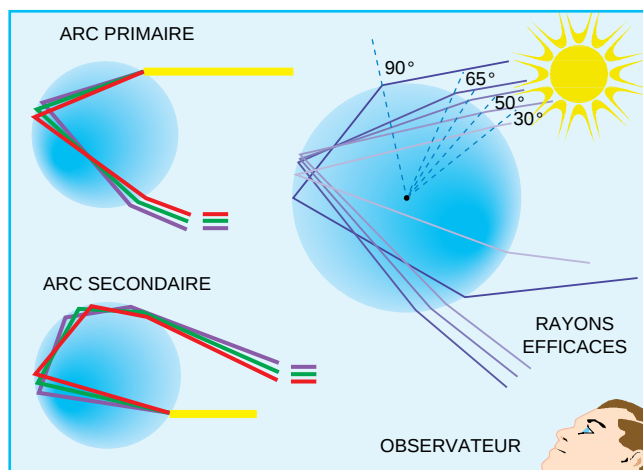




La théorie de l'arc-en-ciel n'a été élucidée qu'à la fin du xx^e siècle. Pourtant Descartes avait compris que les rayons du Soleil qui traversent les gouttes de pluie et subissent une réfraction donnent



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.

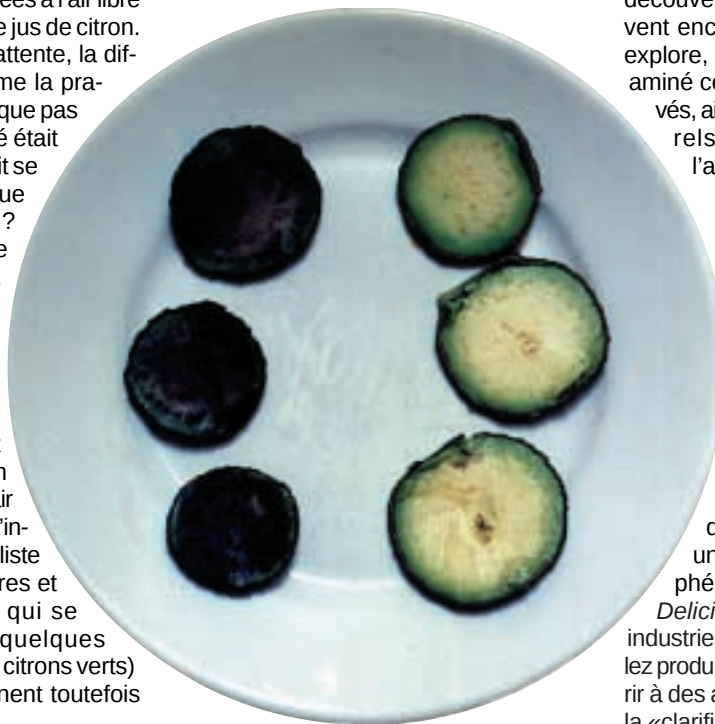
Le temps des légumes est revenu ; leur couleur tendre est gage de leur fraîcheur. Hélas à peine émincés, avocats, salsifis ou champignons noircissent. Comment éviter cette dégradation ? Comment servir des jus de pommes pressés maison qui ne s'assombrissent pas entre la cuisine et la table ? Cuisinières 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.

Une armée de métier adaptable

Les fourmis ajustent à la menace les effectifs des ouvrières combattantes.

Comme l'abeille, la fourmi est un insecte social, c'est-à-dire qu'elle vit en colonies, réparties en castes spécialisées. Cette division du travail accroît l'efficacité du groupe. Dans les sociétés de fourmis, les rôles sont distribués entre les reines fertiles, qui assurent la reproduction, et les ouvrières stériles, qui sont au service de la communauté.

Luc Passera et ses collègues du Laboratoire d'éthologie de l'Université Paul Sabatier, à Toulouse, et Laurent Keller et son équipe de l'Institut d'écologie de l'Université de Lausanne ont montré que les effectifs des castes ne sont pas figés : ainsi le nombre des «soldats» augmente quand les colonies de fourmis du genre *Pheidole* se sentent menacées.

