

> l'autre selon un chemin de longueur minimale, il faut choisir un déplacement perpendiculaire aux deux. Cela correspond à suivre la direction de la bissectrice aux segments AC et BC et, de façon plus globale, à suivre les courbes orthogonales aux ellipses de foyers A et B, c'est-à-dire des hyperboles.

LA DÉCHIRURE SE PROPAGE PERPENDICULAIREMENT AU PLI, SAUF SI...

La même approche permet d'expliquer ce qui se passe en présence d'un pli, tel celui que présente une feuille dont on détache un ruban. Plus concrètement, faisons deux entailles rectilignes perpendiculaires au bord de la feuille et tirons sur la languette ainsi formée, en maintenant le reste de la feuille à plat. En l'absence de toute élasticité, la languette reste plane et rejoint la feuille le long du pli qui relie les extrémités des deux déchirures.

Ici, d'après le critère d'extension minimale, les déchirures doivent se propager perpendiculairement au pli. Autrement dit, dans ce cas précis, les deux déchirures restent parallèles et forment un ruban de largeur constante.

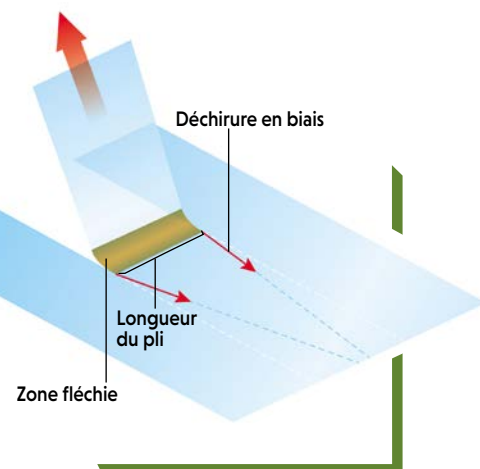
Cette propriété de perpendicularité est de nature purement géométrique et permet d'interpréter des formes de déchirure beaucoup moins simples. L'une de celles-ci s'obtient avec une feuille maintenue à plat et dont le milieu a été légèrement entaillé : quand on tire perpendiculairement au plan de la feuille l'une des lèvres de l'entaille, on obtient, au fur et à mesure que la déchirure se propage, un ruban de plus en plus large qui s'enroule autour de l'axe de traction, comme une hélice sur un cône.

Dans le plan de la feuille, l'extrémité de la déchirure décrit une spirale ; on montre que cette forme résulte du fait que la déchirure se propage perpendiculairement au pli rectiligne reliant les points où le ruban sort du plan de la feuille. Il s'agit d'une spirale logarithmique (la distance au centre croît exponentiellement avec l'angle polaire).

Les déchirures décrites jusqu'ici ne présentent pas de pointe. Pourquoi ? Sans doute parce que nous n'avons pas envisagé le cas d'une feuille collée sur un support. L'adhésion aurait-elle donc un rôle essentiel ? Pas en soi : pour en revenir à la languette sur laquelle on tire, il faut certes tirer plus fort pour que le travail fourni par l'opérateur compense l'énergie d'adhésion, mais le critère de Griffith persiste à prédire une propagation de la

DÉCHIRURE EN POINTE

Lorsqu'on tire sur une languette rectangulaire découpée dans une feuille collée sur un support plan, la feuille adhésive se déchire de biais : la languette détachée finit par former une pointe. La flexion du matériau est ici un facteur crucial. De l'énergie élastique non négligeable est stockée dans l'étroite zone qui subit la flexion (en brun), et cette énergie est proportionnelle à la longueur du pli formé. L'énergie élastique emmagasinée par le système diminue donc si ce pli se réduit, c'est-à-dire si la déchirure s'effectue en biais. Le système adopte cette configuration si l'énergie supplémentaire requise pour déchirer le matériau (la longueur d'une telle déchirure étant supérieure à une déchirure à angle droit) est inférieure à l'énergie élastique libérée.



déchirure perpendiculaire au pli, donc un ruban à bords parallèles.

