

RETOUR SUR « DÉCOLLAGES À CHAUD »

Notre article «*Décollages à chaud*», paru dans le numéro d'octobre (*Pour la Science* n° 480), a suscité plusieurs courriers de lecteurs portant d'une part sur le pilotage des avions et d'autre part sur les effets physiques évoqués. Nous remercions ces lecteurs pour leurs commentaires et les précisions qu'ils nous ont fournies. Nous avons repris certains passages de leurs courriers dans la suite de ce texte afin de clarifier certains points.

Commençons par quelques précisions données par des professionnels sur la phase de décollage.

Lors de l'accélération sur la piste, le pilote ne fait pas décoller l'avion dès que la portance est suffisante, ce qui correspondrait à la vitesse de décrochage. «Au contraire, le pilote empêche l'avion de décoller, lui fait dépasser la vitesse de décrochage pour avoir de la sécurité et tire sur le manche quand est atteinte la "vitesse rotation", déterminée avant le décollage en fonction de la masse, de la température et de la pression.» L'avion commence à s'incliner pour prendre l'assiette de montée, continue à accélérer, puis, lorsque la vitesse décidée pour décoller est atteinte, il quitte le sol. Lors du décollage proprement dit, en tirant sur le manche, «le pilote agit plutôt sur la gouverne de profondeur située sur l'empennage arrière, et non sur les ailerons des ailes, destinés à contrôler le mouvement de roulis [inclinaison sur le côté].»

Un troisième point de pilotage concerne le contrôle de la vitesse de l'avion, en référence à l'encadré de la page 90. Levons l'ambiguïté du texte: lorsque l'avion est en vol, ce que contrôle effectivement le pilote, c'est la vitesse de l'avion par rapport à l'air. Comme l'indiquent les flèches représentant les vitesses dans la figure, la vitesse au sol de l'avion est alors la somme vectorielle de cette vitesse et de la vitesse du vent. Donc, pour une même vitesse par rapport à l'air, la vitesse par rapport au sol sera plus faible si le vent est de face, et plus importante si le vent est de dos, comme écrit dans le texte.

Venons-en à présent aux effets physiques discutés. Un lecteur nous signale que l'un des effets majeurs de l'augmentation de température (ou de la diminution de la densité) de l'air est la réduction de la poussée des moteurs. Nous avons

mentionné cet effet dans notre article, mais nous ne l'avions ni expliqué ni quantifié. L'origine de cet effet est le suivant: «Si l'on augmente le débit de carburant brûlé, la poussée augmente, la température devant la turbine et le régime de rotation augmentent. Lorsque la température devant la turbine ou le régime de rotation atteignent une valeur limite imposée par la résistance des matériaux, on ne peut plus augmenter le débit de carburant, ce qui limite la poussée à une valeur maximale. Or la température devant la turbine ou le régime de rotation augmentent si la densité de l'air alimentant le moteur diminue, puisque le débit massique d'air à chauffer et à brasser par le compresseur diminue. Ainsi, le débit de carburant maximal autorisé, donc la poussée, diminue si la densité diminue.»

Cela signifie que l'accélération de l'avion sera moindre et que le temps et la distance requis pour atteindre la vitesse nécessaire au décollage seront augmentés. Cet effet est dominant par rapport à

par exemple que pour un 737-100, un jour standard, pour les aéroports situés à plus de 6000 pieds d'altitude, le poids maximum au décollage est limité par la vitesse que peuvent supporter les pneus. Dans cette situation, lorsque la température est plus élevée, comme la portance diminue, cette vitesse est atteinte pour une masse plus faible et l'avion doit être moins chargé.

Ces courriers nous donnent l'occasion de rappeler notre démarche: présenter et expliquer ce que peuvent apporter le regard et les outils du physicien dans des situations diverses. Bien souvent, nous choisissons des sujets où nous pouvons expliquer qualitativement et quantitativement le phénomène abordé (par exemple les tubes hurleurs, *Pour la Science* n° 479). Mais nous ne nous interdisons pas d'aborder des sujets qui ne sont pas encore totalement compris (comme l'effet Mpemba, *Pour la Science* n° 342) ou des situations technologiques complexes, comme dans le cas présent. Après un travail bibliographique substantiel, nous



la diminution de la portance évoquée dans le texte qui, comme nous l'avons écrit, ne permet pas de retrouver les valeurs de longueurs de piste données par les constructeurs.

