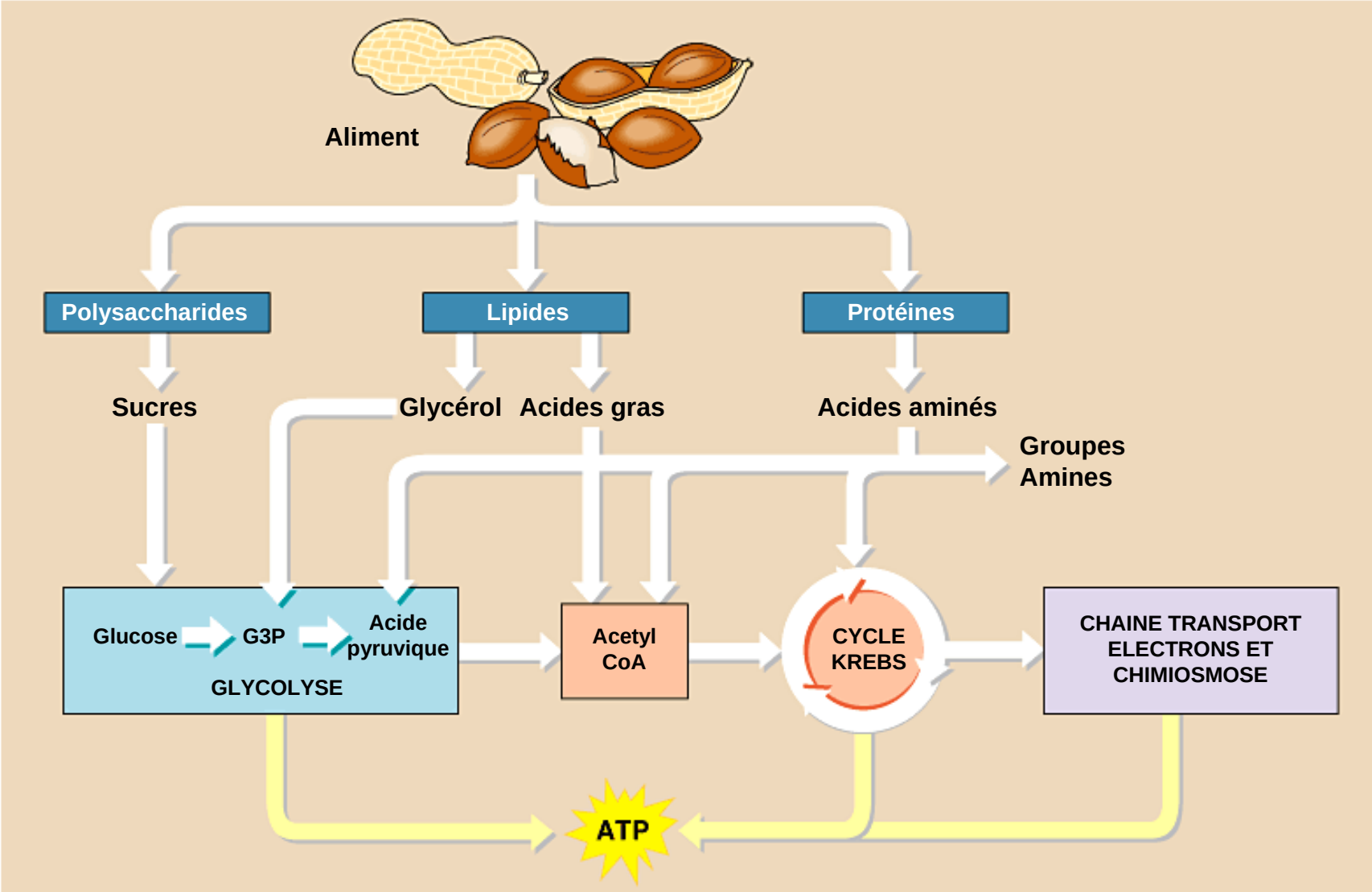
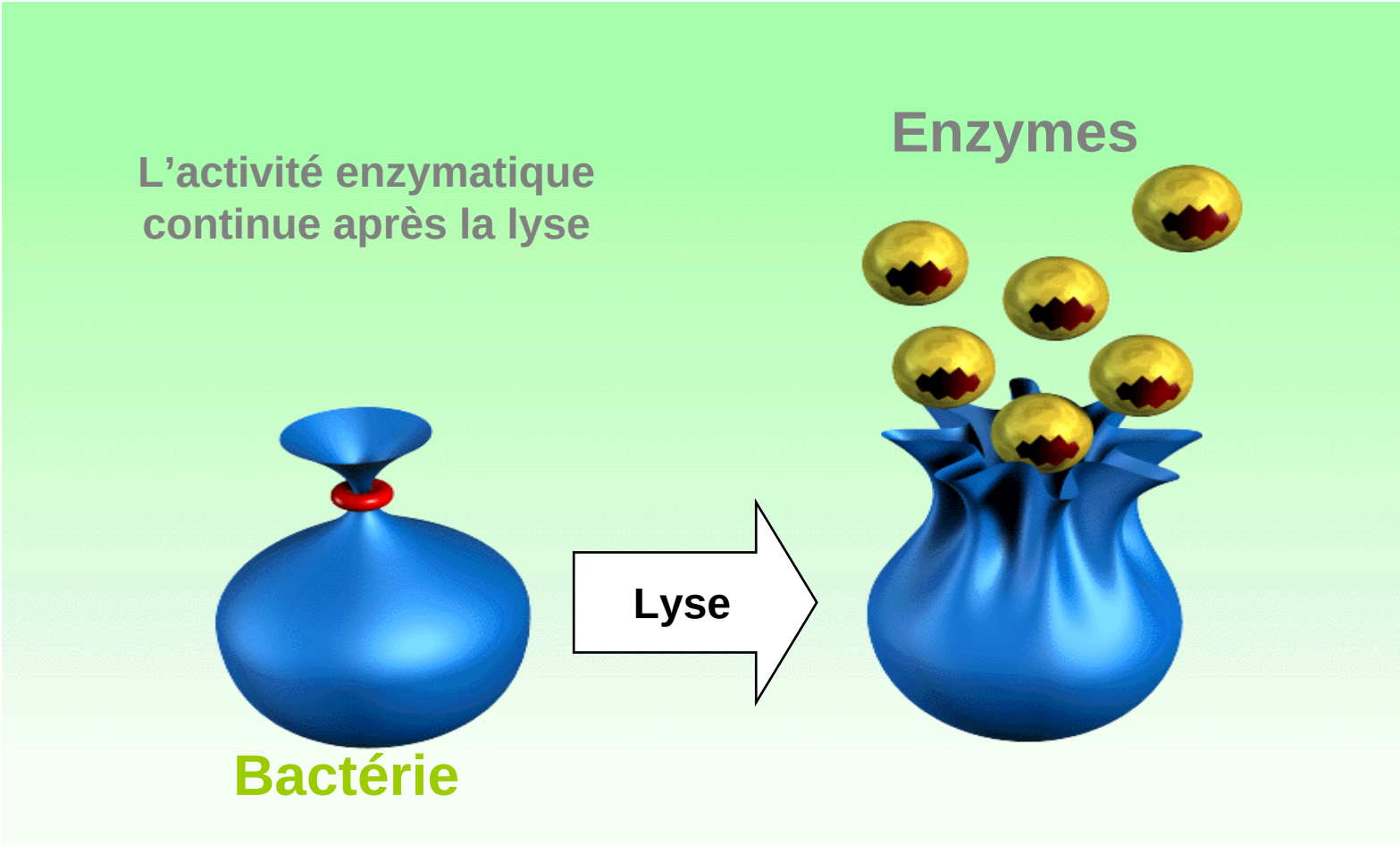