L'ingrédient qui change tout, c'est la flexion du matériau, lorsque celle-ci emmagasine une énergie élastique non négligeable par rapport aux autres. Plus précisément, si la languette a une courbure bien localisée au niveau du pli, ce qui est le cas en présence d'adhésion, l'énergie élastique stockée est proportionnelle à la longueur du pli (voir la figure ci-dessus). Par conséquent, si l'on tire sur la languette en maintenant constant son angle avec la feuille, le pli conserve sa forme, mais l'énergie élastique stockée peut diminuer si la longueur du pli se réduit.

Il y a donc compétition entre cet effet, qui tend à réduire la longueur du pli, et le coût énergétique supplémentaire d'une déchirure en biais qui s'ensuivrait, la longueur d'une telle déchirure étant supérieure à celle d'une déchirure à angle droit. Ce coût supplémentaire est d'autant plus élevé que l'angle de propagation de la déchirure est important.

Ainsi, lorsque l'adhésion est forte, comme pour un rouleau de bande adhésive, du papier peint collé sur le mur ou la peau d'un fruit, le critère de Griffith prédit que la déchirure se propage en biais par rapport à la traction, avec un angle déterminé par une combinaison de toutes les énergies mentionnées. En deux mots, notre languette rétrécit et se décolle sous la forme d'une pointe. Un beau résultat de physique, mais le désespoir des rénovateurs d'appartements ! ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Roman, **Fracture path in brittle thin sheets : A unifying review on tearing**, *International Journal of Fracture*, vol. 182(2), pp. 209-237, 2013.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

COMMENT LES TORTUES GÉANTES ONT CONQUIS LES GALÁPAGOS

Les Galápagos, l'«archipel des tortues» en espagnol, portent bien leur nom. Mais comment ces animaux terrestres s'y sont-ils installés? Un mystère résolu récemment.

Océan Pacifique, le 17 septembre 1835. Charles Darwin, à bord du *Beagle*, débarque sur l'île de San Cristóbal, la plus orientale de l'archipel des Galápagos (à l'époque île Chatham). Son œil est attiré par de profondes allées dans le sol aride, menant à des points d'eau. Il en a vite l'explication après sa rencontre avec deux tortues géantes.

Le 23, il explore l'île Floreana (alors île Charles), la plus méridionale de l'archipel. Sur sa partie basse, il trouve encore des tortues; l'un des (récents) autochtones lui explique que leur morphologie lui enseigne leur provenance dans l'archipel.

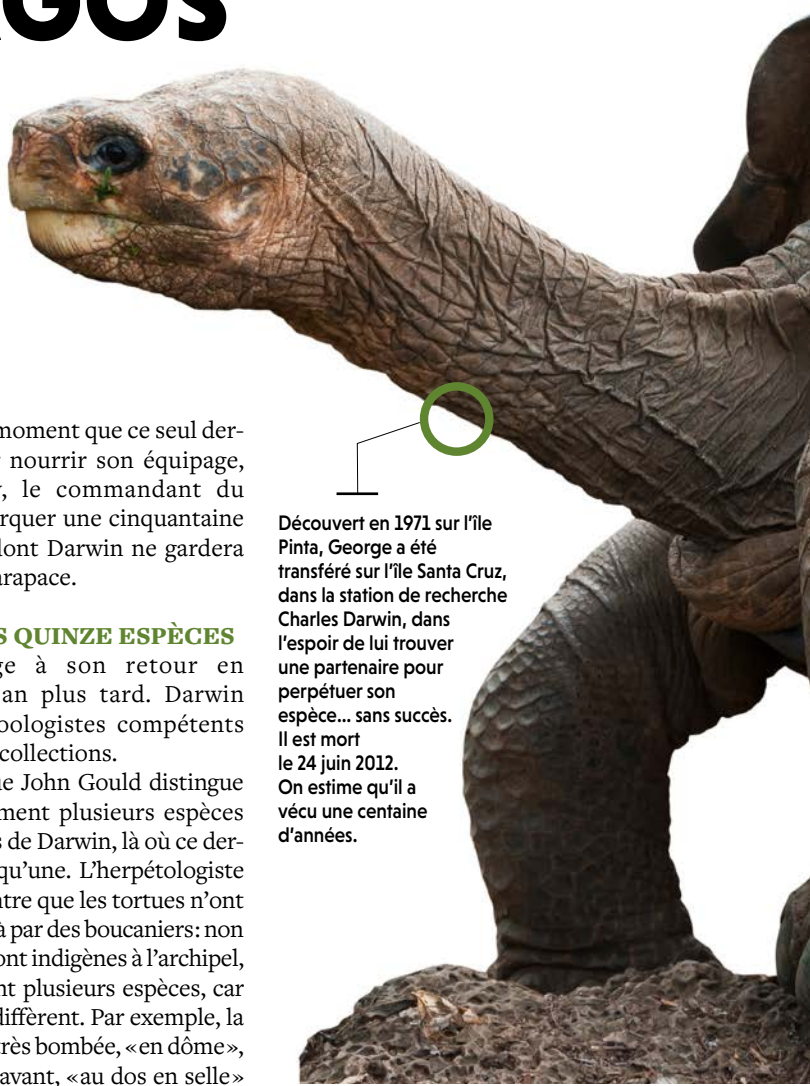
Le 8 octobre, Darwin se trouve sur l'île Santiago (alors île James), l'une des grandes îles centrales de l'archipel. Il y rencontre des boucaniers espagnols qui salent des tortues et, *o tempora, o mores*,

