

INNOCUITE ET DISPONIBILITE DES NUTRIMENTS DANS LES ALIMENTS DE COMPLEMENT

Pierre BESANÇON

Unité de nutrition, Laboratoire de Génie Biologique et
Sciences des aliments, Université Montpellier II (France)

1. INTRODUCTION

Avec pour premier objectif la couverture des besoins nutritionnels du jeune enfant, la conception d'aliments de complément fait toujours intervenir un certain nombre de traitements - domestiques ou industriels - dont il est nécessaire de savoir quelles en sont les incidences en termes de valeur nutritionnelle et d'innocuité. Par ailleurs les facteurs antinutritionnels souvent présents dans les matières premières d'origine végétale doivent être éliminés, sous peine de voir disparaître le bénéfice d'une bonne formulation du produit.

2. QUALITES DE L'ALIMENT

2.1. Quelques définitions

Tout aliment doit répondre en terme de qualité à un double objectif de sécurité et d'acceptabilité (figure 1). La première de ces composantes est de pouvoir garantir une totale innocuité au plan microbiologique, c'est-à-dire l'absence de germes pathogènes ; le produit doit être également exempt de produits toxiques naturels ou néoformés au cours des traitements.

L'acceptabilité d'un aliment dépendra à des degrés divers de ses qualités organoleptiques (saveur, arômes, couleur, texture...), des qualités de services incorporés (par exemple les aliments partiellement ou tout prêts à l'emploi) , et bien entendu de qualités économiques (prix). La conception et l'élaboration d'un aliment devrait intégrer l'ensemble de ces paramètres.

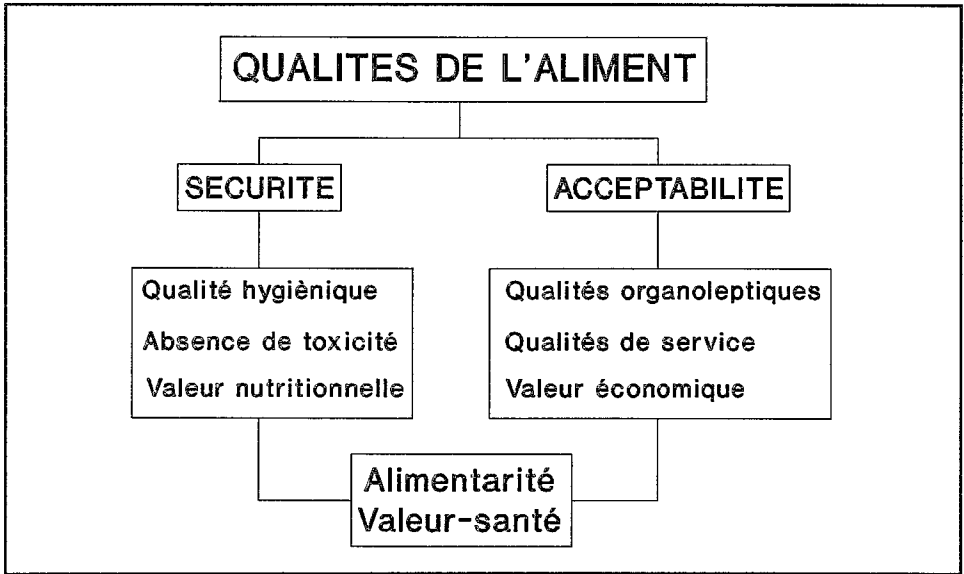


Figure 1
Qualités d'un aliment.