Aliment
Polysaccharides
Lipides
Protéines
Sucres
Glycérol
Acides gras
Acides aminés
Groupes
Amines
Glucose
G3P
Acide
pyruvique
GLYCOLYSE
Acetyl
CoA
CYCLE
KREBS
CHAINE TRANSPORT
ELECTRONS ET
CHIMIOSMOSE
ATP

Microorganismes: poches d'enzymes



Microorganismes: poches d'enzymes

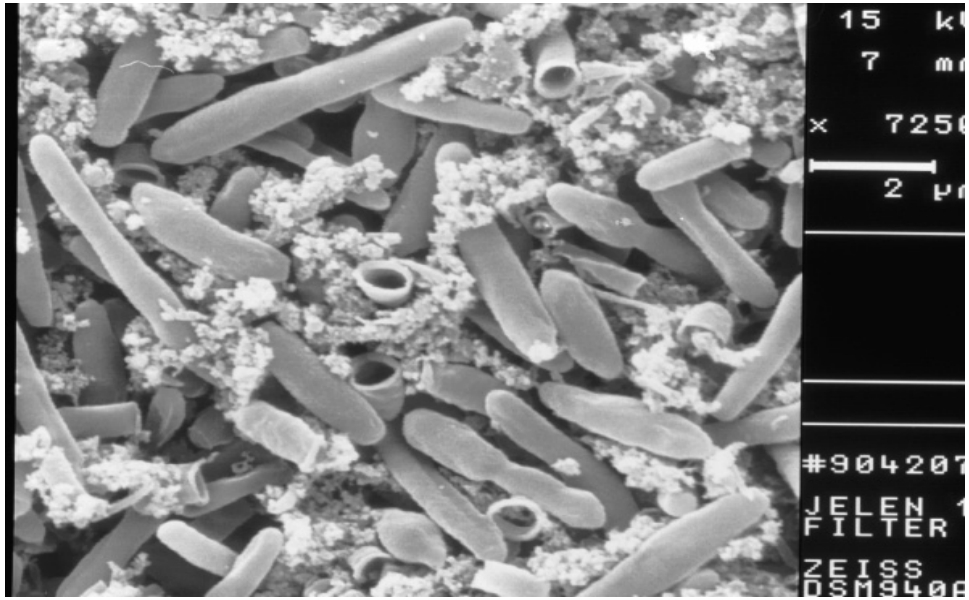


Tableau - Micro-organismes utilisés en industrie alimentaire		
Micro-organismes		**Produits**
Bactéries	bactéries lactiques : *Lactobacillus, Streptococcus*	yaourts, fromages, salaisons, choucroute, pain
	Leuconostoc	œnologie (fermentation malo-lactique)
	bactéries acétiques	vinaigre
	corynébactéries	fromages
Levures	*Saccharomyces cerevisiae, uvarum...*	pain, vin, bière, alcool
Moisissures	*Penicillium*	fromages
	Aspergillus	saké
	Mucor	présure pour fromagerie

© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Tableau - Principaux ferments pour l'industrie laitière et fromagère	
Ferments	**Applications**
Lactobacillus bulgaricus *Streptococcus thermophilus* *Bifidobacterium sp.*	Yaourts
Lactobacillus acidophilus	Laits fermentés
Lactobacillus caucasius	Kéfir (boisson fermentée d'origine caucasienne obtenue à partir de lait de vache ou de chèvre)
Streptococcus cremonis *Streptococcus lactis* *Streptococcus diacetylactis* *Leuconostoc cremonis* *Lactobacillus cremonis* *Lactobacillus lactis*	Premières étapes (caillage) de la plupart des fromages Fromages non affinés à pâte fraîche Beurre
Streptococcus thermophilus *Lactobacillus helveticus* *Propionibacterium shermanii* *Propionibacterium freudenreichii*	Gruyère (les deux souches du genre *Propionibacterium* sont responsables de la formation des trous lors du procédé d'affinage)
Lactobacillus cremonis *Lactobacillus lactis* *Penicillium roqueforti*	Bleu, roquefort (*P. roqueforti* est responsable de la couleur bleue)
Lactobacillus cremonis *Lactobacillus lactis* *Penicillium camemberti*	Camembert

© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Tableau - Principales levures et leurs applications dans le secteur de l'alimentation	
Espèces de levures	**Produits obtenus et applications**
Saccharomyces cerevisiae	Pain (la levure de boulangerie joue un rôle clé dans l'hydrolyse des polysaccharides et des protéines contenus dans la farine ; la production de CO_2 permet de faire « lever » la pâte à pain)
Saccharomyces cerevisiae *Saccharomyces carlsbergensis*	Bière
Saccharomyces cerevisiae *Saccharomyces ellipsoideus* *Kloeckera*, *Hansenula, Hanseniospora*	Vin (les premières étapes du processus de vinification : production d'alcool à partir du moût de raisin, sont principalement réalisées par *S. cerevisiae*)
Saccharomyces sake	Saké
Saccharomyces rouxii	Miso (aliment fermenté à base de soja)
Kluyveromyces fragilis *Kluyveromyces lactis*	Fromages
Candida utilis	Levure alimentaire

