

Le figuier de Barbarie : une source industrielle de bétalaïnes ?

E ODOUX
Cirad-Filhor
Station de la Bretagne
97487 Saint-Denis cedex
La Réunion

A DOMINGUEZ-LOPEZ
Universidad Autónoma
del Estado de México
Facultad de Ciencias Agrícolas
AP 435
Toluca 50 000
Estado de México
Méjico

Reçu le 6 novembre 1995
Accepté le 15 mars 1996

Le figuier de Barbarie : une source industrielle de bétalaïnes ?

RÉSUMÉ

La coloration des figues de Barbarie (genre *Opuntia* et famille des cactacées) est due à des bétalaïnes, pigments azotés de couleur rouge ou jaune. Dans l'industrie agroalimentaire, ce sont essentiellement les pigments rouges de ces mêmes bétalaïnes, alors extraites de la betterave, qui sont utilisés sous forme de jus concentrés sucrés et de poudres. L'extraction des bétalaïnes de la figue de Barbarie pourrait dès lors être intéressante à condition d'obtenir des produits plus stables et/ou moins chers que ceux qui proviennent de la betterave, ou de proposer de nouvelles teintes hydrosolubles jaunes. Après une présentation générale du figuier de Barbarie et une synthèse des connaissances acquises sur la structure, la stabilité et l'utilisation des bétalaïnes, le document analyse les possibilités de valorisation de cette plante à partir de données récoltées dans les conditions d'exploitation spécifiques du Mexique.

MOTS CLÉS

Mexique, *Opuntia*, bétalaïne, pigment, colorant alimentaire, utilisation, analyse des coûts.

Prickly pear: an industrial source of betalains?

ABSTRACT

The colour of prickly pears (genus *Opuntia*, cactus family) is due to the presence of betalains, nitrogenized red or yellow pigments. In the food industry, red betalain pigments, extracted from beets, are used in the form of sweetened juice concentrates and powders. It would thus be interesting to extract betalains from prickly pears on the grounds that the resulting products could be more stable and/or cheaper than those derived from beets, and also to introduce new watersoluble yellow pigments. The present paper provides a general overview of prickly pear and a summary of results on betalain structure, stability and uses. Then, possibilities for the development of this plant, based on data collected under Mexican cultivation conditions, are discussed.

KEYWORDS

Mexico, *Opuntia*, betalaine, pigments, food colourants, uses, cost analysis.

La chumbera : una fuente industrial de bétalaïnes ?

RESUMEN

La coloración de los chumbos (género *Opuntia* y familia de las cactáceas) es debida a las bétalaïnes, pigmentos nitrogenados de color rojo o amarillo. En la industria agro-alimentaria, son esencialmente los pigmentos rojos de estas mismas bétalaïnes, entonces extraídas de la remolacha, los que son utilizados en jugos concentrados azucarados y en pudras. La extracción de las bétalaïnes del chumbo podría entonces ser más interesante a condición de obtener productos más estables y/o más baratos que los que provienen de la remolacha, o de proponer nuevos colores hydrosolubles amarillos. Después de una presentación general del chumbero y una síntesis de los conocimientos adquiridos sobre la estructura, la estabilidad y la utilización de las bétalaïnes, el documento analiza las posibilidades de valorización de esta planta a partir de datos cosechados en las condiciones de explotación específicas de Méjico.

PALABRAS CLAVES

Méjico, *Opuntia*, bétalaïna, pigmentos, colorantes alimentarios, usos, análisis de costos.

● introduction

Le figuier de Barbarie (genre *Opuntia*, famille des cactacées, ordre des caryophyllales, et sous-classe des *Caryophyllidae*) est une plante originaire du continent américain. Cultivé dans cette zone, il est aussi présent dans de nombreux pays possédant des zones semi-arides, comme l'Afrique du Sud, l'Australie, la Tunisie, l'Italie, etc, où il est exploité pour ses fruits, et aussi ses jeunes tiges appelées cladodes ou « raquettes » (GARCIA de CORTÁZAR et NOBEL, 1992).

Le Mexique est probablement le pays où le figuier de Barbarie présente sa diversité génétique la plus importante (DOMINGUEZ-LOPEZ, 1994). Le genre *Opuntia* compte en effet près de 400 espèces et un grand nombre de variétés qui offrent une multitude de formes et de tailles (LAMB, 1993).

Si la sous-classe des *Caryophyllidae* (fig 1) est relativement modeste par le nombre d'espèces qui la composent, lorsqu'on la compare à la composition d'autres sous-classes des Dicotylédones comme les *Dilleniidae*, les *Rosidae* ou les *Asteridae*, elle forme, en revanche, un ensemble très homogène, car ses différentes espèces, réparties dans une douzaine de familles, sont pratiquement toutes réunies dans un seul ordre, les caryophyllales (fig 2) ; les plombagi-

nales et les polygonales, autres ordres des *Caryophyllidae*, ne comportent qu'une famille chacun et un nombre très limité d'espèces. Deux marqueurs – ce qui est exceptionnel – permettent, en outre, de caractériser les caryophyllales ; une forte courbure de l'ovule, et la présence de bétalaïnes (GUIGNARD, 1993).

Les fleurs et les fruits des différentes espèces qui composent les caryophyllales – à l'exception de celles réunies dans la famille des caryophyllacées – doivent en effet leur coloration à ces bétalaïnes, pigments azotés de couleur rouge ou jaune, alors que, chez les autres espèces des angiospermes, cette fonction est assurée par des composés non azotés, les anthocyanes (et les caroténoïdes) (GUIGNARD et al, 1985). Les bétalaïnes et les anthocyanes semblent s'exclure mutuellement dans le règne végétal ; il n'existe pas d'exemple de plante possédant simultanément ces deux types de molécules (BERSET, 1994b). Les botanistes estiment généralement que les anthocyanes auraient supplanté les bétalaïnes au cours de l'évolution, car la présence d'azote dans des molécules qui ne sont pas directement impliquées dans la survie de la plante est un handicap, puisque cet élément est généralement un facteur limitant dans la croissance des végétaux (GUIGNARD, 1993). Cela expliquerait le nombre très restreint de familles botaniques dans lesquelles les bétalaïnes sont présentes, même si certaines des espèces qui en sont pourvues sont d'une importance économique

Figure 1
Classification botanique des caryophyllales (GUIGNARD, 1993).

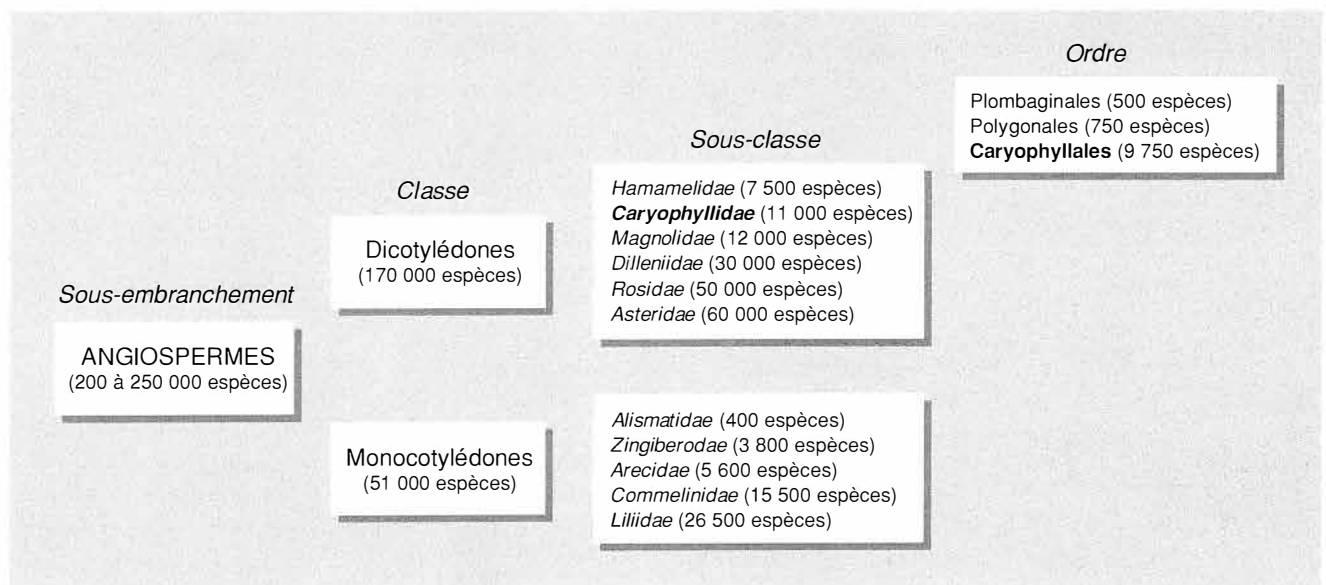




Figure 2
Familles et espèces
de l'ordre des
caryophyllales
(GUIGNARD, 1993).

considérable (betterave), ou possèdent un fort potentiel de valorisation (figuier de Barbarie et amarantes).

