteau-Coton	1.59			4.3		
		16.0	0.0	Maïs-Hareng	2.21			5.7		
		16.0	20.0	Maïs-Soja	2.04			5.2		
		16.0	40.0	Maïs-Soja	1.77			4.2		
		16.0	60.0	Maïs	1.48			3.8		
6. Activée municipale	Rat	16.0	0.0	Maïs-Soja	2.26			6.1		Cheeke et Myer, 1973
		16.0	40.0	Maïs-Soja	1.80			5.0		
		16.0	40.0	Maïs-Soja + Méthionine	1.95			5.6		
		16.0	40.0	Maïs-Soja + Lysine	1.89			5.5		
		16.0	40.0	Maïs-Soja + Méthionine + Lysine	1.97			5.8		
		16.0	40.0	Maïs-Soja + Méthionine + Lysine + Tryptophane	2.3			6.6		
7. Canal d'oxydation	Rat	17.2	0.0	Caséine	2.62			6.5		Harmon et al., 1972
		17.2	16.0	Caséine	2.46			6.5		
		17.2	33.3	Caséine	2.05			6.1		
		17.2	50.0	Caséine	1.74			5.3		
8. Canal d'oxydation	Rat	17.2	16.0	Caséine	2.12	42.1		6.1		Harmon et al., 1972
		14.4	0.0	Caséine	2.67	46.0		5.3		
		17.2	33.3	Caséine	1.97	42.6		5.6		
		11.5	0.0	Caséine	3.29	61.2		5.5		
		17.2	50.0	Caséine	2.0	48.0		5.4		
		8.6	0.0	Caséine	3.79	63.0		4.8		

Tableau 4.3: Valeur alimentaire des boues comme source d'azote protéique (suite et fin)

Origine de la boue	Animal expérimental	Azote de la diète			Valeur alimentaire					Références
		% diète totale	% provenant de boues	Autres sources	Coefficient efficacité protéique	Digestibilité	Valeur biologique	Gain poids (g/j)	Coefficient utilisation nette	
9. Activée municipale	Caille	16.0	10.0	Soja + Méthionine	3.08			3.21		Cheeke et Myer, 1973
		16.0	20.0	Soja + Méthionine	3.02			3.15		
		16.0	40.0	Soja + Méthionine	2.84			2.76		
		16.0	40.0	Soja + Méthionine	3.13			3.16		
		16.0	60.0	Soja + Méthionine + Lysine	2.54			2.36		
10. Activée citrus	Poulet	23.0	0.0	Luzerne-Maïs	2.65			21.7		Damron et al., 1974
		23.0	4.2	Luzerne-Maïs	2.68			21.9		
		23.0	8.4	Luzerne-Maïs	2.62			22.5		
		23.0	16.8	Luzerne-Maïs	2.48			19.7		
		23.0	33.6	Luzerne-Maïs	2.38			20.1		
		23.0	33.6	Luzerne-Maïs + Méthionine + Lysine	2.50			20.2		
11. Activée	Pondeuse				Valeur alimentaire					Damron et al., 1974
					Production oeufs(%)	Poids moyen oeufs (g)	Aliments ingérés/douzaine oeufs (Kg)			
		15.0	0.0	Soja-Luzerne-Maïs	69.61	62.9	2.0			
		15.0	6.4	Soja-Luzerne-Maïs	68.32	63.4	1.98			
		15.0	12.8	Soja-Luzerne-Maïs	67.01	63.6	2.13			
		15.0	19.2	Soja-Luzerne-Maïs	69.21	63.3	2.01			
		15.0	51.2	Soja-Luzerne-Maïs	42.12	59.0	2.86			

qu'ils mesurent une valeur biologique de 69 pour ce type de ration, en comparaison de 60 pour le témoin. Ces auteurs trouvent donc un coefficient d'utilisation nette semblable pour toutes les rations, avec ou sans boue. C'est donc dire que l'introduction de boues comme source de protéines dans la rations des moutons n'influence pas significativement le niveau de rétention de l'azote alimentaire ingéré. Enfin, l'introduction de boues ne semble pas nuire à la croissance du mouton, le gain de poids journalier étant même légèrement supérieur à celui du groupe témoin (Ammerman et Block, 1964).

Chez le boeur (Esvelt et al., 1976), le coefficient d'efficacité protéique de la ration alimentaire passe de 1.05 à 0.88 et 0.79 en y remplaçant respectivement 12% et 21% des protéines conventionnelles par des protéines de boues. Par contre, la digestibilité et le gain de poids journalier ne sont pas affectés, sans égard à l'importance des ajouts de boues. De plus, l'analyse des carcasses n'a révélé aucun effet adverse en raison de l'introduction de boues, et ce, à tous les niveaux.

Des rats, dont 16.6% des protéines alimentaires provenaient de boues, ont démontré un coefficient d'efficacité protéique et des gains de poids journaliers égaux à ceux du groupe témoin. L'introduction de protéines microbiennes à des niveaux plus élevés (33% et 50%) a causé une réduction des performances des animaux expérimentaux (Harmon et al., 1972). Une autre expérience des mêmes auteurs a permis de fixer le degré de digestibilité des rations contenant des boues entre 42% et 48%, des valeurs significativement inférieures à celles de diètes ne contenant pas de boues.

Le remplacement de 50% du soja d'une ration par des boues n'a réduit ni le coefficient d'efficacité protéique ni le gain de poids journalier chez des rats (Harmon et al., 1972). Enfin, selon les auteurs, l'addition de lysine et de tryptophane double la valeur alimentaire des boues, alors que l'ajout d'un seul de ces acides aminés n'y change rien.

Cheeke et Myer (1973) travaillant également avec des rats, ont démontré que l'introduction de 20% de la diète azotée sous forme de protéines microbiennes n'influence pas significativement le coefficient d'efficacité protéique ni le gain de poids journalier. A des niveaux supérieurs, les boues ont cependant un effet négatif sur les animaux. L'addition de lysine, de méthionine et de tryptophane à une diète dont 40% des protéines sont d'origine microbienne rend la valeur alimentaire de cette ration comparable à celle ne contenant que du maïs et du soja. Ces résultats sont en accord avec ceux de Harmon et al. (1972) qui avaient identifié la lysine et la tryptophane comme étant les acides aminés limitatifs des boues. Selon Cheeke et Myer (1973), la digestibilité des protéines de boues serait d'environ 50%, une valeur comparable à celle mesurée par Harmon et al., (1972).

Chez le porc, Firth et Johnson (1955) ont remplacé avec succès jusqu'à 5% de la diète azotée normale par des boues, obtenant un CEP et un gain de poids journalier de 2.23 et 255 g/j. en comparaison de 2.58 et 250 g/j. pour les porcs consommant la diète témoin. A des taux supérieurs d'inclusion, cependant, les boues semblent avoir ralenti la croissance des animaux expérimentaux.

Du purin de porc traité de façon aérobie dans des fosses d'oxydation fut utilisé comme supplément protéique à une ration de base constituée d'un mélange de soja et de maïs (Harmon et al., 1973). Les porcs nourris de cette façon recevaient ainsi 17% de leurs protéines alimentaires par l'intermédiaires de boues. Tous ces porcs ont démontré des performances supérieures à ceux du groupe témoin, affichant des gains de poids journalier de 560 g. et des gains de poids par unité de ration consommée de 0.266, en comparaison de 520 g. et 0.249 respectivement pour les animaux ne recevant que la ration de base. De plus, Wax et al. (1972) rapportent que la consommation de ces boues par les porcs ne communique aucun goût ni odeur particulière à la viande de l'animal.

Par ailleurs, des porcs nourris de protéines microbiennes provenant non pas de boues, mais de cultures pures, ont très bien répondu à ces apports de protéines non conventionnelles. Ainsi, avec des porcelets dont 41% de la diète azotée provenait de microorganismes en remplacement de la farine de poisson, Whittemore et al. (1976) ont mesuré une digestibilité de 89.6%, significativement supérieure à celle de la ration à base de farine de poisson. Avec 65% d'azote bactérien, la digestibilité de la ration était encore de 87.9%. Lors de la même expérience, les auteurs ont mesuré une valeur biologique de 44, 49 et 43 ainsi qu'un coefficient d'utilisation nette de 39, 44 et 38 pour la diète témoin et celles contenant 41% et 65% de protéines microbiennes respectivement. L'analyse des carcasses, n'a pas révélé de différence significative entre les animaux expérimentaux et ceux nourris de la ration ordinaire, et ce aux deux niveaux d'inclusion.

Smith et Palmer (1976) ont comblé la totalité de la diète azotée de porcs avec des levures. La digestibilité d'une telle diète variait de 87% à 90%, la valeur biologique de 43 à 44 et le coefficient d'utilisation nette de 38 à 39, en comparaison de 96%, 56 et 53 respectivement pour une diète normale. L'addition de 0.44% de méthionine a rehaussé la valeur biologique de la diète microbienne à 58 et le coefficient d'utilisation nette à 52, soit l'équivalent de la diète témoin.

On a également testé la valeur alimentaire des boues pour les oiseaux. Chez la caille (Cheeke et Myer, 1973), on peut donner jusqu'à 20% de la diète azotée sous forme de boue, sans effet négatif pour le coefficient d'efficacité protéique et le gain de poids journalier. Au delà de ce niveau (à 40 et 60%), on observe un impact négatif. L'addition d'acides aminés (méthionine et lysine) permet d'atteindre des rendements semblables aux témoins, même en introduisant jusqu'à 40% de protéines microbiennes.