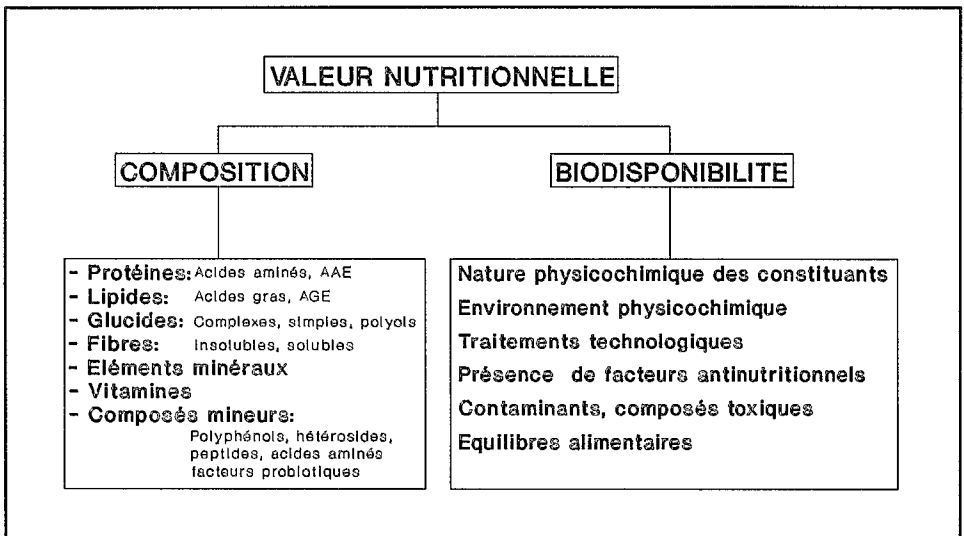


Figure 2
Valeur nutritionnelle d'un aliment.

La qualité nutritionnelle (figure 2) est d'abord fonction de la composition centésimale de l'aliment ou de ses ingrédients, telle qu'elle apparaît dans les tables de composition. On peut évidemment pousser plus ou moins loin l'analyse en allant jusqu'aux teneurs

en acides aminés, en particulier essentiels, en acides gras et à leur équilibre entre saturés, monoinsaturés, et polyinsaturés, en différents types de glucides, simples ou complexes, en fibres, solubles et insolubles, en différents éléments minéraux et vitamines et enfin en substances secondaires présentes en faibles quantités, mais qui peuvent jouer des rôles intéressants au plan biologique (antioxydants, facteurs de protection, peptides...).

Un autre aspect important à prendre en compte dans l'évaluation nutritionnelle de l'aliment est la biodisponibilité des nutriments, c'est-à-dire leur aptitude à être réellement libérés au cours des processus digestifs, à être absorbés correctement puis utilisés efficacement au niveau métabolique. La biodisponibilité dépend de l'environnement physico-chimique des molécules, des procédés technologiques subis, de l'absence de facteurs antinutritionnels et, éventuellement, de l'équilibre du régime.

2.2. Evaluation de la qualité

La qualité nutritionnelle d'un aliment s'évalue principalement au travers de l'analyse chimique. Le recours à des méthodes *in vivo* permet d'avoir une évaluation de la biodisponibilité des nutriments. Les essais sur l'animal de laboratoire, le jeune rat en croissance le plus souvent, permettent d'avoir, lorsqu'ils sont bien pratiqués et dans des temps assez courts de quelques semaines, une évaluation précise de la qualité nutritionnelle des aliments. Aux critères classiques de croissance pondérale et de digestibilité (matière sèche, matières azotés), on peut adjoindre l'analyse de constantes sanguines, la détermination des concentrations en nutriments circulants et en réserve dans les organes.

Cependant ces essais sont lourds et onéreux. Il existe des méthodes alternatives *in vitro* d'évaluation de la biodisponibilité dont les résultats sont assez bien corrélés avec ceux des essais *in vivo*. La lysine, acide aminé essentiel qui doit se trouver en quantité équilibrée dans le régime du jeune enfant en croissance, est susceptible d'être partiellement indisponibilisée par blocage chimique, notamment à l'issue des traitements thermiques d'aliments protéiques et surtout en présence de glucides réducteurs (glucose, lactose) ; dans ce cas, l'analyse globale des acides aminés après hydrolyse acide de la fraction protéique donne la teneur en lysine totale non détruite. L'emploi de réactifs spécifiques qui fixent les liaisons aminées libres (extrémités ϵ -NH₂ des résidus lysyls dans les protéines), tels que le fluorodinitrobenzène (FDNB) ou bien encore une hydrolyse partielle de la protéine par la trypsine donnent une appréciation de la lysine disponible, non bloquée, en général bien corrélée avec la lysine nutritionnellement disponible.