Les bétalaïnes provenant de la betterave sont des pigments essentiellement rouges, classiquement utilisés dans l'industrie agroalimentaire sous forme de jus concentrés sucrés et de poudres. Ils font logiquement partie de la liste des colorants naturels, et sont répertoriés sous le code E 162. Leur faible coût et leur relative stabilité vis-à-vis du pH (notamment par rapport aux anthocyanes) en font un colorant rouge apprécié des industriels, même si leur instabilité thermique limite leur domaine d'application, en particulier aux produits lactés (yaourts, glaces, etc) et à la charcuterie. D'un point de vue industriel, l'utilisation d'extraits colorants à base de figues de Barbarie pourrait être intéressante à condition d'obtenir des produits plus stables et/ou moins chers que ceux qui proviennent de la betterave, ou de proposer de nouvelles teintes hydrosolubles jaunes. le figuier de Barbarie

généralités

Le genre *Opuntia*, le plus important et le plus répandu de la famille des cactacées, est divisé en deux sous-genres, *Cyclopuntia* et *Platopuntia*, et compte de nombreuses espèces, variétés et hybrides différents, parmi lesquelles on peut citer : *O ficus-indica*, *O robusta*, *O leptacantha*, *O megacantha*, *O anyclaea*, *O stricta*, etc. Ces différentes espèces sont communément appelées figuier de Barbarie en français, *no pal* ou *tuna* en espagnol et *prickly pear cactus* en anglais.

Les figuiers de Barbarie (photo 1) sont des plantes grasses épineuses, arborescentes et xérophi-les, pou-

vant atteindre 4 à 5 m de hauteur. Leurs tiges, appelées cladodes, ou plus simplement raquettes, ont été modifiées au cours de l'évolution, pour assurer les fonctions d'une feuille, et notamment devenir le siège de la photosynthèse. La plupart des espèces du genre *Opuntia* possèdent des raquettes ovales et aplaties, munies de nombreuses épines ou glochides. Les fleurs (photo 2) sont hermaphrodites, et leur couleur peut varier du jaune au rouge. Les fruits (photo 3) sont des baies charnues ovoïdes ou piriformes, de dimension comprise entre 5 et 10 cm, et généralement pourvus d'épines. La pulpe est toujours juteuse, de couleur verte, jaune-orangé, rouge ou pourpre et contient de nombreuses graines.

Le figuier se multiplie facilement par bouturage ; ce mode de reproduction a conduit certains pays envahis de figuiers, comme l'Afrique du Sud, à prendre des mesures pour éviter la prolifération de cette plante, et à la déclarer nuisible (JOUBERT, 1993 ; BRUTSCH et ZIMMERMANN, 1993).

Son adaptation aux climats désertiques ou semi-désertiques lui permet, cependant, de constituer, pour certains pays de ce type, une production agricole intéressante. En effet, le métabolisme de type crassulacéen du figuier de Barbarie autorise son développement dans des zones où les précipitations ne dépassent pas 200 à 300 mm/an (ACEVEDO et al, 1983). En condition d'irrigation, la production de matière sèche annuelle de ces plantes (partie aérienne) peut atteindre 50 t/ha (GARCIA de CORTÁZAR et NOBEL, 1991 ; NOBEL et al, 1992b), ce qui est tout à fait exceptionnel. La production de fruits représente alors 6 t de matière sèche, soit environ 40 t/ha/an de fruits frais (GARCIA de CORTÁZAR et NOBEL,

Photo 1
Plants de figuier de Barbarie
(genre Opuntia).



Photo 2
Figuiers de Barbarie en
production : la coloration des
fruits est due à des bétalaines
dont la structure est proche de
celles extraites de la betterave.



1992). Ces chiffres, obtenus dans des conditions optimales, doivent cependant être relativisés ; des rendements en fruits frais de l'ordre de 20 t/ha refléteraient davantage les conditions moyennes de production. À titre de comparaison, des rendements de 70 t/ha de matière fraîche sont courants chez la betterave.

valorisation du figuier de Barbarie

Dans de nombreux pays, le figuier de Barbarie pousse de façon spontanée et ne fait pas l'objet d'une exploitation industrielle ; il s'agit néanmoins d'une plante dont on tire des ressources considérables et qui a une grande importance

économique, même si la transformation ne dépasse généralement pas le stade artisanal.

Au Mexique, les jeunes raquettes tendres, appelées *nopalitos*, sont utilisées quotidiennement dans l'alimentation humaine comme légume, avec des modes de préparation très variés : elles peuvent être cuites, grillées, utilisées en marinade ou en saumure, voire consommées crues.

Ces raquettes sont caractérisées par la présence d'un « mucilage » (TRACHTENBERG et MAYER, 1981 ; RETAMAL et al, 1987) pouvant représenter jusqu'à 35 % de la matière sèche (NOBEL et al, 1992a) ; il s'agit de polyosides dont les structures sont très variables selon les espèces (PAULSEN et LUND, 1979 ; TRACHTENBERG et MAYER, 1981 ; NOBEL et al, 1992a) et auxquels on attribue différentes propriétés. Ainsi, ils posséderaient des vertus hypoglycémiantes (PERIAGO et al, 1993) et favoriseraient l'élimination du cholestérol et des triglycérides dans le sang (IBAÑES-CAMACHO et MECKES-LOZOYA, 1983).

Le fruit est principalement consommé à l'état frais. Après récolte, les figues de Barbarie doivent être débarrassées de leurs épines ; cette opération est souvent réalisée manuellement par brossage, bien que des machines existent à cet effet. Au cours de ce brossage, il faut éviter de provoquer des microlésions sur le péricarpe du fruit, qui affecteraient leur conservation. Des traitements chimiques, voire enzymatiques, peuvent également être envisagés pour améliorer l'efficacité de cette opération.

D'un point de vue technologique, le principal handicap à la transformation de ces fruits est la faible acidité de leur pulpe, qui se traduit par un pH relativement élevé (de 5 à 6). Par conséquent, il est nécessaire d'acidifier la pulpe avant pasteurisation, ou d'avoir recours à une stérilisation pour éviter tout développement de micro-organismes (ESPINOSA et al, 1973 ; JOUBERT, 1993) ; dans les deux cas, cela conduit inévitablement à une dégradation des qualités organoleptiques du fruit, et de sa coloration.

D'autres modes de transformation, tels que la fabrication de confitures, de pâtes de fruit, de boissons alcoolisées, etc, ont été étudiés, et ont donné des résultats plus ou moins intéressants (SAWAYA et al, 1983 ; EWAIDAH et HASSAN, 1992).

Enfin, une voie de valorisation du figuier de Barbarie, originale, consiste à utiliser les raquettes comme substrat pour l'élevage d'un insecte, *Dactylopius coccus* Costa, à partir duquel un colorant naturel, l'acide carminique (E 120), est produit. Cette activité se pratique directement en plantation (Pérou, îles Canaries), ou dans des hangars, sur des raquettes préalablement récoltées (Afrique du Sud), quand les conditions climatiques (fortes pluies) sont défavorables à l'élevage en plein air (BRUTSCH et ZIMMERMANN, 1993).

Photo 3
Fleur du figuier de Barbarie.



importance économique

Le développement du figuier de Barbarie étant essentiellement de type sauvage, il est difficile de mesurer précisément la contribution de cette plante à l'économie des pays producteurs. Dans de nombreux pays, tels que l'Afrique du Sud, les fruits sauvages font l'objet d'un commerce assez actif de la part de cueilleurs qui vendent leur récolte sur le bord des routes (BRUTSCH et ZIMMERMANN, 1993). De faibles volumes sont également exportés vers les pays européens.

Au Mexique, en 1993, la production de figues de Barbarie représentait environ 300 000 t de fruits, pour une superficie de l'ordre de 40 000 ha ; une dizaine d'états sont producteurs, mais les trois quarts de la production nationale proviennent des états de Zacatecas, Mexico et Guanajuato (tableau I). Ces quantités représentent environ 12 % de la production d'oranges, 14 % de celle de bananes, 50 % de celle de pommes et 30 % de celle de mangues. Cette situation n'est pas le reflet d'une production médiocre, mais provient du fait que la culture du figuier est restée très traditionnelle, alors que les autres cultures citées sont, au contraire, très industrialisées. D'autre part, ces chiffres ne tiennent pas compte de la production sauvage, estimée entre 1 et 1,2 Mt (DOMINGUEZ-LOPEZ, 1994). Ces quelques chiffres illustrent l'importance que peut avoir cette plante dans un pays comme le Mexique.

les bétalaïnes

biosynthèse et structures

La famille des bétalaïnes est constituée de deux classes de molécules, les bétacyanines rouges et les bétaxanthines jaunes, qui sont des composés hydrosolubles.

Ces pigments ont en commun (fig 3) une structure probablement élaborée à partir du même intermédiaire, l'acide bétalamique ; ce dernier serait biosynthétisé à partir de la 3,4-dihydroxyphénylalanine ou dopa (IMPELLIZZERI et PIATTELLI, 1972 ; WYLER et MEUER, 1979), dont le précurseur est la tyrosine.