Chez le poulet (Damron et al., 1974), on a introduit jusqu'à 17% de l'azote alimentaire sous forme de boues sans effet significatif sur le coefficient d'efficacité protéique et le gain de poids journalier. L'addition de lysine et de méthionine améliore sensiblement la valeur alimentaire des boues, en accord avec les résultats de Cheeke et Myer (1973).

On peut donner jusqu'à 20% de leurs besoins en protéines sous forme de boue à des pondeuses, sans affecter la ponte, le poids des oeufs et l'efficacité alimentaire de l'oiseau (Damron et al., 1974). Si le jaune de

l'oeuf devient plus foncé avec l'introduction de boues dans la ration, on n'a cependant noté l'apparition d'aucun goût particulier du jaune ou de l'albumine.

Ces résultats expérimentaux suggèrent qu'on peut effectivement introduire des boues biologiques dans les rations alimentaires des animaux.

De façon générale, les boues peuvent vraisemblablement remplacer jusqu'à 20% des protéines conventionnelles de ces rations, et ce, sans nuire à l'efficacité alimentaire, ni aux rendements ou à la qualité des animaux ou des produits animaux.

Au delà de 20%, les résultats deviennent très variables d'un auteur à l'autre. La supplémentation de la ration en acides aminés (méthionine, lysine et tryptophane) devient alors nécessaire, les protéines microbiennes comptant alors pour une trop grande part de la ration.

Il se dégage également de ces résultats que tous les types d'animaux répondent convenablement à l'introduction de boues dans leur alimentation. Ammerman et Block (1964) semblent douter du potentiel alimentaire des boues pour les non-ruminants et la volaille. Cheeke et Myer (1973) sont cependant de l'avis contraire, et les résultats expérimentaux présentés au tableau 4.3 semblent leur donner raison.

4.3.3 Problème des métaux

Les métaux lourds qu'on ne décèle qu'en traces dans les réseaux d'égouts se retrouvent en concentrations importantes dans les boues d'origine municipale (Furr et al., 1976) (tableau 4.4). Ces concentrations de métaux représentent un handicap sérieux au recyclage des boues municipales par l'alimentation animale (Christiansen et Mitchell, 1978).

Par contre, une analyse des boues provenant du traitement des effluents d'une conserverie (Esvelt et al., 1976) révèle des concentrations beaucoup plus faibles que celles observées dans les boues municipales (tableau 4.4). L'analyse des carcasses de bovins ayant consommé des boues de cette origine n'a pas révélé de rétention significative de métaux lourds par ceux-ci (Esvelt et al., 1976).

Ces résultats mettent en évidence un avantage certain des boues d'origine agro-alimentaire sur celles d'origine municipale ou industrielle. Alors que celles-ci devront subir un traitement quelconque pour réduire leur teneur en métaux avant d'être acceptables comme source alimentaire, les premières peuvent être recyclées directement. Le traitement requis pour les boues municipales représente un coût additionnel qui réduit la rentabilité de la revalorisation des protéines contenues dans ces boues.

Tableau 4.4: Teneurs comparatives en métaux lourds de boues municipales et agro-alimentaire

Métal	Concentrations dans les boues (mg/l)											
	Municipales										Conserverie	
	Atlanta	Chicago	Denver	Houston	Los Angeles	Miami	Milwaukee	New York	Philadelphie	San Francisco	Mai 1975	Sept 1975
Cd	104.2	14.8	46.1	111.8	171.4	149.6	443.7	29.7	192.4	8.5	<6	
Cu	1463	578	1370	1560	2890	1200	1288	1890	2680	900	60	90
Fe	24200	8800	82800	32300	20700	9500	43000	21200	19900	30500	19500	6100
Pb	1445	605	1011	2236	3065	1467	2253	1976	7627	2521	50	60
Sn	146	166	161	234	209	289	133	202	492	133	400	
Zn	2838	1160	2860	2560	4590	1400	1370	1340	6890	601	110	200
As	3.6	29	14	20.4	26.0	10.0	3.3	8.0	16.2	6.4	3.5	4.3
Références	Furr et al., 1976										Esvelt et al., 1976	

4.4 Vers de meilleurs rendements en protéines

Les boues dont on a considéré le potentiel de recyclage dans l'alimentation animale provenaient d'installations aux boues activées. Or la disposition de ces boues pose un problème sérieux en même temps qu'onéreux aux opérateurs de ces installations (Jamonet, 1973; Furr et al ., 1976). En conséquence, un des moyens utilisé pour réduire le volume de boues à évacuer est d'allonger le temps de séjour des cellules microbiennes dans le réacteur. En effet, la croissance microbienne nette dans un réacteur opérant en continu peut être décrite par l'équation 4.4 (Sherrard et Schroeder, 1973):

$$R_g = -Y_{obs} R_{su} \quad (4.4)$$

où R_g : taux net de croissance microbienne (mg micro-organismes/l.j)

$-Y_{obs}$:taux observé de production cellulaire
(mg microorganismes/mg DCO enlevée)

R_{su} : taux d'utilisation du substrat (mg DCO enlevée/l.j)

Comme R_g est indépendant de R_{su} (Sherrard et Schroeder, 1973), le taux de production de boue dépend de Y_{obs} qui lui varie à l'inverse du temps de séjour dans le réacteur (figure 4.3). Le taux net de croissance microbienne est donc également inversement proportionnel au temps de séjour des cellules dans le réacteur.

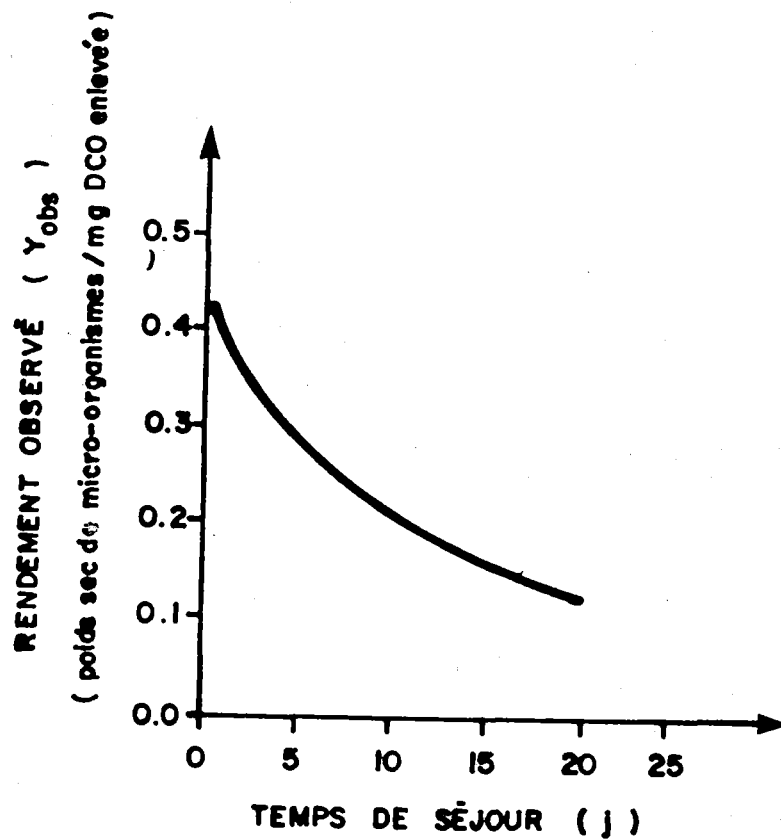


Figure 4.3 . Influence du temps de séjour des cellules microbiennes dans le réacteur sur le rendement en boues (Sherrard et Schroeder , 1972) .

On peut également réduire le volume de boues à évacuer en augmentant le temps de séjour des boues dans le bassin de décantation. Privés des apports de matières organiques dégradables, les microorganismes en sont alors réduits à consommer leur propre matière constituante (Vaseen, 1976).

Si de telles pratiques réduisent les quantités de boues à manipuler, elles présentent, dans une perspective de recyclage par l'alimentation animale, l'inconvénient de réduire la valeur alimentaire du produit, notamment au niveau de la teneur en protéines. Ainsi, sous des conditions usuelles d'opération, la teneur des boues en protéines se situe généralement dans l'intervalle de 20%-40% (Christiansen et Mitchell, 1978).

La récolte des cellules microbiennes alors qu'elles sont encore en phase exponentielle de croissance, permettrait d'accroître les rendements en biomasse et en protéines par unité de matières organique traitée (Vaseen, 1976). Selon Christiansen et Mitchell (1978), la concentration des boues en protéines pourrait alors atteindre les 50% à 60%. Ainsi, Sridhar et Pillai (1973) ont mesuré 43.1% de protéines dans une boue activée alors qu'une culture fraîche de bactéries isolées de cette boue révélait une teneur en protéines de 72.6% à 77.8%. De plus, selon Sherrard et Schroeder (1973), une telle pratique permettrait un meilleur enlèvement des éléments inorganiques tout en maintenant celui des matières organiques.

Pour récolter la biomasse au moment optimal on peut, comme le suggèrent Sherrard et Schroeder (1973), réduire le temps de séjour dans le réacteur et le décanteur.

Vaseen (1976), puis Christiansen et Mitchell (1978) quant à eux suggèrent un procédé d'épuration qui s'inspire des disques biologiques (figure 4.4). L'appareil consiste en une surface mobile enroulée sur elle-même sous forme de spirale. Cette surface sert de support au floc microbien. Une lame mobile récolte continuellement le floc à mesure qu'il se développe.