Ajoutons d'ailleurs que l'une des limites non évoquées pour la vitesse de décollage est la vitesse limite d'utilisation des pneus. Les abaques de vitesse donnés dans la brochure de Boeing sur les caractéristiques des différents modèles de 737 pour la conception des aéroports indique

tentons d'explicitier les phénomènes physiques qui interviennent, d'évaluer quantitativement leur effet et veillons à donner les limites de ces explications. C'est une démarche qui demeure généraliste et nous ne saurions, malgré nos efforts, atteindre la précision du vocabulaire et la richesse de l'analyse que peuvent offrir des années d'expériences dans le domaine concerné. ■

J.-M. COURTY ET É. KIERLIK

L'AUTEUR



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

THE WALKING HEAD

Mignons et fascinants, les tardigrades restaient une énigme pour les zoologistes. L'étude de leur génome a révélé une facette inattendue de leur anatomie et pour le moins glaçante...

Antoni Van Leeuwenhoek, scrutateur inlassable de l'infiniment petit, en observa-t-il sous son microscope ? Il n'en parle pas, et c'est l'entomologiste allemand Johann Goeze qui, un siècle plus tard, en 1773, est le premier à décrire ces étranges animaux. Frappé par leur curieuse démarche sous le microscope, il les appelle « oursons d'eau ». Trois ans plus tard, le naturaliste italien Lazzaro Spallanzani les baptise du nom de « marcheurs lents », en latin *tardus gradus* – au pluriel *tardigrada*, les tardigrades. Il ne croyait pas si bien dire.

Ces petits animaux, qui mesurent 0,1 à 1,7 millimètre, semblent avoir conquis tous les milieux. On les trouve des glaces polaires à l'équateur, à des altitudes supérieures à 6000 mètres dans l'Himalaya ou inférieures à 4000 mètres dans les océans. Lentement, ils colonisent les mousses et

les lichens, les sables des déserts et les sédiments marins, s'installant dans le moindre interstice. Certains sont parasites et vivent sur les branchies de lamellibranches (des mollusques marins) ou les pattes de crustacés. Leur trompe munie de stylets perforateurs leur permet de se nourrir, par exemple, de cellules de mousses ou de lichens, mais aussi de nématodes... ou d'autres tardigrades.

Ces animaux doivent leur résistance exceptionnelle à leur aptitude à passer en « cryptobiose », un état physiologique où le métabolisme est totalement arrêté, l'organisme devenant indestructible. Cette propriété les autorise à survivre dans des conditions environnementales hors norme, *a priori* interdites à tout organisme vivant. Mais ce n'est pas tout. Leur anatomie, qui commence à être bien décryptée, se révèle tout aussi étrange...

Les oursons d'eau se déplacent lentement sur leurs quatre paires de pattes

Leur très petite taille autorise la déshydratation rapide de la cavité corporelle. Ils entrent alors dans un état latent indestructible, la cryptobiose.

Les tardigrades sont ovipares. En conditions défavorables, les œufs sont résistants, à paroi épaisse. En saison favorable, ils ont une paroi mince et se développent immédiatement.



Grâce à la cryptobiose et suivant les espèces, les tardigrades survivent à une dessiccation complète, au froid, au manque d'oxygène, à une teneur élevée en solutés. Ils résistent aussi à un milieu très acide, à des doses importantes de rayons ionisants (ultraviolets, X ou gamma) et même au vide intersidéral. Ces propriétés étonnantes – observées aussi chez d'autres animaux tels que des rotifères, des nématodes ou des arthropodes – découlent de caractéristiques génétiques particulières, telles que la synthèse de tréhalose, un sucre cryoprotecteur.

EN CHIFFRES

1 238

espèces de tardigrades sont connues dans le monde.

2 millions

d'individus par mètre carré, c'est la densité de tardigrades que l'on observe parfois sur des mousses.

– 273 °C

Les tardigrades supportent cette température pendant 20 heures, et – 200 °C pendant 20 mois. Des tardigrades ont ainsi survécu à 2000 ans d'emprisonnement dans des calottes glaciaires. La chaleur ne les perturbe pas plus : ils supportent une température de 150 °C pendant quelques instants...

Le système nerveux est constitué d'un « cerveau » (protocérébron) à deux lobes qui innervent les yeux, connecté à un anneau qui entoure le pharynx et relié à quatre ganglions, un pour chaque paire de pattes. Chez les autres panarthropodes, le cerveau est moins connecté au reste du système nerveux.

