

gène pour une plante et on confère à la plante, par génie génétique, la résistance adéquate.

LE REMÈDE ET LE MAL

Il est cependant impossible d'imaginer qu'on puisse se débarrasser des bactéries, des insectes ou des virus. La lutte est perpétuelle et sans relâche, d'autant que l'on perturbe un système écologique global.

Prenons l'exemple des fruits, symbole du paradis terrestre : n'importe qui a envie de manger des fruits, y compris les insectes, donc ils méritent une protection très forte à base de traitements insecticides. Hélas ces traitements détruisent aussi une flore utile des sols et font place nette pour la prolifération des nuisibles résistants dont on a éliminé la concurrence. Tout déplacement de l'équilibre peut empirer une situation.

Il subsiste des maladies, comme la maladie de l'orme, où il n'y a pas de produit, pas de solution agronomique : l'impossible est peut-être temporaire, mais tant que la solution est absente... vous ne pourrez jamais définitivement éliminer un champignon pathogène et, partant sa dissémination épidémique, d'autant qu'on ne met pas en œuvre les mêmes moyens pour sauver un arbre et pour sauver un homme.

On sait transformer les animaux en insérant de nouveaux gènes, et l'on sait aussi cloner ces animaux. Une équipe de Jouy-en-Josas a cloné des veaux, il y a maintenant quatre ans. Aujourd'hui l'INRA examine avec l'INSERM la possibilité de modifier les porcs, afin qu'ils puissent servir de porte-greffe pour l'homme. On touche, ce faisant, des problèmes éthiques car nous avons en tête le docteur Moreau qui transformait des cochons en hommes. Le public et aussi les chercheurs tentent de déterminer une éthique déterminant les responsabilités de la science, plus d'ailleurs que celle des scientifiques.

LES RAISONS DE L'IRRATIONNEL

Je crois à trois points. Le bien-être animal qui bien sûr doit être respecté ; nous tentons de mesurer ce bien-être, ce qui est difficile. Le monde agronomique porte une attention particulière aux animaux, qui ne sont pas considérés comme des cobayes, mais en tant que partenaires d'étude. Le deuxième point est le transfert de ces connaissances au cas de l'homme. Il faut se donner un impossible moral : ne pas conduire d'expériences inutiles et ne pas faire sur l'homme un certain nombre d'expériences qu'on fait sur l'animal. L'exemple typique est

le clonage des veaux. D'ailleurs quand l'INRA a fait son expérience, j'ai interrogé les scientifiques. Leurs réponses ont été satisfaisantes : les expériences sur les animaux clonés sont utiles car elles permettent de distinguer clairement ce qui est dû au génome de ce qui est dû à l'environnement. Elles permettent des recherches sur la résistance aux maladies ou sur la nutrition qui sont beaucoup plus économiques en termes animaux.

On ne peut voir avec la même indulgence les débuts de clonage d'embryons humains pratiqués aux États-Unis peu de temps après et cela avait scandalisé tout le monde. Il faut savoir cloisonner ce type de recherche. Dans les années 1986-1987, on avait trouvé une sonde d'acide nucléique qui se greffait spécifiquement sur le chromosome Y et déterminait si l'embryon était mâle ou femelle. Son utilisation chez l'Homme est interdite.

Le troisième point dépasse l'éthique, laquelle n'est pas toujours un garde-fou suffisant : le consommateur n'acceptera jamais des produits issus de traitements zootechniques qui leur paraîtraient déviants par rapport aux relations de l'homme avec l'animal.

Cette attitude irrationnelle a en fait un sens. Même si les hormones de synthèse sont en tout point identiques aux hormones naturelles, elles détruisent l'image du lait associé à la pureté : le public assimile l'injection d'hormones à un dopage. Les sensibilités sont évidemment dépendantes de la richesse du pays.

L'augmentation de la productivité est toujours une préoccupation, cependant, et c'est horrible à dire, les estomacs solvables sont saturés. Bien sûr, ces techniques pourraient être utiles dans les pays où le lait manque, mais, là encore, pouvons-nous préconiser dans les pays en développement des techniques qu'on ne voudrait pas utiliser ?

L'AGRICULTURE, SOURCE D'ÉNERGIE ?

L'utilisation de végétaux comme source d'énergie ou de molécules intéressantes est ancienne : jusqu'à la révolution industrielle, le bois de chauffage assurait l'essentiel de notre approvisionnement énergétique et, après le choc pétrolier des années 1973, nombre de scientifiques ont voulu exploiter l'énergie solaire.

