



4. KAMERLINGH ONNES, en 1922, dessiné par son neveu, Harm Kamerlingh Onnes.

J. de Nobel, un jour, un étudiant de l'école de fabrication d'instruments qui commande la régulation d'un manomètre relié au liquéfacteur s'endort, et laisse la pression augmenter lentement : la température augmente aussi. Lorsque celle-ci passe à 4,2 kelvins, Holst voit l'aiguille du galvanomètre dévier brusquement : la résistance vient de réapparaître.

Holst a ainsi observé par hasard, pour la première fois, la transition du mercure de l'état que Kamerlingh Onnes nomme alors supraconducteur à l'état de conducteur ordinaire. Ces expériences ont convaincu Kamerlingh Onnes que la résistance du mercure s'annule vers 4,2 kelvins : il publie cette découverte en novembre 1911. Des expériences ultérieures sur l'étain et le plomb montrent que la supraconduction est une propriété de nombreux métaux à très basse température.

En 1914, Kamerlingh Onnes établit, dans une bobine supraconductrice en plomb, un courant permanent qu'il nomme supracourant persistant. La bobine est placée dans un cryostat qui contient de l'hélium liquide, et le courant est induit par un champ magnétique externe. En l'absence de résistance, les électrons circulent indéfiniment dans la bobine. Après avoir observé ce courant, le physicien austro-néerlandais Paul Ehrenfest écrit au prix Nobel de physique Hendrik Lorentz : «L'action de ces courants "permanents" sur une aiguille magnétique est troublante. Vous sentez de façon presque tangible comment l'anneau d'électrons dans le fil tourne en rond encore et encore – lentement, et sans friction.»

Kamerlingh Onnes meurt en 1926. Une affection des bronches l'obligeait depuis longtemps à de longs séjours de convalescence en Suisse. Son absence physique ne l'empêchait apparemment pas de diriger son équipe. Il aurait même continué après sa mort : son service funéraire ayant duré plus longtemps que prévu, la procession dû courir à travers la ville pour être à l'heure pour l'enterrement dans le petit village voisin de Voorschoten. Alors que le cortège se dépêchait, Flim aurait remarqué : «C'est bien dans les façons du vieil homme – il continue à nous faire courir.»

Kamerlingh Onnes croyait fermement que la supraconduction aurait des applications pratiques. Il avait pourtant découvert qu'un champ magnétique, même très faible, détruit la supraconduction. Dans les métaux qu'il a étudiés, le supracourant est limité à de petites intensités : le champ magnétique associé à un courant d'intensité suffisante empêche la supraconduction. Des matériaux supraconducteurs pour de grandes intensités de courant n'ont été découverts, fabriqués et utilisés dans des appareillages, par exemple pour l'imagerie médicale par résonance magnétique, qu'un demi-siècle après sa mort. Les matériaux supraconducteurs les plus récents permettront peut-être des applications telles que la lévitation magnétique des trains et le transport du courant électrique sans pertes.

Rudolf de BRUYN OUBOTER est professeur de physique expérimentale au Laboratoire Kamerlingh Onnes de Leyde.

Kurt MENDELSSOHN, *The Quest for Absolute Zero : The Meaning of Low-Temperature Physics*, Taylor and Francis, 1977.

Rudolf de BRUYN OUBOTER, *Superconductivity : Discoveries during the Early Years of Low Temperature Research at Leiden. 1908-1914*, in *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. Mag-23, n° 2, pp. 355-370, mars 1987.

Bruce SCHECHTER, *The Path of No Resistance : The Story of the Revolution in Superconductivity*, Simon & Schuster, 1989.

Gianfranco VIDALI, *Superconductivity : The Next Revolution ?*, Cambridge University Press, 1993.

J. MATRICON et G. WAYSAND, *La guerre du froid*, éditions du Seuil, 1994.

Jacobus de NOBEL, *The Discovery of Superconductivity*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 9, pp. 40-42, septembre 1996.

L'UNIVERS DES SCIENCES

L'UNIVERS DES SCIENCES

LES ÉTOILES

Vie et mort des soleils lointains

JAMES KALER



LES ÉTOILES

Ce livre expose l'origine et la nature de nos connaissances sur les étoiles, avant de les décrire dans leur dynamique et leur devenir. Les objets célestes les plus insolites, géantes rouges, supernovae, pulsars et trous noirs, s'insèrent alors naturellement dans le récit de l'évolution stellaire.

272 pages - 220 F
code 1892

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p.98

Des plantes à sang chaud

ROGER SEYMOUR

Certaines fleurs dégagent une grande quantité de chaleur lorsqu'elles fleurissent. Quelques-unes d'entre elles règlent même leur température dans d'étroites limites, comme des animaux à sang chaud.

Au printemps 1972, à Los Angeles, le zoologiste George Bartholomew organisa une soirée pour ses étudiants et ses collègues. Un de ses invités, Daniel Odell, cheminait avec les autres quand il remarqua quelques fleurs spectaculaires : elles étaient composées d'une structure d'aspect phallique, longue d'une vingtaine de centimètres, qui était partiellement enveloppée d'une structure ressemblant à une feuille. Intrigué, D. Odell en cueillit une pour nous la montrer : la fleur était chaude ! Mieux encore, la température de cette fleur augmenta progressivement, jusqu'à devenir supérieure à celle du corps humain. Les zoologistes que nous étions furent ébahis : comment une simple plante osait-elle atteindre une température supérieure à celle des fleurons de l'évolution, les animaux à sang chaud ?