Enfin les experts FAO et OMS ont préconisé la méthode dite DISCO pour l'évaluation de la qualité des protéines : elle associe une détermination chimique de la teneur en acides aminés, le calcul de l'indice chimique de la protéine analysée par rapport à une protéine de référence ou une combinaison-type d'acides aminés ainsi qu'une mesure de la digestibilité de l'azote : on détermine alors un indice DISCO qui est le produit de la digestibilité *in vivo* par l'indice chimique (ou score chimique).

L'évaluation toxicologique passe par des protocoles bien établis et souvent beaucoup plus longs. Elle porte sur les substances naturelles toxiques, les contaminants chimiques (produits phytosanitaires, métaux lourds), les additifs et auxiliaires technologiques, les produits néoformés à l'issue des traitements. Les essais sur l'animal de laboratoire à des doses croissantes permettent de déterminer des doses maximales sans effet (DSE) ; la DSE affectée d'un coefficient de sécurité généralement de 100 permet de fixer une dose journalière admissible (DJA) chez l'homme ; on tient compte ensuite des niveaux prévisionnels de consommation des aliments visés, pour proposer des teneurs autorisées.

3. TRAITEMENTS TECHNOLOGIQUES

3.1. Objet et nature des traitements (figure 3)

Les traitements, qu'ils soient domestiques, artisanaux ou industriels, applicables à l'élaboration d'aliments de compléments pour l'enfant, ont des buts divers :

- séparer et purifier les parties comestibles des matières premières ;
- améliorer les conditions de conservation (pasteurisation, stérilisation) ;
- modifier ou améliorer les propriétés fonctionnelles (solubilité, viscosité, fluidité, aptitude à la formation de gels...) ou nutritionnelles (digestibilité) ;
- améliorer les qualités organoleptiques (saveurs, arômes...).

Ces traitements sont de différentes natures :

- traitements de nature physique :
 - . thermiques : chaleur, froid ;
 - . mécaniques : hautes pressions ;
 - . de fractionnement : centrifugation, filtration ;
 - . d'irradiation : micro ondes, U.V., rayons gamma ;
 - . de réduction de l'activité de l'eau : déshydratation, ajouts de solutés.

Innocuité et disponibilité des nutriments dans les aliments de complément

- traitements de nature chimique :

- . alcalins ;
- . oxydants ou réducteurs ;
- . acides ;

- traitements enzymatiques :

- . hydrolyse de protéines, de polysaccharides, de glycosides ;
- . inactivation de composés toxiques ;
- . synthèses.

Traitements de
séparation et

Traitements de
conservation

Modifications de
propriétés fonctionnelles

L'ALIMENTATION DE COMPLEMENT DU JEUNE ENFANT

- effets plutôt favorables si les conditions de traitement sont douces et bien maîtrisées ;
- perte légère de valeur nutritionnelle pour des traitements modérés ;
- pertes sévères et apparition de dérivés toxiques dans les conditions les plus sévères.

3.2.1. Effets favorables

Les traitements ont souvent pour objet d'améliorer la qualité nutritionnelle de produits peu comestibles à l'état naturel. Ainsi lors du traitement (par exemple la cuisson), dans la mesure où seule la conformation générale des macromolécules (structure secondaire, tertiaire et/ou quaternaire des protéines) est modifiée, sans altération des molécules constitutives (structure primaire), on observe plutôt une amélioration de la digestibilité du fait de la dénaturation thermique des protéines, de la gélatinisation de l'amidon, de l'inactivation d'enzymes indésirables (lipoxygénases), de la destruction de facteurs antinutritionnels thermolabiles. Ce sera donc le cas pour les graines de légumineuses utilisées dans de nombreuses formulations.

3.2.2. Effets défavorables

De nombreuses causes de pertes de nutriments ou de réduction de la biodisponibilité

3.2.2.2. Modifications de molécules

De nombreux acides gras et acides aminés sont fragiles et peuvent être altérés. Les acides gras polyinsaturés à longue chaîne, classe à laquelle appartiennent les acides gras essentiels, sont très facilement oxydables. En présence d'agents oxydants (oxygène, métaux, radicaux libres), se forment des peroxydes lipidiques, eux-mêmes considérés comme toxiques ou prooxydants par exemple vis-à-vis des protéines. Les conséquences se situent à deux niveaux : organoleptique (rancissement) et nutritionnel (perte d'acides gras essentiels, risques toxiques).