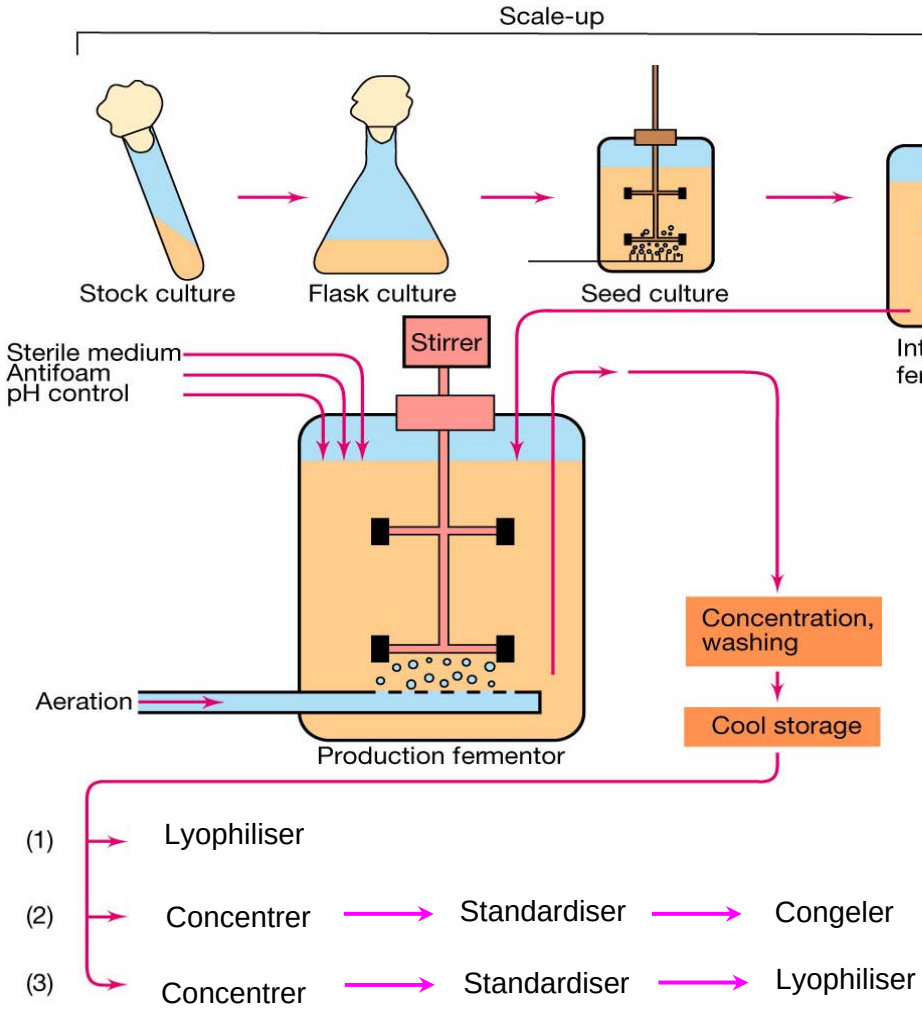
© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Tableau - Principales espèces de moisissures importantes en production alimentaire		
Espèces	**Caractères particuliers**	**Utilisations**
Penicillium roqueforti	Bleu vert ; température optimale 18 à 20 °C ; inhibé à 20 % de sel ; peut se développer à des taux d'oxygène faible de l'ordre de 5 % ; pH de 3 à 10,5	Fabrication de fromages à pâte persillée
Penicillium camemberti	Moisissure blanche. Synonyme de *Penicillium caseicolum,* il est aussi appelé *Penicillium candidum* ; température optimale 15 à 25 °C ; inhibé par des taux de sel de 20 à 25 % ; pH optimal 5	Fabrication de fromages à croûte fleurie
Penicillium nalgiovensis	Blanc puis devient vert	Flore de surface du saucisson, fromage d'Ellischauer
Penicillium album	Blanc puis devient vert	Flore de surface du saucisson, couverture de certains fromages
Geotrichum candidum	Forment des arthrospores ; il existe des souches très sporulantes et graisseuses, et d'autres plus sèches, plus filamenteuses ; pH entre 5 et 7 ; inhibés à partir de 2 % de sel	Agents importants de l'affinage de fromages, fabrication de gari
Mucor	Produisent des sporanges noirs ; vitesse de développement horizontal rapide	Flore de surface de certains fromages, transformation de produits divers
Rhizopus	Très grande vitesse de développement grâce à la présence de stolons sur le mycélium ; sporanges noirs	Transformation de produits divers
Aspergillus oryzae	Jaune verdâtre puis brun. Groupe important auquel se rattache *A. sojeae*	Fermentation de produits à base de riz et de soja
Aspergillus niger	Tête conidienne très noire	Production de molécules diverses (acide citrique, protéases...)
Fusarium solani	Rose ; colonies graisseuses et rases ; présence de deux types de spores (micro- et macroconidies)	Flore de surface de certains fromages, participent à la « fermentation » du café

© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Tableau - Critères de choix de différents micro-organismes utilisés en transformation de produits alimentaires				
Critères	**Bactéries lactiques**	**Corynebactéries**	**Levures**	**Moisissures**
Conditions de croissance	• Température optimale et cycle thermique • Croissance à basse température • Comportement en présence d'autres bactéries (effets synergiques, symbiose, antagonismes...)	• pH optimal et minimal • Comportement à + 4 °C • Croissance à 10-15 °C • Comportement en présence de levures et/ou moisissures	• Adaptation à des températures basses ou élevées • Exigences faibles en éléments nutritifs • Comportement en présence de bactéries lactiques et propioniques	• Vitesse de germination et de croissance • Température • Comportement en présence d'autres micro-organismes (*Mucor* ...)
Productions ou caractères particuliers	• Capacité acidifiante • Production de polysaccharides (dextranes) • Arômes • Potentiel aminopeptidasique • Potentiel protéolytique • Bactériocines	• Pigmentation non photodépendante • Activité caséolytique • Activité aminopeptidasique • Activité lipolytique • Arômes • Activité déméthiolase	• Taux d'éthanol • Rendement en éthanol • Production élevée en glycérol • Esters lourds • Phénotype « *killer* » (1) • Dégradation de l'acide malique • Caractère agglomérant • Propriétés protéolytiques • Action sur les polyphénols	• Morphologie (feutrage ras, dense, aéré...) • Couleur et stabilité au vieillissement • Sporulation souhaitée (*Penicillium Roquefortii*) ou non (*Penicillium Camembertii*) • Activité protéolytique • Activité lipolytique
Caractères non recherchés	• Production de peptides amers	• Production de sulfures	• Production d'écume • Production d'acide acétique • Production d'acétate d'éthyle (acidité volatile) • Production d'H_2 S et de mercaptans • Production trop importante d'alcools supérieurs	• Goûts indésirables
Sensibilité	• Lysozyme • Phages • Antibiotiques • Tolérance au sel	• Tolérance au sel (8-15 %)	• Tolérance à l'éthanol intra et extracellulaire • Tolérance à l'anhydride sulfureux	• Résistance au sel
Fabricant	• Rendement de production • Résistance à la congélation, à la lyophilisation et au séchage (levures) • Temps de conservation			
(1) Levures capables de sécréter des substances inhibitrices qui peuvent entraîner la destruction des autres souches.				

Selon la formulation

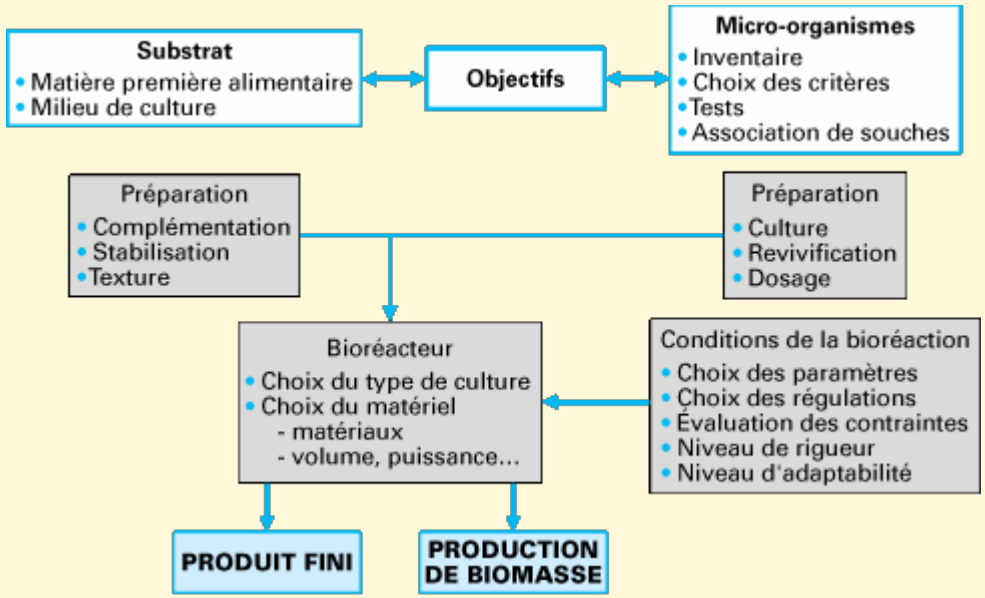


(a)