Depuis ce jour, je suis à la chasse des plantes «à sang chaud» et je les analyse dès que je peux ravir quelques heures à mon programme de recherches sur les animaux. Nous avons notamment découvert quelques plantes capables de produire autant de chaleur par unité de masse que des oiseaux et des insectes en vol,

qui sont pourtant les plus grands producteurs de chaleur. En outre, certaines de ces plantes règlent leur température tout comme le font les oiseaux ou les mammifères ; elles peuvent même ajuster leur production de chaleur et conserver une température aussi constante que possible malgré les fluctuations de la température de l'air.

Nous n'avons pas été les premiers à découvrir que certaines plantes dégagent de la chaleur : en 1778, Jean-Baptiste de Lamarck avait signalé qu'un arum européen (probablement *Arum italicum*) devenait chaud lorsqu'il fleurissait. Cette plante fait

partie de l'immense famille des aracées, qui comprend les philodendrons tels ceux que nous avons observés, l'arum à capuchon (*Arisaema triphyllum*), le chou aux mouffettes et bien d'autres plantes familières. Dans cette famille des arums, la partie florale est nommée spadice ; ce n'est pas une vraie fleur, mais plutôt une «inflorescence», c'est-à-dire une grappe de petites fleurs ou fleurons. Le spadice des arums, avec ses centaines de fleurons regroupés sur une tige commune, est partiellement enveloppé d'une grande bractée, ou feuille spécialisée, nommée spathe.

Après Lamarck, les botanistes ont découvert plusieurs autres aracées et des plantes d'autres groupes qui possèdent également la capacité de s'échauffer : nénuphar de l'Amazonie, goyave, certains palmiers et certaines cycadées. Plusieurs botanistes, tel Bastiaan Meeuse, de l'Université de Washington, ont en partie révélé le mécanisme de la production de la chaleur par les cellules végétales.

Chez les arums, deux voies biochimiques sont simultanément activées dans les mitochondries, qui sont les organites intracellulaires assurant la production d'énergie des cellules. Une de ces deux voies seulement est sensible aux ions cyanure, composés d'un atome de carbone lié à un atome d'azote ; elle est commune aux animaux et aux plantes. L'autre voie métabolique, insensible à ce poison, existe chez les plantes productrices de

Philodendron selloum

Température de la fleur :

38 à 46°C

Pour des températures de l'air comprises entre 4 et 39 °C

Durée de la période de régulation :

18 à 24 heures



1. ON CONNAÎT TROIS PLANTES qui règlent leur température : *Philodendron selloum*, *Symplocarpus foetidus* (le chou des mouffettes) et *Nelumbo nucifera* (le lotus sacré).

chaleur, chez certaines autres plantes, chez des champignons et chez certains organismes unicellulaires. Dans les deux cas, l'énergie provient de diverses molécules énergétiques et d'oxygène, qui réagissent en formant une molécule riche en énergie nommée ATP (adénosine triphosphate) ; la décomposition ultérieure de celle-ci fournit l'énergie indispensable aux diverses activités cellulaires ou à la production de chaleur. On ignore toutefois si l'échauffement des cellules d'arums s'effectue par synthèse, puis dégradation d'ATP, ou si la chaleur est directement libérée par les voies métaboliques, sans production intermédiaire d'ATP.

Un philodendron à sang chaud

Nous avons d'abord étudié *Philodendron selloum* d'un tout autre point de vue : au lieu d'examiner des cellules ou des molécules individuelles, comme l'avaient fait la plupart des botanistes, nous avons étudié les inflorescences comme si elles étaient un animal complet. Comme G. Bartholomew et ses collègues de l'Université de Los Angeles effectuaient des études comparatives de la production de chaleur et de la régulation de la

température corporelle chez les animaux, nous disposions de toutes les méthodes et de tous les équipements requis. Nous avons également le matériel végétal à portée de main : de nombreux philodendrons étaient en fleur juste sous les fenêtres du laboratoire.

Nous avons d'abord vérifié que les inflorescences devenaient aussi chaudes qu'il nous l'avait semblé lors de la soirée donnée par G. Bartholomew : nous avons planté des sondes dans les spadices et relié celles-ci à un ordinateur qui enregistrait en continu les températures mesurées. Alors que la température de l'air extérieur était en moyenne de 20 °C, celle des spadices était proche de 40 °C!

Comme nous ne maîtrisons pas les variations de température à l'extérieur, nous avons coupé quelques spécimens et les avons placés dans des logettes climatisées où nous pouvions régler la température. De la sorte, nous pouvions, en outre, déterminer la production de chaleur par la mesure de la consommation d'oxygène, car ces deux phénomènes sont liés (chez les animaux, la consommation d'un centimètre cube d'oxygène s'accompagne d'une production de chaleur de 20 joules).

Nous avons alors examiné ces inflorescences à des températures variées, inférieures à 0 °C aussi bien que supérieures à 50 °C. Si certaines de ces inflorescences ne parvenaient pas à se réchauffer aux températures les plus basses, leur température atteignait 38 °C quand la température ambiante était seulement de 4 °C. Aux températures ambiantes supérieures à 4 °C, la température des inflorescences coupées continuait d'augmenter, mais avec une différence moindre entre la température ambiante et la température de la plante, la température des inflorescences atteignant 46 °C lorsque la logette climatisée était à la température de 39 °C.