Vaseen (1976) souligne qu'on peut adapter les disques biologiques pour obtenir le même résultat. Il suffit de prévoir un moyen pour récolter la biomasse sur la parois des disques. Les disques biologiques sont d'ailleurs déjà utilisés pour l'épuration biologique d'effluents d'origine agro-alimentaire (Hudson et al., 1976; Johnson et Krill, 1976; Corneille et O'Shaughnessy, 1975; Blanc et al., 1978; Environment Canada, 1975). Ce procédé de traitement peut enlever 90% de la DBO et des solides en suspension d'une eau usée et s'avère moins sensible que les boues activées aux variations de la charge hydraulique ou organique (Antonie et Koehler, 1971). Les disques biologiques requièrent également moins d'énergie que les boues activées pour le traitement d'une même charge organique (Couillard, 1972a).

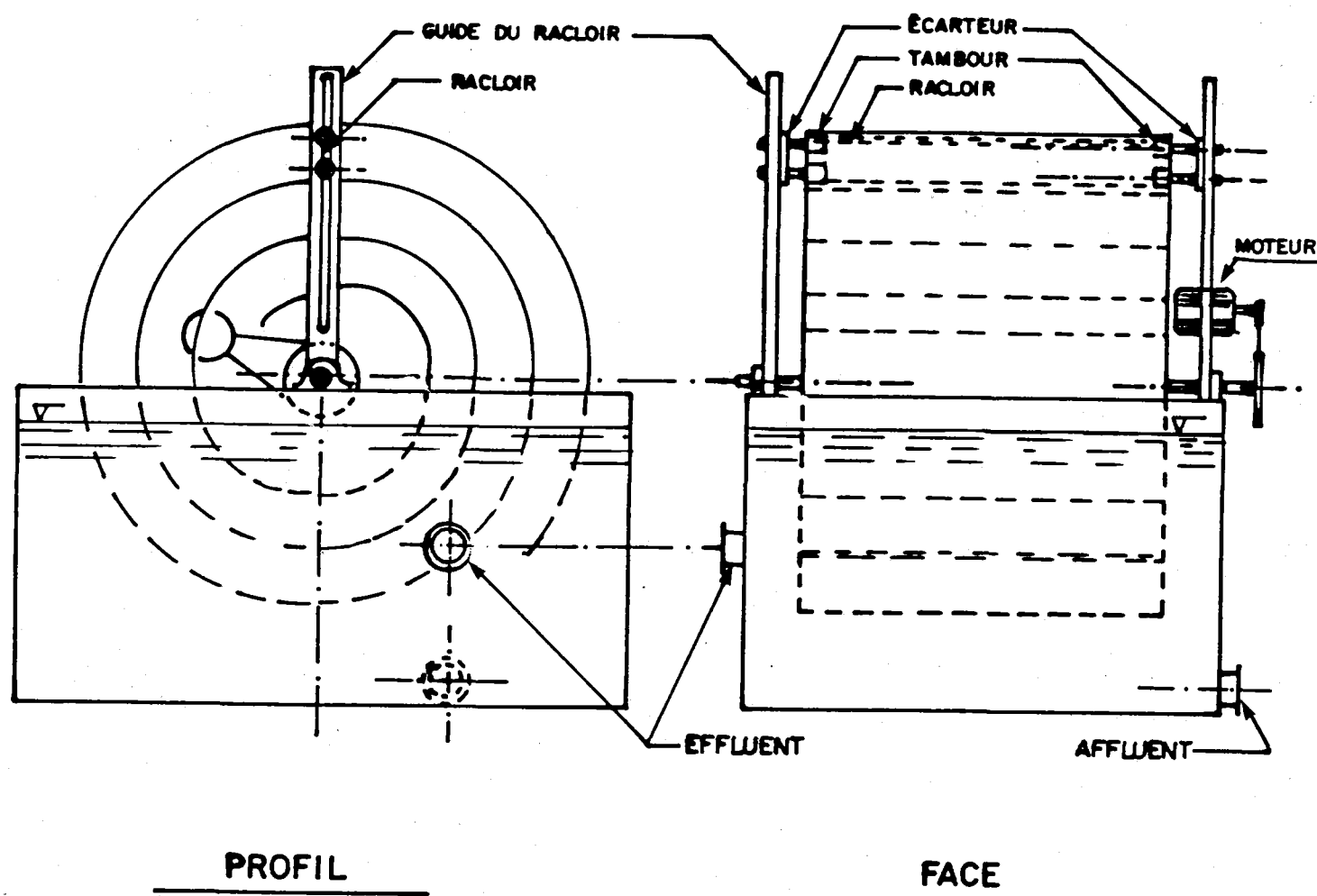


Figure 4.4 . Modification des disques biologiques pour récolter la biomasse au stade désiré (Vaseen, 1976) .

5. ETUDE D'UN CAS: USINE LAITIÈRE

5.1 Description de l'usine

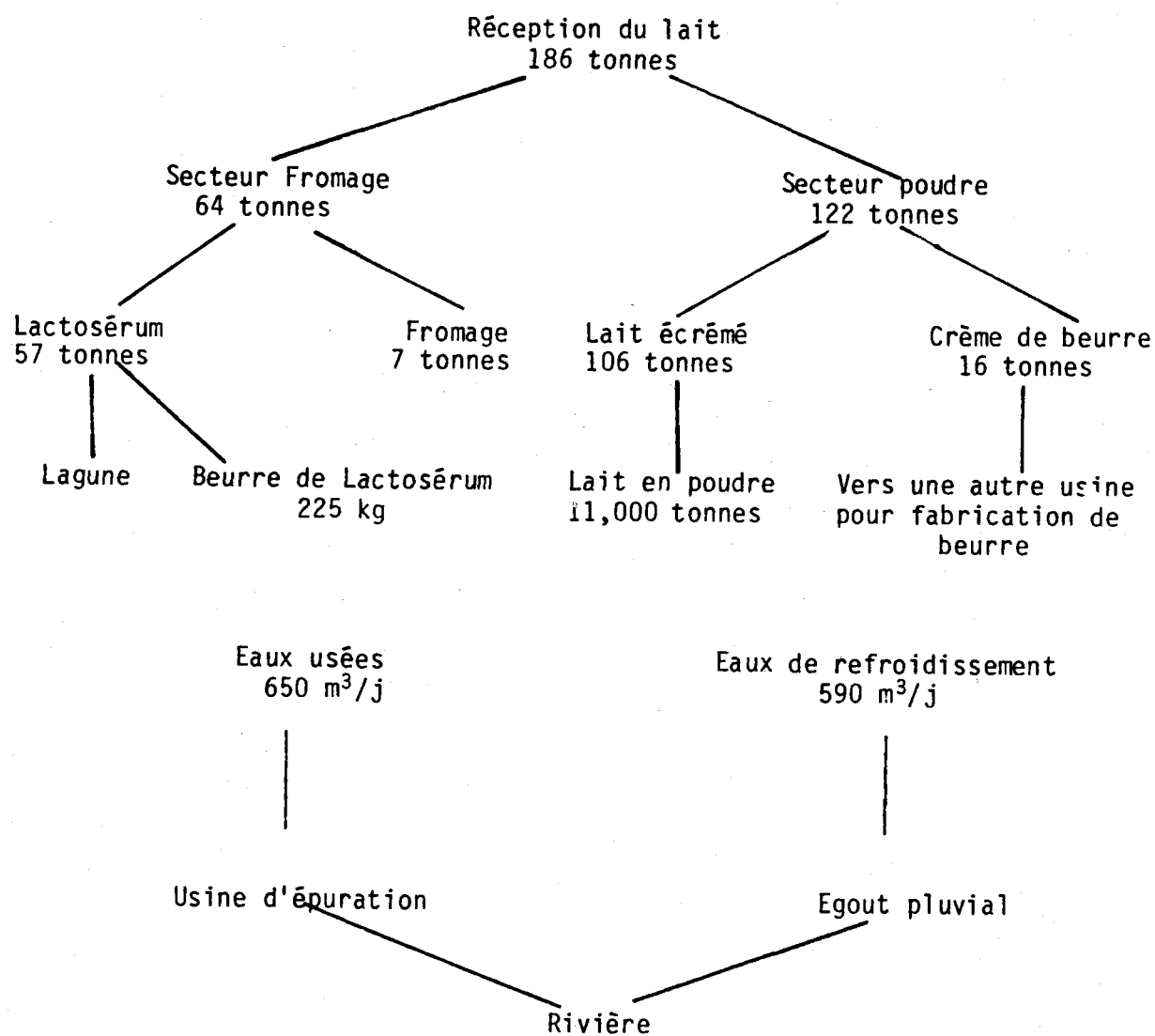
L'usine laitière située à Amqui, Québec, appartient à la Coopérative agricole du Bas St-Laurent. L'usine traite quotidiennement 186 tonnes de lait, dont 64 tonnes sont transformées en fromage et 122 tonnes en poudre de lait. L'organigramme de la figure 5.1 illustre avec plus de détails les processus de transformation du lait dans cette usine.

5.2 Traitement des eaux usées

Les eaux usées provenant de la fabrication du fromage sont acheminées vers une usine de traitement de type secondaire à aération prolongée (Figure 5.2) (Zaloum, 1979). On y retrouve deux bassins d'aération d'une capacité totale de 3,600 m³, ce qui, au débit moyen de design, assure un temps de rétention des eaux usées de six jours. Les boues sont ensuite acheminées vers un décanteur circulaire de huit mètres de diamètre. Une partie des boues décantées est recyclée par les bassins d'aération et le reste est envoyé à un digesteur aérobie ayant un temps de rétention de 30 jours.