Barton Spear

(b)

Figure - Phases et étapes d'une production par voie biotechnologique



© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Tableau - Principales fermentations microbiennes			
Fermentation	**Principaux produits**	**Micro-organismes**	**Applications**
Homolactique	96 % d'acide lactique	*Lactococcus*	Salaisons, produits laitiers, choucroute, ensilage
		Lactobacillus	
		Sc thermophilus	
Hétérolactique	40 % d'acide lactique, 19 % de CO_2, 18 % d'éthanol, 18 % de glycérol	*Leuconostoc*	Kéfir, accidents de fabrication
		Lactobacilles hétérofermentaires	
Alcoolique	50 % d'éthanol, 50 % de CO_2	Levures du genre *Saccharomyces*	Vin, bières, pain, pâtisseries
Acides mixtes	50 % d'acide lactique, 20,5 % d'acides divers, 12 % de CO_2, 0,5 % d'H_2, 11 % d'éthanol	*Escherichia coli Salmonella*	Gonflements et mauvais goûts, risques de pathogénicité
		Citrobacter	
Butanediolique	5 % d'acides divers, 40 % de CO_2, 0,5 % d'H_2, 15 % d'éthanol, 38 % de butanediol	*Enterobacter*	Gonflements et mauvais goûts
		Klebsiella	
Butanoïque	15 % d'acide acétique, 35 % d'acide butyrique, 48 % de CO_2, 3 % d'H_2	*Clostridium tyrobutyricum*	Gonflements en fromages à pâte cuite
		C. butyricum	
Acétonobutylique	Acide acétique et butyrique, acétone, butanol	*Clostridium acetobutylicum* et *butylicum*	Production de solvants
Propionique	6 % d'acide acétique, 60 % d'acide propionique, 10 % d'acide succinique, 16 % de CO_2	*Propionibacterium*	Fermentation gazogène dans les fromages à pâte cuite et production d'arôme
Entner-Doudoroff	50 % d'éthanol, 50 % de CO_2	*Zymomonas mobilis*	Production d'éthanol
Acétique	Acide acétique	*Gluconobacter*	Production de vinaigre
		Acetobacter	
Méthanique	Méthane	*Methanobacterium*	Production de méthane en épuration anaérobie
		Methanococcus	
		plus des bactéries syntrophiques	
Malolactique	Acide lactique à partir de l'acide malique	*Leuconostoc oenos*	Désacidification des vins
		Ln mesenteroides	
		Lactobacillus plantarum	

Tableau - Incidence du type de métabolisme dans les productions microbiennes	
Voie métabolique	**Exemples de produits importants formés**
Catabolisme	• Acides
	• Alcools
	• Gaz
	• Arômes divers
	• Produits de protéolyse et de lipolyse
	• Produits de dégradation de l'amidon
Anabolisme	• Dextranes et biopolymères
	• Vitamines
	• Enzymes libérées par lyse cellulaire
	• Biomasse

© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Tableau - Sélection d'un micro-organisme		
Phase	**Étape**	**Remarques**
1	**Inventaire**	Recherche de la souche la plus proche chez les fabricants Recherche dans les collections de souches nationales et internationales La souche retenue doit être isolée, identifiée et conservée dans des conditions qui empêchent sa mutation (congélation à – 85 °C ou dans l'azote liquide, lyophilisation)
2	**Tests technologiques**	Ces essais sont obligatoires pour confirmer la bonne adaptation du micro-organisme à l'objectif. Ils doivent se faire si possible à partir d'un substrat proche de celui qui sera utilisé industriellement
3	**Essais de production**	D'abord au stade du laboratoire, puis en production pilote et à l'échelle industrielle

© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Paramètres du bioréacteur

- Température
  - Critique pour une croissance optimale
- Aération
  - En rapport avec le débit d'oxygène et la vitesse d'agitation
- Agitation
  - Dépend des dimensions de la cuve et des turbines utilisées
  - Contrôle le taux d'aération
  - Peut endommager les cellules
- pH
  - Important pour la croissance et la survie
- Mousse

Figure - Matériel de production

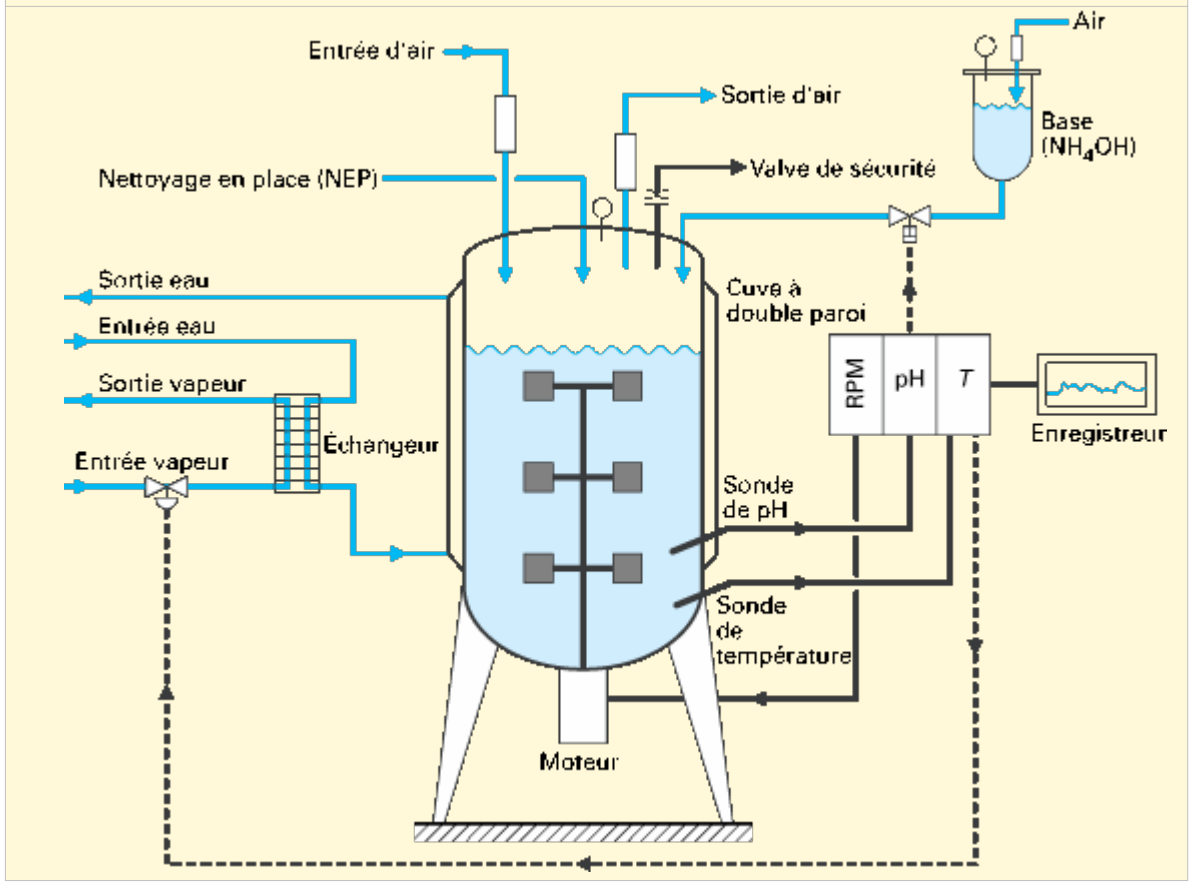
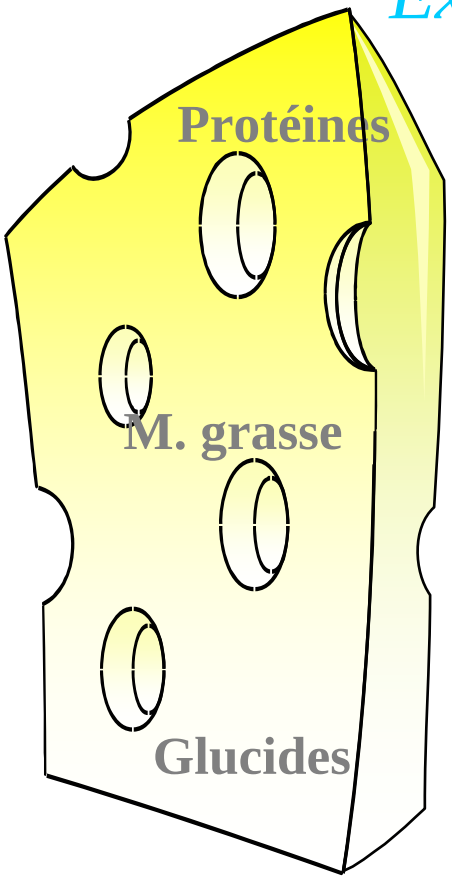