Ainsi les philodendrons peuvent ajuster leur production de chaleur pour maintenir leurs inflorescences au chaud lorsque le temps est froid, mais aussi pour éviter une surchauffe quand il fait déjà chaud. Quelle surprise! Non seulement ces fleurs produisaient de la chaleur, comme les animaux, mais elles assuraient leur régulation thermique, tout comme les animaux à sang chaud tels que les oiseaux et les mammifères.

Deux ans après ces expériences, Roger Knutson, du Collège Luther, dans l'Iowa, signala que le spadice du chou aux mouffettes, *Sympllocarpus foetidus*, maintenait sa température entre 15 et 24 °C pendant au moins deux semaines,

vers la fin de l'hiver, alors que les températures étaient encore négatives (la plante serait même capable de faire fondre la neige autour d'elle).

Puis, en 1996, Paul Schultz-Motel et moi-même avons découvert que le lotus sacré, *Nelumbo nucifera*, maintient sa température aux alentours de 32 °C pendant deux à quatre jours au milieu de sa

période de floraison estivale, même lorsque la température de l'air est inférieure à 10 °C. Dans ce cas, c'est le réceptacle, la partie centrale de la fleur en forme de cône spongieux, qui produit l'essentiel de la chaleur. Le lotus sacré appartient à une famille botanique différente de celle du philodendron et du chou aux mouffettes, ce qui suggère que le phénomène de régulation thermique a évolué de manière indépendante chez le lotus et chez les arums.

À quoi sert la régulation de la température chez les plantes? Chez les oiseaux et chez les mammifères, la régulation de la température permet aux cellules de

Lotus sacré

Température de la fleur : 30 à 37 °C
Pour des températures de l'air comprises entre 10 et 35 °C
Durée de la période de régulation : deux à quatre jours





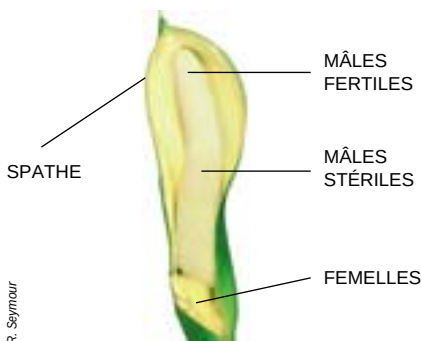
G. Gottsberger, University of Ulm



G. Bryce



G. Gottsberger, University of Ulm



R. Seymour

2. DES COLÉOPTÈRES assurent la pollinisation de *Philodendron selloum*. Les inflorescences, ou parties florales, de cette plante sont constituées de trois types de petites fleurs : des fleurons mâles fertiles, des fleurons mâles stériles et des fleurons femelles, qui se développent au bout d'une tige (*ci-contre*). Au cours de la période pendant laquelle la plante règle la température de son inflorescence, la structure en forme de feuille qui entoure l'inflorescence s'ouvre et laisse ainsi entrer les insectes qui accèdent aux fleurons (*en haut à gauche*). Les coléoptères déposent alors le pollen dont ils sont déjà chargés sur les fleurons femelles ; puis, lorsque la plante se refroidit, le spathe se replie, emprisonnant quelques-uns de ces visiteurs. Plus tard, la spathe se rouvre partiellement (*au centre*), et les fleurons mâles libèrent alors leur pollen. L'étroitesse de l'ouverture ainsi ménagée force les coléoptères à ramper à travers le pollen (*à droite*), qui se colle sur leur corps alors qu'ils partent vers d'autres inflorescences. Cette coïncidence entre les périodes de réchauffement de la plante et les périodes de reproduction conduit à penser que la régulation thermique du philodendron favorise l'attraction des coléoptères pollinisateurs.

fonctionner à une température optimale, où les réactions biochimiques sont coordonnées et efficaces. Les animaux qui ont le sang chaud et disposent d'une régulation thermique restent actifs et continuent de chercher leur nourriture quand le froid ralentit les réactions cellulaires et l'activité des animaux à sang froid, tels les reptiles. La forte production énergétique des tissus des oiseaux ou des mammifères dont le thermostat est réglé à une température élevée (proche de 40 °C) permet des exercices physiques prolongés, tels la course ou le vol. Pour les plantes, ces descriptions ne tiennent pas, et une autre explication doit être trouvée.

Les avantages de la régulation

Des botanistes avaient supposé que les arums et certaines autres plantes se chauffaient afin d'évaporer des substances odoriférantes qui auraient attiré des insectes pollinisateurs. Si l'hypo-

thèse explique que ces plantes dégagent de la chaleur, elle ne justifie pas pourquoi cette production de chaleur est augmentée ou diminuée selon la température ambiante. Nous proposons deux autres hypothèses pour expliquer comment certaines espèces de plantes ont progressivement été dotées d'une régulation thermique.

Tout d'abord, les plantes « à sang chaud » pourraient créer un environnement stable et chaud pour des insectes pollinisateurs qui faciliteraient ainsi la reproduction végétale. Chez les gros insectes qui transportent le pollen, le vol, les déplacements et les interactions sociales sont des activités qui nécessitent une température corporelle élevée, laquelle n'est maintenue qu'au prix d'une dépense énergétique importante. Les individus qui visitent des plantes « à sang chaud » profiteraient d'un chauffage directement fourni par la plante ; ils mangeraient, digéreraient, s'accoupleraient et vaqueraient à diverses occupations sans gaspiller leur propre

énergie pour maintenir leur température corporelle. D'autre part, on peut également imaginer que la fleur elle-même ait besoin d'une température constante pour développer ses structures reproductrices ou pour protéger ses parties sensibles des dommages qui résulteraient d'une production de chaleur incontrôlée.