Certains acides aminés (tableau 1) sont également très sensibles à certaines conditions de pH, de température, d'oxydation, à la présence de glucides réducteurs (glucose, fructose, lactose), de polyphénols...

Tableau 1

Sensibilité de quelques acides aminés à différents agents physiques ou chimiques.

	Chaleur	pH	Glucides	Polyphénols	Oxydation
Lysine	++	+++	+++++	+++	
Cystéine	++++	++++		++	+++
Méthionine				+	++++
Tryptophane	++++	++			++
Asparagine + Glutamine	++++	++++			

3.2.2.3. Formation de liaisons covalentes

Des liaisons fortes inter- ou intra-moléculaires peuvent se produire entre protéines, à l'intérieur d'une même protéine ou entre protéines et glucides. La réaction de Maillard débute par la réaction entre une fonction aminée libre (lysine) et la fonction réductrice d'un glucide pour continuer par toute une série de modifications et de réarrangements moléculaires. C'est le cas aussi de la liaison du type aspartyl-lysine, glutamyl-lysine ou bien lysinoalanine. Dans chacun de ces cas des résidus lysyls sont impliqués : cela conduit à une réduction de la digestibilité, à une perte de biodisponibilité de la lysine, plus difficilement libérable ou moins accessible nutritionnellement.

3.2.2.4. Néoformation de composés toxiques

Dans les cas les plus extrêmes de nombreux dérivés peuvent apparaître à partir d'acides aminés ou d'acides gras. Il peut s'agir de dérivés oxydés : aldéhyde malonique à partir d'acides gras insaturés ; acides aminés soufrés oxydés, tels que le sulfoxyde de méthionine, la méthionine-sulfone. Il s'agit aussi de dérivés cyclisés ou polymérisés à

partir d'acides gras, ou de tryptophane, d'acide glutamique, de créatinine. Certains de ces composés (carbolines, imidazoquinoline, imidazoquinoxaline) sont doués de propriétés mutagènes : ils apparaissent lors de traitements thermiques sévères. Les acides gras polyinsaturés peuvent également sous l'effet de la chaleur subir des cyclisations et des polymérisations conduisant à des composés peu digestibles et potentiellement toxiques.

3.3. Les traitements thermiques

Ce sont probablement les traitements les plus utilisés aussi bien au niveau domestique qu'artisanal et industriel. L'action de la chaleur intervient à plusieurs niveaux :

- traitements de cuisson :
 - . four, sous-vide, micro-ondes ;
 - . cuisson-extrusion ;
 - . friture plate ou profonde .
- blanchiment ;
- pasteurisation (autoclavage), stérilisation (U.H.T) ;
- séchage :
 - . évaporation ;
 - . séchage sous vide ou par évaporation ;
 - . lyophilisation.
- grillage et torréfaction.

Le couple temps-température est déterminant pour l'évaluation de l'efficacité et/ou des effets. On pourrait néanmoins en première approximation considérer trois gammes de températures comme le montre le tableau 2.

Tableau 2
Traitements thermiques et effets nutritionnels.

Température	Traitements	Effets nutritionnels
jusqu'à 100°C	blanchiment, pasteurisation, cuisson à l'eau, sous-vide, micro-ondes, atomisation	dénaturation des protéines, amélioration de la digestibilité, inactivation de facteurs antinutritionnels
de 100 à 140°C	stérilisation	réaction de Maillard, perte de lysine disponible, ponts covalents
au delà de 140°C	friture, grillage, torréfaction	réaction de Maillard, destruction d'acides aminés isomérisations, ponts covalents dérivés toxiques

La réaction de Maillard elle-même, à partir d'une protéine (principalement les résidus lysyls) et d'un glucide réducteur (glucose, lactose...) peut être globalement décomposée en trois étapes :

- la première, dont certaines des réactions sont au début réversibles, conduisant aux composés d'Amadori, n'a qu'assez peu de conséquences au plan nutritionnel ;
- la seconde conduit à la formation de composés intermédiaires, des prémélanoïdes, non colorés. On assiste à une réduction très significative de la valeur nutritionnelle et à l'apparition de composés mutagènes et tératogènes.
- la troisième aboutit à la formation de composés volatils et odorants et de pigments colorés, de haut poids moléculaire et insolubles, les mélanoidines qui ne sont pas absorbables.