Tableau - Modes d'intervention des micro-organismes sur les aliments	
Interventions	**Exemples**
Directes	• Production d'alcool ou de gaz par les levures • Acidification lactique des produits laitiers, des viandes ou des végétaux • Production d'acétaldéhyde dans le yaourt • Colorations diverses...
Indirectes	• Coagulation lactique des produits laitiers ou des salaisons • Épaississement de la texture • Stabilisation microbienne des produits • Amélioration de la digestibilité...

Tableau - Manifestations de l'action microbienne dans les aliments		
Effets sur le produit	**Exemple**	**Micro-organismes impliqués**
Modification de la texture	Coagulation du lait	Bactéries lactiques diverses
	Texture filante ou veloutée de produits laitiers frais fermentés	Bactéries lactiques par production de dextranes
	Modification de volume des produits de panification ou de pâtisserie	*Saccharomyces cerevisiae*
	Production de textures alvéolées dans le pain	*Saccharomyces cerevisiae*
	Formation « d'yeux » dans les fromages...	Bactéries propioniques
Aromatisation	Goût de noix (éthanal ou acétaldéhyde) dans certains vins	*Saccharomyces cerevisiae*
	Goût typique du beurre (diacétyle)	*Lactococcus lactis diacetylactis*
	Goût typique du yaourt (acétaldéhyde et acide lactique)	*Lactobacillus delbrueckii bulgaricus*
	Développement du goût du cacao	Bactéries diverses
Coloration	Trouble blanchâtre dans les bières « blanches »	*Saccharomyces cerevisiae*
	Brunissement de la pâte des fromages à pâte pressée cuite par le propionate de calcium	Bactéries propioniques
Modification du goût	Acidification du chou (choucroute)	*Lactobacillus*
	Désacidification du vin	Bactéries malolactiques
Apport diététique	Production de vitamines B, etc. dans certains produits laitiers fermentés	*Bifidobacterium*
Amélioration de la digestibilité	Protéolyse dans les produits laitiers ou les viandes	Enzymes microbiennes ou animales
	Dégradation de l'amidon dans les produits céréaliers	Enzymes microbiennes ou végétales
Stabilisation microbienne	Acidification	Bactéries lactiques et acétiques
	Production d'éthanol	*Saccharomyces cerevisiae*