Chacune de ces deux hypothèses expliquerait pourquoi des plantes règlent leur température. Toutefois les interactions de *Philodendron selloum* et des insectes pollinisateurs sont en faveur de la première solution. Gerhard Gottsberger, de l'Université d'Ulm, a étudié une telle interaction au Brésil, d'où cette plante est originaire.

L'inflorescence de *Philodendron selloum* comporte trois types de fleurons. À la partie supérieure, des fleurons mâles fertiles produisent du pollen ; à la base de l'inflorescence, les fleurons femelles produisent les fruits après fécondation ; entre les fleurons fertiles mâles et femelles, une

bande de fleurons mâles stériles fournit la nourriture aux insectes pollinisateurs et est également la partie de l'inflorescence qui dégage le plus de chaleur rayonnée. La température est réglée pendant une période de 18 à 24 heures qui recouvre la période de réceptivité des fleurons femelles à la pollinisation. Pendant ces quelques heures, la spathe qui entoure le spadice s'ouvre, laissant les insectes pollinisateurs – essentiellement des coléoptères – accéder facilement aux fleurons chauds et stériles, où ils pourront puiser leur nourriture. Le spadice se refroidit ensuite, et la spathe se referme autour de lui, emprisonnant quelques coléoptères. Après une période d'environ 12 heures, une fois que les fleurons femelles ont été pollinisés, la fleur se réchauffe de nouveau et la spathe s'écarte partiellement. Les fleurons fertiles mâles libèrent alors leur pollen, qui vient se coller sur les

insectes ; ces derniers s'échappent et vont alors répéter ce cycle sur d'autres inflorescences. Un tel mécanisme favorise la pollinisation croisée et évite l'autofécondation, augmentant la diversité génétique de l'espèce et améliorant le succès de sa reproduction.

Tout comme *Philodendron selloum*, le lotus sacré maintient des températures élevées lorsque les stigmates femelles sont humides et réceptifs, avant que le pollen ne soit libéré. Le réchauffement commence avant l'ouverture totale des pétales et se termine une fois que la fleur a complètement éclos. Si la forme de cette fleur favorise également la pollinisation par les coléoptères, on ignore encore si la régulation thermique a évolué spécifiquement pour aider les coléoptères dans leur entreprise. En effet, on ignore l'habitat initial de cette plante et, de ce fait, on ignore si les coléoptères sont ses principaux pollinisa-

teurs dans cette région. En outre, la pollinisation de la fleur n'est pas exclusivement fondée sur les coléoptères : une fois que les pétales se sont entièrement ouverts et que la production de chaleur décroît, d'autres insectes peuvent faire leur office.

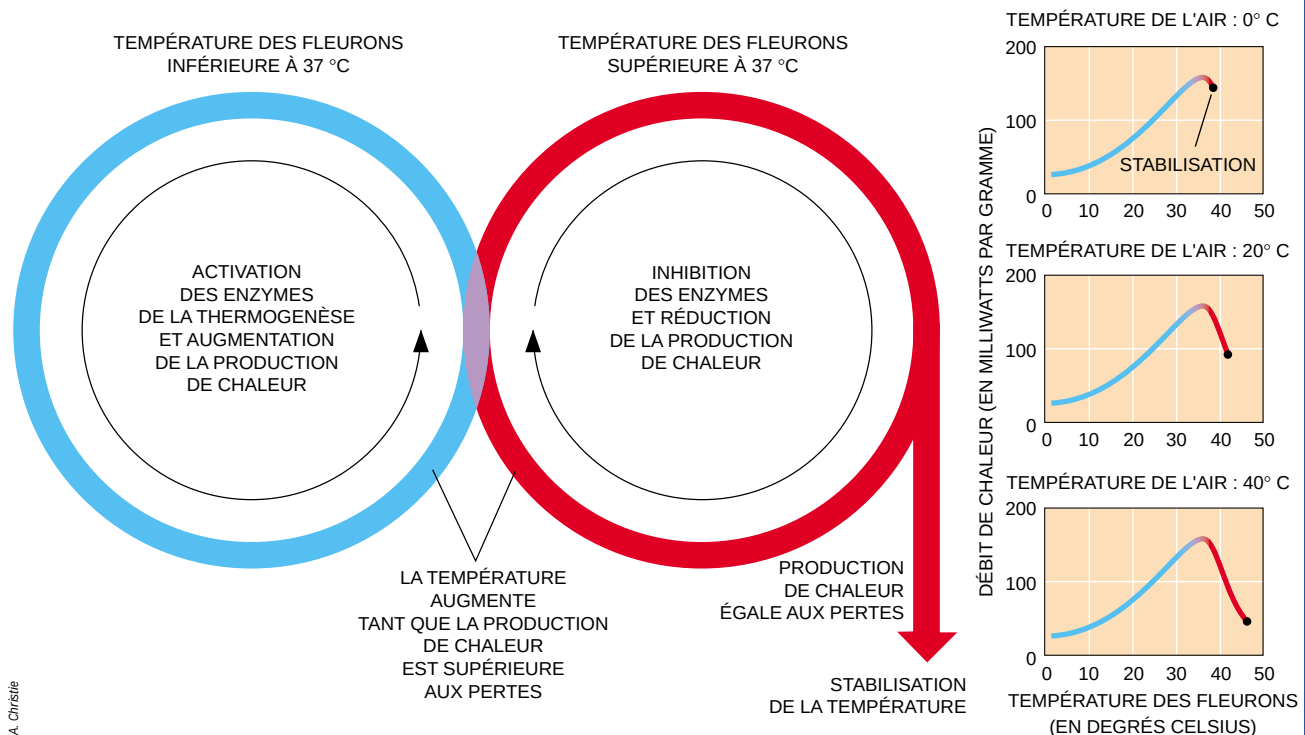
Comment fonctionne le philodendron

En matière de régulation thermique des plantes, la question du comment est aussi fascinante que celle du pourquoi ; c'est d'ailleurs le comment qui m'a le plus intéressé, quand j'ai commencé à étudier sérieusement les philodendrons. Pour aborder ce problème, nous avons fait équipe avec G. Bartholomew et Christopher Barnhart, au début des années 1980 ; la réponse était loin d'être évidente, car les plantes fonctionnent très différemment des animaux.