Le tube digestif est constitué d'une bouche munie de stylets perforateurs (qui seraient des griffes transformées), d'un pharynx fonctionnant comme une pompe, d'un œsophage, d'un estomac large, d'un rectum court et d'un anus.

L'animal n'a que des muscles longitudinaux lisses, d'où son déplacement lent.

Pas d'organe respiratoire. Les gaz s'échangent à travers la surface humide de l'animal et diffusent jusqu'aux tissus.

zoologistes pour leur trouver une place logique dans la classification animale. La segmentation les rapprocherait des annélides (l'ensemble des vers annelés) ou des arthropodes, mais l'absence de tout système interne circulatoire, respiratoire et excréteur pose question.

COUSIN DES ARTHROPODES ?

Les phylogénies moléculaires les plus récentes placent les tardigrades dans l'embranchement des panarthropodes, avec les onychophores et les euarthropodes (les arthropodes actuels). Les onychophores – « porteurs de griffes » – sont de longs animaux segmentés, chaque segment étant pourvu d'une paire d'appendices marcheurs. Ils vivent dans des aires fragmentées, toutes au sud du tropique du Cancer, provenant de la fracturation du continent de Gondwana. Les euarthropodes regroupent des taxons bien connus – crustacés, arachnides, mille-pattes, insectes. Ils présentent eux aussi de nombreux segments.

Le regroupement de ces trois taxons – tardigrades, onychophores et euarthropodes – au sein du superphylum des panarthropodes implique que l'organisation de chacun soit héritée d'un ancêtre hypothétique commun, dont on devrait pouvoir reconstruire la structure. De nombreuses questions se posent alors. Notamment, l'ancêtre avait-il de nombreux segments ou seulement quatre, comme les tardigrades ? Répondre à une telle question revient à trouver l'homologie entre les différentes parties du corps ➤

munies de griffes, mues par de seuls muscles longitudinaux (ils n'ont pas de muscles transverses). Ils portent une cuticule complexe, constituée de chitine (le principal composant de l'enveloppe externe des insectes), de protéines et de mucopolysaccharides (des groupements de glucides), avec des mues périodiques. Chez certaines espèces de tardigrades, elle forme des plaques qui soulignent les différents segments de l'animal.

On distingue ainsi, chez tous les tardigrades, un plan d'organisation homogène : une tête suivie de quatre segments portant chacun une paire de pattes. Pourtant, cette anatomie présente des énigmes, ce qui explique la difficulté des



Tardigrade
Hypsibius dujardini
Taille : 0,5 mm

> de ces animaux, c'est-à-dire la similitude qui correspond à l'héritage d'un ancêtre commun.

Au vu de la segmentation du corps et des mues de la cuticule, les zoologistes ont très vite rapproché les tardigrades des arthropodes. Logiquement, ils ont proposé que les têtes des animaux de ces deux taxons étaient homologues, avec pour conséquence l'homologie des quatre segments des tardigrades avec les premiers segments du corps des arthropodes. Pourtant, des difficultés ont immédiatement été notées, en particulier l'originalité du cerveau des tardigrades par rapport aux autres panarthropodes.

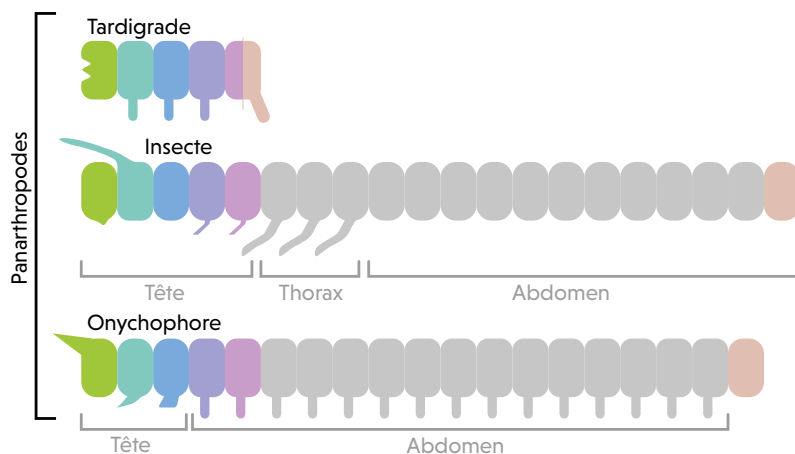
Si, à l'époque, il n'y avait pas d'autres outils à disposition que l'observation, il en est tout autrement aujourd'hui. Depuis une vingtaine d'années, on sait que l'organisation des animaux à symétrie bilatérale est contrôlée, suivant l'axe antéropostérieur, par des gènes particuliers dits homéotiques: des gènes homologues qui organisent le développement d'organismes aussi variés que les vertébrés, les arthropodes, les annélides, les mollusques... Bref, une même boîte à outils moléculaires permet la structuration d'animaux très différents. Or leur ordre sur le chromosome est identique à celui de leurs lieux d'action suivant l'axe antéropostérieur. Ainsi, en comparant les lieux d'expression de ces gènes chez les différents panarthropodes, il devrait être possible de déterminer si leurs têtes et segments sont bien homologues, en supposant que les lieux d'expression de ces gènes homologues sont homologues.