© Techniques de l'Ingénieur - 2004

Ex. bactéries lactiques



Proteolyse →

Lipolyse →

Lactose —Glycolyse→

Citrate → → →

Fermentations primaires

Peptides

Acides aminés

Acides gras libres

Lactate

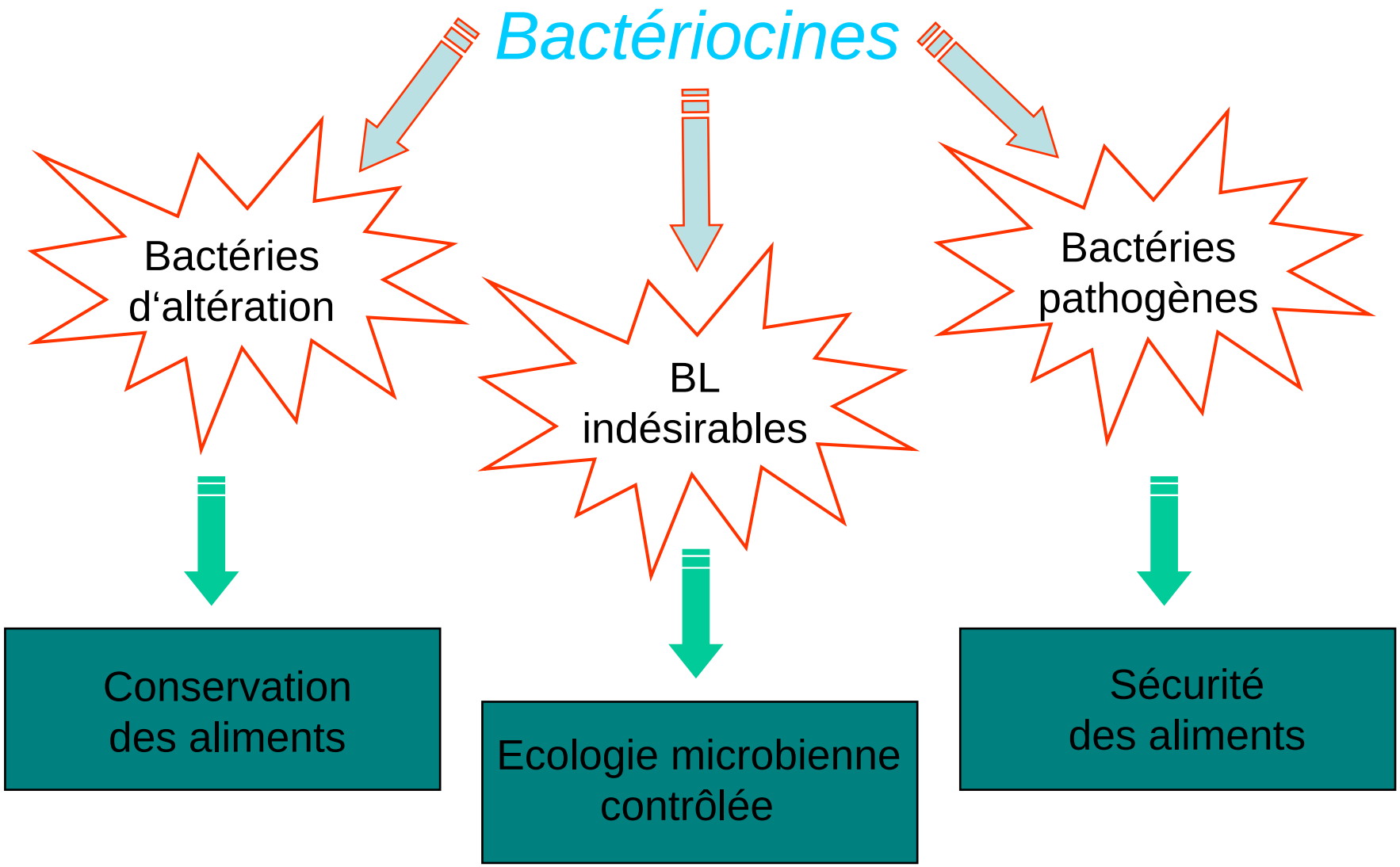
Fermentations secondaires

Composés soufrés

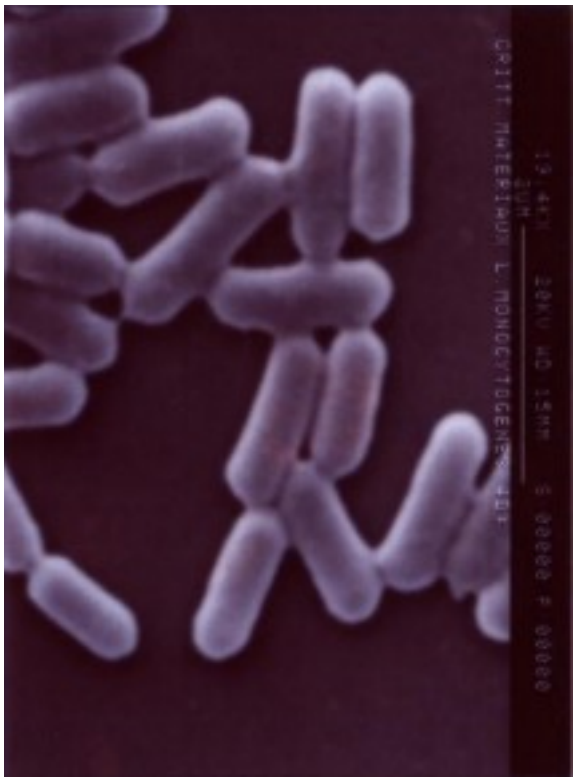
Esters

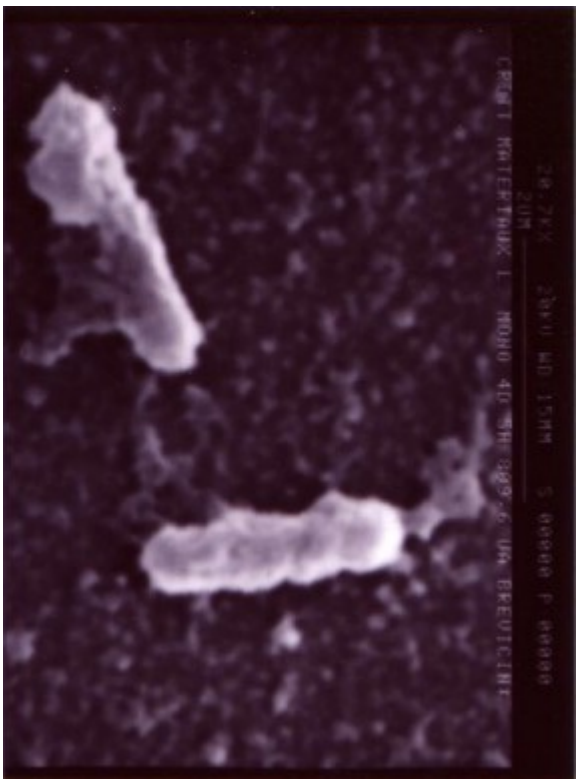
Composés arômatiques

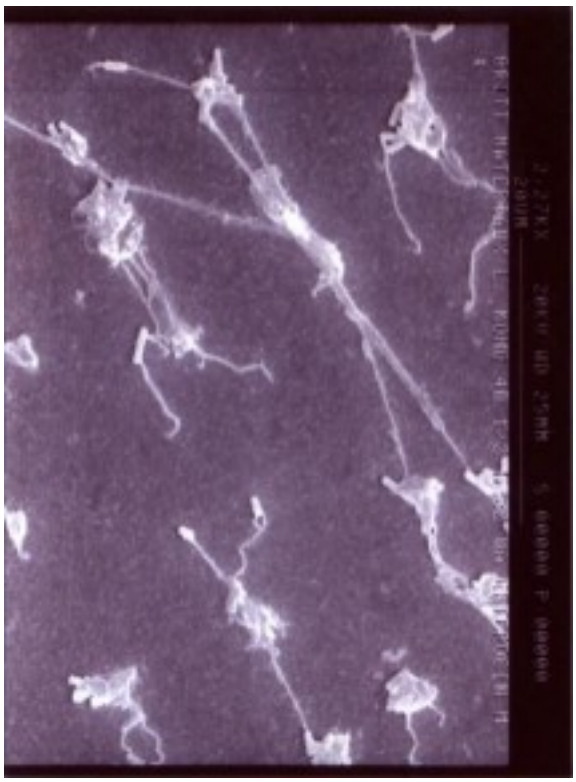
Diacétyl


Bactériocines
Bactéries d'altération
BL indésirables
Bactéries pathogènes
Conservation des aliments
Ecologie microbienne contrôlée
Sécurité des aliments

Effet de la pédiocine AcH sur *Listeria monocytogenes*

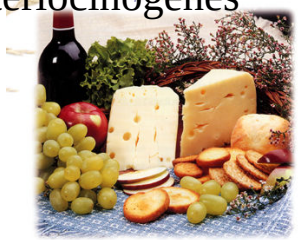




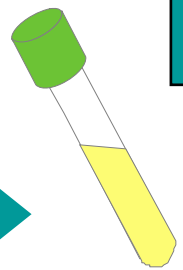


Isolement

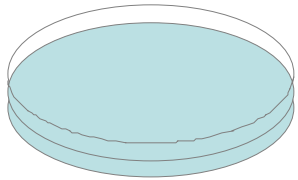
Recherche de bactéries lactiques bactériocinogènes



