

Fabriques de protéines vivantes *

par J. T. Worgan
(Collège national de technologie
de l'alimentation, Université
de Reading)

Chaque année la population mondiale s'accroît d'environ 75 millions d'individus, ce qui aggrave de plus en plus les difficultés que l'agriculture traditionnelle éprouve à satisfaire la demande de nourriture. Récemment les stocks de nourriture dans le monde ont diminué du fait de mauvaises récoltes dans plusieurs des principales régions de production de telle sorte que des conditions climatiques défavorables pourraient dans l'avenir être à l'origine de famines dans certaines régions. Nous sommes dans la nécessité d'utiliser toutes les méthodes possibles pour accroître la production de nourriture et nous devons particulièrement faire usage de celles qui sont indépendantes des conditions atmosphériques pour suppléer à la production agricole. La production de micro-organismes est une de ces méthodes ; sur elle se fondent de grands espoirs pour l'avenir.

Bien qu'ils soient, du point de vue de leur structure, les moins complexes des êtres vivants, les micro-organismes sont capables, à partir d'éléments très simples d'effectuer la synthèse des composants les plus complexes de notre alimentation et notamment les protéines, les hydrates de carbone, les graisses et les vitamines. Du fait qu'il est plus difficile d'accroître l'approvisionnement en protéines par des méthodes agricoles, des recherches ont été entreprises récemment sur les processus microbiens dans le but de déterminer la valeur de ces micro-organismes comme sources de protéines.

Matériaux bruts

Les éléments nutritifs nécessaires à la croissance de la levure de boulanger et des micro-organismes choisis pour la production de protéines comprennent de petites quantités de composés simples inorganiques contenant du potassium, du phosphore, du soufre et du magnésium. L'azote indispensable à la synthèse des protéines est fourni par des sels d'ammonium ou de l'urée. Les composés carbonés, qui fournissent d'une part l'énergie biologique nécessaire à la croissance cellulaire et d'autre part les matériaux destinés à la fabrication des constituants cellulaires, sont requis en quantités beaucoup plus importantes que les autres éléments nutritifs. Ce sont les quantités de composés carbonés disponibles qui déterminent la contribution plus ou moins significative des protéines microbiennes à la production alimentaire.

Dans la pratique, il n'existe que deux sources primaires de composés carbonés suffisamment importantes pour justifier leur emploi dans la production de protéines microbiennes. L'une est constituée par les réserves mondiales de combustibles fossiles créées

En dépit de tous les progrès accomplis dans les techniques de culture, le mauvais temps peut contrarier ou même détruire complètement les récoltes. Un des principaux avantages des méthodes bactériologiques, c'est qu'elles sont entièrement indépendantes des conditions climatiques. Un autre avantage réside dans la rapidité de la synthèse des protéines qui peut par ce moyen être réalisée à l'échelle d'une production industrielle.

Dans la méthode classique de production de levure de boulanger, une culture de levures *in vitro* atteint une masse de 100 tonnes en un délai de 14 jours. La moitié de cette masse cellulaire de levures est composée de protéines. Le même phénomène s'observe dans le cas de toutes les autres méthodes bactériologiques de production de protéines; c'est pourquoi la culture de levures peut être prise comme exemple pour illustrer la rapidité de la synthèse des protéines.

Une culture de levures placée dans un tube à essai est mise en incubation pendant environ 48 heures et elle sert ensuite à ensemercer un milieu de culture de plus grand volume. On répète cette manœuvre à plusieurs reprises au fur et à mesure que le volume s'accroît, d'abord au laboratoire puis à l'usine jusqu'à ce qu'il y ait assez de semence de levures pour ensemercer les principaux récipients réservés à la croissance qui ont des capacités de 50 000 à 250 000 litres. Pendant la croissance on règle la température et le pH et en faisant passer de l'air au travers de la culture, on apporte l'oxygène indispensable pour une production optimale de celle-ci. Lorsque la croissance est terminée les cellules de levures sont séparées par centrifugation.

par l'activité de photosynthèse des plantes pendant des milliers d'années. L'autre est constituée par les hydrates de carbone des plantes qui poussent actuellement; assurer un approvisionnement régulier en ces dernières mettrait cette méthode en concurrence avec l'agriculture pour l'utilisation des terres arables.