UNE TÊTE SUR PATTES

C'est le pari qu'ont fait Frank Smith et Bob Goldstein, de l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis, en comparant le génome de *Hypsibius dujardini*, une espèce de tardigrade, et les transcriptomes (l'ensemble des gènes exprimés) de trois espèces (dont *H. dujardini*) avec ceux d'euarthropodes et d'onychophores. Les résultats sont étonnants. Autant euarthropodes et onychophores ont des panoplies géniques identiques, autant les tardigrades brillent par leur originalité: chez eux, il manque les gènes majeurs qui, chez les insectes, structurent le thorax et l'abdomen! Les segments du tardigrade seraient-ils homologues de la tête des insectes? Oui, ont montré les deux chercheurs (voir l'encadré ci-dessus). On comprend pourquoi Florian Maderspacher, éditeur à la revue *Current Biology* qui a publié ces travaux, a surnommé les tardigrades *walking heads*!

COMME DES TÊTES D'INSECTES

Les seuls gènes homéotiques dont disposent les tardigrades sont des gènes qui définissent la partie antérieure des autres panarthropodes (et celui qui code leur extrémité postérieure). Chez les insectes, cette partie antérieure représente la tête. Les tardigrades seraient-ils homologues de la tête des insectes? Pour l'affirmer, il restait une difficulté à résoudre: les gènes homéotiques ne s'expriment pas dans les deux premiers segments de la tête des insectes et ne peuvent donc servir de moyen de comparaison. Toutefois, un autre gène du développement – *otd* – s'exprime dans leur premier segment (en vert ci-dessous). Or son étude chez les tardigrades montre qu'il s'exprime dans toute leur tête. Ainsi, la tête du tardigrade est homologue non pas de la tête d'un insecte, mais de son premier segment! Et les quatre segments suivants sont homologues des quatre segments qui poursuivent la tête de l'insecte. Le tardigrade est donc homologue de la tête d'un insecte!



Par quel chemin évolutif en est-on arrivé là? La panoplie complète de gènes homéotiques se trouvant aussi chez les annélides et les vertébrés, cela signifie qu'elle est plus ancienne que l'ancêtre hypothétique commun aux panarthropodes. La version incomplète des tardigrades correspond donc à une perte secondaire, corrélée à la disparition d'une grande partie du corps de l'animal.

Chez les arthropodes, on connaît deux grands types de développement: celui à bandelette germinative longue et celui à bandelette germinative courte. Dans le premier cas, le très jeune embryon est constitué d'une bandelette qui va donner l'ensemble des segments de l'animal. Il en est ainsi, par exemple, chez la drosophile. Dans l'autre cas, la bandelette est courte, c'est-à-dire que seules les ébauches des premiers segments antérieurs sont présentes, les autres segments se constituant au fur et à mesure par croissance postérieure de l'embryon. On peut se représenter le tardigrade comme le résultat de l'embryogenèse d'une bandelette germinative courte qui n'a pas eu de croissance postérieure. L'évolution aurait favorisé une durée de développement courte, produisant des adultes de la taille de la jeune larve. Le mignon ourson d'eau n'a décidément rien à envier au *walking dead*... ■

BIBLIOGRAPHIE

F. W. Smith et B. Goldstein, **Segmentation in tardigrade and diversification of segmental patterns in Panarthropoda**, *Arthropod Structure & Development*, vol. 46, pp. 328-340, 2017.