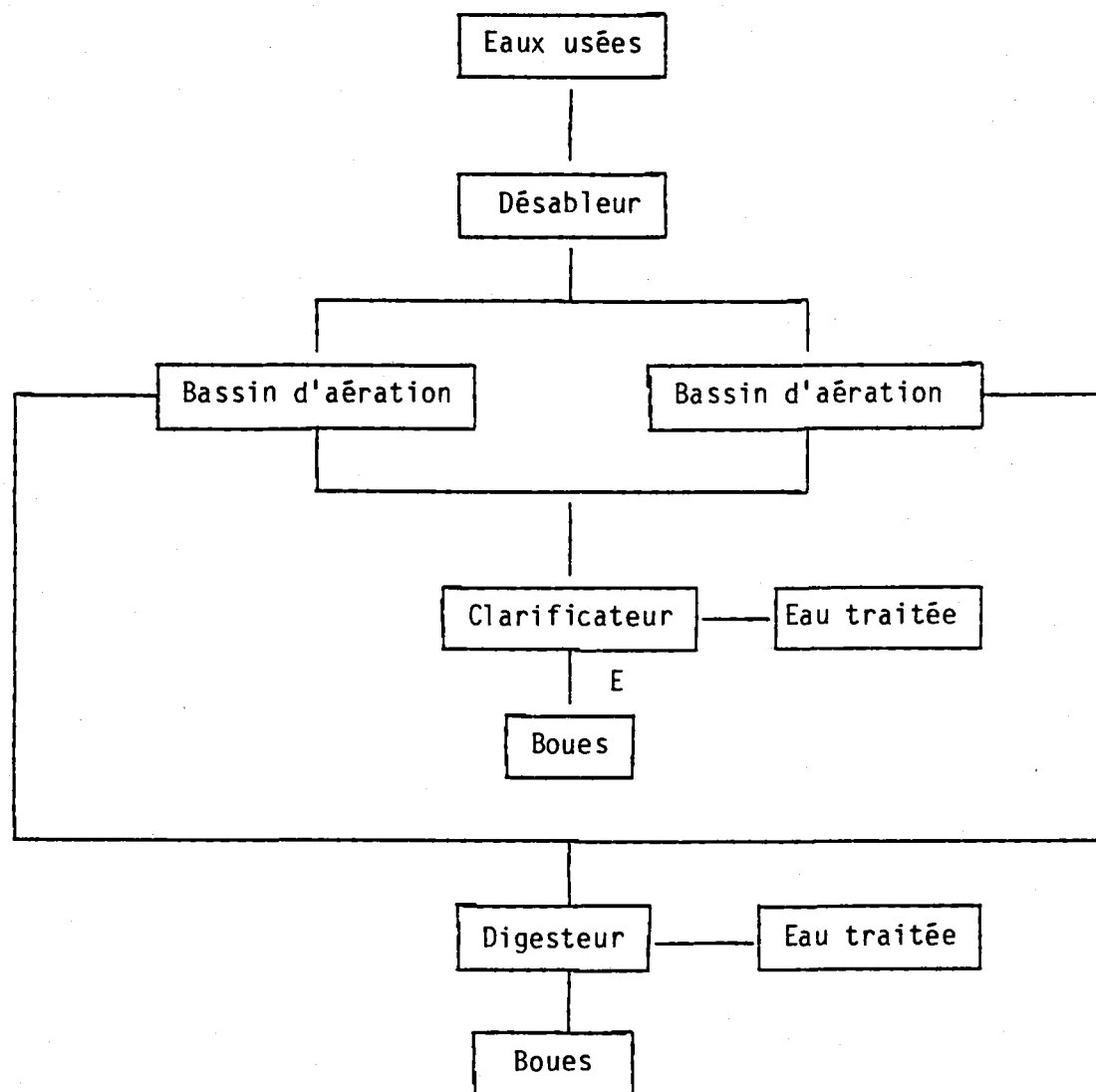
Le tableau 5.1 présente les caractéristiques physico-chimiques de l'affluent et de l'effluent de l'usine de traitement. Aux conditions d'opération en vigueur, l'usine de traitement permet une épuration poussée des eaux usées. Ainsi, les solides en suspension sont réduits de 98%, les

Figure 5.1: Schéma de production de l'usine de la Coopérative du Bas St-Laurent, à Amqui



Zaloum, 1979

Figure 5.2: Schéma de fonctionnement de l'usine de traitements d'Amqui



E : Point d'échantillonnage des boues

Tableau 5.1: Caractéristiques physico-chimiques de l'affluent et de l'effluent de l'usine de traitement des eaux usées de la fromagerie d'Amqui

Paramètre	Affluent		Effluent		Degré de traitement %
	mg/l	Kg/j	mg/l	Kg/j	
Solides totaux	1450	638	605	266	58
Solides en suspension	393	173	8	4	98
Phosphates	27	12	10	4	63
Nitrites-Nitrates N	0.045	0.02	0.09	0.04	-
Azote Kjeldahl N	37.5	16	8.5	4	77
Azote ammoniacal N	1.7	0.7	<0.1	<0.05	94
DCO totale	1573	692	54	24	97
DBO totale	930	409	15	7	98
COT	485	213	16.5	7	97

Zaloum, 1979

phosphates et l'azote organique de 63% et 77% respectivement. L'enlèvement de la DCO, de la DBO et du COT est presque total (97%).

Annuellement, près de 7000 m³ de boue sont éliminés du clarificateur secondaire. La concentration de ces boues en solides (MLSS) est de 5000 mg/l, pour une production annuelle d'environ 35 tonnes (Zaloum, 1979). La disposition de ces boues pose un problème important aux responsables de l'usine, et une large part des coûts annuels d'opération y est affectée. Actuellement, la disposition est réalisée par épandage au sol, ce qui implique pour les mois d'hiver, le stockage de volumes importants de boues.

5.3 Analyse des boues: méthodes

5.3.1 Teneur en protéines

Cinq échantillons de boues d'environ un litre furent prélevés aux pompes du décanteur secondaire de l'usine de traitement (cf. Figure 5.2). Dès la réception au laboratoire de l'INRS-Eau, les boues furent lyophilisées.

La teneur des boues en azote Kjeldahl total (TKN) fut mesurée à l'aide d'un analyseur C-H-N Hewlett-Packard 185-B. La technique consiste à porter environ 300 mg de produit lyophilisé, en présence d'un catalyseur (oxyde de cuivre), à 1000⁰ (afin de la réduire en H₂, NO_x et CO₂). Chacun de ces trois produits de réaction est ensuite séparé dans une colonne à chromatographie de type Poropak Q 80-100 mesh dans laquelle circule un flux

d'hélium de 120 ml/min. Le passage de chaque élément est détecté par un pont de conductivité et traduit par une courbe sur un graphique. L'intégration de cette courbe est proportionnelle à la concentration de l'élément dosé. Les mesures d'un tel appareil peuvent atteindre une précision de 0.3% selon l'homogénéité du produit analysé.

En multipliant la mesure de TKN par 6.25 (cf. Annexe), on a pu obtenir la teneur brute des boues en protéines, exprimée en pourcentage sur une base sèche.

5.3.2 Composition des protéines en acides aminés

Pour ce type d'analyse, l'échantillon est d'abord hydrolysé et on doit alors s'assurer d'obtenir au moins 0.3 mg de protéines par millilitre d'hydrolysate. Pour ce faire, l'échantillon est mis au four à 110° (pendant 18 heures), en présence de HCl 6N. L'échantillon hydrolysé est ensuite filtré sur filtre Watman # 1. Le filtrat est évaporé sous vide à 49°, (puis repris dans de l'eau et évaporé à nouveau), tout cela dans le but d'en extraire le HCl utilisé lors de l'hydrolyse. Repris à nouveau dans un tampon au citrate de pH 2, l'échantillon est alors prêt pour l'analyse. Séparés sur colonne de résine échangeuse d'ions C-3 de Technicon, les acides aminés sont dosés par un analyseur Technicon TSM-1. Le passage de chaque acide aminé se traduit par une courbe sur un graphique dont l'intégration est proportionnelle à la teneur de cet acide aminé dans la source protéique analysée. La précision des mesures est de l'ordre de 4%. Cependant, le

type de digestion utilisé lors de ces analyses détruit deux des acides aminés, la cystine et le tryptophane. On n'a donc pu les doser dans les boues soumises à l'étude.

5.4 Analyse des boues: résultats

Le tableau 5.2 présente les résultats d'analyse des boues. La teneur brute en protéines y varie de 41.3% à 43.8%, pour une moyenne de 42.3%. Ces résultats sont conformes à ceux d'auteurs ayant travaillé sur le sujet (cf. Tableau 5.2).

D'autre part, les analyses de teneur en acides aminés révèlent des protéines d'excellente qualité qui se comparent fort bien aux normes de la FAO. En effet, si occasionnellement un échantillon a pu montrer un déficit pour l'un ou l'autre des acides aminés, la teneur moyenne s'est généralement avérée supérieure à ces normes. Pour la méthionine et la cystine, cependant, quatre des cinq échantillons ont démontré une teneur inférieure à la norme de 3.5 g/16 g N. Cette situation n'a rien de surprenant, compte tenu que ces acides aminés sont normalement limitatifs dans les protéines microbiennes.