La consommation d'énergie par habitant dans un pays développé comme le nôtre est de quatre tonnes équivalent-pétrole par habitant, dont 20 pour cent pour les transports, alors que le rayonnement solaire correspond à 280 tonnes équivalent en pétrole par habitant. Le second chiffre impressionne. Hélas, il faut

regarder le rendement : avec un rendement de conversion d'un pour cent, un tiers de la surface cultivable devrait être alloué aux transports. Or le rendement de la photosynthèse est entre 0,1 et 0,33 pour cent et de plus cette énergie est diluée alors que les énergies fossiles sont concentrées.

La rentabilité économique des biocarburants est encore inférieure à celle des carburants fossiles par un facteur de deux à trois et elle dépend de la fiscalité. Mais il subsiste un coût d'opportunité : un agriculteur peut avoir intérêt à mettre une jachère en production industrielle de biocarburants.

On cherche aussi à coupler la production de biocarburants à la création de produits à forte valeur ajoutée. Il y a une filière éthanol qui vient du blé et le sous-produit va en alimentation animale et il y a une filière diester avec le colza qui laisse du glycérol ; Rhône-Poulenc examine une chimie fondée sur le glycérol de manière à augmenter la valeur du tout. Parallèlement les matériaux biodégradables comme les huiles ou les détergents seraient écologiquement intéressants, car la pollution naissant de déversement d'huile, de vidange notamment, est une menace pour l'environnement. Toutefois, ces cultures ne doivent évidemment pas employer trop d'engrais à base de nitrates ou de phosphates.

LA CHIMIE VERTE

Les plantes sont des usines chimiques absolument extraordinaires : elles synthétisent ce que l'homme lui-même n'est pas capable de synthétiser très facilement et très spontanément. On part de l'énergie solaire et à la fin, grâce à cette usine végétale, on produit des molécules extrêmement complexes. On exploite cette capacité pour faire des médicaments et des produits de base de l'industrie chimique, et l'ingénierie génétique peut nous aider à produire des éléments à haute valeur ajoutée.

Les impossibles en agriculture sont rares, mais les progrès ne sont pas économiquement transposables d'un pays à l'autre. La difficulté majeure est celle d'un village agricole global interdépendant où les transferts, bénéfiques et maléfiques, sont rapides. La gestion de l'écosystème Terre reste à imaginer.

Guy PAILLOTIN est Président de l'Institut National de la Recherche Agronomique.

Ce texte est la retranscription du débat enregistré avec Émile Noël, qui sera diffusé sur France Culture le 8 mai 1996, à 9 heures.

Histoire de l'arc-en-ciel

JEAN-LOUIS RICARD

Plus de 2 000 ans ont été nécessaires à la compréhension et à l'élaboration de la théorie de ce phénomène naturel.

Pour les Scandinaves c'est un pont entre le ciel et la Terre, permettant aux dieux de venir sur Terre ; pour les Incas, c'est un cadeau du Soleil ; pour d'autres Indiens, c'est l'arc de guerre des dieux de l'atmosphère ou le chemin emprunté par les morts pour monter au ciel. Selon une légende irlandaise, un pot d'or se trouverait à chaque pied de l'arc-en-ciel. Le phénomène est parfois assimilé à un monstre ou à un serpent. D'après le culte des Fôn du Dahomey, en Afrique occidentale, le dieu Dan de la fécondité et de la richesse se manifeste sous la forme d'un arc-en-ciel qui encercle le monde, et il est symbolisé par un serpent qui se mord la queue.

Les poètes grecs de l'Antiquité l'identifient à l'écharpe multicolore de la déesse Iris. Fille du Titan Thaumas et de l'Océanide Électre, elle est sœur des Harpies, créatures répugnantes au corps d'oiseau et à tête de femme, ravisseuses d'enfants et d'âmes. Zéphyr, le vent d'Ouest, aurait été son époux. Elle est figurée sur des vases et sur des bas-reliefs vêtue d'une longue tunique, les cheveux retenus par un bandeau et des ailes aux épaules : elle porte une écharpe légère dont les couleurs au soleil font un arc-en-ciel.