Par bonheur, les énormes quantités de déchets fournis par l'agriculture et l'industrie se composent essentiellement d'hydrates de carbone qui peuvent être transformés en protéines microbiennes. Ainsi, par exemple, moins d'un quart des matériaux fournis par les récoltes servent de nourriture; la plupart des matériaux éliminés correspondent aux débris des récoltes et aux déchets provenant de la préparation ultérieure des aliments. L'ensemble de ces déchets se présente soit sous forme solide, où ils sont constitués de matières cellulosiques, soit réparti dans les grands volumes de liquides éliminés par les usines. On trouve dans le tableau I, quelques exemples de la production annuelle de déchets cellulosiques.

La cellulose est le principal composant de ces déchets et c'est le composé organique le plus abondant dans le monde. Dans les débris des récoltes et dans les sous-produits

* De spectrum 142.

Tableau I.
Production annuelle mondiale d'hydrates de carbone dans les déchets d'origine végétale.

Déchets	Hydrates de carbone (en milliers de tonnes) dans les déchets provenant	
	de l'agriculture	de l'industrie
Paille de blé	286 000	57 300
Son de blé		
Paille de maïs	120 000	30 100
Raffles de maïs		
Bagasses de canne à sucre		83 000
Mélasses		9 300

de l'exploitation forestière, elle est accompagnée par de la lignine et des hémicelluloses. En raison de l'effet protecteur exercé par la lignine et de la structure partiellement cristalline de la cellulose, ces produits résistent à une dégradation rapide par les micro-organismes. En les hydrolysant par la chaleur en présence d'acide on transforme la cellulose en glucose et les hémicelluloses en pentoses. L'hydrolysat, une fois neutralisé, peut être utilisé pour la croissance des levures ou des champignons. Techniquement, la méthode est réalisable. Elle a été utilisée en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale et elle est encore exploitée dans plusieurs usines de production en Russie et en Tchécoslovaquie. Une production annuelle d'un million de tonnes de

protéines à base de levures a été définie comme objectif en Russie. La possibilité d'utiliser la cellulose en provenance des déchets de papier grâce à une méthode semblable est actuellement à l'étude à l'Université de Manchester.

La transformation industrielle de nombreux produits naturels est à l'origine de grands volumes de déchets liquides qui se caractérisent par une importante demande biologique en oxygène (DBO) et provoquent la pollution. Les déchets sont propres en ce sens qu'ils dérivent principalement de substances qui sont mangeables et qui ne contiennent donc aucune substance chimique nocive. La plupart contient un mélange complexe de composés organiques consistant essen-

tiellement en hydrates de carbone mais du fait de leur importante DBO il n'est pas rentable économiquement de les traiter directement. En y faisant pousser des champignons on réduit leur potentiel de pollution et le mycélium fongique peut facilement être récolté par simple filtration. En ajoutant du sulfate d'ammonium aux déchets on augmente la teneur en protéines du mycélium fongique du fait que l'azote ainsi fourni est transformé en protéines. Au Collège national de technologie alimentaire nous avons appliqué cette méthode à des déchets liquides obtenus après extraction d'huiles de palme et d'olive, à des déchets en provenance d'usines de fabrication d'amidons de blé, de maïs ou de pommes de terre et aux liquides que l'on peut extraire des déchets de pulpe d'agrumes.