Comment *Philodendron* stabilise sa température

Les inflorescences de *Philodendron selloum* stabilisent leur température grâce au thermostat de leur fleurons mâles stériles réglé à 37 °C (diagramme). Quand la température des fleurons devient inférieure à cette température, les fleurons augmentent leur production de chaleur (cycle de gauche). Tant que la production de chaleur est supérieure aux pertes, la température des fleurons augmente. Quand la température des fleurons est supérieure à 37 °C (cycle de droite), les enzymes nécessaires à la thermogenèse s'inactivent progressivement. Cette inhibition conduit

à une diminution de la thermogenèse qui se poursuit jusqu'à ce que la quantité de chaleur dégagée soit égale à la quantité de chaleur perdue. La température finale des fleurons dépend de la température ambiante (courbes à droite) ; quand l'air est frais, les fleurons perdent rapidement la chaleur, de sorte qu'ils la produisent rapidement, et leur température se stabilise vers 37 °C. Quand la température ambiante est élevée, les fleurons perdent moins de chaleur, de sorte qu'ils en produisent moins et que leur température se stabilise vers 46 °C.



Chez ces derniers, la régulation thermique est complexe : elle nécessite la présence de capteurs de température dispersés sur tout le corps, et un système nerveux qui intègre toutes les informations et qui envoie ensuite les commandes indispensables aux diverses parties du corps pour qu'elles modifient leur température. Par exemple, le système nerveux commande le gonflement des plumes ou le hérississement des poils, en réaction à un refroidissement : ainsi l'organisme augmente l'isolation thermique et réduit les pertes de chaleur. Comme cette stratégie a des limites, les animaux doivent également augmenter leur production de chaleur lorsque leur environnement devient trop froid : ils frissonnent alors, faisant ainsi fonctionner leurs muscles pour leur faire consommer de l'ATP ; simultanément le rythme respiratoire et la vitesse de circulation du sang augmentent pour accélérer l'apport des substances nutritives et de l'oxygène aux tissus producteurs de chaleur.

Toutefois les plantes n'ont ni fourrure, ni plumes, ni système nerveux, ni muscles, ni poumons, ni sang, ni cerveau. Comment le philodendron se réchauffait-il ou se refroidissait-il, alors, dans une gamme de températures comprise entre 38 et 46 °C ?

Nous avons d'abord cherché quelle partie de l'inflorescence produisait la chaleur : nous avons séparé les fleurons des divers types de la tige qui les porte et avons mesuré la consommation d'oxygène pour chaque type. Ces mesures ont révélé que les fleurons mâles stériles étaient ceux qui consommaient la plus grande partie de l'oxygène fourni ; les fleurons mâles fertiles en consommaient un peu, et les fleurons femelles, comme la tige, quasiment pas. Des études ultérieures confirmèrent que la régulation thermique de l'inflorescence et montrèrent que les fleurons peuvent très bien se passer des systèmes complexes de régulation de la température dont disposent les animaux, car ils contiennent leurs propres thermostats, leurs propres sources d'approvisionnement en nourriture et leur propre dispositif de captation de l'oxygène.

Pour démontrer l'existence des thermostats, nous avons enlevé les fleurons mâles stériles du spadice et avons placé ces fleurons isolés dans des incubateurs réglés à des températures fixes. Livrés à eux-mêmes, les fleurons n'interagissaient plus, de sorte que nous pouvions déterminer quelle la quantité de chaleur ils produisaient.

Les fleurons isolés dégageaient peu de chaleur lorsqu'ils étaient placés à une température proche de 0 °C, vraisemblablement parce que leurs enzymes nécessaires à la production de chaleur fonctionnent lentement à basse température. En revanche, à température supérieure, la production de chaleur variait, en fonction de la température ambiante, comme sur le spadice intact, où les fleurons gagnent quelques degrés supplémentaires en raison de la chaleur dégagée par leurs voisins. À mesure que les fleurons s'échauffent, leur vitesse de production de chaleur augmente, ce qui les réchauffe davantage : cette amplification a lieu jusqu'à ce que la température des fleurons atteigne 37 °C. Aux températures supérieures, les fleurons réduisent brusquement leur production de chaleur.