D'autre part, la composition en acides aminés de ces boues est comparable à celles mesurées par d'autres auteurs. La teneur de chaque acide aminé se situe en effet à l'intérieur des intervalles de variations rapportés.

Tableau 5.2: Analyse des boyes d'Amqui. Teneur brute en protéines et composition des protéines en acides aminés

	Echantillons						Ecart dans la littérature ⁴		FAO
	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	Moyenne ³	Minimum	Maximum	
Teneur brute en protéines (%)	41.3	42.8	42.5	42.5	42.5	42.3 ± 1.09	27.7	65.6	
Acide aminé (g/16gN)									
Alanine	9.27	9.08	9.28	8.30	6.70	8.53 ± 1.36			
Arginine	8.56	7.93	6.86	5.91	2.65	6.38 ± 2.88	3.20	5.00	
Acide aspartique	10.83	14.67	16.13	13.47	14.23	13.87 ± 2.42			
Acide glutamique	13.63	14.66	15.80	12.40	11.70	13.64 ± 2.06	8.80	11.98	
Glycine	5.17	5.96	6.34	5.05	4.50	5.40 ± 0.92	4.71	5.67	
Isoleucine	5.09	4.84	6.08	4.60	3.87	4.90 ± 0.99	2.80	6.77	4.0
Leucine	7.96	8.02	9.62	7.24	6.67	7.90 ± 1.38	4.86	8.63	7.0
Lysine	5.84 ²	6.17 ²	4.37 ²	8.05 ²	3.22 ²	5.53 ² ± 2.29	2.83	6.65	5.5
Méthionine + Cystine ¹	1.57	1.42	3.86	2.02	2.79	2.33 ± 1.24	1.30	3.77	3.5
Proline	0.91	1.13	1.15	0.82	-	1.00 ± 0.20			
Sérine	4.93	4.59	6.30	5.15	5.41	5.46 ± 0.65			
Thréonine	6.88	7.49	7.29	6.55	6.87	7.02 ± 0.46	3.54	6.77	4.0
Tryptophane	- ¹	- ¹	- ¹	- ¹	- ¹	- ¹	0.68	2.72	1.0
Tyrosine	2.53	2.77	3.77	2.73	1.99	2.76 ± 0.81	2.13	4.35	
Valine	6.82	5.94	8.55	6.84	4.81	6.59 ± 1.70	3.63	8.52	5.0
Phénylalanine + tyrosine	7.46	7.36	9.37	7.18	4.90	7.35 ± 2.19	5.82	10.50	6.0

¹ Non déterminé: détruit par l'hydrolyse

² Lysine + histidine

³ Moyenne et intervalle de confiance à 95%

⁴ Tels que rapportés au tableau 4.2

Des expériences d'alimentation, où les boues de l'usine d'Amqui auraient servi de source partielle d'azote alimentaire n'ont pu être réalisées. Il apparaît nécessaire de faire ultérieurement de telles expériences afin de pouvoir compléter l'évaluation du potentiel de recyclage de ces boues dans l'alimentation animale. Si ces expériences devaient révéler une valeur alimentaire comparable à ce que d'autres auteurs ont déjà démontré, on pourrait alors envisager l'inclusion des boues dans les rations alimentaires, jusqu'à un niveau d'environ 20% de la diète azotée.

5.5 Potentiel de production annuelle de protéines à l'usine d'Amqui

Avec une teneur moyenne en protéines de 42.3%, la production annuelle de solides comporte environ 15 tonnes de protéines. Or, au prix moyen aux minoteries, à la mi-septembre 1980, de \$1115 la tonne (Anonyme, 1980), ces protéines ont une valeur de \$17,000.

A la sortie du décanteur secondaire, cependant, les boues sont très diluées et difficilement manipulables, ce qui réduit leur potentiel d'utilisation. La concentration des boues, à l'aide d'un filtre-presse par exemple, se ferait à un coût d'environ \$66 la tonne (Basset et al., 1978). Même en tenant compte de ces coûts additionnels, les boues de l'usine d'Amqui n'en conservent pas moins une valeur de près de \$15,000.

Les coûts annuels d'opération de l'usine d'Amqui proviennent en grande partie de la disposition des boues (Zaloum, 1979). Or, la récupération de ces boues pour le recyclage dans l'alimentation animale éliminerait

ce problème ainsi que les coûts qui y sont associés. De plus, la valeur marchande des boues devrait permettre d'éponger en partie les coûts d'opération résiduels. Le recyclage des boues par l'alimentation animale présenterait donc un double avantage pour les opérateurs de l'usine d'Amqui.

Par ailleurs, la situation de la fromagerie d'Amqui dans l'ensemble de l'industrie de transformation du lait et de la viande au Québec indique que celle-ci, loin de constituer un cas marginal, se situe au milieu de l'échelle (Figure 5.3). C'est-à-dire que 52% des 251 établissements recensés par Statistique Canada (1976 a,b) comptent plus d'employés que la fromagerie d'Amqui et, qu'étant plus gros, ils sont susceptibles de produire plus d'effluents, donc plus de boues et de protéines via le traitement biologique de ceux-ci.

5.6 Potentiel de production annuelle de protéines au Québec

L'industrie de transformation du lait et de la viande rejette annuellement environ 166,000 tonnes de DBO_T . A l'usine d'Amqui, le rapport de la production de boue sur la DBO_T traitée est d'environ 0.4 (Zaloum, 1979). Si tous les effluents des secteurs viande et lait étaient traités dans des conditions semblables à celles prévalant à l'usine d'Amqui, la production annuelle de boues s'élèverait à plus de 66,000 tonnes (base sèche), et celles de protéines à plus de 28,000 tonnes. Au prix actuel des protéines, ces boues auraient une valeur de près de \$32 millions.

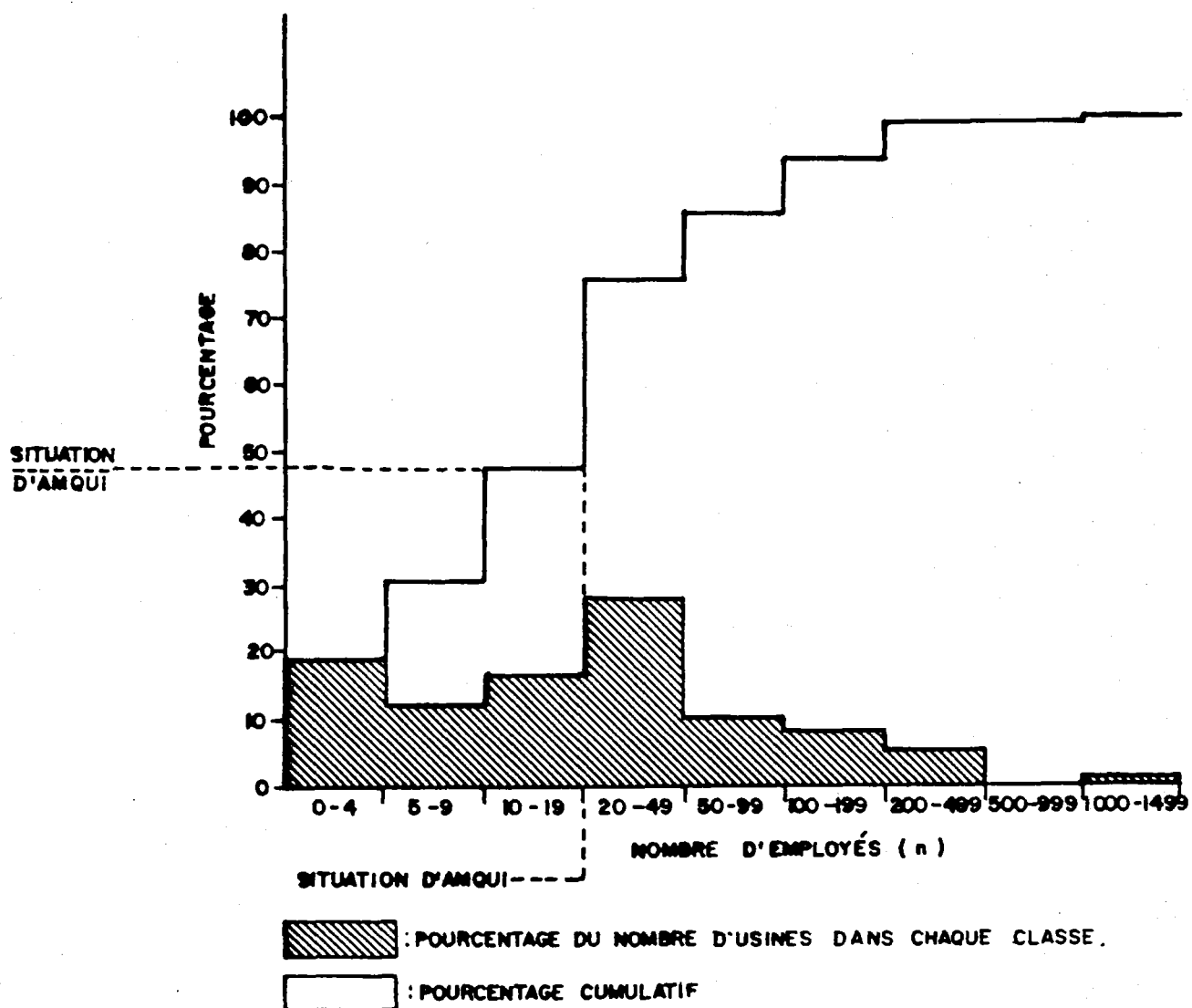


Figure 5.3. Distribution des usines de transformation du lait et de la viande selon le nombre d'employés.