Les pigments diffèrent, en revanche, par la nature du substituant lié à cet acide bétalamique (fig 3). Dans le cas des bétacyanines, ce substituant est un dérivé, glycosilé ou non, de la cyclodopa, dont le précurseur pourrait aussi être la dopa (WYLER et al, 1984), alors que, dans le cas des bétaxanthines, différents substituants peuvent être trouvés, dont la dopa elle-même, la dopamine et différents acides aminés (PIATTELLI et al, 1965 ; STRACK et al, 1981). Les différentes étapes de la biosynthèse des bétalaïnes n'ont pas toutes été clairement élucidées et il demeure de nombreuses incertitudes, en ce qui concerne les précurseurs de ces substituants notamment.

Tableau I
Distribution par état de la production de figue de Barbarie au Mexique.

<i>État producteur</i>	<i>Superficie cultivée (ha)</i>	<i>Production (t)</i>	<i>Rendement moyen (t/ha)</i>
Aguascalientes	1 477	3 085,5	2,1
Coahuila	67	1 340	2
Guanajuato	6 454	59 641,4	9,2
Hidalgo	3 000	15 000	5
Jalisco	2 720	22 688,5	8,3
Jalisco	8 622	75 339	8,7
Mexico	620	4 030	6,5
Oaxaca	1 908	23 850	12,5
Queretaro	3 585	10 862,6	3,1
San Luis Potosi	13 130	86 421,7	6,6
Zacatecas			
TOTAL	41 483	301 052,7	7,3

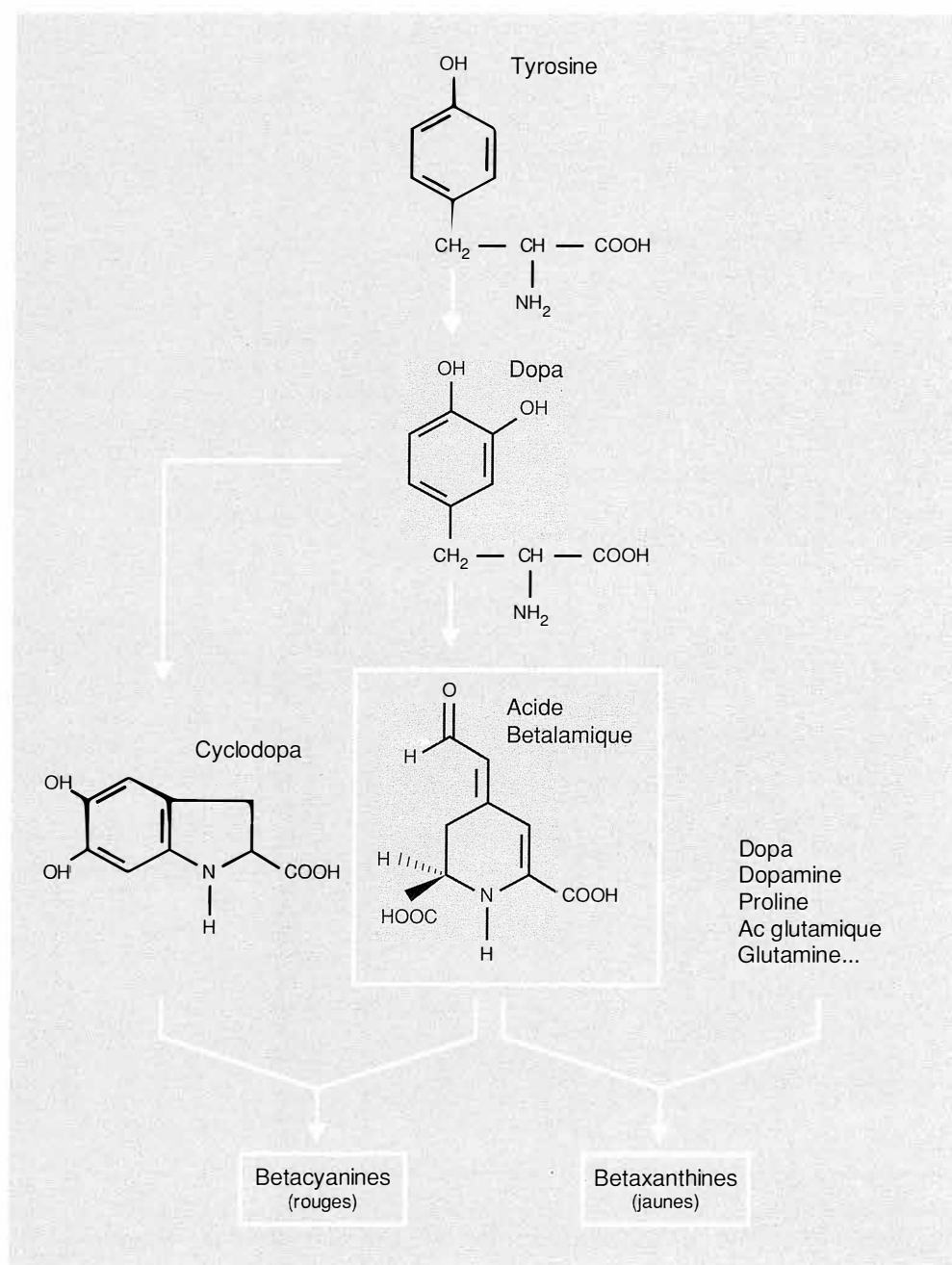


Figure 3
Précurseurs possibles de la biosynthèse des bétalaines.

Parmi les bétacyanines, la bétanidine et l'isobétanidine (fig 4) semblent être les seules formes aglycones existant naturellement, alors que les formes glycosilées sont, au contraire, très nombreuses. Plus de 40 composés différents provenant de nombreuses espèces de caryophyllales ont pu

être séparés (PIATTELLI et MINALE, 1964a ; PIATTELLI et MINALE, 1964b ; PIATTELLI et IMPERATO, 1969), mais les seuls ayant fait l'objet d'études approfondies sont la bétanine et l'isobétanidine (fig 4), constituants majeurs de la betterave (MÉGARD, 1993), et, dans une moindre mesure,

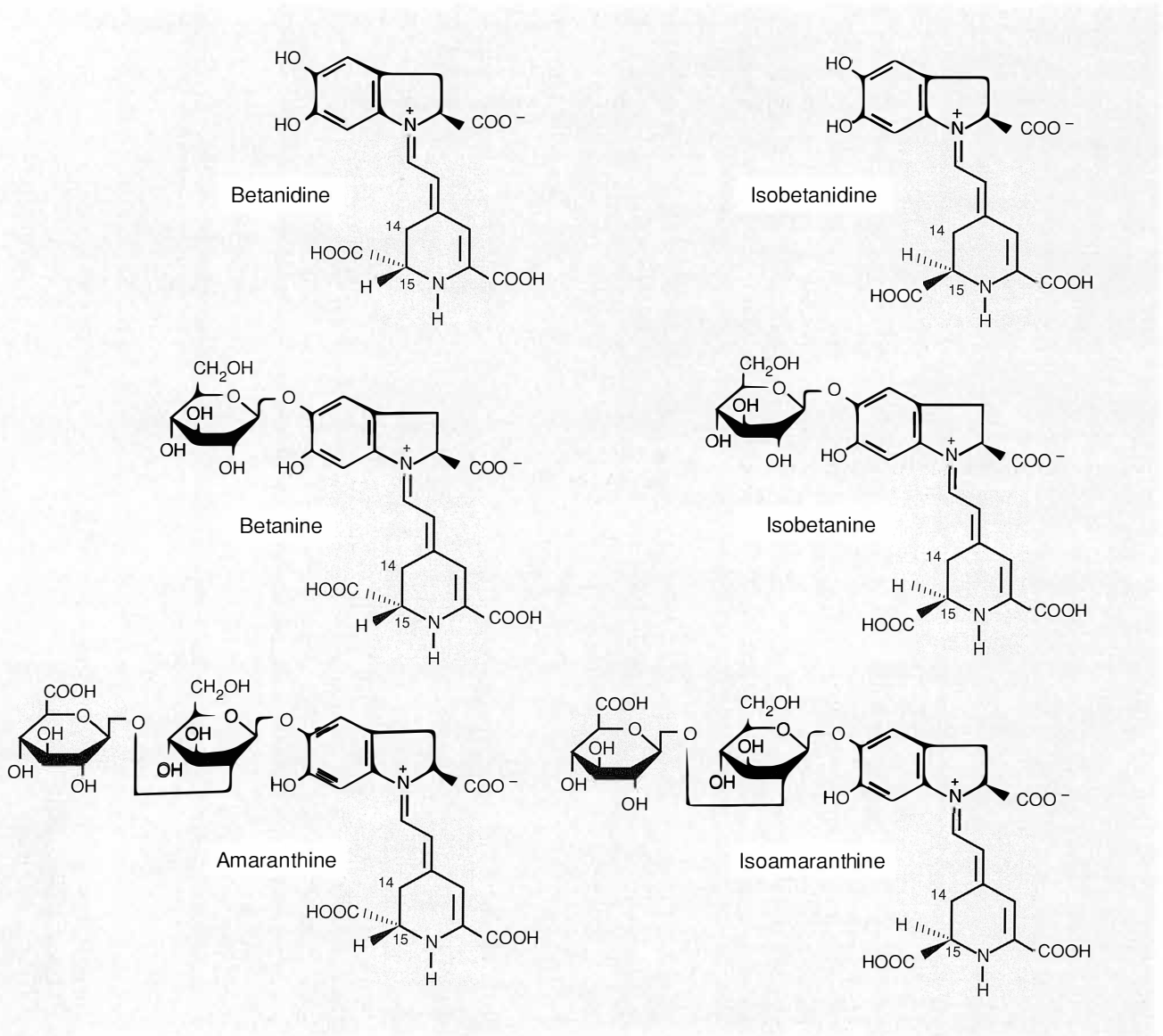


Figure 4
Structures des bétacyanines
les plus connues.

l'amaranthine et l'isoamaranthine extraite de l'amarante (PIATTELLI et al, 1969 ; HUANG et VON ELBE, 1986).

