

Quant aux oiseaux au poitrail roux, on a longtemps débattu: des bernaches à cou roux, *Branta ruficollis* 3? Ce n'est peut-être pas le cas. D'abord, l'aire de répartition de cette espèce ne correspond pas, car elles nichent au nord de la Sibérie et ne migrent que vers l'Europe du Sud-Est (Bulgarie, Roumanie, Ukraine...). Ensuite, l'analyse des palmipèdes selon le critère de Tobias, du nom de Joseph Tobias, de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, ne valide pas l'identification. Cette méthode, proposée en 2010 et d'ordinaire appliquée à des espèces actuelles, a été utilisée avec

les caractéristiques anatomiques visibles sur les représentations de Meïdoun (couleur des pattes, taille relative du bec, pourtour des yeux...), c'est inédit pour une image.

Conclusion? Les oies peintes se distinguent trop des bernaches à cou roux, essentiellement au niveau du cou, des flancs et de la poitrine, même en imaginant une licence artistique, et ce alors que toutes les espèces peintes dans le mastaba sont bien identifiables. Ces oies seraient plus probablement les représentantes d'une espèce vivante il y a plus de 4600 ans et aujourd'hui disparue.

L'espèce en question rejoindrait alors la liste de celles, comme l'aurochs *Bos primigenius*, qui n'ont laissé de trace dans l'histoire que sous forme de représentations dans l'art égyptien. ■

A. Romilio, «Assessing "Meidum Geese" species identification with the "Tobias criteria"», *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 36, 102834, 2021.



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)



LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

LA CAFETIÈRE QUI NE MANQUE PAS D'AIR

Le fonctionnement de la cafetière italienne paraît simple. Il n'en présente pas moins quelques subtilités dont il faut tenir compte pour obtenir un café optimal.



Machines à expresso, cafetières à filtre, à piston, à broyeur, cafetières italiennes... Le choix est vaste ! Un même café moulu donnera des résultats différents selon la température de l'eau, la pression, la durée du passage de l'eau dans la mouture, etc.

Pour les amateurs, rien ne vaut le café intense et corsé préparé avec une cafetière italienne. Inventée en 1933 par l'ingénieur italien Alfonso Bialetti, cette cafetière en aluminium est toujours commercialisée sous le nom de Moka Express, et d'autres marques l'ont imitée. Son utilisation est simplissime : remplir le réservoir inférieur d'eau, placer au-dessus le panier en forme d'entonnoir et le remplir de café moulu, visser la partie supérieure (la verseuse), placer sur le feu et attendre quelques minutes que l'eau remonte par la cheminée, traverse le café en extrayant ses arômes et vienne remplir la verseuse.

À y regarder de près, cependant, les choses ne sont pas si simples. Alors que la température idéale de l'eau pour

l'extraction est de 90 °C, on lit souvent que si l'eau remonte dans la cafetière, c'est parce qu'elle bout. Plus curieux encore : chaque modèle de cafetière italienne est conçu pour préparer un nombre précis de tasses. Il est déconseillé de préparer deux tasses avec un modèle destiné à quatre tasses. Pourquoi ?

ÉVAPORATION, MAIS PAS ÉBULLITION

Pour répondre à ces questions, voire optimiser la préparation du café, examinons plus en détail le fonctionnement de cette cafetière. Conformément à la notice, on remplit le réservoir d'eau jusqu'au niveau de la valve de sécurité. Une fois la verseuse vissée, ce qui assure l'étanchéité du dispositif, de l'eau et un

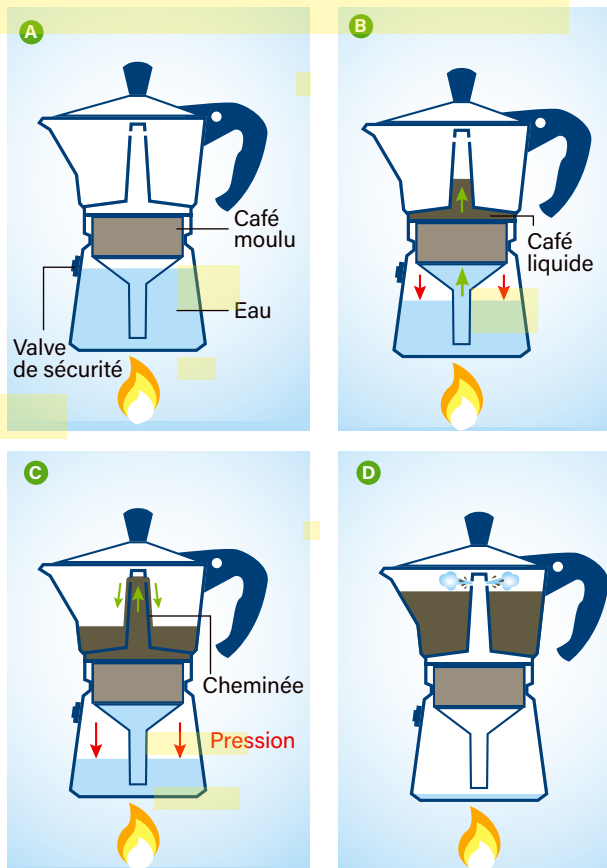
petit volume d'air sec sont enfermés dans le réservoir. Lorsque l'eau chauffe, la pression de cet air augmente progressivement, puisque l'air s'échauffe et que de l'eau s'évapore.