Le volume de protéines ainsi produites représente approximativement 20% des quantités importées des marchés extérieurs au Québec. D'autre part, considérant que 20% de la diète azotée constitue un taux maximal sécuritaire d'inclusion de boues dans les rations alimentaires, les 28,000 tonnes de protéines de boues représentent 15% du potentiel d'inclusion au Québec.

Ces valeurs ne constituent qu'une approximation des performances réalisables, puisque les rendements en boues et en protéines peuvent varier selon la qualité de l'effluent à traiter et les caractéristiques opérationnelles de l'usine. Ainsi, le traitement des eaux usées par un procédé tel que celui proposé par Vaseen (1976) permettrait de produire plus de boues, avec une teneur en protéines supérieure, pour la même charge organique traitée. En conséquence, la production théorique de 28,000 tonnes de protéines constitue vraisemblablement un minimum réalisable plutôt qu'un maximum.

Les analyses faites par divers auteurs, ainsi que celles réalisées, dans le cadre du présent mémoire sur les boues de l'usine de traitement des effluents de la fromagerie d'Amqui démontrent que les boues activées présentent une teneur brute en protéines d'environ 40% et ce, de façon, assez constante.

Les mêmes analyses démontrent également que ces protéines présentent une composition en acides aminés intéressante, en comparaison des normes de la FAO. Les carences majeures se situent au niveau des acides aminés soufrés, en accord avec les carences déjà notées dans les protéines de diverses classes de microorganismes.

Bien que cela n'ait pu être démontré avec les boues de l'usine d'Amqui, plusieurs études démontrent que de telles boues peuvent combler jusqu'à 20% de la diète azotée de toutes les classes d'animaux sans nuire ni aux rendements des animaux ni à la qualité des produits.

La production annuelle de boues de l'usine de traitement d'Amqui comporte 15 tonnes de protéines. D'une valeur de \$17,000, ces protéines n'en sont pas moins épandues au sol à grands frais. Or le recyclage des boues comme source protéique permettrait de réduire les frais annuels d'opération de l'usine.

L'extrapolation des résultats de l'analyse de ce cas indique que le traitement des eaux usées de l'ensemble de l'industrie de transformation du lait et de la viande conduirait à une production de plus de 28,000 tonnes de protéines, pour une valeur d'au delà de \$32 millions. Cette production permettrait de réduire de 20% la dépendance de l'agriculture québécoise des marchés extérieurs de protéines. En outre, de telles valeurs constituent vraisemblablement une estimation conservatrice puisqu'on peut envisager l'utilisation de procédés de traitement qui produisent plus de boues, avec une teneur en protéines plus élevée.

La revalorisation, dans l'alimentation animale, de la biomasse produite lors du traitement des effluents de l'industrie agro-alimentaire pourrait donc constituer une réponse intéressante à deux problèmes fort concrets. Bien qu'actuellement, les autorités responsables de l'application de la loi (S.R, c.f-7) et du règlement (C.P. 1967-1972) relatifs aux aliments pour le bétail ne permettent pas un tel recyclage, cette solution mériterait cependant d'être envisagée sérieusement, compte tenu des possibilités que cette étude laisse entrevoir.

Références bibliographiques

ABDO, K.M., K.W. KING and R.W. ENGEL. (1964).

Protein quality of rumen microorganisms. J. Anim. Sci. 23(3): 734-736.

AGRICULTURE QUEBEC. (1978).

Coup d'oeil sur l'agro-alimentaire au Québec, 1978, Gouvernement du Québec, Québec, 334 p.

AMMERMAN, C.B. and S.S. BLOCK. (1964).

Feeding values of rations containing sewage sludge and oakwood sawdust. J. Agric. Food Chem. 12(4): 539-540.

ANONYME. (1970).

New algae path to protein. Chem. Eng. 77(14): 30-32.

ANONYME. (1980).

Revue des marchés. Provendes. La Terre de chez-nous, 51(28): 31.

ANTONIE, R.L. and F.J. KOEHLER. (1971).

Application of rotating disc process to municipal wastewater treatment.

Water Pollution Control Research Series. Report 17050 DAM 11/71 USEPA, 74 p.

BARTSCH, A.F. (1967).

Biological aspects of stream pollution. Dans: "Biology of water pollution"
U.S. Dept. of the Interior. Federal Water Pollution Control Administration:
13-20.

BARTSCH, A.F. and W.M. INGRAM. (1967).

Stream life and the pollution environment. Dans: "Biology of water pollution". U.S. Dept. of the Interior. Federal Water Pollution Control Administration: 119-127.

BASSET, D.J., M. TOLANEY et K. CONARROE. (1978).

Performance comparison of filter press, belt press and centrifuge units for dewatering of citrus processing/activated sludge. Dans: "Proceedings 33rd Industrial Waste Conference". Purdue Univ.: 113-120.

BIRCH, G.G., K.J. PARKER and J.T. WORGAN. (1976).

Food from waste. Applied Sci. Publish. Ltd. 301 p.

BLANC, F.C., J.C. O'SHAUGHNESSY and C.H. MILLER. (1978).

Treatment of bottling plant wastewater with rotating biological contactors. Dans: "Proceedings of the 33rd Industrial Waste Conference". Purdue Univ.: 614-623.

BOOTH, A.N., D.L. ROBBINSON and A.E. WASSERMAN. (1962).

Whey-yeast rat-feeding study. J. Dairy Sci. 45(9): 1106-1107.

BOUGH, W.A., W.L. BROWN, J.D. PORSCHE and D.M. DOTY. (1972).

Utilization of collagenous by-products from the meat packing industry: production of single-cell protein by the continuous cultivation of Bacillus megaterium. Appl. Microbiol. 24(2): 226-235.

BOWMAN, J.C. (1973).

Possibilities for changing by genetic means the biological efficiency of protein production by whole animals. Dans: "The biological efficiency of protein production". J.G.W. Jones ed.: 173-182.

BRESSANI, R. (1968).

The use of yeasts in human foods. Dans: "Single-Cell Protein". Mateles, R.I. and Tannenbaum, S.R. ed.: 90-121.

BRINLEY, F.J. (1967).

Sewage, algae and fish. Dans: "Biology of Water Pollution". U.S. Dept. of the Interior. Federal Water Pollution Control Administration: 10-13.

BUREAU DE LA STATISTIQUE DU QUEBEC. (1977).

Statistiques agricoles du Québec, 1975-1976, Gouvernement du Québec, Québec, 177 p.

CALLOWAY, D.H. and A.M. KUMAR. (1969).

Protein quality of the bacterium Hydrogenomonas eutropha. Appl. Microbiol. 17(1): 176-178.

CASEY, A.P. and J.A. LUBITZ. (1963).

Algae as food for space travel. Food Technol. 17(11): 1386-1394.

CHEEKE, P.R. and R.O. MYER. (1973).

Evaluation of the nutritive value of activated sewage sludge with rats and Japanese quail. Nutr. Rep. Internat. 8(6): 385-392.

CHRISTIANSEN, E.B. and D.H. MITCHELL. (1978).

The production of protein from municipal sewage. AICHE Symposium Series 74(172): 175-181.

CLEMENT, G., C. GIDDEY and R. MENZI. (1967).

Amino acid composition and nutritive value of the algae Spirulina maxima. J. Sci. Food Agr. 18(8): 497-501.

COOK, B.M. (1962).

Nutritive value of waste grown algae. Am. J. Public Health, 52(3): 243-251.

COOK, B.M., E.W. LAN and B.M. BAILEY. (1963).

The protein quality of waste grown green algae. I. Quality of protein in mixtures of algae, nonfat powdered milk and cereals. J. Nutr. 81(1): 23-29.

CORNEILLE, R.W. and J.C. O'SHAUGHNESSY. (1975).

Treatment of apple wastes using rotating biological contactors. Dans: "Proceedings of the 30th Industrial Waste Conference". Purdue Univ.: 675-688.

COUILLARD, D. (1972).

Processus de traitement et assainissement des eaux. INRS-Eau, notes de cours pour l'unité EAU-7243. Université du Québec, Québec.

COUILLARD, D. (1972a).

Principes des opérations unitaires de traitement des eaux usées et de l'eau d'approvisionnement, traitement par le sol, traitements physiques, biologiques et chimiques. INRS-Eau, notes de cours pour l'unité EAU-7243. Université du Québec, Québec.

COUILLARD, D. et D. CLUIS (1974).

Compilation de certains rejets industriels: bilan des polluants. INRS-Eau, rapport scientifique No 47, Université du Québec, Québec, 246 p.

CRAWFORD, D.L., E. MCCOY, J.M. HARKIN and P. JONES. (1973).

Production of microbial protein from waste cellulose by Thermononospora fusca, a thermophilic actinomycete. Biotechnol. Bioengin. 15(5): 833-843.

DABBAH, R. (1970).

Protein from micro-organisms. Food Technol. 24(6): 659-665.

DAMRON, B.L., A.R. ELDRED, S.A. ANGALET, J.L. FRY and R.H. HARRIS. (1974).

Evaluation of activated citrus sludge as a poultry feed ingredient. Dans: "Proceedings fifth national symposium on food processing wastes". Rapport EPA-600/2-74-058: 142-154.

DAY, D.L. and B.G. HARMON. (1974).