Un exemple connu grâce aux travaux des laboratoires NESTLE en Suisse montre la perte de lysine nutritionnellement disponible dans des laits en poudre (tableau 3).

Tableau 3
Pertes de lysine dans des laits en poudre (lysine exprimée en g/16 gN).

	Lysine totale	Lysine disponible	Lysine disp/totale %
Lait lyophilisé	8	8	100
Lait séché par atomisation	8	8	100
Lait séché sur cylindre			
- conditions modérées	7	5	70
- conditions sévères	6	2	30

Ces résultats sont significatifs. Dans le cas de la poudre de lait obtenue dans des conditions sévères, la valeur de la lysine totale est diminuée de 25 % par rapport à la valeur de la lysine totale dans le lait.

4. FACTEURS ANTINUTRITIONNELS

4.1. Données générales

Les matières premières, notamment d'origine végétale et surtout les graines de légumineuses, entrent dans la composition d'aliments de complément.

Tableau 4
Facteurs antinutritionnels.

COMPOSES DE NATURE AZOTEE OU PROTEIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Lectines, hemagglutinines - Inhibiteurs d'enzymes : amylases, protéases, lipases - Peptides à activité biologique - Acides aminés ou dérivés : mimosine, L-DOPA, selenoaminoacides, lysinoalanine - Acides aminés lathyrogènes - Produits de la réaction de Maillard
GLUCIDES	<ul style="list-style-type: none"> - Xylose - alpha-galactosides - Béta-glucanes
GLYCOSIDES, HETEROSIDES	<ul style="list-style-type: none"> - Facteurs cyanogènes - Facteurs favogènes : vicine - Facteurs goitrigènes : glucosinolates - Glycosides stéroïdiques et triterpenoïdiques : saponines - Phytoestrogènes
COMPOSES DE NATURE PHENOLIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Acide chlorogénique - Flavonoïdes - Gossypol - Polyphénols, tanins
LIPIDES	<ul style="list-style-type: none"> - Acides gras cycliques, oxydés - Acide érucique
PHYTATE	- Acide phytique et sels d'acide phytique
ALCALOIDES	
MYCOTOXINES	

Tableau 5
Effets des inhibiteurs de protéases.

- interaction et formation de complexes avec les protéases à sérine	affinité variable selon les espèces
- hypersécrétion pancréatique	rat, poulet, cobaye
- hyperplasie pancréatique	
- réduction de croissance	
- potentialités carcinogènes	rat (pancréas)
- effets protecteurs, anticarcinogène	souris, hamster

4.3. Lectines

Les lectines ou agglutinines sont présentes dans tout le règne végétal et dans toutes les parties de la plante ; elles sont en particulier très abondantes (1 à 3 % du poids sec) dans les graines de légumineuses. Il s'agit de protéines, de poids moléculaire élevé, éventuellement glycosylées, qui présentent la particularité d'avoir une affinité pour des motifs glycaniques de molécules glycoconjuguées (glycoprotéines). Les différentes lectines reconnaissent de façon spécifique les motifs glycaniques qui leur correspondent.

Les effets antinutritionnels ou éventuellement toxiques sont essentiellement dus à leur capacité de fixation sur les glycoprotéines membranaires au niveau de la muqueuse intestinale, entraînant une réduction des capacités digestives et d'absorption et des troubles gastro-intestinaux (diarrhées, nausées). Certaines lectines manifestent également des effets cytotoxiques : c'est le cas des lectines du haricot (phytohémagglutinine) ou des graines de ricin (ricine). Les lectines de pois, de lentilles, de fève sont considérées comme non toxiques et sans effet antinutritionnel sur la croissance.