Des déchets de bananes et de capitules de tournesol ont été transformés en protéines microbiennes sous l'action des mêmes espèces de champignons. Le produit a été essayé comme aliment protéique pour les porcs et les volailles. Une entreprise du Royaume-Uni, Ranks Hovis Mc Dougall, a mis au point une méthode semblable pour faire pousser des champignons sur des déchets d'amidon et cherche actuellement à produire une nourriture pour l'alimentation humaine à partir d'un mycélium fongique. La société Whey Developments, également au Royaume-Uni, a imaginé une méthode en deux étapes pour le traitement du lactosérum. On sépare d'abord les protéines du lactosérum, après quoi on fait pousser une culture de champignons adaptée au lactose sur le liquide résiduel. Le produit mycélien contient environ 45 pour cent de protéines.

Substrats à base de combustibles fossiles

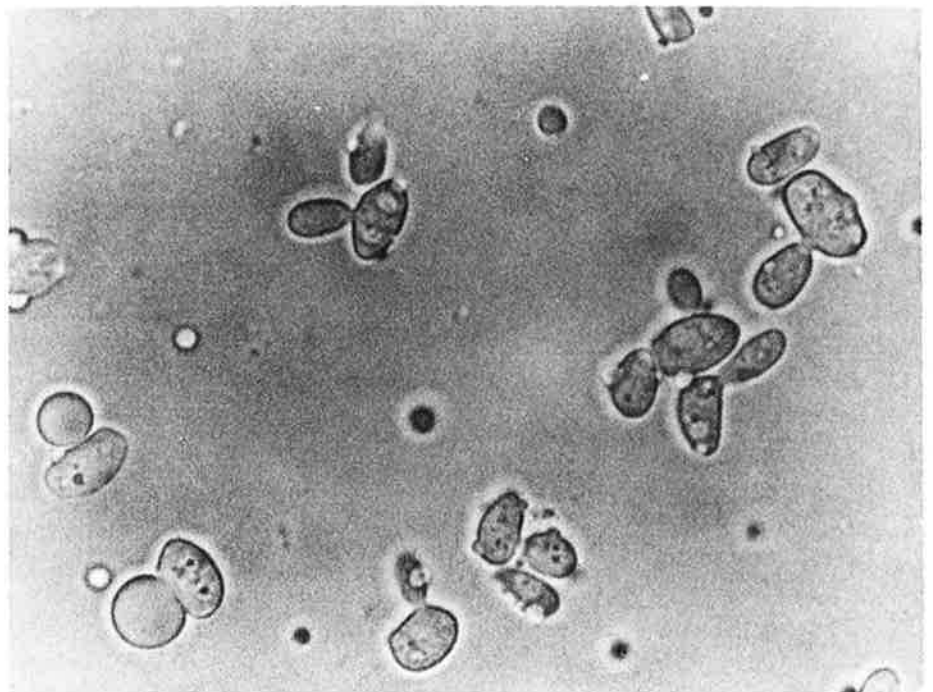
Le gaz naturel et le pétrole constituent des sources possibles de carbone nécessaire à la production de protéines microbiennes. L'emploi du pétrole a d'abord donné lieu à des recherches entreprises par la British Petroleum qui à l'origine cherchait à utiliser les levures pour éliminer sélectivement les polymères d'hydrocarbures. Lorsque la nécessité d'accroître les approvisionnements en protéines est devenue apparente, on s'est rendu compte que les cellules de levures constituaient un sous-produit intéressant. La méthode a maintenant été mise au point pour produire des protéines utilisables pour l'alimentation animale.

La méthode employée pour la culture des levures sur le pétrole est semblable à celle qui vient d'être décrite pour la production des levures de boulanger. Mais, par comparaison avec les méthodes utilisant les hydrates de carbone, il faut assurer une agitation beaucoup plus importante pour réaliser le mélange du pétrole avec l'eau et apporter de plus grands volumes d'air. Le rendement à partir du pétrole, est deux fois plus important qu'à partir des hydrates de carbone; 100 tonnes de pétrole fournissent 100 tonnes de levures contenant 50 pour cent de protéines.