F. W. Smith et al., **The compact body plan of tardigrades evolved by loss of a large body region**, *Current Biology*, vol. 26, pp. 224-229, 2016.

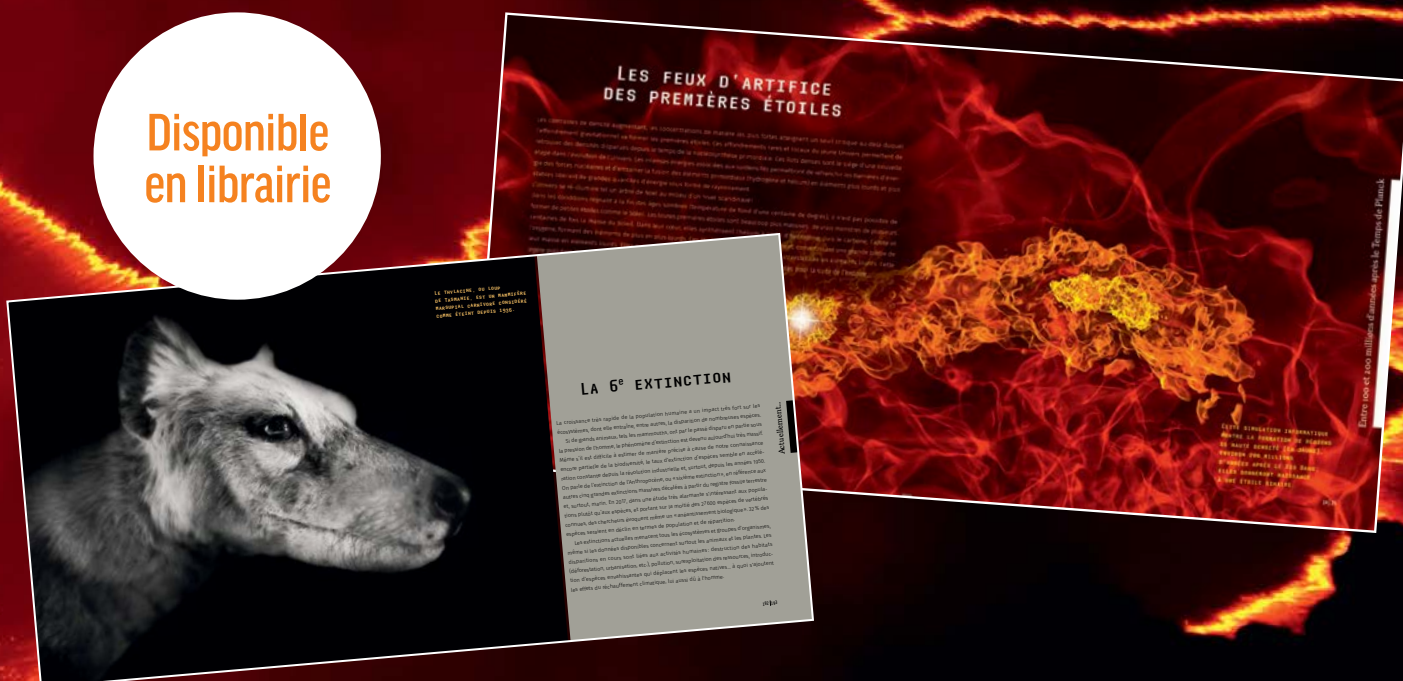
F. W. Smith et E. L. Jockusch, **The metameric pattern of *Hypsibius dujardini* (Eutardigrada) and its relationship to that of other panarthropods**, *Frontiers in Zoology*, 11 : 66, 2014.



25 x 25 cm cm - 224 pages + 224 pages cahier photo - 28 €

Un voyage unique dans l'histoire de l'Univers, de la Terre et du vivant

Disponible
en librairie



Belin:
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter sur www.belin-editeur.com

[f/EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions_belin](https://www.instagram.com/editions_belin)

L'AUTEUR



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

DES SQUELETTES CROUSTILLANTS

Les matières grasses empêchent les feuilletages de s'amollir, et permettent ainsi d'inventer de nouveaux mets croustillants.

La minceur des feuillets fait le croustillant des pâtes feuilletées: au lieu d'avoir le craquement unique d'une épaisse couche de pâte, on a en bouche une succession de petites ruptures, chacune associée à un son particulier, cette succession engendrant le son spécifique des croustillants.