Nutritive value of aerobically treated livestock and municipal wastes.

Dans: "Wastewater use in the production of food and fiber. Proceedings".

Rapport EPA-660/2-74-041: 240-255.

DELANEY, R.A.M., R. KENNEDY and B.D. WALLEY. (1975).

Composition of Saccharomyces fragilis biomass grown on lactose permate. J.

Sci. Food Agric. 26(8): 1177-1186.

DOUGHERTY, M.H. and R.R. McNARY. (1958).

Activated citrus sludge - Vitamin content and animal feed potential. Sewage

Industr. Wastes 30(9): 1151-1155.

DWIVEDI, B.H., D.L. GIBSON and J.M. BELL. (1972).

Nutritive value of meat substitute prepared from brewer's yeast and isolate soy proteins. J. Inst. Can. Sci. Technol. Alim. 5(1): 155-158.

ECKENFELDER, Jr., W.W. et D.J. O'CONNOR. (1961).

Biological waste treatment. Pergamon Press, 229 p.

ENVIRONMENT CANADA. (1974).

Meat and poultry industry in Canada. Plant directory, 155 p.

ENVIRONMENT CANADA. (1975).

Environmental inventory of the canadian dairy products industry. Vol. A.
145 p.

ERSHUL, B.A.F. and D.L. ISENBURG. (1968).

Protein quality of various algal biomass produced by a water reclamation pilot plant. J. Nutr. 95(3): 374-380.

ESVELT, L.A., H.H. HART and W.W. HEINEMANN. (1976).

Cannery waste biological sludge disposal as cattle food. J. Water Poll. Control Fed. 48(12): 2779-2790.

EVANS, G.H. (1968).

Industrial production of single-cell protein from hydrocarbons. Dans: "Single Cell Protein". Mateles, R.I. and Tannenbaum, S.R. ed.: 243-254.

FIRTH, J.A. and B.C. JOHNSON. (1955).

Sewage sludge as a feed ingredient for swine and poultry. J. Agr. Food Chem. 3(9): 795-796.

FOSTER, J.F. and J.H. LITCHFIELD. (1964).

A continuous culture apparatus for the microbial utilization of hydrogen produced by electrolysis of water in close-cycle space systems. Biotechnol. Bioengin. 6(4): 441-456.

FROBISHER, M., R.D. HINS DILL, K.T. CRABTREE and C.R. GOODHEART. (1974).

Fundamentals of microbiology, 9th ed., W.B. Saunders Co. 850 p.

FURR, A.K., A.W. LAWRENCE, S.S.C. TONG, M.C. GRANDOLFO, R.A. HOFSTADER, C.A. BACHE, W.H. GUTENMANN and D.J. LISK. (1976).

Multielement and chlorinated hydrocarbon analysis of municipal sewage sludges of American Cities. Environ. Sci. Technol. 10(7): 683-687.

GORMAN, O.T. and J.R. KARR. (1978).

Habitat structure and stream fish communities. Ecology 59(3): 507-515.

GOUVERNEMENT DU QUEBEC. (1979).

Bâtir le Québec. Enoncé de politique économique, Gouvernement du Québec, Québec, 523 p.

HACKLER, L.R., A.L. NEUMANN and B.C. JOHNSON. (1957).

Feed from sewage III. Dried activated sewage sludge as a nitrogen source for sheep. J. Anim. Sci. 16(1): 125-129.

HAN, Y.W., C.E. DUNLAP and C.D. CALLIHAN. (1971).

Single cell protein from cellulosic wastes. Food Technol. 25(2): 130-133, 154.

HARMON, B.G., D.L. DAY, A.H. JENSEN and D.H. BAKER. (1972).

Nutritive value of aerobically sustained swine excrement. J. Anim. Sci. 34(3): 403-407.

HARMON, B.G., D.L. DAY, D.H. BAKER and A.H. JENSEN. (1973).

Nutritive value of aerobically or anaerobically processed swine waste. J. Anim. Sci. 37(2): 510-513.

HARRIS, E.E., C.J. HAJNY et M.C. JOHNSON. (1951).

Protein evaluation of yeast grown on wood hydrolysate. Ind. Eng. Chim. 43(12): 1593-1596.

HAWKES, H.A. (1963).

The ecology of waste water treatment. MacMillan Co. 203 p.

HINTZ, H.F., H. HEITMAN, W.C. WEIR, D.T. TORELL and J.H. MEYER. (1966).

Nutritive value of algae grown on sewage. J. Anim. Sci. 25(3): 675-681.

HUDSON, J.W., J.P. SMITH and F.G. POHLAND. (1976).

Rotating biological contactor treatment of shellfish processing wastewaters.

Dans: "Proceedings 31st Industrial Waste Conference". Purdue Univ: 193-205.

JAMONET, B. (1973).

Le traitement des boues résiduelles. Aspects techniques - Aspects économiques. Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 184 p.

JOHNSON, D.B. and W.P. KRILL. (1976).

RBC pilot plant treatment of pretreated meat slaughtering processing waste.

Dans: "Proceedings 31st Industrial Waste Conference". Purdue Univ.: 733-742.

JONES, J.R.E. (1964).

Fish and river pollution. Butterworth, London, 220 p.

KARR, J.R. et I.J. SCHLOSSER. (1978).

Water resources and the land-water interface. Science 201(4352): 229-234.

KIHLBERG, R. (1972).

The microbe as a source of food. Ann. Rev. Microbiol. 26: 427-466.

KO, P.C. and Y. YU. (1968).

Production of SCP from hydrocarbons. Dans: "Single Cell Protein". Mateles, R.I. and Tannenbaum, S.R., ed.: 255-262.

LEHNINGER, A.L. (1975).

Biochemistry. 2nd ed. Worth Publ. Inc. 1104 p.

LEVEILLE, G.A., H.E. SAUBERLICH and J.W. SHOCKLEY. (1962).

Protein value and the amino acid deficiencies of various algae for growth of rats and chicks. J. Nutr. 76(4): 423-428.

LIPINSKY, E.S. and J.H. LITCHFIELD. (1970).

Algae, bacteria and yeasts as food or feed. CRC Crit. Rev. Food Sci. Technol. 1(4): 581-618.

LITCHFIELD, J.H., V.G. VELY and R.C. OVERBEEH. (1963).

Nutrient content of morel mushroom mycelium. Amino acid content of the protein. J. Food Sci. 28(6): 741-743.

LITCHFIELD, J.H. (1977).

Single-cell proteins. Food Technol. 31(5): 175-179.

LOMOVA, M.A., G.G. LITVINOV, V.G. LAVROV and L.B. MELEKHOV. (1977).

Quantitative evaluation of the protein of active sludge of the purification section of paper pulp plants. Tsellyul., Bum. Karton 1977(7): 11-12. Dans: Chem. Abstract 87(12): 90277u. 1977.

LUBITZ, J.A. (1963).

The protein quality, digestibility and composition of algae, Chlorella 71105. J. Food Sci. 28(2): 229-232.

MCDONALD, P., R.A. EDWARDS and J.F.D. GREENHALGH. (1973).

Animal nutrition. 2nd ed. Oliver & Boyd. 479 p.

MACKENTUM, K.M. (1969).

The practice of water pollution biology. U.S. Dept. of the Interior. Federal Water Pollution Control Administration, 281 p.

MATELES, R.I. and S.R. TANNEBAUM. (1968).

Single Cell Protein. M.I.T. Press. Cambridge, 480 p.

MAYNARD, L.A., J.K. LOOSLI, H.F. HINTZ et R.G. WARNER (1979).

Animal Nutrition. 7th edition McGraw-Hill Book Co. 602 p.

MILLER, T.L., S. LIE and M.J. JOHNSON. (1964).

Growth of a yeast on n-alkanes. Biotechnol. Bioengin. 6(3): 299-307.

NEEDHAM, J.G. and P.R. NEEDHAM. (1962).

A guide to the study of freshwater biology. 5th ed., Holden-Day ed. 108 p.

NEIDHART, F.C. (1963).

Effects of environment on the composition of bacterial cells. Ann. Rev. Microbiol. 17: 61-86.

NEMEROW, N.L. (1978).

Industrial water pollution. Origine, Characteristics and Treatment. Addison-Wesley Publ. Co. 738 p.

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE (1973).

Besoins énergétiques et besoins en protéines. Rapport d'un comité spécial mixte. FAO/OMS d'experts. Série de rapports techniques No 522, Genève, 123 p.

OSWALD, W.J. and C.G. GOLUEKE. (1968).

Large scale production of algae. Dans: "Single Cell Protein". Mateles, R.I. and Tannenbaum, S.R. ed: 271-305.

PEPPLER, H.J. (1968).

Industrial production of single-cell protein from carbohydrates. Dans: "Single Cell Protein". Mateles, R.I. and Tannenbaum, S.R. ed: 229-242.

POWELL, R.C., E.M. NEVELS and M.E. McDOWELL. (1961).

Algae feeding in humans. J. Nutr. 75(1): 7-12.

RITCHIE, J.C. (1972).

Sediment, fish, and fish habitat. J. Soil Water Conserv. 27(3): 124-125.

SHERRARD, J.H. et E.D. SCHROEDER. (1972).

Relationship between the observed cell yield coefficient and mean cell residence time in the completely mixed activated sludge process. Water Res. 6(9): 1039-1049.

SHERRARD, J.H. et E.D. SCHROEDER. (1973).