Comme le montre la figure 4, ces bétacyanines diffèrent entre elles par la nature du substituant glucidique entrant dans leur constitution. De plus, chaque composé bétacyanidique semble pouvoir exister sous deux formes isomères, grâce aux deux positions possibles du groupement carboxylique en C₁₅ par rapport au plan de la molécule (fig4).

On notera enfin l'existence possible d'une néobétanine (ALARD et al, 1985 ; STRACK et al, 1987),

composé orange qui se distingue de la bétanine par une double liaison supplémentaire en C₁₄-C₁₅, alors que certains auteurs la considèrent comme un artefact formé durant la préparation de l'échantillon (WYLER, 1986).

Les bétaxanthines les plus connues sont les vulgaxanthines I et II de la betterave (PIATTELLI et al, 1965 ; SAVOLAINEN et KUUSI, 1978) et l'indicaxanthine du figuier de Barbarie (PIATTELLI et al, 1964 ; IMPELLIZZER et PIATTELLI, 1972).

En règle générale, les vulgaxanthines sont présentes en faibles quantités, car les betteraves sont

typiquement rouges ; il existe, néanmoins, des variétés entièrement jaunes (« Golden Beet »). Chez le figuier de Barbarie, au contraire, les variétés jaunes sont beaucoup plus communes.

D'autres composés jaunes existent, dont certains (fig 5) ont été analysés dans différentes plantes (STRACK et al, 1981). La faible diversité de structures connues par rapport aux bétacyanines n'est sans doute que le reflet du faible intérêt porté jusqu'à maintenant aux bétaxanthines. Contrairement aux bétacyanines, la bibliographie ne rapporte pas la possibilité d'une isomérisation en C₁₅ pour les bétaxanthines.

stabilité des extraits

Différents facteurs tels que l'oxygène, la température, le pH, la lumière, etc, affectent la stabilité des extraits colorants naturels ; cette stabilité est le critère technologique principal qui conditionne leur utilisation, notamment dans l'industrie agroalimentaire (LABATUT et al, 1990 ; BERSET, 1990 ; BERSET, 1994a ; MILLET, 1994).

De très nombreuses études ont été consacrées à la stabilité des bétalaïnes, et principalement à celle de la bétanine de la betterave. Une synthèse bibliographique abondamment documentée a été récemment publiée sur ce sujet (MÉGARD, 1993).

Il ressort de ces études que l'instabilité thermique de ces molécules est le principal frein à leur utilisation. À titre indicatif, la cuisson des betteraves à 90 °C pendant 2 heures conduit à une perte en bétanine de l'ordre de 40 à 60 %. Parmi les autres bétacyanines, seul le comportement de l'amaranthine vis-à-vis de la température semble avoir été étudié (HUANG et VON ELBE, 1986) ; les résultats obtenus montrent une stabilité encore moindre que celle de la bétanine.

Les bétaxanthines (SAGUY, 1979 ; JOUBERT, 1993) sont moins stables que la bétanine dans les conditions habituelles d'utilisation ; d'un point de vue pratique, cela se traduit par un changement de teinte du produit, pendant le traitement thermique ou au cours du stockage, lorsque ces composés sont en mélange (ce qui est le cas d'un jus de betterave).

Il faut aussi noter que la stabilité dépend du pH du milieu ; ainsi, la vulgaxanthine devient plus stable que la bétanine à pH 7, alors qu'aux pH inférieurs, l'ordre de stabilité est inversé

(SAVOLAINEN et KUUSI, 1978). Pour les deux familles de composé, la stabilité est toutefois meilleure entre pH 5 et 6, et l'intensité d'absorbance maximale. Lorsque l'on s'éloigne de ces conditions, non seulement l'intensité d'absorbance diminue, mais on observe en outre (ce qui n'a été étudié que chez les bétacyanines) un déplacement du λ_{\max} reflétant des changements de teintes (VON ELBE et al, 1974 ; VON ELBE, 1975 ; HUANG et VON ELBE, 1986). Il convient cependant de relativiser ce phénomène, qui ne se produit qu'aux pH inférieurs à 3 et supérieurs à 7 ; il ne concerne donc pas la plupart des applications alimentaires.

Le rôle de l'oxygène dans la dégradation des bétalaïnes a été mis en évidence par différents auteurs (VON ELBE et al, 1974 ; VON ELBE, 1975 ; SINGER et VON ELBE, 1980 ; ATTOE et VON ELBE, 1982 ; MÉGARD, 1993) ; paradoxalement, la présence d'antioxydants ne semble pas améliorer la stabilité des pigments (PASCH et VON ELBE, 1979), bien que ce point soit très controversé. Enfin, une étude consacrée à la stabilité des jus de figues de Barbarie (MERIN et al, 1987) n'attribue à l'oxygène qu'un rôle mineur dans la dégradation des bétacyanines.

Les rayonnements UV de la lumière se comportent comme un catalyseur dans ce phénomène d'oxydation ; aucune dégradation ne semblant intervenir en l'absence d'oxygène (ATTOE et VON ELBE, 1981 ; HUANG et VON ELBE, 1986).

L'activité de l'eau est un facteur important de stabilité (COHEN et SAGUY, 1983 ; SAGUY et al, 1984) ; ainsi, une poudre de betterave peut être conservée plusieurs mois sans dégradation notable des pigments, ce qui n'est pas le cas en solution (COHEN et SAGUY, 1983 ; SAGUY et al, 1984). La concentration en pigment joue également un rôle, car les solutions concentrées sont plus stables que les solutions diluées ; cet effet de protection des molécules entre elles s'observe aussi chez les anthocyanes où le phénomène a été particulièrement bien étudié (MAZZA et BROUILLARD, 1987). Les cations métalliques, et principalement ceux du fer et du cuivre, peuvent avoir un effet extrêmement négatif sur la stabilité, même pour des teneurs de l'ordre de la centaine de ppm (PASCH et VON ELBE, 1979).

Enfin, différentes activités enzymatiques sont susceptibles de dégrader les bétalaïnes (LASHLEY