Dans la Bible, l'arc-en-ciel est le symbole de l'alliance que Dieu a conclue avec l'homme après le déluge : la postérité de Noé n'a plus à craindre un nouveau déluge. Dans l'Apocalypse, l'arc-en-ciel apparaît autour du trône de Dieu sous forme de lumière. Ce phénomène naturel a été très souvent représenté, mais quelle en était l'interprétation ?

Aristote est le premier philosophe à s'intéresser à l'arc-

en-ciel. Dans les *Météores*, il suppose que les rayons solaires se réfléchissent sur la surface externe des gouttes d'eau du nuage et que l'ombre de ce dernier, mêlée aux rayons du soleil, produit les couleurs de l'arc. Selon Aristote, le nuage est une surface d'eau noire ; or, la lumière traversant une surface noire devient rouge, comme la flamme du bois qui brûle : c'est l'origine de la couleur rouge de l'arc-en-ciel. Aristote ne voit que trois couleurs, le rouge, le vert et le violet. Ces deux dernières couleurs sont dues à l'atténuation de l'intensité lumineuse avec la distance : une réflexion proche expliquerait la couleur rouge, une réflexion plus éloignée le vert et la plus lointaine, le violet. Les Grecs, et notamment Aristote, distin-



Iris, parée de son écharpe, symbolisait l'arc-en-ciel pour les Grecs. Elle est représentée ici, sur un boîtier de montre.

guaient mal la lumière de la vision. La théorie d'Aristote, peu compatible avec les théories actuelles, domina pourtant pendant près de 2 000 ans.

Contrairement à l'ouïe et à l'odorat, la vue, comme le toucher, était un sens actif : selon Platon, un «quid» (quelque chose) sortait de l'œil pour se diriger vers l'objet et le tâter. Euclide, puis Ptolémée, donnèrent les principales caractéristiques de ce rayon visuel émergeant de l'œil, notamment qu'il se propage en ligne droite.

L'OPTIQUE ARABE

Les Arabes abandonnent la notion de rayon visuel émis par l'œil au profit du rayon de lumière issu de l'objet et pénétrant dans l'œil. Né à Bassorah, en Irak, en 965, et mort au Caire, en 1039, Alhazen comprend que la réfraction est un phénomène fondamental en optique. Il donne les lois de la réflexion, et établit des lois qualitatives observées lors de phénomènes de réfraction. Son *Discours de la lumière* ne sera imprimé en Occident qu'en 1572. Jusqu'à la fin du XIV^e siècle, l'optique arabe aura une influence notable ; elle ne sera supplantée par l'optique de l'Occident qu'à la fin du XVI^e siècle.

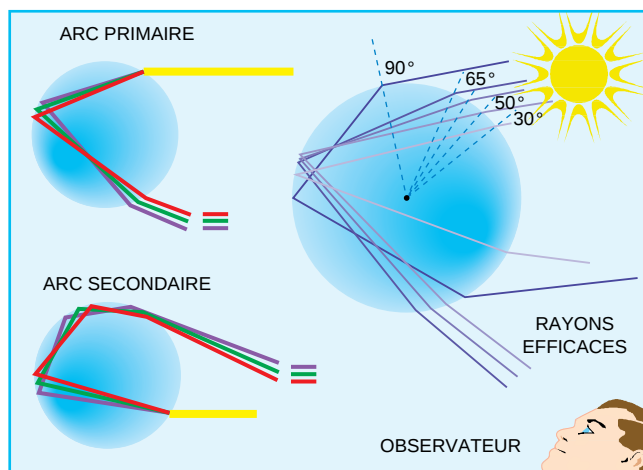
Ainsi, au XIII^e siècle, Robert Grosseteste, évêque de Lincoln et fondateur de l'école scientifique d'Oxford, s'intéresse à la réfraction. Il pressent que la réfraction est à l'origine des arcs-en-ciel, mais son interprétation est fautive. Il formule une loi erronée de la réfraction, où le rayon réfracté suit la bissectrice de l'angle formé par la normale et le rayon incident (depuis plusieurs siècles, Alhazen avait formulé une théorie plus élaborée). En 1266, constatant que des arcs-en-ciel apparaissent aussi dans des cascades, son disciple Roger Bacon émet l'idée que l'arc-en-ciel est produit par des réflexions dans les gouttes de pluie. Contrairement à Grosseteste, il ne mentionne pas la réfraction dans les causes possibles d'un arc-en-ciel.