L'élimination des effets délétères des lectines passe par une dénaturation thermique ; généralement il faut des conditions de traitement thermique au moins aussi sévères que pour inactiver les inhibiteurs de protéases.

4.4. Polyphénols

Il s'agit d'un groupe très diversifié de composés phénoliques plus ou moins polymérisés ou condensés (tanins). Les polyphénols condensés sont constitués de proanthocyanidines polymériques, difficilement hydrolysables et non absorbables. Ils sont abondants dans certaines céréales (sorgho) et les graines de légumineuses.

Les interactions des tanins avec les protéines, d'une part, dans l'aliment et, d'autre part, dans le tractus digestif au niveau de la muqueuse intestinale expliquent leurs effets antinutritionnels : baisse de digestibilité des protéines, blocage de la lysine. Mais par ailleurs on leur attribue aussi des effets antioxydants favorables.

L'élimination des tanins n'est pas une opération facile. Les traitements thermiques sont inefficaces sur les tanins condensés. Mieux vaut écarter les parties de la plante qui en contiennent le plus.

4.5. Alpha-galactosides

Il s'agit d'oligosides présents dans les graines de légumineuses, contenant du galactose dont les liaisons osidiques ne sont pas hydrolysables par les enzymes digestives de l'espèce humaine. Leur transit dans le tractus digestif les conduit dans le colon ou gros

intestin où ils sont fermentés par la microflore digestive, produisant des phénomènes de flatulence et de diarrhée. L'élimination des alpha-galactosides peut se faire partiellement par solubilisation ou, éventuellement, par voie enzymatique au cours de la germination ou d'une fermentation des graines.

4.6. Phytates

Il s'agit de sels d'acide phytique ou acide myoinositolhexaphosphorique. Très ubiquitaire dans les grains et graines, les phytates représentent jusqu'à 1 à 5 % du poids sec de certaines graines et constituent une forme très peu disponible de phosphore par

s'agit de faire agir l'activité phytasique de la graine elle-même soit par trempage soit par un début de germination. La deuxième voie a recours à des phytases exogènes ajoutées dans le milieu : il peut alors s'agir d'un procédé fermentaire au cours duquel se développent des micro-organismes producteurs de phytases. C'est ce que l'on peut observer au cours de fermentations lactiques. Une dernière solution consisterait à apporter dans le milieu au cours d'un trempage par exemple, non un micro-organisme mais une préparation enzymatique qui contiendrait une activité phytasique. On connaît en effet des champignons (*Aspergillus niger*, *A. ficuum*), des levures (*Saccharomyces cerevisiae*), des bactéries (*Bacillus subtilis*) qui produisent des phytases.

Certaines de ces souches microbiennes sont déjà utilisées dans l'industrie pour produire d'autres activités enzymatiques.

Enfin, l'élimination des alpha-galactosides de graines de légumineuses pourrait également passer par une solution enzymatique de cette nature (alpha-galactosidases microbiennes).