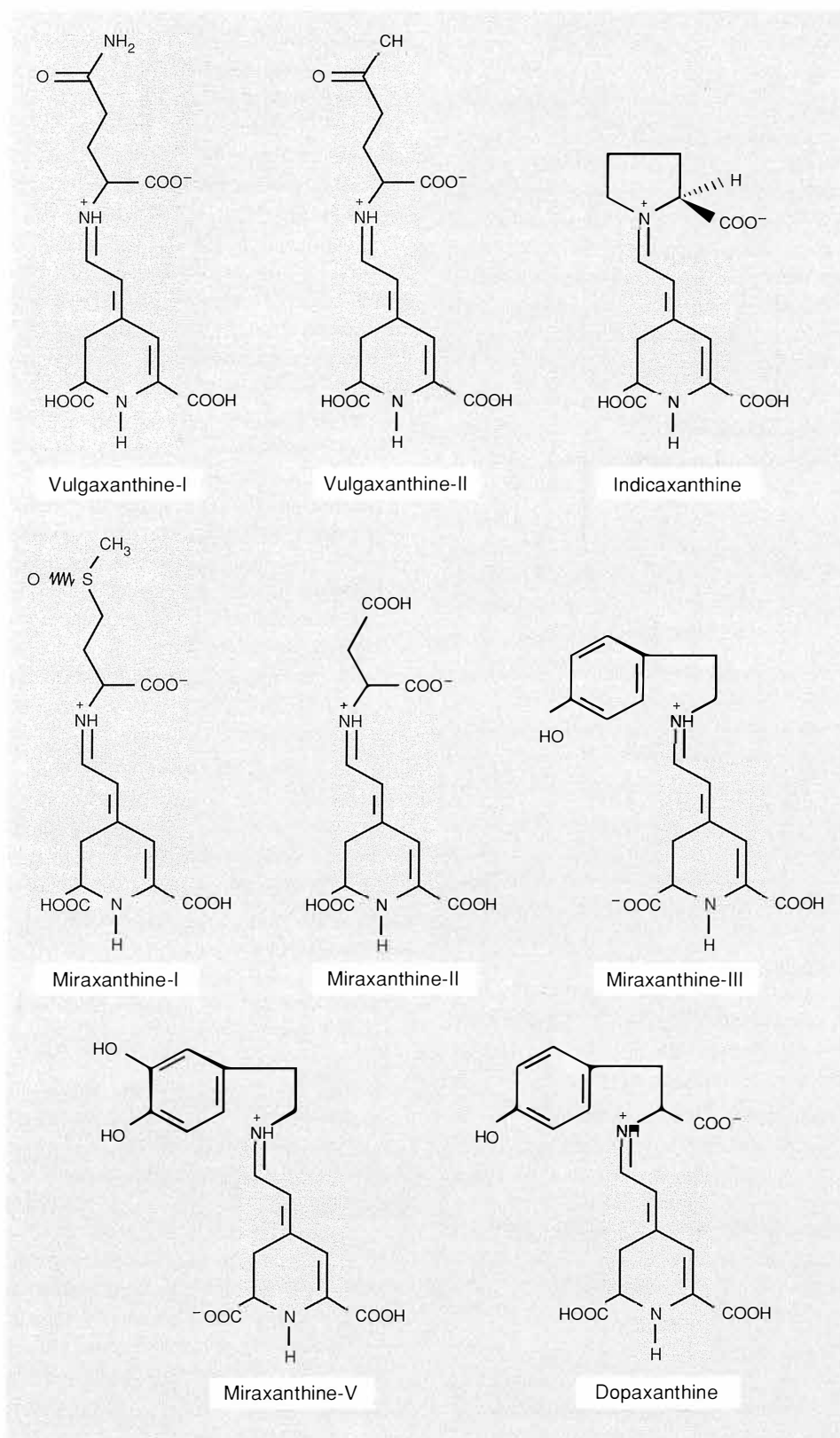


Figure 5
Structures de quelques
bétaxanthines.

et WILEY, 1979 ; SHIH et WILEY, 1982 ; WASSERMAN et GUILFOY, 1983).

Quel que soit le mécanisme de dégradation, la stabilité des bétalaïnes in situ est toujours supérieure à celle des pigments purifiés. Cette caractéristique est d'ailleurs commune à la majorité des colorants naturels. D'un point de vue purement technologique, et en dehors de toute considération économique, la purification des extraits se limitera par conséquent au strict nécessaire.

utilisations et marché

Les différents facteurs responsables de la dégradation des bétalaïnes sont autant de contraintes qui limitent leur utilisation, malgré un coût relativement faible des extraits concentrés (de l'ordre de 15 FF/kg). Les préparations de bétalaïnes sont généralement vendues sous formes de poudres et de jus concentrés sucrés à 70°brix, et possèdent des teneurs en pigments comprises entre 0,2 et 1,0 %.

Les utilisations les plus classiques concernent les aliments à faibles activités en eau (épices, etc), soumis à des traitements thermiques modérés et/ou ayant une courte durée de vie (yaourts, charcuterie, etc), ou stockés à très basse température (glaces, etc). Enfin, il faut citer l'emploi des bétalaïnes dans l'industrie pharmaceutique, mais sous une forme beaucoup plus purifiée (LEJEUNE et al, 1987 ; LEJEUNE et al, 1983).

Le marché des bétalaïnes, et plus généralement des colorants naturels, est très difficile à appréhender. Les chiffres avancés sont la plupart du temps contestés par les industriels, qui préfèrent ne pas dévoiler leurs propres informations. En revanche, la profession s'accorde pour dire que ce marché des colorants naturels est en croissance régulière. La législation, et particulièrement les règles d'étiquetage (dénomination « naturel » ou non), aura cependant une incidence importante sur l'évolution de ce marché.

● teneurs en bétalaïnes dans les figues de Barbarie

Les données bibliographiques disponibles relatives aux pigments des figues de Barbarie concernent principalement la séparation et l'identifica-

tion des composés ; les rares auteurs ayant fourni des données quantitatives (FORNI et al, 1992) mentionnent des concentrations respectives en pigments jaunes et rouges, de l'ordre de 40 mg et 14 mg pour 100 g de pulpe fraîche. D'un point de vue économique, cette information est naturellement indispensable pour juger de l'opportunité d'une valorisation des figues de Barbarie comme colorant alimentaire.

Dans cette optique, nous nous sommes procurés des fruits de différentes espèces et variétés de figuiers, afin de vérifier ces chiffres et de les comparer à ceux de la betterave. La plupart des échantillons proviennent du jardin botanique de Blaïnes en Espagne (encadré). Le tableau II montre les principales caractéristiques des fruits étudiés.

La couleur de ces fruits était principalement rouge ou pourpre ; seuls deux échantillons étaient de couleur jaune. Le poids moyen des fruits oscillait entre 10 et 100 g, ce qui montre l'extrême diversité de taille que l'on peut rencontrer (photo 4). On notera le caractère généralement peu acide de ces fruits, avec des pH pouvant aller jusqu'à 6,6.

Les teneurs en bétalaïnes des différents échantillons (encadré) sont réunies dans le tableau III. La teneur totale en pigment par rapport au fruit entier peut varier de manière très importante ; de 0,5 mg/100 g de matière fraîche chez *O microdasys* jusqu'à 114 mg/100 g chez *O sp1*. Ces valeurs sont tout à fait comparables à celles rencontrées dans la betterave ; en effet, dans une étude réalisée sur plus de 300 variétés de betterave, SAPERS et HORNSTEIN (1979) ont trouvé des teneurs maximales en bétalaïnes de l'ordre de 60 mg pour 100 g de matière fraîche, alors que VON ELBE et al (1972) en ont obtenu jusqu'à 135 mg/100 g.

Les fractions de pulpe ou d'écorce étudiées individuellement permettent de constater que la concentration dans les écorces est souvent très importante et parfois même supérieure à celle de la pulpe. Comme, de plus, cette fraction écorce peut représenter plus de la moitié du poids du fruit entier (jusqu'à 90 %), elle aura une importance capitale dans la rentabilité d'une telle valorisation de la figue de Barbarie. Ce résultat est illustré de manière différente par la figure 6, où est représentée la contribution de l'écorce et de la pulpe à la coloration de 100 g de fruit, en tenant compte des concentrations en bétalaïnes et des pourcentages

Tableau II
Caractéristiques physico-chimiques des fruits de quelques espèces d'*Opuntia*
(jardin botanique de Blaïnes, Espagne).

Espèces	Couleurs	Poids moyen (g)	°brix		pH	
			Écorce	Pulpe	Écorce	Pulpe
<i>O sp^a</i>	pourpre	40	9,5	9,5	4,4	4,2
<i>O robusta</i>	pourpre	90	13,0	14,0	3,9	4,1
<i>O robusta-robusta</i>	pourpre	45	12,8	14,2	4,8	5,1
<i>O decumbrens</i>	rouge	25	13,4	13,4	5,0	4,3
<i>O ficus-indica₃</i>	rose	105	9,0	14,3	5,5	6,0
<i>O sp₁</i>	pourpre	14	8,0	8,2	4,9	4,9
<i>O sp₂</i>	pourpre	14	9,0	8,0	3,5	3,8
<i>O aciculata</i>	rouge	20	7,0	6,6	3,9	3,1
<i>O sherri</i>	pourpre	12	9,6	9,3	3,9	3,9
<i>O microdasys</i>	rouge	16	6,0	7,2	3,0	2,8
<i>O curvispina</i>	rouge	20	8,4	9,2	4,2	3,7
<i>O ficus-indica₁</i>	jaune	85	13,9	10,0	5,1	6,3
<i>O ficus-indica₂^b</i>	jaune	60	13,4	13,0	5,3	6,6

a) espèce récoltée à Montpellier. b) espèce commerciale de Colombie.

respectifs de ces fractions, pour chacune des six espèces les plus performantes. Dans tous les cas, sauf celui d'*Orobusta*, la quantité de pigments apportée par l'écorce est supérieure, et même largement supérieure, à celle provenant de la pulpe.

Il faut noter que cette écorce, très souple pour des fruits arrivés à maturité, est difficile à séparer de la pulpe autrement que manuellement ; d'autre part, elle donne par broyage une purée extrêmement visqueuse, car elle est probablement constituée de polysides de type pectinique. Par conséquent,

Photo 4
Échantillons de
figues de
Barbarie,
mettant en
évidence
la diversité de
forme et de taille
des fruits
d'*Opuntia*.



Tableau III
Teneurs en bétalaïnes de différentes fractions de figue de Barbarie (exprimées par rapport à la matière fraîche).