À la même époque, à la fin du XIII^e siècle, le physicien et philosophe polonais Vitellion, reprend les hypothèses d'Alhazen et montre que la déviation des rayons lumineux par la réfraction est d'autant plus importante que le milieu est dense. Il comprend que ce phénomène intervient dans la formation des arcs-en-ciel. Son œuvre, méconnue, ne sera publiée qu'en 1572, en même temps que celle d'Alhazen.

C'est un autre dominicain, le moine Thierry de Freiberg (1250-1310), qui observe la réfraction à l'aide de flacons



La théorie de l'arc-en-ciel n'a été élucidée qu'à la fin du xx^e siècle. Pourtant Descartes avait compris que les rayons du Soleil qui traversent les gouttes de pluie et subissent une réfraction donnent



un arc primaire ; ceux qui subissent deux réfractions sont la cause de l'arc secondaire. Un observateur ne voit que les rayons dont l'angle d'incidence est proche de 59 degrés.

de verre remplis d'eau, assimilés à des gouttes de pluie fortement grossies. Il retrouve l'ensemble des phénomènes qui produisent un arc-en-ciel : le déplacement rectiligne des rayons du Soleil, les réflexions et les réfractions qu'ils subissent, la valeur de l'angle où apparaissent le phénomène et les différentes couleurs. Selon lui, les couleurs résulteraient du mélange de deux qualités, l'éclat et l'obscurité. Toutefois, ces résultats ont été peu diffusés.

Né à Messine en 1494, Francesco Maurolico fut moine dans un monastère isolé des Pouilles. Son œuvre, *Photismi de lumine et umbra* (Lumières sur la lumière et sur l'ombre), achevée en 1567, est considérée comme le meilleur ouvrage d'optique du xvi^e siècle. Il y traite notamment de la formation de l'arc-en-ciel. Il considère que la lumière se réfléchit sur la partie extérieure convexe et sur la partie intérieure concave des gouttes d'eau. Toutefois, cet ouvrage eut une influence minime, car il ne fut publié qu'en 1601.

La théorie de l'arc-en-ciel a été ébauchée au début du xvii^e siècle, par Marc Antonio De Dominis, évêque de Spalatro. En captant les rayons du Soleil dans un ballon rempli d'eau dont il modifie la hauteur, il forme des arcs-en-ciel sur les murs de son laboratoire. En observant le parcours des rayons lumineux dans le ballon, il montre que les rayons du Soleil sont réfractés en pénétrant dans une goutte d'eau ; ils sont réfléchis par le fond de la goutte qui se comporte comme un miroir concave ; ils ressortent de la goutte en subissant une nouvelle réfraction.

En 1604, Johannes Kepler publie un supplément à Vitellion ; il répond à presque toutes les questions anciennes, mais ne parvient pas à établir la loi de la réfraction. Toutefois, Kepler amorce

la démarche qui sera reprise avec succès, quelques années plus tard, par Descartes. En considérant l'œil comme une sphère, il calcule les chemins optiques sous différentes incidences.

LA THÉORIE CLASSIQUE

En 1637, René Descartes reprend la théorie de De Dominis et la complète. Il montre qu'un arc-en-ciel résulte des lois de la réflexion et de la réfraction. Il établit que le rapport des sinus de l'angle d'incidence et de réfraction est constant quel que soit l'angle d'incidence (la loi avait déjà été établie, vers 1620, par le Hollandais Willebrod Snell, aussi nommé Snellius). Les rayons lumineux issus du Soleil supposé ponctuel arrivent parallèlement en différents points de la goutte de pluie, qu'ils abordent sous plusieurs angles d'incidence.

Les rayons qui subissent une seule réflexion donnent l'arc primaire ; l'arc secondaire, extérieur, est produit par une double réflexion à l'intérieur des gouttes. Tous les rayons incidents ne sont pas efficaces, c'est-à-dire visibles par l'observateur : seuls les rayons qui arrivent sous une incidence proche de 59 degrés pour l'arc primaire et de 71 degrés pour l'arc secondaire le sont.

Enfin, Isaac Newton donne une explication satisfaisante de la coloration de l'arc-en-ciel. En expérimentant avec des prismes, il montre que la lumière blanche est un mélange de couleurs, et que chaque couleur a un indice de réfraction différent.

Un rayon lumineux provenant du Soleil est réfracté à l'entrée et à la sortie de la goutte, ce qui sépare les rayons monochromatiques composant la lumière solaire. L'effet de chaque goutte est transitoire, mais la permanence du phénomène s'explique par la succession rapide

des gouttes de pluie. Si la théorie de Descartes et de Newton explique la décomposition de la lumière, elle ne justifie pas la présence des arcs surnuméraires, qui apparaissent vers l'intérieur de l'arc-en-ciel, du côté lumineux de l'arc primaire.