Echantillon

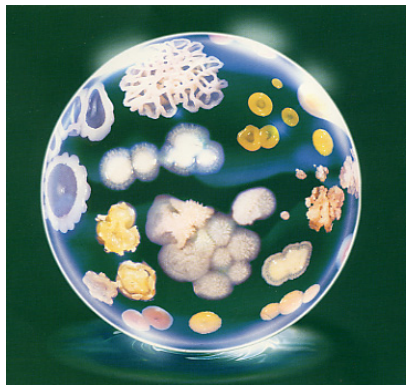


Solution saline



MRS agar

Incubation anaérobe
30°C, 2-3 jours



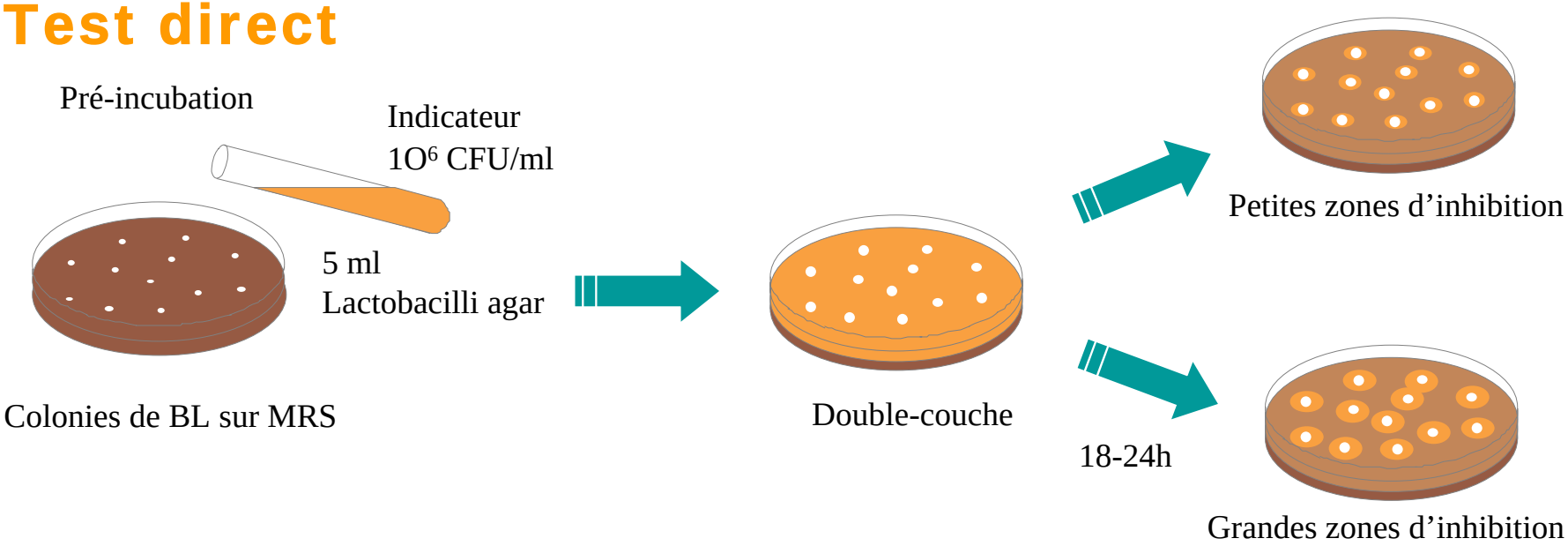
La bactérie

- Isolement
- Purification
- Identification

La bactériocine

- Test antibactérien
- Purification et structure
- Essai pilote
- Essai de production

Test direct


Pré-incubation
Indicateur
1O6 CFU/ml
5 ml
Lactobacilli agar
Colonies de BL sur MRS
Double-couche
18-24h
Petites zones d'inhibition
Grandes zones d'inhibition

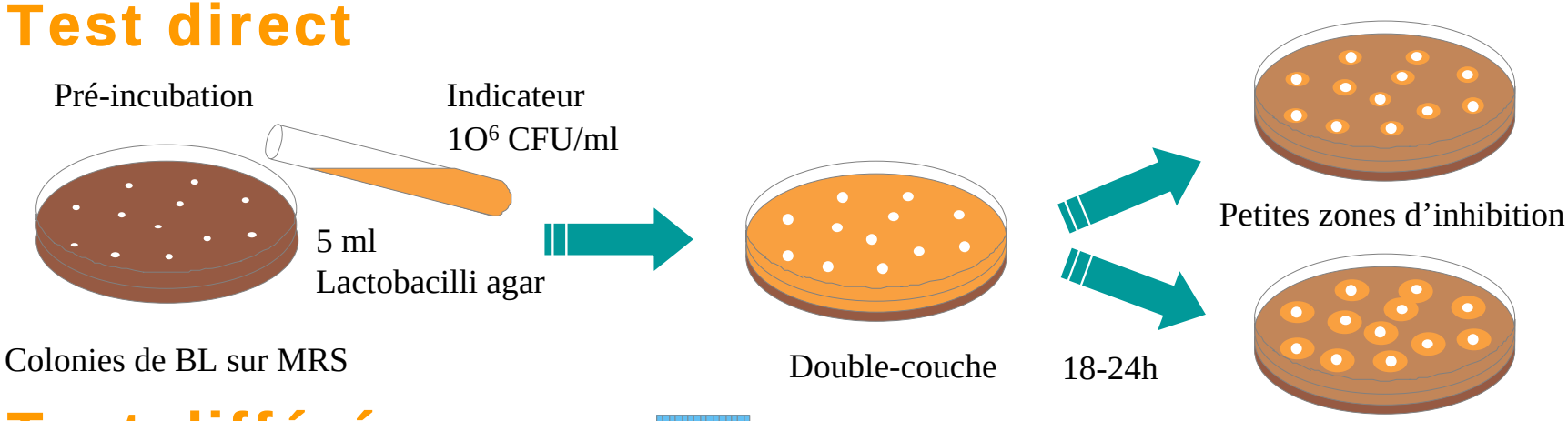
Bactérie test

Bactérie cible

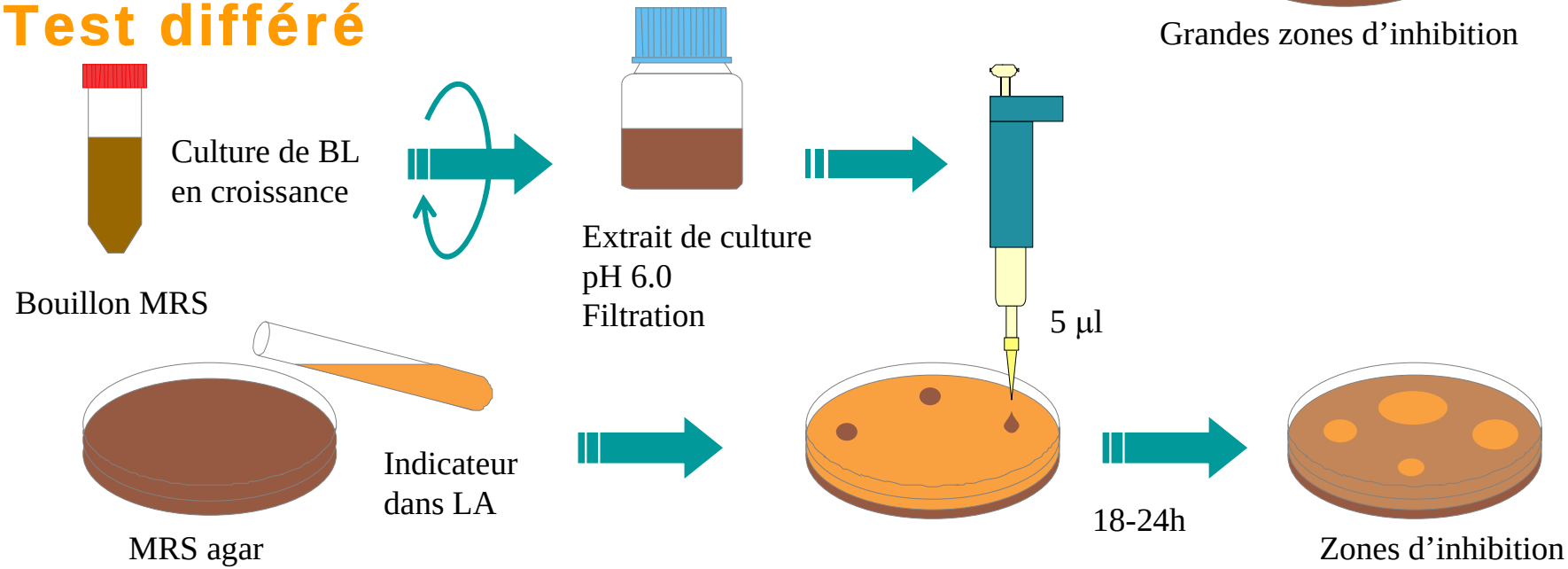
Souche test : *L. lactis* RO 50
Souche cible : *P. acidilactici* JCM 5885