Espèces	Écorce (mg/100 g)	Pulpe (mg/100 g)	Total (mg/100 g)
<i>Opuntia sp3</i>	72,0 (61,7 %)	49,3 (25,1 %)	56,8 (86,8 %)
<i>O robusta</i>	19,0 (55,3 %)	58,2 (34,1 %)	30,4 (89,4 %)
<i>O robusta-robusta</i>	40,5 (65,5 %)	86,1 (29,1 %)	51,6 (94,6 %)
<i>O decumbrens</i>	22,1 (64,5 %)	37,3 (18,4 %)	21,2 (82,9 %)
<i>O ficus-indica3</i>	1,1 (44,4 %)	4,1 (49,5 %)	2,6 (93,9 %)
<i>O sp1</i>	118,3 (73,8%)	126,8 (21,0 %)	113,9 (94,8 %)
<i>O sp2</i>	44,8 (89,6 %)	27,6 (7,0 %)	42,0 (96,6 %)
<i>O aciculata</i>	1,8 (88,9 %)	0,3 (7,6%)	1,6 (96,5 %)
<i>O sherri</i>	8,4 (87,3 %)	6,0 (9,3 %)	7,9 (96,6 %)
<i>O microdasys</i>	0,9 (53,2 %)	0,0 (37,3 %)	0,5 (90,5 %)
<i>O curvispina</i>	112,4 (62,1 %)	99,0 (26,8 %)	96,3 (88,9 %)
<i>O ficus-indica1</i>	6,1 (33,7 %)	8,9 (59,2 %)	7,4 (92,9 %)
<i>O ficus-indica2</i>	8,9 (40,4 %)	20,5 (52,4 %)	14,3 (92,8 %)

Les chiffres entre parenthèses et en petits caractères représentent le pourcentage pondéral de la fraction considérée par rapport au fruit entier (le complément à 100 % étant constitué par les graines dans la colonne total).

comme l'écorce ne confère aucun goût désagréable (amertume ou autre) et qu'elle ne semble pas contenir de composés toxiques, une utilisation intégrale du fruit par un traitement enzymatique adapté pourrait être envisagée, ce qui laisserait présumer des rendements très importants.

La répartition entre bétacyanines et bétaxanthines pour chacune des variétés est présentée dans le tableau IV, ainsi que le rapport entre ces deux classes de composés. Ce rapport est intéressant à étudier, car la stabilité des composés est différente. Les bétaxanthines étant moins stables, pour éviter des changements de nuances, au cours du stockage ou lors d'un traitement thermique, dus à des cinétiques de dégradation différentes, il sera préférable, pour les variétés rouges, d'avoir le rapport le plus faible possible.

Dans le cas de ces figues, ce rapport est, pour la plupart des espèces, proche de zéro, à l'exception d'*O robusta* et d'*O ficus-indica3* ; cette dernière étant de couleur rose et particulièrement pauvre en pigments totaux. À titre de comparaison, SAPERS et HORNSTEIN (1979) ont observé des rapports compris entre 0,36 et 0,63 pour les variétés de betterave les plus riches en bétalaïnes, et entre 0,12 et 1,25 pour l'ensemble des variétés.

Dans le cas des figues jaunes, ce rapport est largement en faveur des bétaxanthines, mais la concentration totale est très faible.

Chez le figuier de Barbarie, il semble y avoir une sorte d'exclusion mutuelle entre bétaxanthines et bétacyanines. Ce point, qui mériterait d'être confirmé sur un plus grand nombre d'échantil-

Figure 6
Contribution de l'écorce et de la pulpe à la coloration des figues (quantité totale de pigment pour 100 g de matière fraîche).

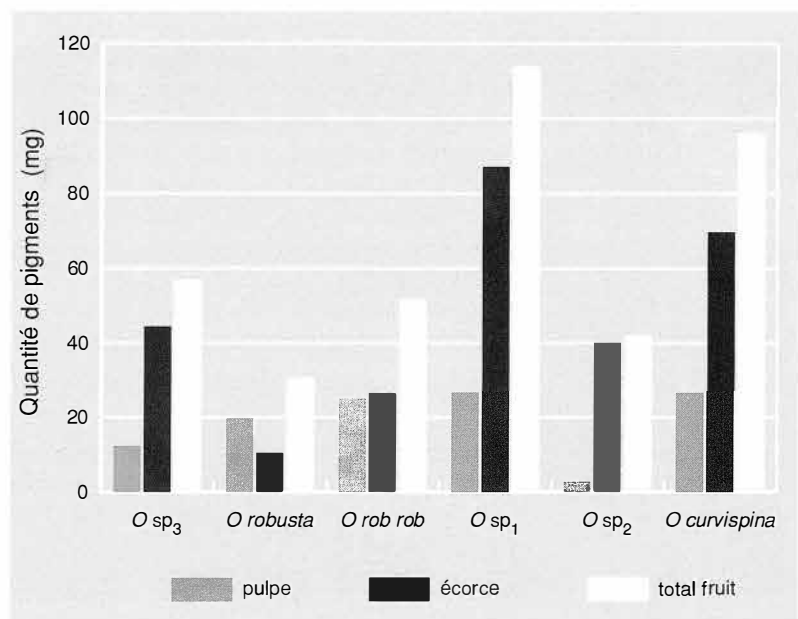


Tableau IV

Teneurs en bétacyanines et en bétaxanthines des figes de Barbarie (exprimées par rapport à la matière fraîche).

Espèces	Bétacyanines (mg/100 g)	Bétaxanthines (mg/100 g)	Bétaxanthines/ Bétacyanines
<i>O</i> sp ₃	56,8	0	0
<i>O robusta</i>	23,1	7,2	0,31
<i>O robusta-robusta</i>	45,9	5,4	0,12
<i>O decumbrens</i>	21,1	0	0
<i>O ficus-indica</i> ₃	0,9	1,7	1,9
<i>O</i> sp ₁	100,8	0,7	≅ 0
<i>O</i> sp ₂	41,7	0,3	≅ 0
<i>O aciculata</i>	1,6	0	0
<i>O sheri</i>	7,9	0	0
<i>O microdasys</i>	0,5	0	0
<i>O curvispina</i>	83,8	11,6	0,14
<i>O ficus-indica</i> ₁	0,2	7,0	35
<i>O ficus-indica</i> ₂	0,3	14,0	47

lons, constituerait un avantage par rapport à la betterave.

Des tests destinés à évaluer la stabilité des colorants de la fige de Barbarie (résultats préliminaires) n'ont pas montré de différences significatives entre des extraits de fige de Barbarie et de betterave. Il faudra donc envisager le même type d'applications que pour le rouge de betterave.

● aspects économiques

La possibilité d'une valorisation des figes de Barbarie par l'obtention d'extraits colorants naturels pose inévitablement la question de leurs débouchés éventuels, et cela d'autant plus qu'ils seront identiques à ceux obtenus à partir de la betterave puisqu'il s'agit de la même famille de composés. Par conséquent, des extraits colorants issus de figes peuvent-ils intéresser des industriels utilisateurs de ce type de produit, alors que les extraits de betterave sont déjà bien implantés sur le marché international ? En d'autres termes, des concentrés et poudres de fige de Barbarie peuvent-ils concurrencer ceux de betterave ?

Pour que l'utilisation d'extraits colorants à base de figes de Barbarie présente un intérêt industriel par rapport à la betterave, il faut pouvoir proposer soit de nouvelles teintes hydrosolubles, soit des produits plus stables, ou encore des produits à un prix inférieur.

De nouvelles teintes pourrait être obtenues par l'exploitation du genre *Opuntia* qui possède

l'avantage de présenter une diversité génétique bien plus importante que celui des betteraves ; cela se traduit par une plus grande diversité de teintes ; les espèces jaunes sont, par exemple, beaucoup plus courantes. Celles étudiées dans le cadre de ce travail ont cependant montré des teneurs en bétaxanthines beaucoup trop faibles pour une utilisation industrielle. Il faut également mentionner les espèces oranges dont la coloration serait due à la néobétanine, même s'il y a controverse sur l'existence de ce type de composé. Nos résultats ne permettent pas de conclure actuellement sur la possibilité de développer de nouvelles teintes à partir de figes de Barbarie, mais une étude spécifique des espèces jaunes et oranges permettrait de le vérifier, et d'évaluer l'intérêt de leur valorisation comme colorant alimentaire.

La stabilité des extraits, notamment thermique, est un point essentiel, car il s'agit de la contrainte technologique principale qui limite leur utilisation dans l'industrie agroalimentaire. Les bétalaïnes de la fige de Barbarie possédant des structures identiques à celles de la betterave (du moins pour les pigments rouges), il était raisonnable de supposer que les stabilités des colorants extraits de ces deux fruits étaient comparables, sauf dans l'hypothèse d'un effet « matrice » très marqué du figuier. Cependant, les résultats préliminaires obtenus ne semblent pas montrer de différences significatives entre des concentrés de fige et de betterave, et donc aucun avantage particulier ne serait conféré par l'utilisation de l'un ou l'autre des extraits.