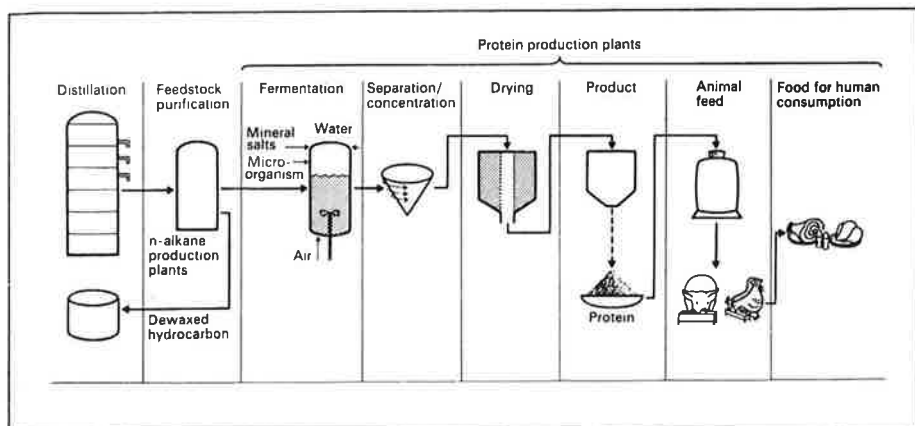
Les produits pétroliers présentent toutefois l'inconvénient de renfermer parfois des substances nocives que l'on retrouve dans les levures. Pour surmonter cette difficulté, la British Petroleum a recours à deux procédés : ou bien elle purifie le substrat avant de l'utiliser, ou bien elle extrait des levures recueillies toutes les matières grasses, qui contiennent les produits nocifs en dissolution.

Les recherches entreprises par Shell et ICI sur le gaz naturel utilisé comme substrat se sont révélées décevantes en termes de rendement. De plus, il y a un danger d'explosion à l'occasion du mélange de l'air avec le méthane. Ces résultats ont amené ces

entreprises à étudier une méthode de remplacement pour produire des protéines à base de levures ou de bactéries, méthode qui consiste à transformer d'abord les hydrocarbures en alcools. La matière première d'origine peut aussi bien être le pétrole que



Levures en croissance sur des hydrocarbures. On peut voir des cellules se divisant activement et quelques gouttes de substances huileuses.



Principales étapes du procédé de la British Petroleum pour la production de protéines à base de levures poussant sur un hydrocarbure (*n*-alcane).

Distillation. Purification des matériaux. Usines à production de *n*-alcane. Hydrocarbures dépolymérisés. Fermentation : eau, air, sels minéraux, micro-organismes. Concentration. Séparation. Séchage. Produit. Protéines. Alimentation animale. Nourriture pour consommation humaine.

Protéines et algues

Les algues unicellulaires contiennent de la chlorophylle et sont donc capables, par photosynthèse, d'utiliser l'énergie solaire pour leur croissance. Le gaz carbonique de l'air est exploité pour la synthèse des composants cellulaires de telle sorte qu'aucun apport en substances organiques n'est nécessaire. La production d'algues semble donc posséder un gros avantage par rapport aux autres méthodes de production de protéines microbiennes.

Dans la pratique, il est nécessaire, bien entendu, de s'équiper en matériel et en sources d'énergie et de recueillir les cellules après la pousse. Lorsque les algues se sont développées dans des conditions normales, en milieu calme, il faut soumettre plusieurs tonnes de cultures à la centrifugation pour obtenir un kilogramme de cellules. Bien que le choix de la température optimale, l'agitation et l'introduction de grands volumes

d'air pour augmenter l'apport en gaz carbonique puissent améliorer le rendement, le volume des cultures à centrifuger reste encore de 10 à 20 fois supérieur au volume qu'il faut manipuler pour obtenir la même quantité de protéines à partir des cultures de levures.