Chez ces fourmis, très répandues dans les régions tempérées et notamment dans le midi de la France, les ouvrières adultes sont de deux types : les ouvrières minores de petite taille, et les ouvrières majors de grande taille, les soldats. Les ouvrières majors se différencient des ouvrières minores par la taille de leur tête, qui est armée de mandibules puissantes. Elles ont pour rôle de défendre la colonie.

Dans l'espèce *Pheidole pallidula*, un mécanisme de régulation sociale maintient quasi constantes les proportions de

soldats et d'ouvrières minores : les soldats représentent entre 5 et 30 pour cent de la colonie. Ces proportions semblent le meilleur compromis, assurant à la fois une protection minimale contre un prédateur potentiel et la croissance de la population, puisque les ouvrières minores assurent diverses activités sociales, telles que la «puériculture», le forage des galeries, la construction des nids ou encore la récolte de la nourriture.

Or, L. Passera et L. Keller ont été les premiers à montrer que ces proportions ne sont pas immuables et que les fourmis *Pheidole pallidula*, mises en alerte par toute menace d'agression, décrètent un état d'urgence qui se traduit par une augmentation du nombre de soldats.

Pour le montrer, ces biologistes ont étudié deux colonies de *Pheidole pallidula* étrangères, c'est-à-dire prélevées sur deux fourmilières différentes : ils les ont désarmées en éliminant tous les soldats. Les deux colonies ont été placées dans un couloir de circulation, de part et d'autre d'une grille qui interdisait toute intrusion ou toute attaque directe. Les fourmis ne pouvaient se toucher qu'avec leurs antennes ou leurs pattes. Se sentant menacées par les étrangères, elles réagirent en élevant deux fois plus de soldats que des fourmis témoins élevées sans menace. Comment cette

mobilisation se produit-elle ? Les ouvrières, qu'elles soient des soldats majors ou des fourmis minores passent toutes par les mêmes stades larvaires et la différenciation n'a lieu qu'au cours du dernier stade qui précède la nymphose (la larve se transforme en nymphe, laquelle donne l'insecte). Ainsi, les fourmis ne deviennent soldats ou simples ouvrières qu'au dernier moment et c'est la taille de la larve qui est le facteur déterminant. Pour que ces larves atteignent la taille qui fera de l'insecte à naître un soldat, les fourmis les suralimentent et leur administrent un régime riche en protéines.

UNE STRATÉGIE COÛTEUSE

Cette stratégie de défense a plusieurs conséquences pour la colonie : la production de soldats est lente, car il faut environ sept semaines pour les fabriquer, et elle est coûteuse, puisqu'il faut nourrir davantage les larves. Enfin, comme davantage de larves deviennent des soldats, le nombre d'ouvrières minores diminue : la colonie se défend bien, mais elle se dépeuple.

Une autre attitude consisterait à redistribuer les tâches entre les fourmis déjà actives dans la colonie, mais les tâches sont très spécifiques et le comportement des fourmis peu flexible. Toutefois, si, en temps de paix, les soldats sont presque inactifs et représentent une sorte de luxe, ils sont beaucoup plus efficaces que les minores en temps de guerre. En raison de leur taille, ils assurent une défense passive du nid en bloquant l'entrée ; en cas d'intrusion, ils portent, avec leurs mandibules, des morsures fatales aux étrangères immobilisées par plusieurs ouvrières minores. Ainsi les fourmis s'imposent un «effort de guerre» pour adapter au mieux leurs caractères physiques à la tâche.

Reste à découvrir le signal qui déclenche la production de soldats : il s'agirait d'une phéromone, une molécule-signal transmise par contact (quand on supprime toute possibilité de contact entre les deux espèces, les fourmis ne se sentent pas menacées). Contrairement aux fourmis d'une même fourmilière, celles de deux fourmilières différentes émettent des hormones différentes (même si elles sont de la même espèce). Les fourmis qui surveillent l'entrée de la colonie détecteraient cette molécule par contact avec l'intrus, transmettraient l'information au reste de la colonie, qui déciderait de suralimenter les larves pour produire des soldats au lieu d'ouvrières.

Marie-Thérèse LANDOUSY



Fourmis majors soldats entourées d'ouvrières minores.