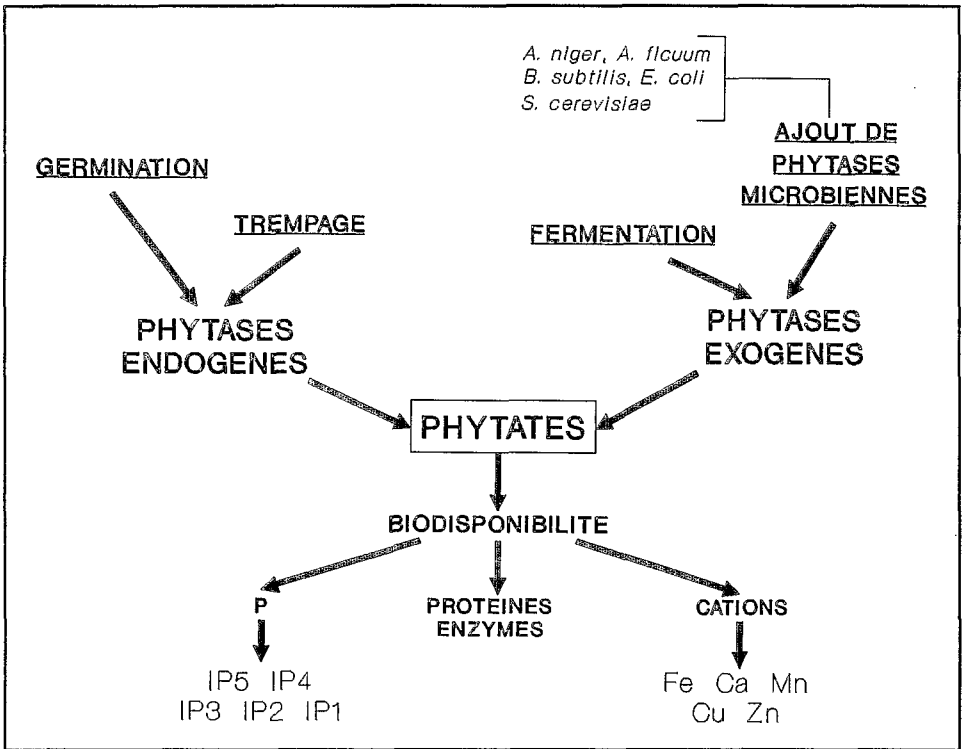


Figure 4
Stratégies possibles pour l'élimination des phytates.

5. CONCEPTION D'ALIMENTS ET MAITRISE DE LA QUALITE

La conception d'aliments de complément pourrait passer par trois étapes principales (figure 5) :

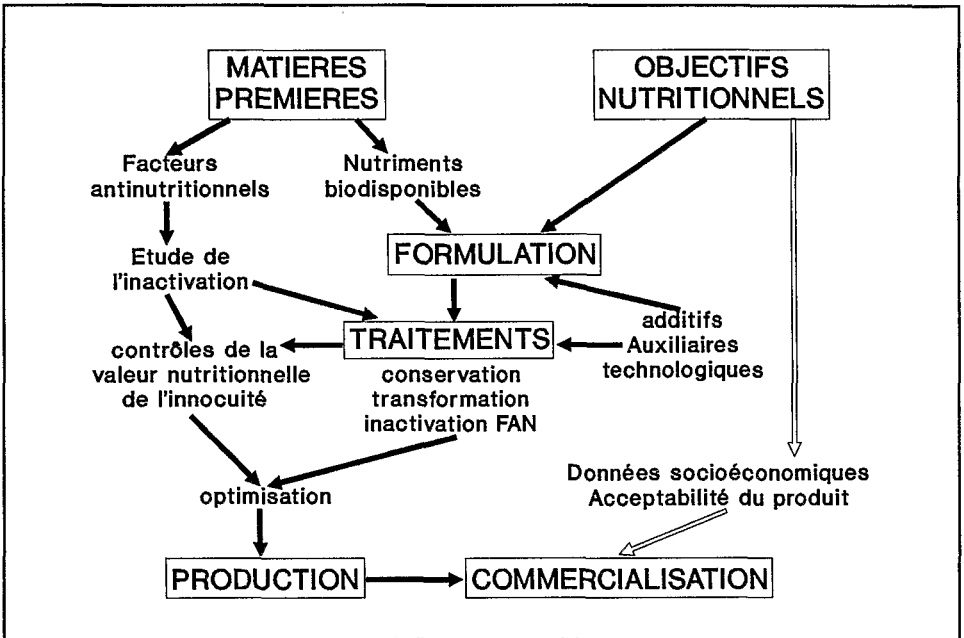


Figure 5

Stratégie de conception d'un aliment de sevrage.

- la formulation du produit qui dépend :

- . des objectifs nutritionnels, qui sont de couvrir tout ou partie des besoins du jeune enfant ;
- . du choix des matières premières, conditionné par la connaissance des teneurs en nutriments disponibles et des facteurs antinutritionnels.

- Une étape de mise au point des traitements avec pour objectifs :

- . d'améliorer les conditions de conservation (qualité microbiologique) ;
- . de conférer des qualités organoleptiques acceptables ;
- . d'inactiver les facteurs antinutritionnels et réduire les teneurs en composés indésirables ;
- . éventuellement améliorer les qualités nutritionnelles par des opérations d'enrichissement (minéraux, vitamines) ou hydrolytiques (amylase...).