Le coût des extraits de figues est, bien entendu, l'un des éléments déterminants pour leur développement. Celui-ci est difficile à établir de manière précise, puisqu'il dépendra évidemment des conditions locales. À partir de l'exemple du Mexique, sachant que le prix d'une tonne de figues cultivées est d'environ 1400 FF et en prenant pour hypothèse un rendement en pulpe de 25 %, le coût matière d'une tonne de concentré à 70°brix obtenu à partir de pulpe serait de l'ordre de 35 000 FF. L'écart entre ce coût matière et le prix de vente d'un concentré de betterave (environ 15 000 FF la tonne) est considérable, d'autant qu'il faut encore lui ajouter des coûts de fabrication et une marge bénéficiaire. Ce calcul représente toutefois l'hypothèse la plus défavorable, car il faut également tenir compte de certains éléments de nature à diminuer ce coût matière, et en particulier :

- *Le prix des figues* : le prix retenu est celui de fruits cultivés. Or, dans le cas d'une valorisation des fruits sauvages (ou des écarts de tri) la situation pourrait être autre et le coût matière devenir celui de la main-d'œuvre pour la cueillette des figues. Nous ne disposons pas d'éléments suffisants pour établir ce coût, mais il faut savoir qu'un cueilleur peut récolter entre 100 et 150 kg de fruits par jour (DOMINGUEZ-LOPEZ, 1994). Dans un tel contexte, les difficultés se situent généralement au niveau de l'implantation de l'unité de transformation, l'accessibilité des zones de production, les voies de communication, etc.

- *Le choix de l'espèce* : le calcul qui a été développé prend pour hypothèse de départ l'exploitation de fruits dont le rendement en pulpe est de 25 % ; dans l'étude présentée, cela correspond à celui effectivement observé pour les espèces les plus riches en bêtaïnes. Or, seulement une douzaine d'échantillons ont été étudiés parmi l'extrême diversité d'espèces du genre *Opuntia*. On peut raisonnablement supposer qu'un criblage variétal plus étendu permettrait d'identifier une ou plusieurs espèces possédant des teneurs en pigments similaires et des rendements en pulpe sensiblement supérieurs. Des rendements de l'ordre de 50 % permettraient de diviser le coût matière par deux. D'autre part, un programme de sélection variétale pourrait être envisagé et aboutir à une amélioration certaine des rendements en pulpe et des teneurs en pigments.

- *La fraction du fruit utilisée* : comme déjà signalé, la quantité de pigments apportée par la fraction écorce est très importante. D'autre part, sa constitution probable (polyosides de type pectinique) suggère la possibilité de l'utilisation d'enzymes, qui est une pratique classique dans l'industrie des jus de fruits, afin d'améliorer les rendements d'extraction. Par conséquent, la valorisation intégrale du fruit, à la condition de trouver un traitement enzymatique adapté et performant, permettrait de diviser le coût matière d'un concentré de figue par 3 ou 4 par rapport à l'hypothèse de départ.

Ces quelques éléments montrent que, selon les options choisies et selon les conditions locales, le coût matière pourrait varier dans des proportions extrêmement importantes ; bien que les données économiques soient insuffisantes pour poursuivre le raisonnement, il apparaît envisageable de pouvoir proposer sur le marché un concentré de figues de Barbarie à un prix raisonnable.

● conclusions

Les premiers résultats de cette étude ont montré que les teneurs en pigments des figues de Barbarie sont très variables selon les espèces, mais que certaines espèces rouges possèdent des quantités de bêtaïnes tout à fait comparables à celles de la betterave ; par conséquent, il est possible d'obtenir, à partir de ces fruits, des produits commerciaux dont le pouvoir colorant est identique à ceux des concentrés ou poudres de betterave. Cependant, il n'y a pas de différences significatives dans la stabilité des extraits, et donc pas d'applications nouvelles à espérer de ceux obtenus à partir de figues de Barbarie.

En revanche, le genre *Opuntia* présente une diversité génétique bien plus importante que celui des betteraves, et l'un des prolongements de ce travail pourrait consister à étendre le criblage variétal commencé, en mettant notamment l'accent sur l'observation des espèces d'*Opuntia* jaunes et oranges. Une étude systématique de ce genre assez mal connu, et pourtant très bien représenté dans certains pays, serait susceptible de déboucher rapidement vers la mise au point de produits nouveaux pouvant présenter un intérêt industriel sur un marché en croissance comme celui des colorants alimentaires. D'autres genres

de la famille des cactacées peuvent également être intéressants, dont certains (comme les *Cereus*) sont déjà exploités industriellement pour leurs fruits.

D'un point de vue économique, une telle valorisation pourrait être envisageable, à la condition de réduire sensiblement le coût matière du concentré de figue, tel qu'il a été calculé dans l'hypothèse de départ donnée dans ce travail (environ 35 000 FF la tonne), et qui correspond à la situation observée au travers des échantillons étudiés. Cela pourrait être obtenu en valorisant des fruits sauvages plutôt que cultivés (ce qui posera d'autres problèmes par ailleurs), en ciblant des variétés plus performantes en terme de rendement en pulpe et de teneur en pigments, ou enfin en utilisant l'intégralité du fruit (écorce et pulpe) à l'aide d'un traitement enzymatique adapté. Dans le premier cas, seule une étude de faisabilité économique sur site peut permettre de juger de la rentabilité d'un tel projet. Dans les deux autres cas, une étude technique préalable sera nécessaire pour valider les hypothèses émises.

● références

- Acevedo E, Badilla I, Nobel PS (1983) Water relations, diurnal acidity changes, and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol* 72, 775-780
- Alard D, Wray V, Grotjahn L, Reznik H, Strack D (1985) Neobetainin: isolation and identification from *Beta vulgaris*. *Phytochem* 24 (10), 2383-2385
- Attoe EL, Von Elbe JH (1981) Photochemical degradation of betanine and selected anthocyanins. *J Food Sci* 46, 1934-1937
- Attoe EL, Von Elbe JH (1982) Degradation kinetics of betanine in solutions as influenced by oxygen. *J Agric Food Chem* 30, 708-712
- Berset C (1990) Etat des recherches sur les colorants alimentaires naturels. *IAA* 11, 1163-1166
- Berset C (1994a) Propriétés fonctionnelles des colorants alimentaires naturels. *IAA* 111, 5-10
- Berset C (1994b) Les anthocyanes : structures et propriétés. In : *Actes des 13^e Journées Internationales sur les Huiles Essentielles, septembre 1994*. Dignes-les-Bains, France, Riv Ital EPPOS, 507-514
- Brutsch MO, Zimmermann HG (1993) The prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (Cactaceae)] in South Africa: utilisation of the naturalized weed, and of the cultivated plants. *Econ Bot* 47 (2), 154-162
- Cohen E, Saguy I (1983) Effect of water activity and moisture content on the stability of beet powder pigments. *J Food Sci* 48, 703-707
- Dominguez-Lopez A (1994) *Étude d'une nouvelle valorisation des figues de Barbarie (Opuntia spp) au Mexique pour la production de colorants alimentaires*. Montpellier, France, ENSIA-SIARC (École nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires, section Industries agro-alimentaires régions chaudes), mémoire de Mastère, 67 p
- Espinosa JA, Borrocal RA, Jara M, Zorilla CG, Zanabria CP, Medina JT (1973) Quelques propriétés et essais préliminaires de conservation des fruits et du jus de figue de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*). *Fruits* 28 (4), 285-289
- Ewaidah EH, Hassan BH (1992) Prickly pear sheets: a new fruit product. *Int J Food Sci Technol* 27 (3), 353-358
- Forni E, Polesello A, Montefiori D, Maestrelli A (1992) High-performance liquid chromatographic analysis of the pigments of blood-red prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). *J Chromatogr* 593, 177-183
- Garcia de Cortázar V, Nobel PS (1991) Prediction and measurement of high annual productivity for *Opuntia ficus-indica*. *Agr For Meteorol* 56, 261-272
- Garcia de Cortázar V, Nobel PS (1992) Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *J Am Hort Sci* 117 (4), 558-562
- Guignard JL (1993) *Abrégé de Botanique*. Paris, France, Masson, 8^e éd, 276 p
- Guignard JL, Cosson L, Henry M (1985) *Abrégé de Phytochimie*. Paris, France, Masson, 224 p
- Huang AS, Von Elbe JH (1986) Stability comparison of two betacyanine pigments - amaranthine and betanine. *J Food Sci* 51 (3), 670-674
- Ibañes-Camacho R, Meckes-Lozoya M (1983) Effect of semi-purified product obtained from *Opuntia streptacantha* L (a cactus) on glycemia and triglyceridemia of rabbit. *Arch Invest Méd* 14 (4), 437-443
- Impellizzeri G, Piattelli M (1972) Biosynthesis of indicaxanthin in *Opuntia ficus-indica* fruits. *Phytochem* 11, 2499-2502
- Joubert E (1993) Processing of the fruit of five prickly pear cultivars grown in South Africa. *Int J Food Sci Technol* 28, 377-387
- Labatut L, In T (1990) La couleur au naturel. *Biofutur*, novembre, 37-41
- Lamb BM (1993) *Guide des cactus du monde*. Lausanne, Suisse, Delachaux et Nestlé SA, 215 p
- Lashley D, Wiley RC (1979) A betacyanine decolorizing enzyme found in red beet tissue. *J Food Sci* 44, 1568-1569
- Lejeune B, Grand A, Pourrat A (1987) Emploi du rouge de betterave pour la coloration de comprimés pelliculés. *STP Pharma* 3 (5), 400-403
- Lejeune B, Pouget MP, Pourrat A (1983) Le rouge de betterave : essais de stabilisation et utilisation dans la formulation des gels. *Labo-Pharma* 31 (334), 638-641