Détection de composés antibactériens chez les bactéries lactiques

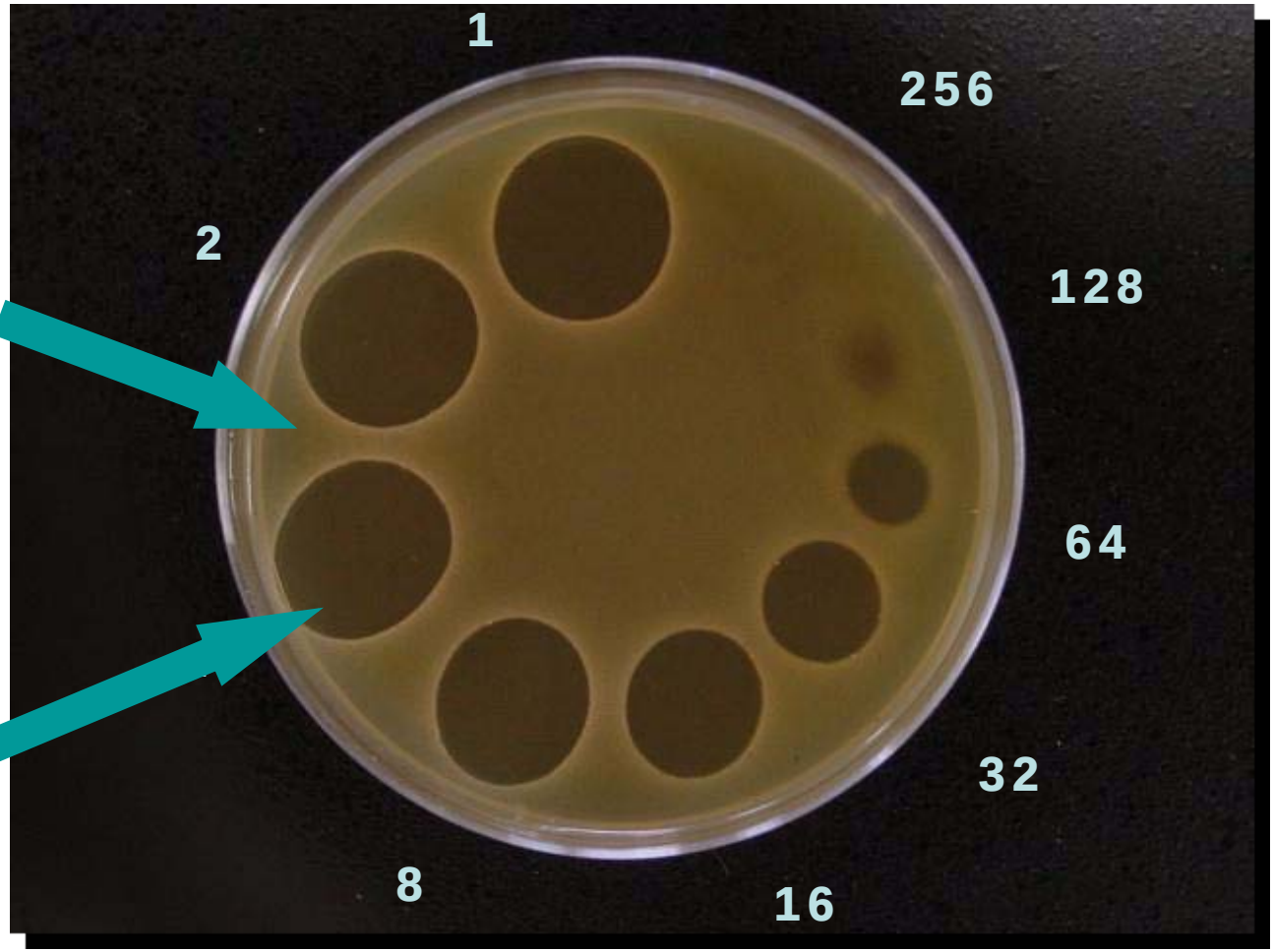
Test direct



Test différé



Détection de composés antibactériens chez les bactéries lactiques



Zone de croissance

Zone d'inhibition

Titrage : dilution critique

Souche test : *L. lactis* RO 50
Souche cible : *P. parvulus* JCM 5889

Exemples de spectres d'activité

Espèce indicatrice	Sensibilité en UA (X200) RO 50	IT 62	Espèce indicatrice	RO 50	IT 62
L. lactis RO 50	0	512	*L. sake*	2048	64
L. lactis subsp. *lactis*	16	128	*L. vaginalis*	0	0
L. lactis subsp. *raffinolactis*	8	0	*W. confusa*	1024	0
L. garvieae	4	0	*W. halotolerans*	128	0
P. acidilactici	1024	256	*W. hellenica*	64	0
P. acidilactici	8	0	*W. kandleri*	8	0
P. pentosaceus	16	0	*W. minor*	0	0
T. halophilus	512	256	*W. paramesenteroides*	128	32
E. faecium	32	32	*W. viridescens*	32	0
E. faecalis	256	32	*L. carnosum*	64	64
E. hirae	8	4	*L. citreum*	4	0
E. casseliflavus	128	256	*L. fallax*	32	0
E. durans	8	0	*L. lactis*	64	0
E. gallinarum	64	32	*L. mesenteroides*	1024	0
E. mundtii	0	64	*L. paramesenteroides*	512	8
E. raffinosus	2	0	*B. cereus*	8	4
E. saccharolyticus	512	128	*B. thuringensis*	0	0
L. casei	1024	0	*B. subtilis*	32	0
L. fructosus	0	0	*C. tyrobutyricum*	256	256
L. gasseri	0	0	*S. aureus*	256	0
L. paracasei	0	0	Yeast & Molds	0	0