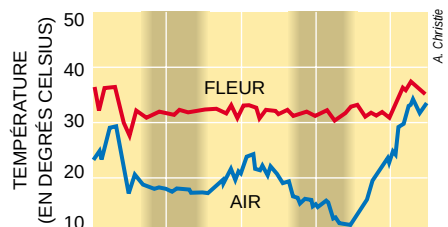
Ainsi les conditions environnementales déterminent l'amplitude de cette diminution. Si la température de l'air est voisine de 4 °C, les fleurons perdent rapidement leur chaleur, et leur température se stabilise vers 38 °C (avec une production intense de chaleur). En revanche, si l'environnement est chaud, par exemple à 39 °C, leur déperdition calorifique est ralentie et leur température se stabilise vers 46 °C (avec une production de cha-



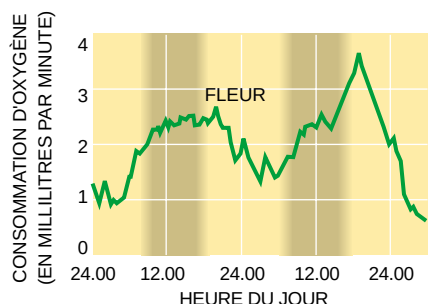
R. Seymour



R. Seymour

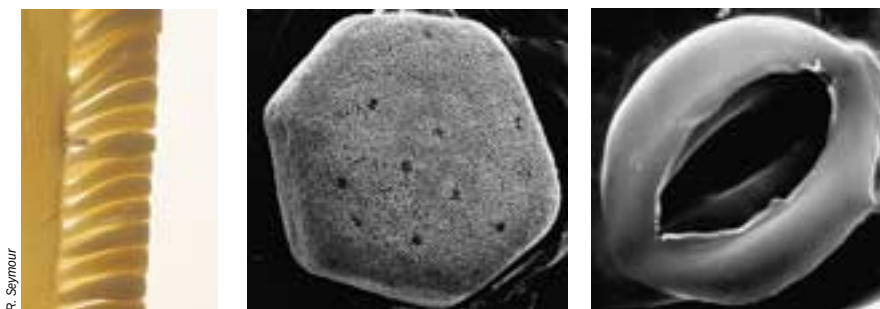


A. Christie



3. TOUS LES STADES DE LA FLORAISON du lotus sacré sont visibles sur la photographie centrale. La régulation de la température commence entre la formation du bouton (à droite du centre de la photographie) et l'épanouissement des pétales (à gauche), quand les insectes pénètrent dans la fleur. Elle se termine lorsque les pétales s'épanouissent entièrement (en haut). Après la pollinisation, les pétales tombent, et le réceptacle, qui contient les graines, commence à se développer. Ce réceptacle, la structure spongieuse jaune visible sur la coupe transversale de

la fleur (à gauche), est le principal organe générateur de chaleur. Les graphiques, qui indiquent la température de l'une des fleurs, montre comment le lotus sacré commande sa température. En effet, la température de sa fleur reste quasi constante (courbe supérieure) malgré les importantes variations de la température ambiante. De même, la fleur parvient à assurer une régulation en augmentant sa consommation d'oxygène (et, par conséquent, sa production de chaleur) lorsque l'air est froid et la réduit lorsque l'air se réchauffe (courbe inférieure).



4. LES FLEURONS STÉRILES du *Philodendron selloum* (à gauche) laissent pénétrer l'oxygène par des pores appelés stomates. Plusieurs stomates (taches sombres) sont visibles sur la micrographie de gauche, qui montre la pointe d'un fleuron. La micrographie de droite est un agrandissement d'un stomate isolé.

leur réduite). Le comportement thermique des fleurons est réversible : un fleuron qui a réduit sa production de chaleur aux heures chaudes du jour reprend celle-ci lorsque la température diminue, la nuit venue.

Apparemment la production de chaleur diminue d'elle-même dans les fleurons déjà chauds, parce que la température élevée inhibe les voies métaboliques responsables de la production de chaleur. On ignore encore si la chaleur agit directement sur les enzymes qui gouvernent ces voies de production, ou indirectement, en perturbant la structure des membranes sur lesquelles se fixent ces enzymes.

Un rendement record

Ayant déterminé comment le thermostat des fleurons réglait la production de chaleur, nous avons cherché comment les fleurons obtiennent l'oxygène et les substances nutritives nécessaires à la production de chaleur, et quelle quantité de chaleur ils produisent. Nos études antérieures avaient donné une estimation de la quantité de chaleur produite sur la base de la consommation d'oxygène, mais nous avons confirmé que toute l'énergie investie dans le réchauffement de l'inflorescence de *Philodendron selloum* est présente dans les fleurons (pour d'autres plantes capables de régulation thermique, tel le chou aux mouffettes, le combustible est importé de la racine). Puis nous avons constaté que les fleurs « brûlent » des graisses plutôt que des sucres comme le font les autres arums : les observations au microscope électronique des fleurons mâles ont révélé que leurs tissus contiennent des gouttelettes de matière grasse et de nombreuses mitochondries ; ainsi leur

structure ressemble remarquablement à celle du tissu adipeux brun, un tissu des mammifères qui est spécialisé dans la production de chaleur (dans l'espèce humaine, ce tissu n'est abondant que chez le nouveau-né). Les animaux comme les plantes utilisent généralement les mitochondries pour convertir en ATP la majeure partie de l'énergie qu'ils dérivent des substances nutritives ; mais, comme la graisse brune, l'inflorescence de *Philodendron selloum* utilise directement les nutriments et l'oxygène pour produire de la chaleur.

La thermogenèse de *Philodendron selloum* a un rendement énergétique exceptionnel : un spadice de 125 grammes produit environ neuf watts pour maintenir l'inflorescence à 40 °C à une température ambiante de 10 °C, soit la même puissance que celle rayonnée par un chat de trois kilogrammes, placé dans les mêmes conditions. Un rat pesant 125 grammes ne rayonne que deux watts, parce que, bien isolé par sa fourrure, il perd moins de chaleur et peut consacrer son énergie à d'autres fonctions.