Cell yield and growth rate in activated sludge. J. Water Poll. Control. Fed. 45(9): 1889-1897.

SMITH, R.H. et R. PALMER. (1976).

A chemical and nutritional evaluation of yeasts and bacteria as dietary protein sources for rats and pigs. J. Sci. Food Agric. 27(8): 763-770.

SNYDER, H.E. (1970).

Microbial sources of proteins. *Adv. Food Res.* 18: 85-140.

SPICER, A. (1971).

Protein production by microfungi. *Tropical Sci.* 13(2): 239-250.

SRIDHAR, M.K.C. et S.C. PILLAI. (1973).

Proteins in wastewater and wastewater sludges. *J. Water Poll. Control Fed.* 45(7): 1595-1600.

STATISTIQUE CANADA. (1976a).

Abattage et conditionnement de la viande. 1974. Recensement annuel des manufactures. Catalogue 32-221 annuel, Ottawa, 19 p.

STATISTIQUE CANADA. (1976b).

Industrie laitière. 1974. Recensement annuel des manufactures. Catalogue 32-209 annuel. Ottawa, 23 p.

SUBRAHMANYAM, P.V.R., C.A. SASTRY, A.V.S. PRABHAKARA and S.C. PILLAI.
(1960).

Amino acids in sewage sludges. *J. Water Poll. Control. Fed.* 32(4): 344-350.

SURUCU, G.A., R.S. ENGELBRECHT and E.S.K. CHIAN. (1975).

Thermophilic microbial treatment of high strength wastewaters with simultaneous recovery of single-cell protein. *Biotechnol. Bioengin.* 17(11): 1639-1662.

TANNENBAUM, S.R. and S.A. MILLER. (1967).

Effect of cell fragmentation on nutritive value of Bacillus megaterium protein. Nature 214(5094): 1261-1262.

THATCHER, F.S. (1954).

Food and feed from fungi. Ann. Rev. Microbiol. 8: 449-472.

THOMANETZ, E. and D. BARDTKE. (1978).

Characterization of the biomass of activated sludge by determining total protein using the amino acid content. Gas - Wasserfach Wasser-Abwasser 119-(3): 141-144. Dans: Chem. Abstract 89(10): 79703a. 1978.

UNIVERSITE LAVAL. CENTRE DE RECHERCHES EN NUTRITION. (1975).

Le recyclage des substances nutritives par l'épuration biologique sélective des eaux usées. Vol. II. Etat actuel des connaissances et travaux préliminaires à l'université Laval. 417 p.

UNIVERSITE LAVAL. CENTRE DE RECHERCHES EN NUTRITION. (1976).

Etude de praticabilité sur l'utilisation de sources non traditionnelles d'énergie et de protéines pour l'alimentation animale. 562 p.

VASEEN, V.A. (1976).

Protein from wastewater. A source of food? Water Waste Engin. 13(1): 38-39.

VOLLENWEIDER. R.A. (1968).

Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with reference particular to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OCDE, Paris, Rapport DAS/CSI/68.27, 182 p.

WAGNER, F., T. KLEEMAN and W. ZAHN. (1969).

Microbial transformation of hydrocarbons. II. Growth constants and cell composition of microbial cells derived from n-alkanes. Biotechnol. Bioengin. 11(3): 363-408.

WASLEIN, C.A., D.H. CALLOWAY and S. MARGEN. (1969).

Human intolerance to bacteria as food. Nature 221(5175): 84-85.

WASLEIN, C.I. (1975).

Unusual sources of protein for man. CRC Crit. Rev. Food Sci. Technol. 5(1): 77-151.

WAX, J.E., B.G. HARMON and G.R. SCHMIDT. (1972).

Effect of liquid feeding oxidation ditch mixed liquor on the palatability of porks. Abstract in J. Anim. Sci. 35(5): 1100.

WETZEL, R.G. (1975).

Limnology. W.B. Saunders Co. 743 p.

WHITTEMORE, C.T., I.W. MOFFAT and A.G. TAYLOR. (1976).

Evaluation of digestibility, growth and slaughter of microbial cells as a source of proteins for young pigs. J. Sci. Food Agric. 27(12): 1163-1170.

WINTER, G.R. (1975).

Protein efficiency in Canada. Canadian Livestock Feed Board Publ. 330 p.

WOLNAK, B., B.N. ANDREEN, J.A. CHRISHOLM Jr. and T. OMIHARA. (1967).

Fermentation of methane. Biotechnol. Bioengin. 9(1): 57-76.

YAMADA, K., J. TAKAHASHI, Y. KAWABATA, T. OKADA and T. ONIHARA. (1968).

SCP from yeast and bacteria grown on hydrocarbons. Dans: "Single Cell Protein". Mateles, R.I. et Tannenbaum, S.R., ed: 193-207.

ZALOUM, R. (1979).

Amélioration de l'efficacité d'une usine d'épuration dans l'industrie laitière. Etude présentée au Colloque sur le traitement des eaux usées le 5 nov. 1979. Hôtel Reine-Elizabeth. 45 p.

ZIMMERMAN, D.R. and S.B. TEGBE. (1977).

Evaluation of a bacterial SCP for young pigs and rats. J. Anim. Sci. 46(3): 469-475.

ANNEXE: Tests pour mesurer la valeur alimentaire d'une source protéique

A.1 Tests basés sur l'analyse chimique de la source protéique

A.1.1 Teneur brute en protéines

Cette valeur est obtenue en dosant l'azote total de la source protéique et en multipliant le résultat par 6.25. Cette technique repose sur deux hypothèses, partiellement inexactes, que toute protéine alimentaire contient 16% d'azote et que tout l'azote d'une source alimentaire est protéique. La teneur brute en protéines sur-évalue donc le pourcentage réel de protéines d'une source alimentaire.

A.1.2 Indice chimique

L'indice chimique consiste à comparer la teneur de chaque acide aminé essentiel de la source protéique à tester à celui présent dans la protéine de référence de la Food and Agriculture Organization (FAO). Le plus bas rapport obtenu constitue l'indice chimique de la protéine. Il indique par la même occasion quel est l'acide aminé limitatif.

A.2 Tests basés sur la croissance de rats nourris de la source protéique à tester

A.2.1 Coefficient d'efficacité protéique

Cet indice est une mesure du gain de poids des rats par quantité unitaire de protéines ingérée. Comme son nom l'indique, il mesure l'effica-

cité d'une source protéique à soutenir la croissance de l'animal.

A.2.2 Technique des pentes

Cette technique consiste à comparer les gains journaliers de poids vifs de rats nourris de différents types de protéines.

A.3 Tests basés sur le bilan azoté de rats nourris de la source protéinique à tester

Pour les tests de cette catégorie, on doit mesurer les différentes formes d'azote excrété par l'animal. Ainsi, on distingue:

N fécal: N de protéines alimentaires non digérées
 N fécal métabolique

N urinaire: N endogène
 N exogène

N fécal métabolique: bile, enzymes digestives, cellules épithéliales desquamées, résidus de microorganismes intestinaux

N urinaire endogène: provient du catabolisme normal des cellules
 $N_{\text{endo}}(\text{mg/j}) = 146 W^{0.76}(\text{kg})$

N urinaire exogène: provient de la désamination des acides aminés en excès pour les besoins animaux.

A.3.1 Pourcentage de digestibilité

Cette valeur indique la proportion d'azote alimentaire ingéré qu'on ne retrouve pas dans le fèces et qui a donc été digéré par l'animal.

On le calcule ainsi:

$$\% \text{ de digestibilité} = \frac{N \text{ ingéré} - (N \text{ fécal total} - N \text{ fécal métabolique})}{N \text{ ingéré}} \times 100$$

A.3.2 Valeur biologique

C'est une mesure de l'azote alimentaire qui est effectivement retenu par l'animal, une fois l'absorption faite. La valeur biologique ne tient donc pas compte de la digestibilité de la source protéique. On peut en effet imaginer une protéine dont une faible proportion de la quantité ingérée serait absorbée (faible digestibilité) mais dont la quasi totalité de la fraction absorbée serait retenue par l'organisme (forte valeur biologique).

On calcule ainsi le valeur biologique:

$$V.B. = \frac{N \text{ retenu}}{N \text{ absorbé}} \times 100$$

$$V.B. = \left(\frac{N \text{ ingéré} - (N \text{ fécal total} - N \text{ fécal métabolique})}{N \text{ ingéré} - (N \text{ fécal} - N \text{ fécal métabolique})} - \frac{(N \text{ urinaire total} - N \text{ urinaire endo})}{N \text{ ingéré} - (N \text{ fécal total} - N \text{ fécal métabolique})} \right) \times 100$$

A.3.3 Coefficient d'utilisation nette

Cet indicateur mesure la proportion de l'azote ingéré retenu par l'organisme.

C'est en fait le produit de la digestibilité par la valeur biologique. En effet:

$$C.U.N. = \frac{N \text{ retenu}}{N \text{ ingéré}} = \frac{N \text{ absorbé}}{N \text{ ingéré}} \times \frac{N \text{ retenu}}{N \text{ absorbé}} = \text{Digest.} \times \text{Valeur biologique}$$

Expérimentalement, on mesure ce coefficient en comparant l'azote corporel des carcasses d'un groupe de rats nourris de la protéine à tester à celui des carcasses d'un groupe de rats soumis à une diète protéoprive.

$$C.U.N. = \frac{N \text{ corporel du groupe testeur} - N \text{ corporel du groupe protéoprive}}{N \text{ ingéré par le groupe testeur}}$$