Cette étape peut se terminer par un essai sur l'animal de laboratoire, destiné à valider *in vivo* les opérations technologiques retenues.

- Une phase de production (et de commercialisation) qui après optimisation de la formule et des traitements devra intégrer les possibilités de contrôle et le suivi de la qualité sur différents paramètres définis durant la phase de mise au point. Ceci justifie de mettre en place dès le départ un système de contrôle de la qualité et des risques (système HACCP).

Le système de contrôle est à envisager à plusieurs niveaux (figure 6) :

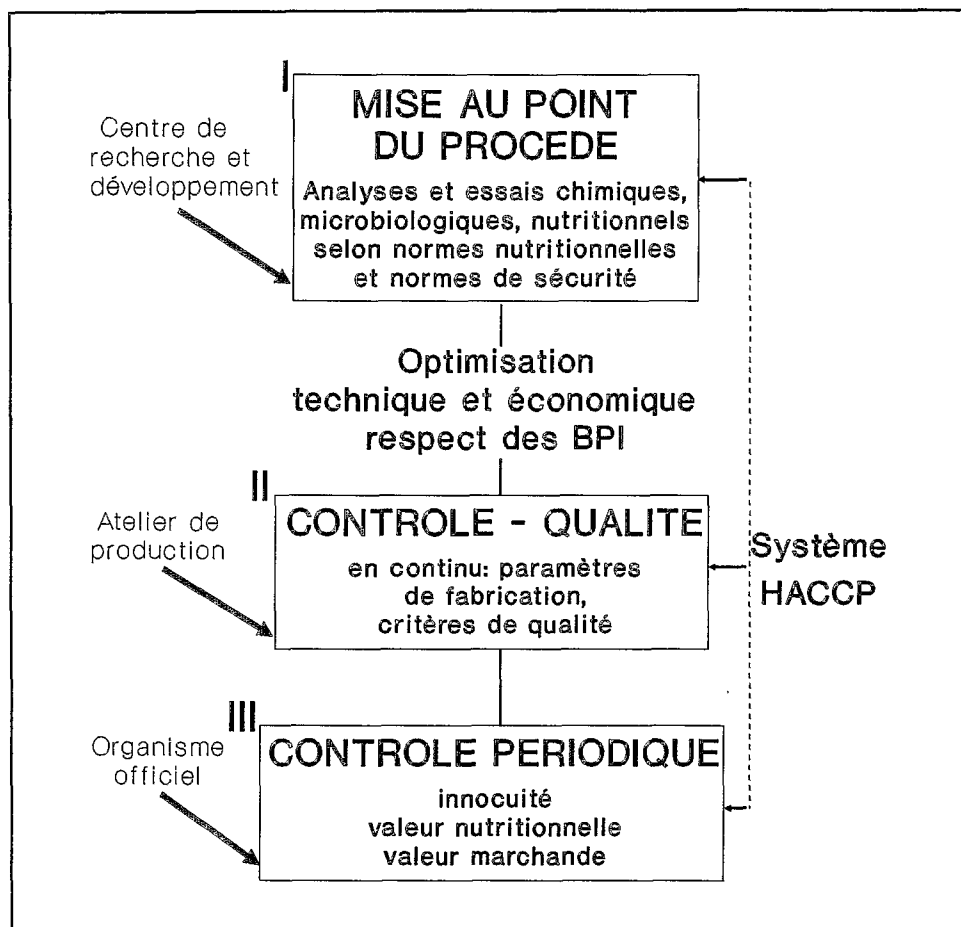


Figure 6
Système de contrôle qualité.

Innocuité et disponibilité des nutriments dans les aliments de complément

- mise au point du procédé : cette étape met en oeuvre des analyses chimiques et microbiologique destinées à démontrer l'innocuité du produit et sa conformité par rapport à des normes nationales ou internationales, ainsi que des analyses nutritionnelles destinées à garantir la qualité requise par rapport à des apports