Rapportée à la masse de l'organe, la production de chaleur par les fleurons de *Philodendron selloum* rapproche ces derniers des oiseaux et des insectes volants : avec une masse de huit milligrammes, ils fournissent 0,16 watt par gramme de tissu, contre 0,2 à 0,7 watt par gramme chez les oiseaux et les insectes volants. D'autres arums sont encore plus efficaces : *Arum maculatum* produit 0,4 watt par gramme de fleurons, soit à peine moins que la puissance de un watt par gramme produite par le tissu adipeux brun du hamster de Sibérie, ou de 2,4 watts par gramme des muscles du vol chez l'abeille, champion de la thermogenèse animale.

MUSCLE DU VOL DE L'ABEILLE

2,4

TISSU ADIPEUX BRUN
DU HAMSTER

1,0



0,4



ARUM MACULATUM

0,237



COLIBRI

0,16



FLEURON DU PHILODENDRON

0,016



RAT DE 125 GRAMMES À 10 °C

5. LE RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE (en watts par gramme) des arums – la famille de plantes à laquelle appartiennent *Philodendron selloum* et *Arum maculatum* – atteint des valeurs élevées, proches de celles qui caractérisent les muscles des ailes des abeilles ou les tissus de hamster spécialisés dans la production de chaleur (tissu adipeux brun).

Pour rayonner autant, *Philodendron selloum* doit s'approvisionner en oxygène : c'est un problème technique intéressant, car la plante n'a ni poumon, ni système circulatoire, ni régulation hormonale. Nous avons montré que les fleurons puisent l'oxygène par simple diffusion de l'air, qui en contient environ 21 pour cent. Comme la concentration en oxygène à l'intérieur des fleurons est inférieure à celle de l'air, l'oxygène diffuse des zones à forte concentration vers les zones à faible concentration. Nos expériences ont montré que la diffusion de l'oxygène ne ralentit que lorsque la concentration en oxygène, dans la couche d'air qui entoure le fleuron, devient inférieure à 17 pour cent. Cependant, en pratique, une telle concentration n'est jamais atteinte, même lorsque les fleurons ont une production maximale de chaleur.

Nos études anatomiques récentes ont indiqué comment l'oxygène pénètre dans les fleurons. Chacun d'eux mesure environ sept millimètres de long et 1,2 millimètre d'épaisseur

(soit environ la taille d'un grain de riz). L'oxygène s'introduit par quelque 170 pores ou stomates, puis se répartit dans un réseau de cavités interstitielles qui occupe moins de un pour cent du volume du fleuron. La distance de diffusion, entre la surface du fleuron et chacune des cellules, est un peu inférieure à 0,75 millimètre, ce qui est remarquablement proche de la longueur des canaux tubulaires remplis d'air qui assurent l'approvisionnement en oxygène des muscles de vol des insectes.

Nos travaux sur les plantes «à sang chaud» sont une excellente démonstration de l'intérêt de la pluridisciplinarité. Poussés par la curiosité, nous avons jeté un regard neuf sur des phénomènes inhabituels, sans être bloqués par les préjugés qui canalisent souvent la recherche. Sortant des sentiers battus, nous avons mis en évidence des ressemblances remarquables entre les animaux et les plantes, deux catégories d'organismes qui semblent n'avoir pas grand-chose en commun.

Roger SEYMOUR est professeur de zoologie à l'Université d'Adélaïde.

R.S. SEYMOUR, G.A. BARTHOLOMEW et M.C. BARNHART, *Respiration and Heat Production by the Inflorescence of Philodendron selloum*, in *Planta*, vol. 157, n° 4, pp. 336-343, avril 1983.

R.S. SEYMOUR, M.C. BARNHART et G.A. BARTHOLOMEW, *Respiratory Gas Exchange during Thermogenesis in Philodendron selloum Koch*, in *Planta*, vol. 161, n° 3, pp. 229-232, juin 1984.

B.J.D. Meeuse et I. RASKIN, *Sexual Reproduction in the Arum Lily Family, with Emphasis on Thermogenicity*, in *Sexual Plant Reproduction*, vol. 1, n° 1, pp. 3-15, mars 1988.

R.S. SEYMOUR, *Analysis of Heat Production in a Thermogenic Arum Lily, Philodendron selloum, by Three Calorimetric Methods*, in *Thermochimica Acta*, vol. 193, pp. 91-97, 14 décembre 1991.

R.S. SEYMOUR et P. SCHULTZE-MOTEL, *Thermoregulating Lotus Flowers*, in *Nature*, vol. 383, p. 305, 26 septembre 1996.

La ressemblance mathématisée

JEAN-PAUL DELAHAYE

Être intelligent c'est voir des ressemblances, mais qu'est-ce qu'une ressemblance ?

Que la tête de Louis Philippe ressemble à une poire, c'est ce que les caricatures ont montré. Que la carte de l'Italie ressemble à une botte, cela saute aux yeux. Que le bruit de la grosse caisse ressemble au tonnerre, le compositeur le sait et l'utilise. Que l'histoire de *La bicyclette bleue* ressemble à celle d'*Autant en emporte le vent*, c'est ce que les juges ont dû évaluer. La reconnaissance de la ressemblance est essentielle à notre survie : sans une notion instinctive de «situation équivalente», sans une maîtrise des «visages semblables», des «animaux de la même espèce», etc., nous ne pourrions nous orienter, nous reconnaître, identifier les aliments comestibles, les bêtes dangereuses.