Thomas Young en trouva l'explication en 1803 : il montra que la superposition de plusieurs ondes peut provoquer un renforcement ou une atténuation de l'intensité lumineuse, c'est-à-dire que les ondes peuvent interférer. Ainsi, deux rayons déviés dans la même direction par une goutte d'eau interfèrent soit positivement, soit négativement, donnant naissance à une série de bandes alternativement sombres et brillantes. L'aspect des arcs surnuméraires dépend de la taille des gouttes, et l'on distingue rarement de tels arcs quand le diamètre des gouttes dépasse un millimètre.

Aujourd'hui, quatre théories coexistent et expliquent les différents phénomènes observés lors d'un arc-en-ciel : la théorie «classique» de Descartes, Newton et de Young qui s'applique pour les grosses gouttes d'eau (supérieures à un millimètre) ; celle de Georges Biddel Airy, datant de 1838, pour les gouttes dont le diamètre est supérieur à 0,1 millimètre ; celle de Gustav Mie, élaborée en 1908, est fondée sur les équations électromagnétiques de Maxwell : elle est «exacte», mais lourde ; enfin, la théorie du moment cinétique complexe, établie par Vijay Khare, en 1975, donne des résultats très proches de ceux de Mie, tout en s'affranchissant des longs calculs informatiques.

Jean-Louis Ricard est chercheur, à Météo-France, à Toulouse.

Fraîches couleurs

Comment éviter le noircissement des fruits et des légumes.

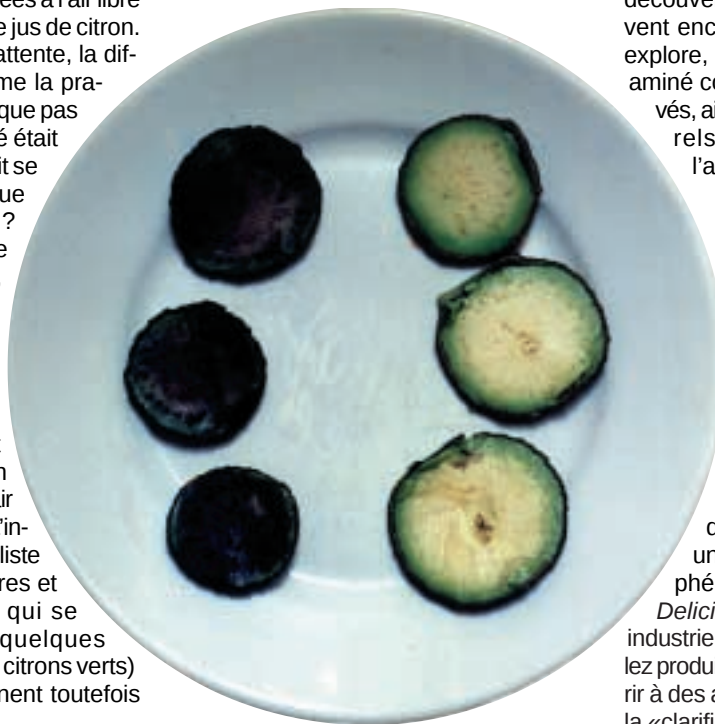
Le temps des légumes est revenu ; leur couleur tendre est gage de leur fraîcheur. Hélas à peine émincés, avocats, salsifis ou champignons noircissent. Comment éviter cette dégradation ? Comment servir des jus de pommes pressés maison qui ne s'assombrissent pas entre la cuisine et la table ? Cuisinières et cuisiniers préconisent le citron dont le jus, disent-ils, préviendrait l'apparition de couleurs associées à la surmaturation, à l'endommagement ou à la pourriture des végétaux. Leur recommandation est-elle fondée ?