- Mazza G, Brouillard RJ (1987) Color stability and structural transformations of cyanidin 3,5-diglucoside and four 3-deoxyanthocyanins in aqueous solutions. *J Agric Food Chem* 35, 422-426
- Mégard D (1993) Stability of red beet pigments for use as food colorant: a review. *Foods Food Ingredients J* 158, 130-150
- Merin U, Gagel S, Popel G, Bernstein S, Rosenthal I (1987) Thermal degradation kinetics of prickly-pear-fruit red pigment. *J Food Sci* 52 (2), 485-486
- Millet P (1994) Les colorants parient sur l'Europe. *Parfums, Cosmétiques, Arômes* 115, 97-100
- Nobel PS, Cavalier J, Andrade JL (1992a) Mucilage in Cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *J Exp Bot* 43 (250), 641-648
- Nobel PS, Garcia-Moya E, Quero E (1992b) High annual productivities of certain agaves and cacti under cultivation. *Plant Cell Environ* 15, 329-335
- Pasch JH, Von Elbe JH (1979) Betanine stability in buffered solutions containing organic acids, metal cations, antioxidants, or sequestrants. *J Food Sci* 44 (1), 72-81
- Paulsen BS, Lund PS (1979) Water-soluble polysaccharides of *Opuntia ficus-indica* cv « Burbank's Spineless ». *Phytochem* 18, 569-571
- Periago MJ, Ros G, Lopez G, Martinez MC, Rincon F (1993) Componentes de la fibra dietética y sus efectos fisiológicos. *Rev Esp Cienc Technol Aliment* 33 (3), 229-246
- Piattelli M, Giudici de Nicola M, Castrogiovanni V (1969) Photocontrol of amarantin synthesis in *Amaranthus tricolor*. *Phytochem* 8, 731-736
- Piattelli M, Imperato F (1969) Betacyanins from the family *Cactaceae*. *Phytochem* 8, 1503-1507
- Piattelli M, Minale L (1964a) Pigments of centrospermae. I - Betacyanins from *Phyllocactus hybridus* Hort and *Opuntia ficus-indica* Mill. *Phytochem* 3, 307-311
- Piattelli M, Minale L (1964b) Pigments of centrospermae. II - Distribution of betacyanins. *Phytochem* 3, 547-557
- Piattelli M, Minale L, Prota G (1964) Isolation, structure and absolute configuration of indicaxanthin. *Tetrahedron* 20, 2325-2329
- Piattelli M, Minale L, Prota G (1965) Pigments of centrospermae. III - Betaxanthins from *Beta vulgaris* L. *Phytochem* 4, 121-125
- Retamal N, Duran JM, Fernandez J (1987) Seasonal variations of chemical composition in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L) Miller). *J Sci Food Agric* 38, 303-311
- Saguy I (1979) Thermostability of red beet pigments (betanin and vulgaxanthin-I): influence of pH and temperature. *J Food Sci* 44, 1554-1555
- Saguy I, Goldman M, Bord A, Cohen E (1984) Effect of oxygen retained on beet powder on the stability of betanine and vulgaxanthine I. *J Food Sci* 49, 99-101
- Saguy I, Kopelman IJ, Mizrahi S (1978a) Computer-aid determination of beet pigments. *J Food Sci* 43 (1), 124-127
- Saguy I, Mizrahi S, Kopelman IJ (1978b) Mathematical approach for the determination of dye concentration in mixtures. *J Food Sci* 43 (1), 121-123, 134
- Sapers GM, Hornstein JS (1979) Varietal differences in colorant properties and stability of red beet pigments. *J Food Sci* 44, 1245-1248
- Savolainen K, Kuusi T (1978) The stability properties of golden beet and red beet pigments: influence of pH, temperature, and some stabilizers. *Z Lebensm Unters-Forsch* 166, 19-22
- Sawaya WN, Khatchadourian HA, Safi WM, Al-muhamad HM (1983) Chemical characterization of prickly pear pulp, *Opuntia ficus-indica*, and the manufacturing of prickly pear jam. *J Food Technol* 18 (2), 183-193
- Shih CC, Wiley RC (1982) Betacyanine and betaxanthine decolorizing enzymes in the beet (*Beta vulgaris* L) root. *J Food Sci* 47, 164-166
- Singer J, Von Elbe JH (1980) Degradation rates of vulgaxanthine I. *J Food Sci* 45, 489-491
- Strack D, Engel U, Reznik H (1981) High performance liquid chromatography of betalains and its application to pigment analysis in *Aizoaceae* and *Cactaceae*. *Z Pflanzenphysiol Bd* 101, S 215-222
- Strack D, Engel U, Wray V (1987) Neobetanin: a new natural plant constituent. *Phytochem* 26 (8), 2399-2400
- Trachtenberg S, Mayer AM (1981) Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochem* 20 (12), 2665-2668
- Von Elbe JH (1975) Stability of betalains as food colors. *Food Technol* 29 (5), 42-46
- Von Elbe JH, Maing IY, Amundson CH (1974) Color stability of betanin. *J Food Sci* 39, 334-337
- Von Elbe JH, Sy SH, Maing IY, Gabelman GH (1972) Quantitative analysis of betacyanins in red table beets (*Beta vulgaris*). *J Food Sci* 37, 932-934
- Wasserman BP, Guilfooy MP (1983) Peroxidative properties of betanin decolorization by cell walls of red beet. *Phytochem* 22 (12), 2653-2656
- Wylar H (1986) Neobetanin: a new natural constituent? *Phytochem* 25 (9), 2238
- Wylar H, Meuer U (1979) Zur biogenese der betacyane: versuche mit [2-¹⁴C]-dopaxanthin. *Helv Chim Acta* 62, 1330-1339
- Wylar H, Meuer U, Bauer J, Stravs-mombelli L (1984) Cyclodopa glucoside (= (2S)-5- (β-D-glucopyranosyloxy)-6-hydroxyindoline-2-carboxylic acid) and its occurrence in red beet (*Beta vulgaris* var *rubra* L). *Helv Chim Acta* 67, 1348-1355

Détermination de la teneur en pigments dans les figes de Barbarie

origine et préparation des échantillons

Les différentes espèces ou variétés étudiées provenaient essentiellement de la collection de cactacées du jardin botanique « Marimurtra » de Blañes en Espagne ; cependant, l'un des échantillons était constitué de figes importées de Colombie, et un autre de figes récoltées dans la région de Montpellier.

Tous les échantillons ont été lavés et épluchés manuellement. Les pulpes ont été tamisées grossièrement afin de séparer les graines ; les écorces sont broyées. Les purées obtenues ont été congelées dans des sacs en polyéthylène à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à leur utilisation.

détermination de la teneur en pigments

principe de la méthode

Le principe de la méthode retenue pour mesurer la teneur en pigments (SAGUY et al, 1978a et b) repose sur le fait que la représentation mathématique la plus exacte du spectre d'absorbance d'un pigment pur en solution est une distribution logarithmique normale, proportionnelle à la concentration. Ainsi, on a une relation entre absorbance et concentration en fonction de la longueur d'onde. Dans le cas d'un mélange de différents pigments, l'absorbance totale pour une longueur d'onde donnée est égale à la somme des absorbances de chacun des pigments, à cette longueur d'onde. Donc, en tout point d'un spectre d'absorbance d'un mélange, on aura une relation, définie par une équation connue, entre la concentration respective de chacun des composés et l'absorbance mesurée en ce point. Pour n composés, on mesurera au moins n valeurs d'absorbance à différentes longueurs d'onde (en général proche des maxima d'absorption des composés étudiés) qui permettront d'obtenir un système de n équations à n inconnues, dont la résolution donnera les concentrations des différents produits. On peut améliorer la précision de la méthode en multipliant le nombre de mesures d'absorbance, c'est-à-dire en « balayant » plus largement le spectre étudié, et donc en modélisant au mieux la courbe expérimentale.

analyses des échantillons

Dans le cas des figes de Barbarie, quatre familles de composés sont répertoriées : les bétacyanines et les bétaxanthines qui sont les pigments recherchés, ainsi que l'acide bétalamique et les produits de brunissement qui peuvent être présents et interférer dans les mesures.

Les échantillons ont été traités de la manière suivante :

- a) centrifugation des pulpes ou des écorces broyées pendant 15 min à 6000 g pour éliminer les matières en suspension ;
- b) dilution du surnageant au dixième (1/10) dans une solution d'éthanol à 76 % ; repos de l'échantillon pendant 30 min afin de clarifier la solution ;
- c) centrifugation de la solution pendant 15 min à 6000 g ;
- d) mesure de l'absorbance du surnageant, après dilution éventuelle dans une solution d'éthanol à 76 %, à 20 longueurs d'ondes différentes entre 355 et 545 nm, par pas de 10 nm environ ;
- e) calcul des concentrations en pigments à l'aide du modèle proposé par SAGUY et al, 1978b.