La difficulté est que la même eau ne coule jamais deux fois sous le pont : deux situations ne sont jamais identiques en tout point, jamais deux animaux ne sont exactement pareils, jamais le visage de nos connaissances ne présente le même aspect à deux instants différents, etc.

Nous savons pourtant juger que deux situations, deux objets, deux images sont analogues, et cette capacité est une composante essentielle de l'intelligence. L'un des problèmes majeurs de l'Intelligence

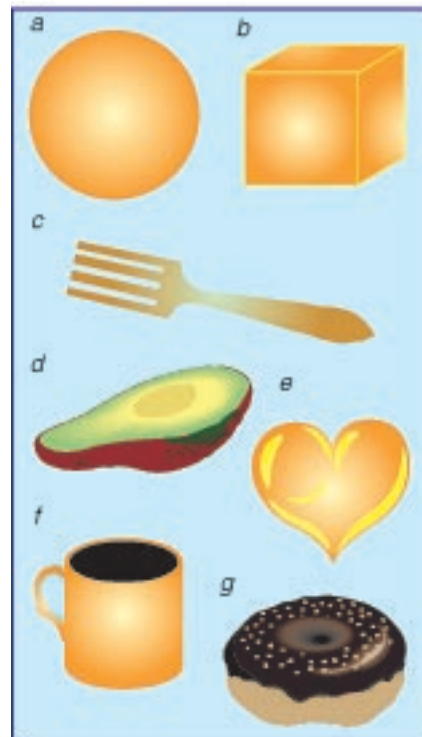
artificielle est de confectionner des programmes qui, au moins partiellement, reconnaissent des objets approchants. Le problème est difficile (et tout progrès en Intelligence artificielle est difficile), mais faut-il pour cela renoncer à le résoudre et penser qu'il est définitivement hors de portée ?

Les mathématiques qui prétendent fournir des outils pour comprendre le monde, le modéliser, le maîtriser proposent-elles de bonnes théories de la ressemblance ?

Nous verrons que oui en examinant plusieurs de ces théories. La dernière d'entre elles a été créée récemment par un groupe de physiciens, de mathématiciens et d'informaticiens : elle est fascinante par les liens qu'elle établit avec la thermodynamique et parce qu'on peut la considérer comme la théorie ultime de la ressemblance.

LES SEMBLABLES GÉOMÉTRIQUE ET TOPOLOGIQUE

L'idée mathématique la plus ancienne est celle de semblable géométrique : deux objets sont semblables si, en leur faisant effectuer des translations, des rotations, des symétries et des homo-



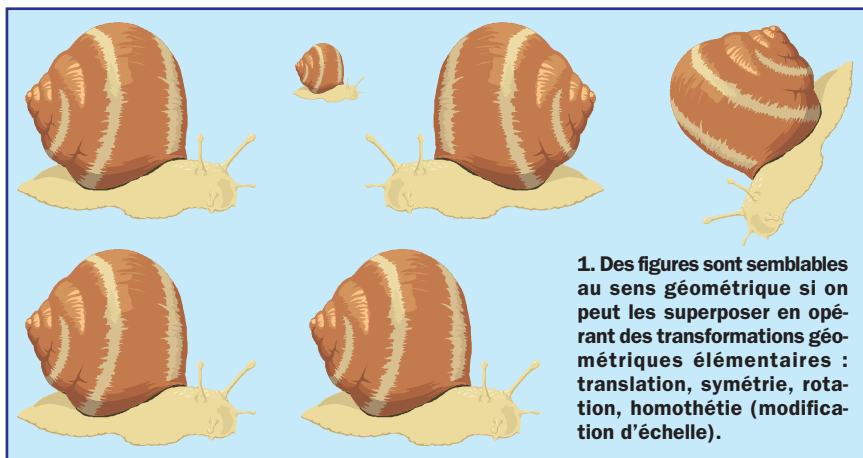
2. La surface d'un ballon peut se déformer continûment et prendre la forme d'un cube, d'un demi-avocat, d'un cœur, ou même d'une fourchette. Ces objets sont topologiquement semblables et pourtant, il est inacceptable de les considérer «semblables». La tasse et le gâteau torique sont topologiquement équivalents entre eux mais pas à la sphère.

thétiques (agrandissements et rapetissements bien proportionnés), on peut les superposer.

Cette notion de figures géométriques semblables est utile pour faire des plans de voitures ou de maisons, mais elle est trop limitée, car trop rigide. Ce n'est pas elle qui pourra, par exemple, nous indiquer si deux photographies différentes représentent le même visage. Les mathématiciens, conscients de cette limite, ont proposé une notion bien plus souple de ressemblance : l'homéomorphie.

Deux surfaces sont homéomorphes si, en imaginant qu'elles sont fabriquées avec un caoutchouc parfait, on peut déformer l'une en l'autre sans faire de déchirure. Cette fois, la notion de ressemblance obtenue est trop molle ! La surface d'un cube est topologiquement semblable à celle d'un ballon ou même d'une fourchette. La *ressemblance topologique* conduit d'ailleurs à des situations paradoxales : un système d'anneaux enlacés est transformable progressivement en le même système d'anneaux libérés. Bien d'autres notions de topologie généralisent et étendent celle d'homéomorphisme, mais chacune ne saisit qu'une part bien mince de l'idée d'analogie.

Une raison en est sans doute que,



1. Des figures sont semblables au sens géométrique si on peut les superposer en opérant des transformations géométriques élémentaires : translation, symétrie, rotation, homothétie (modification d'échelle).