Toutefois, on souhaite souvent associer à la pâte feuilletée une préparation qui a du goût et une consistance plus souple; hélas, l'eau qu'elle contient détrempe les feuillets, ce qui tue le croustillant. Comment protéger la pâte feuilletée? En imperméabilisant par de la matière grasse... Cela conduit à imaginer un système culinaire nouveau, que j'ai nommé «odier».

Analysons la question de la protection de la pâte feuilletée. La cuisson de la pâte la met dans un état dit vitreux, où les molécules forment un solide amorphe (non cristallisé): au refroidissement de la pâte, les chaînes de ces polymères que sont les amyloses et les amylopectines de l'amidon ne peuvent plus bouger suffisamment pour s'ordonner en cristaux et sont figées dans des positions désordonnées. La pâte cuite, dans son état vitreux, est cassante comme le verre, qui a donné son nom à cet état de la matière.

À l'air libre, les pâtes feuilletées s'amollissent, parce que l'humidité de l'air est absorbée et que l'eau joue alors un rôle de plastifiant, séparant les chaînes de polymères et leur permettant de bouger. Comment l'éviter? Si l'eau est une menace pour les feuillets croustillants, il suffit de protéger ces derniers par une couche qui fasse barrière. Or les cuisiniers savent que badigeonner des viandes avec de l'huile prévient l'évaporation de l'eau. Il est

d'ailleurs facile de vérifier que, dans un tube, de l'eau recouverte d'une couche d'huile, même mince, ne s'évapore pas (mon test a duré un an). En application de cette idée simple, chacun peut faire cuire un feuilletage en forme de tarte, puis badigeonner l'intérieur avec du beurre de cacao (chocolat blanc) fondu. Avec deux ou trois couches successives, histoire de bien recouvrir tout le feuilletage, on parvient sans difficulté à faire séjourner de l'eau dans le fond de tarte. Nous y avons même mis un poisson rouge!

Or l'éventail des matières grasses alimentaires ne se limite pas à l'huile ou au beurre de cacao. Pourquoi ne pas utiliser du beurre? Ou du chocolat? Ou de la graisse de foie gras, pour des plats salés?

Allons plus loin. Qu'avons-nous fait? Mis un peu de «chair autour des os». On peut faire plus. Par exemple, si nous immergeons un petit bloc de pâte feuilletée dans un parallélépipède de chocolat fondu, que nous laissons ensuite prendre par refroidissement, nous obtenons un squelette croustillant au centre du carré, ajoutant du croustillant dans le croquant.

Et en immergeant dans du beurre? À condition que ce beurre ait été clarifié, c'est-à-dire qu'on l'ait débarrassé de son eau, par chauffage lent, puis décantation de la matière grasse, on obtient à nouveau une armature, un échafaudage croustillant au

Immergés dans
de la matière grasse,
ces feuilletés
ne perdront pas
leur croustillant!



centre d'un solide mou (si la température n'est ni trop basse ni trop haute, bien sûr).

Dans de la graisse de foie gras? Dans de la matière grasse de fromage? Dans un glaçon d'huile d'olive? Dans du beurre noisette? Les voilà, ces systèmes que je propose de nommer des odiers, en l'honneur du chimiste français Auguste Odier, quiisola la chitine de l'exosquelette d'arthropodes en 1823... ce qui doit nous faire penser que le squelette croustillant peut tout aussi bien être à l'intérieur qu'à l'extérieur! ■



LA RECETTE

- 1 Avec 200 grammes de farine et un peu d'eau, faire de la pâte que l'on étale en un disque d'environ 1 centimètre d'épaisseur.
- 2 Y déposer 100 à 200 grammes de beurre malaxé, en un disque plus petit.
- 3 Replier la pâte sur le beurre en l'enfermant comme une lettre dans une enveloppe.
- 4 Au rouleau, étendre trois fois plus long que large, et replier en quatre. Répéter l'opération d'étalement et de repliement.
- 5 Cuire au four à 170 °C pendant 50 minutes, afin d'obtenir un feuilletage très sec, donc très croustillant.
- 6 Préparer un beurre noisette en chauffant du beurre dans une casserole, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles (de vapeur d'eau).
- 7 Tremper le feuilletage dans le beurre noisette et faire prendre le système en refroidissant.