ne retient sur le moment que ce seul dernier point. Pour nourrir son équipage, Robert FitzRoy, le commandant du *Beagle*, fait embarquer une cinquantaine de ces tortues, dont Darwin ne gardera pas même une carapace.

PAS UNE, MAIS QUINZE ESPÈCES

Tout change à son retour en Angleterre, un an plus tard. Darwin approche des zoologistes compétents pour étudier ses collections.

L'ornithologue John Gould distingue ainsi immédiatement plusieurs espèces parmi les pinsons de Darwin, là où ce dernier n'en voyait qu'une. L'herpétologiste Thomas Bell montre que les tortues n'ont pas été amenées là par des boucaniers: non seulement elles sont indigènes à l'archipel, mais elles forment plusieurs espèces, car leurs anatomies diffèrent. Par exemple, la carapace est soit très bombée, «en dôme», soit relevée sur l'avant, «au dos en selle»



Découvert en 1971 sur l'île Pinta, George a été transféré sur l'île Santa Cruz, dans la station de recherche Charles Darwin, dans l'espoir de lui trouver une partenaire pour perpétuer son espèce... sans succès. Il est mort le 24 juin 2012. On estime qu'il a vécu une centaine d'années.

EN CHIFFRES

417

kilogrammes, c'est le poids de Goliath, la plus grande tortue connue. De l'espèce *Chelonoidis porteri*, endémique de l'île de Santa Cruz, dans l'archipel des Galápagos, cette tortue mesure 135,8 cm de long, 102 cm de large et 68,5 cm de haut.

Sa carapace, relevée à l'avant, est dite au dos en selle.

Si l'on n'a pas encore trouvé d'autres spécimens de son espèce, on a découvert sur les flancs du volcan Wolf, dans le nord de l'île Isabela, plusieurs tortues qui lui sont apparentées.

19

îles et 29 îlots forment l'archipel des Galápagos. Le point chaud responsable de leur apparition se situe actuellement sous l'île Fernandina, la plus occidentale et la plus jeune de l'archipel.

43

La plus grande tortue *Chelonoidis chilensis* connue, l'espèce sœur des tortues des Galápagos, mesure 43 centimètres. Cela reste inférieur à la taille des tortues de l'archipel. Il est probable que leur ancêtre commun ait certes été géant, mais moins grand que les spécimens des Galápagos, et qu'un phénomène de gigantisme insulaire se soit produit dans l'archipel.



George le solitaire
(*Chelonoidis abingdonii*)

Taille (longueur de carapace): 102 cm
Poids: 88 kg

(voir les photos ci-contre et page 95), avec également des formes intermédiaires.