L'emploi d'une algue bleu-vert appelée *Spirulina maxima* pourrait améliorer l'efficacité d'ensemble de la méthode. On l'a découverte dans les eaux du lac Tchad où, depuis des siècles, elle constitue la principale source de protéines pour les populations locales. En raison de la forme et de la taille de ces cellules, la *Spirulina* a tendance à s'agglutiner et peut être séparée par simple filtration. On la récolte dans le lac Tchad en ramassant dans le lac les masses d'algues et en filtrant l'eau en excès au travers d'une couche de sable. On fait ensuite sécher le résidu au soleil. Les cellules contiennent

Tableau II.
Comparaison des rendements énergétiques en fonction des méthodes de production des protéines.

Méthode	Rendement énergétique, soit apport en énergie valeur énergétique du produit
Culture d'algues	2,8
Levures sur hydrocarbures	3,0
Levures sur hydrocarbures transformés en alcools	5,6
Levures ou champignons sur hydrates de carbone non cellulosiques	1,7
Levures ou champignons sur produits de l'hydrolyse d'hydrates de carbone cellulosiques	2,7
Agriculture intensive	1,0
Synthèse chimique	33,0

le gaz naturel et les alcools produits sont aussi bien le méthanol que l'éthanol. Selon la méthode proposée par ICI, les bactéries se développent dans un milieu de culture dans lequel le méthanol est la source de carbone. Pour réduire le coût des investissements en matériel et améliorer l'efficacité du système d'aération on a étudié un nouveau modèle d'appareil à fermentation dans lequel aucun agitateur mécanique n'est utilisé, le brassage étant réalisé uniquement par circulation d'air.

Le produit d'origine bactérienne d'ICI et le produit à base de levures de la British Petroleum ont tous deux subi des essais très complets pour l'alimentation animale. La BP a atteint le stade de la construction d'usines capables d'assurer une production intensive de 100 000 tonnes par an de protéines à base de levures, qui pourront être introduites sur le marché comme protéines de haute qualité utilisables pour l'alimentation animale. On projette actuellement de construire des usines semblables en Arabie Saoudite et au Venezuela.

62 pour cent de protéines, soit plus que la viande. En plus de l'avantage d'être faciles à récolter, elles croissent dans un milieu à pH élevé (de 9,5 à 10), ce qui augmente l'efficacité de l'absorption de l'anhydride carbonique et simplifie le problème de la contamination par d'autres organismes. Des usines pilotes pour la production de *Spirulina* ont été construites au Mexique et dans le sud de la France.

Les algues, les bactéries, les champignons et les levures existent dans tous les types d'environnements naturels et il se peut que chacun des aliments que nous consommons contienne des vestiges de leurs cellules. Une forte proportion de cellules microbiennes sont présentes dans les aliments préparés au moyen de méthodes faisant appel à des micro-organismes. La bière, le vin, le pain, le fromage, le yoghourt en sont des exemples. L'idée que l'homme puisse se nourrir de micro-organismes n'est donc pas nouvelle, mais il est important qu'aucune forme nouvelle de nourriture ne soit introduite dans l'alimentation tant qu'on ne lui aura pas fait subir des essais minutieux pour s'assurer qu'elle peut être consommée sans danger.

Les essais sont onéreux et doivent s'étendre sur plusieurs années. Pour cette raison, il n'existe qu'un ou deux produits qui aient été prévus d'emblée pour l'alimentation humaine ; l'intérêt à court terme de la plupart de ces méthodes c'est de produire des protéines pour l'alimentation du bétail. Lorsque l'innocuité des produits aura été bien établie, il ne sera pas difficile de créer des aliments destinés à la consommation de l'homme, car des produits texturés semblables aux aliments protéiques extraits du soja ont déjà été préparés en laboratoire à partir de bactéries, de levures et de champignons.