Mettons-la à l'épreuve : comparons des rondelles d'avocat laissées à l'air libre à des rondelles arrosées de jus de citron. Après quelques heures d'attente, la différence, manifeste, confirme la pratique culinaire, mais n'explique pas l'effet protecteur. Si l'acidité était en cause, le vinaigre devrait se substituer au citron... ce que réfute l'expérience. Alors ? Le citron renferme de l'acide ascorbique, ou vitamine C, qui est un composé antioxydant. Autrement dit, de l'acide ascorbique pur (on en trouve en pharmacie) devrait être plus efficace que le jus de citron : c'est bien le cas. En outre, on observe que l'oxygène de l'air participe au brunissement. L'industrie peut-elle allonger la liste empirique que les cuisinières et cuisiniers ont établie et qui se résume au jus de quelques agrumes (citrons, oranges, citrons verts) et aux saumures, qui donnent toutefois un goût salé ?

Le brunissement des végétaux est dû à des enzymes nommées polyphénoloxydases, qui modifient les molécules de polyphénol (un centre benzénique, à six atomes de carbone disposés aux sommets d'un hexagone, auquel sont liés plusieurs groupes hydroxyle OH) des fruits et des légumes. En présence d'oxygène, ces enzymes remplacent les groupes hydroxyle par des atomes d'oxygène, puis les quinones ainsi formées réagissent, engendrant des pigments bruns de la même famille que la mélanine (qui se forme quand nous bronçons). Ce brunissement enzymatique, qui défend appa-

remment les plantes contre les ravageurs, fait rage dans la plupart des fruits, des feuilles et dans de nombreux champignons ; il ne sévit pas dans les végétaux intacts, parce que les enzymes et les polyphénols sont séparés par des membranes.

Divers traitements physiques évitent le brunissement des légumes et fruits qui sont émincés, ce qui est fréquemment leur lot, en cuisine : la congélation ou la réfrigération ralentissent l'action des enzymes, mais ne la bloquent pas ; la pasteurisation est plus radicale, car elle dégrade les enzymes, mais elle ne s'applique pas à tous les fruits et légumes, car



Laissés à l'air libre, des morceaux d'avocat

elle dégrade souvent la texture ou la couleur des végétaux. Enfin le conditionnement en l'absence d'oxygène évite l'apparition des composés bruns ; l'industrie procède parfois sous atmosphère d'azote ou de dioxyde de carbone.

Revenons à la chimie : n'existe-t-il pas des inhibiteurs qui, en proportion infime, préviendraient le brunissement enzymatique ? Dix micromoles par litre d'acide salicylhydroxamique inhibent complète-

ment les polyphénoloxydases des pommes ou des pommes de terre, par exemple ; et la bentonite, une argile qui absorbe les protéines, réduit l'activité polyphénoloxydase des vins ; la gélatine, le charbon actif ou la polyvinylpolypyrrolidone extraient aussi des phénols solubles des vins et des bières, mais ils modifient les propriétés des produits.

Employés dans l'industrie agro-alimentaire, les sulfites évitent le brunissement en se liant aux quinones et en formant des sulfoquinones incolores : le dioxyde de soufre et le métabisulfite de sodium sont un outil courant des producteurs de vin, par exemple, mais ils ont des effets secondaires qui préoccupent les autorités sanitaires : aux bénignes migraines causées par les vins excessivement sulfités s'ajoutent des crises d'asthme ou d'urticaire, des nausées, voire des chocs anaphylactiques. La recherche d'autres inhibiteurs aussi efficaces et sans inconvénient s'impose.

De nombreux inhibiteurs ont été découverts ou synthétisés, mais ils doivent encore prouver leur innocuité. On explore, par exemple, la cystéine, acide aminé contenant du soufre, et ses dérivés, ainsi que bien des composés naturels (dans le miel, les figues ou l'ananas) ou de synthèse.

En France, Jacques Nicolas, au CNAM, et ses collègues de la Station INRA de Montfavet explorent une voie nouvelle : l'utilisation de cyclodextrines, des molécules en forme d'abât-jour qui évitent le brunissement en extrayant les polyphénols dans leur cavité centrale. J. Nicolas et ses collègues ont d'abord analysé l'effet anti-brunissement de ces molécules dans des solutions modèles contenant un ou deux phénols et de la polyphénoloxydase de la pomme *Red Delicious*. En attendant l'application industrielle de leurs résultats, si vous voulez produire un jus de pommes sans recourir à des atmosphères inertes, recourez à la «clarification», qui consiste à laisser le brunissement se produire ; comme les polyphénoloxydases des pommes se trouvent dans le chloroplaste des cellules, elles restent dans les débris solides, qui noircissent, s'agrègent et sédimentent. Laissez alors reposer le jus avant de decanter le liquide ambré et clair.

Hervé THIS

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 29 mai 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.