En 1914, sur des critères anatomiques précis, l'herpétologiste californien John Van Denburgh reconnaît quatorze espèces, dont treize nommées, qu'il classe dans le genre *Testudo*. Plus tard, on les rétrograde un temps en sous-espèces, dans le genre *Geochelone* et le sous-genre *Chelonoidis*. Mais en 1980, Roger Bour, zoologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, propose un statut de genre pour *Chelonoidis*, les sous-espèces redevenant espèces.

Aujourd'hui, la phylogénie moléculaire confirme l'hypothèse de Roger Bour: on compte maintenant quinze espèces de tortues aux Galápagos. Mieux, l'histoire évolutive de ces animaux, retracée grâce à la phylogénie moléculaire, coïncide avec l'histoire géologique de l'archipel. Ces deux histoires sont si liées qu'elles fournissent une piste pour restaurer certaines espèces de tortues disparues.

> Reconstruire l'histoire évolutive des tortues des Galápagos est une entreprise très délicate : certaines espèces sont éteintes et de nombreuses tortues ont été déplacées d'une île à l'autre, autrefois par des boucaniers, récemment sous des prétextes de conservation. Mais l'approche moléculaire a des avantages ; on peut rechercher l'ADN ancien sur les squelettes des espèces éteintes et identifier ainsi relativement facilement les animaux déplacés et leurs descendants. Depuis une vingtaine d'années, Adalgisa Caccone, de l'université Yale, aux États-Unis, s'est lancée dans cette aventure et, peu à peu, les travaux de son équipe ont révélé l'origine des tortues géantes des Galápagos.

UNE SŒUR SUR LE CONTINENT

Ces tortues forment un groupe monophylétique du genre *Chelonoidis* : elles ont un même ancêtre commun et représentent à elles seules tous les descendants de cet ancêtre. Or il existe trois autres espèces de tortues du genre *Chelonoidis* sur le continent sud-américain : *C. denticulatus*, *C. carbonarius* et *C. chilensis*. En comparant leurs séquences d'ADN avec celles des tortues des Galápagos, les biologistes ont montré que, sans conteste, l'espèce *C. chilensis* est le groupe frère de celui des tortues de l'archipel, et que leur ancêtre commun le plus récent a vécu il y a 3,2 millions d'années.

Les tortues des Galápagos ont commencé à se diversifier il y a environ 1,74 million d'années. Trois groupes distincts ont ainsi divergé il y a environ 1,3 million d'années : un groupe centre-sud-ouest, rassemblant les espèces des îles Isabela, Rabida, Pinzón, Fernandina, Floreana et de l'ouest de Santa Cruz ; un groupe nord-est, constitué des espèces de Pinta, San Cristóbal, Santa Fé, Española et de l'est de Santa Cruz, et un groupe nord-ouest comportant les espèces de Santiago et du nord d'Isabela.

Au sein de ces trois clades, les diversifications se sont produites pendant la seconde moitié du Pléistocène, respectivement il y a 1,28, 0,82 et 0,4 million d'années. On distingue en tout quinze espèces (dont celles éteintes) – généralement une par île, avec cependant deux exceptions : Isabela présente plusieurs espèces endémiques associées à ses différents volcans, et Santa Cruz deux espèces, dont une décrite récemment, en 2015.

Si l'histoire évolutive des tortues des Galápagos s'est ainsi éclaircie ces dernières années, il restait à comprendre comment ces diversifications se sont produites et, surtout, comment ces tortues

UN ARCHIPEL VOLCANIQUE MOUVANT

Situées sur la plaque tectonique de Nazca, les îles des Galápagos résultent du fonctionnement d'un point chaud – un endroit où la montée d'un panache de magma se traduit par une activité volcanique. Ce dernier se trouve non loin de la jonction triple, dite des Galápagos, entre les plaques Pacifique, de Cocos et de Nazca (auxquelles s'ajoutent les microplaques des Galápagos et nord-Galápagos), ce qui crée une situation géologique complexe.

La plaque de Nazca se déplace vers l'est à une vitesse de près de 4 centimètres par an par rapport au point chaud et plonge sous le continent sud-américain. Au fur et à mesure qu'elle avance sur le point chaud, celui-ci y fait croître des îles. Les îles orientales de l'archipel sont donc les plus âgées. À l'est, San Cristóbal date de 3,2 millions d'années (Ma) ; à l'ouest, Isabela a moins de 0,7 Ma.

En se fondant sur les changements du niveau de la mer et sur l'érosion, des géologues ont aussi montré que l'archipel était différent dans le passé. Ainsi, il y a 3 Ma, San Cristóbal et Española étaient reliées – de même que Santa Cruz et Floreana il y a 2 Ma. Et il y a 1 Ma, Floreana, Santa Cruz, Santiago et Pinzón constituaient un seul bloc... ce qui simplifiait le déplacement des tortues terrestres.

géantes – et terrestres – étaient arrivées sur l'archipel. Leur ancêtre savait-il nager ? La réponse est venue... d'Afrique.

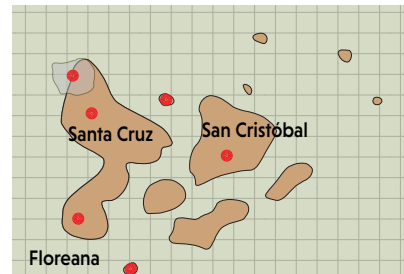
Le 14 décembre 2004, on observait une tortue géante terrestre sortant de l'eau à la pointe de Kimbiji, en Tanzanie, au sud de Zanzibar. Une étude rapide révéla qu'elle était originaire d'Aldabra, une île des Seychelles, au nord de Madagascar, à 800 kilomètres de là. Seule explication : le courant sud-équatorial, qui coule d'est en ouest à une vitesse de 1 à 3 nœuds, l'avait portée. La preuve ? Ses pattes antérieures et la base de sa carapace étaient couvertes d'anatifes, des animaux exclusivement marins qui s'accrochent aux corps flottants ou animés. Connaissant leur vitesse de croissance, on estime que la tortue est restée dans l'eau pendant 6 à 7 semaines. Nourrie convenablement, elle s'est remise de son voyage en trois mois.

Difficile à croire, mais les tortues terrestres peuvent donc flotter ; de fait, leurs poumons sont hauts dans la carapace et leur long cou peut faire office de tuba. Les

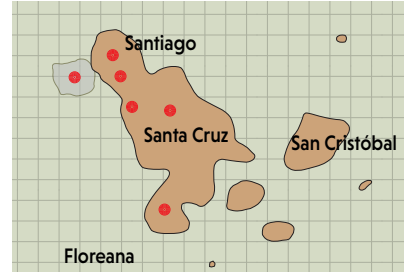
3 millions d'années



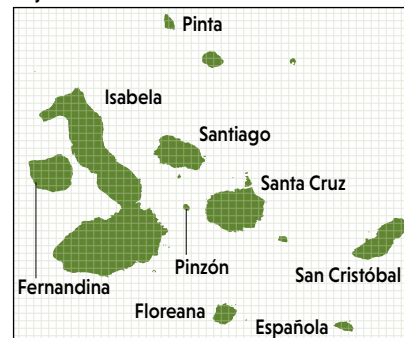
2 millions d'années



1 million d'années



Aujourd'hui





tortues sont des animaux à métabolisme bas, capables de jeûner longtemps; plus elles sont grandes, plus leurs réserves de graisse sont importantes, et plus leur jeûne peut être long. De plus, en brûlant leur graisse, elles produisent de l'eau, ce qui compense la déshydratation. C'est donc probablement par ce moyen que les premières tortues sont arrivées aux Galápagos, distantes d'environ 1000 kilomètres du continent – portées par le courant de Humboldt, qui remonte le long de la côte ouest de l'Amérique du Sud et s'incurve vers le large à la hauteur du Pérou pour former le courant sud-équatorial.

PAS SI SOLITAIRE, GEORGE ?

Vraisemblablement, la première colonisation a eu lieu sur San Cristóbal, l'île la plus ancienne et la plus proche du continent. Pour reconstituer la suite de l'histoire, il faut réfléchir non pas avec la géographie actuelle de l'archipel, mais avec les projections proposées par les géologues (voir l'encadré page ci-contre).

Il y a un million d'années, les îles centrales de Santa Cruz, Floreana et Pinzón n'en formaient qu'une. Plus tard, lors de l'élévation du niveau de la mer, la population des tortues de l'unique île originelle s'est trouvée scindée en trois; ainsi, ce ne sont pas les tortues qui ont migré, mais l'environnement qui a changé et séparé ces groupes, lesquels ont ensuite évolué indépendamment. On nomme vicariance ce phénomène. Ainsi, la diversification des tortues de l'archipel s'est faite de deux manières, par vicariance et par migration.

L'analyse moléculaire menée par l'équipe d'Adalgisa Caccone a eu des effets collatéraux positifs. En effet, la tortue endémique de Floreana (*Chelonoidis*

elephantopus) est aujourd'hui disparue. Or trente-cinq tortues vivant sur les pentes du volcan Wolf, dans le nord de l'île Isabela, présentent un ADN mitochondrial et des marqueurs nucléaires identiques à ceux des animaux éteints de Floreana. Ce sont donc des descendants de l'espèce éteinte, sans doute le résultat de transports de tortues réalisés il y a deux siècles par les boucaniers. Les parentés génétiques sont si fortes qu'un programme de restauration de l'espèce disparue est envisagé. Il en est de même avec l'espèce endémique de l'île Pinta, *C. abingdonii*. Longtemps, on a considéré que George le solitaire, mort il y a cinq ans, en était le dernier représentant. Or huit individus apparentés ont été trouvés sur le volcan Wolf.

Si une tortue a pu arriver aux Galápagos, d'autres se sont-elles installées ailleurs de façon similaire? Très probablement, car on connaît deux lignées analogues dans l'océan Indien.

Sur l'archipel des Mascareignes, formé par le point chaud de La Réunion et dont les îles principales sont La Réunion, Maurice et Rodrigues, une diversification rapide de tortues géantes à partir d'un ancêtre commun a donné cinq espèces du genre *Cylindraspis*, toutes disparues. Et sur l'archipel des Seychelles et les îles proches, même si l'analyse moléculaire a montré que tous les spécimens anciens appartenaient à une seule espèce (du genre *Aldabrachelys*), ils présentent une grande diversité de traits: la colonisation a sans doute été trop récente pour qu'il y ait spéciation. Les premières tortues auraient posé la patte sur l'île d'Aldabra. D'où venaient-elles? Mystère... Une chose est sûre: elles venaient de la mer et étaient déjà géantes. ■

Dans l'archipel, la forme de la carapace varie selon les espèces, allant du dôme (ici *Chelonoidis elephantopus*, endémique de l'île Floreana, à gauche) au dos en selle (à droite).

BIBLIOGRAPHIE

J. M. Miller et al., **Identification of genetically important individuals of the rediscovered Floreana Galapagos giant tortoise (*Chelonoidis elephantopus*) provide founders for species restoration program**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 11471, 2017.

N. Poulakakis et al., **Unravelling the peculiarities of island life : vicariance, dispersal and the diversification of the extinct and extant giant Galapagos tortoises**, *Molecular Ecology*, vol. 21, pp. 160-173, 2012.

N. Poulakakis et al., **Historical DNA analysis reveals living descendants of an extinct species of Galapagos tortoise**, *PNAS*, vol. 105, pp. 15464-15469, 2008.

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

FEUILLETÉS SANS PÂTE NI BEURRE

Les gerhardts sont des systèmes feuilletés où s'intercalent des couches d'émulsions réalisées avec d'autres produits que le beurre: fromage, chocolat, foie gras...

Le froid de l'hiver nous invite à consommer des matières grasses (avec modération). J'ai baptisé du nom du chimiste alsacien Charles Gerhardt une généralisation du beurre feuilleté introduit dans le numéro de mars 2016.

Partons de la pâte feuilletée. On superpose un disque de pâte et un autre de beurre, on replie la pâte sur le beurre et on étend l'ensemble en une bande trois fois plus longue que large; on plie celle-ci en trois et on répète six fois l'opération d'allongement et de pliage, afin d'obtenir 729 minces couches de beurre entre 730 minces couches de pâte. À la cuisson, la pâte sèche et devient croustillante.

Le beurre feuilleté? On utilise cette fois deux disques faits d'émulsions de beurre et l'on procède comme précédemment, mais avec moins de tours, et sans cuisson bien entendu. La première émulsion est à base de beurre dans une solution aqueuse (café, jus de fruit, vin, bouillon...) et la seconde est une émulsion d'un liquide dans du beurre. Mon ami le chef Pierre Gagnaire, par exemple, produit un beurre feuilleté de cresson et genièvre, ou de pistache et café.

Les gerhardts, eux, sont produits avec une autre matière grasse que le beurre. Par exemple du beurre noisette, obtenu en chauffant du beurre jusqu'à ce que l'évaporation du petit-lait permette un échauffement qui fait réagir chimiquement les protéines, d'où la couleur blonde et la merveilleuse odeur. Il y a aussi le chocolat (fait de 50% de beurre de cacao), le fromage, le foie gras...

Pour un gerhardt au foie gras, on procède comme pour le beurre feuilleté. On prépare d'abord une émulsion de foie gras dans un liquide (vin blanc réduit, fond

Le chocolat, trop dur à température ambiante, peut servir d'ingrédient à un gerhardt si on l'assouplit en lui ajoutant des matières grasses.



d'oie ou de canard), et, par ailleurs, on confectionne une émulsion d'un liquide dans du foie gras (en battant comme pour le beurre feuilleté). Puis, après passage au froid, on utilise les deux matières comme pour une pâte feuilletée inversée, en posant un disque sur l'autre et en tournant deux ou trois fois.

Cette préparation n'est pas cuite, mais on peut aussi faire un feuilletage cuit au foie gras. Il faudrait alors malaxer du foie gras (cru ou cuit), avec un peu de farine pour faire un premier pâton, que l'on place au réfrigérateur, puis disperser un peu de foie gras dans de la farine, comme l'on procède avec le beurre et la farine dans une pâte sablée, et enfin procéder avec les deux matières comme pour une pâte feuilletée classique, cuisson incluse.

Pour mettre en œuvre le procédé avec du chocolat, il y a une difficulté: si la matière grasse laitière commence à fondre à -10°C et finit de fondre à 55°C, le beurre de cacao est trop dur aux températures inférieures à 34°C, et fondu à plus de 37°C. Comment lui conférer la souplesse indispensable au tourage?

Un corps pur fond à une température précise et un mélange fait d'un grand nombre de composés a un comportement de fusion progressif, chaque composé du mélange fondant à une température particulière. Le beurre est fait d'environ 60 millions de triglycérides différents,

mais le chocolat de seulement une centaine, de sorte que sa fusion est plus brusque. La solution? Puisque le goût du chocolat n'est pas dû à la matière grasse, jouons avec cette dernière: fondons-le préalablement et ajoutons-lui du beurre ou de l'huile, qui diversifieront les triglycérides. Puis, avec ce chocolat à la fusion plus progressive, procédons comme avec le foie gras, le beurre ou le fromage. ■



LA RECETTE

- 1 Préparer une émulsion de foie gras en passant du foie gras cru ou cuit au tamis, puis en le chauffant dans du gewurztraminer réduit, jusqu'à la confection d'une crème.
- 2 Faire une émulsion d'un liquide dans du foie gras en battant cet autre liquide (fond de canard) dans du foie gras écrasé.
- 3 Mettre au froid les deux émulsions pendant une heure environ.
- 4 Puis faire un disque avec chaque émulsion, et les déposer l'un sur l'autre.
- 5 Replier la couche inférieure sur la couche supérieure, puis, au rouleau, allonger de façon à obtenir une bande trois fois plus longue que large. Plier en trois, tourner d'un quart de tour, et répéter l'opération d'allongement et de pliage.
- 6 Couper des tranches que l'on entoure d'une gelée faite avec l'un des deux liquides utilisés pour l'émulsion et de la gélatine (5 % en masse).