La pression de la vapeur d'eau ajoute à celle de l'air sec une « pression partielle » d'autant plus grande que la température est élevée. Cette pression partielle atteint 1 atmosphère (1,01 bar) lorsque la température vaut 100 °C. Autrement dit, comme la surpression nécessaire à élever une colonne d'eau de 10 centimètres ne vaut qu'un centième d'atmosphère, l'augmentation de pression fait monter dès le début l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur.

C'est ce que confirment les mesures très précises réalisées il y a une dizaine

QUAND L'AIR ET LA VAPEUR D'EAU POUSSENT

Dans le réservoir inférieur d'une cafetière italienne posée sur le feu, l'eau chauffe et s'évapore en partie, et l'air s'échauffe aussi **A**. La pression exercée par la vapeur d'eau et l'air augmente peu à peu. Ce faisant, elle pousse l'eau dans le panier-entonnoir qui contient le café moulu **B**. Après avoir traversé la mouture, l'eau, chargée en arômes et devenue ainsi café liquide, monte dans la cheminée puis s'écoule dans la verseuse par les orifices du sommet **C**, jusqu'à épuisement du réservoir inférieur **D**.



d'années par des physiciens de l'université de Trieste et des ingénieurs de la société Illy, qui ont placé des capteurs dans une Moka Express (voir l'encadré page 90). La première goutte de café recueillie après le filtre était typiquement à une température comprise entre 60 °C et 65 °C, quand la pression dans le réservoir était à peine plus élevée que la pression atmosphérique. La dernière goutte de café extraite était à une température de 96-98 °C, avec une pression dans le réservoir dépassant 2 bars.

DE L'AIR CHAUD ET DE LA VAPEUR D'EAU

Soyons plus quantitatifs. Au départ, l'air enfermé dans le réservoir est à pression atmosphérique, soit 1,01 bar

(ou 101 kilopascals). À température ambiante, disons 20 °C, la contribution de la vapeur d'eau à la pression est très faible: 0,023 bar; la pression de l'air sec est donc d'environ 0,99 bar.

À mesure que l'on chauffe, la température de l'air sec, dont la quantité est fixée, augmente, mais le volume qu'il occupe s'accroît aussi puisque l'eau est poussée vers la verseuse; en fin d'extraction, ce volume est multiplié par 6 environ. Ainsi, quand l'air sec avoisine une température de 100 °C, à cause de l'augmentation de volume, sa contribution à la pression totale se réduit à 0,21 bar, soit un cinquième de sa valeur initiale.

En revanche, la pression de la vapeur d'eau dans de l'air à 100% d'humidité augmente très rapidement: elle atteint

0,31 bar à 70 °C, 0,70 bar à 90 °C, 1,01 bar, comme il se doit, à 100 °C, la température d'ébullition, 1,43 bar à 110 °C et près de 2 bars à 120 °C. Ces chiffres confirment ceux mentionnés plus haut: nul besoin d'atteindre l'ébullition pour créer la surpression nécessaire à l'extraction du café.

En moyenne sur la durée de l'extraction, la température de l'eau qui traverse la mouture est de l'ordre de 80 °C. On est donc loin de l'eau bouillante. Cette température est même un peu basse par rapport à celle recommandée (90 °C ± 5 °C)

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



pour obtenir un bon espresso: un peu d'acidité est possible.

C'est pour cette raison qu'il est fortement déconseillé de mettre moins d'eau que prévu. Avec davantage d'air sec et moins d'eau à faire monter, la température moyenne de l'eau sera encore plus basse et le café ne sera pas bon. Une solution parfois recommandée est alors de remplir le réservoir avec de l'eau déjà chaude (mais non bouillante); la température moyenne d'extraction sera alors plus élevée. Dans tous les cas, il faut retirer la cafetière du feu dès qu'elle gargouille: les dernières gouttes, produites à des températures dépassant 95 °C, sont amères.

BIEN CHOISIR SA MOUTURE DE CAFÉ

Comme le savent les baristas accomplis, le goût du café dépend aussi du temps d'extraction et de la qualité de la mouture. La percolation de l'eau à travers le café moulu est un processus très complexe. Au début, l'eau imbibe facilement la mouture sèche. Cette dernière est en effet constituée d'un empilement grossier de particules submillimétriques, laissant des pores et des interstices interconnectés où l'eau peut s'engouffrer. La «perméabilité» du matériau est alors relativement élevée.

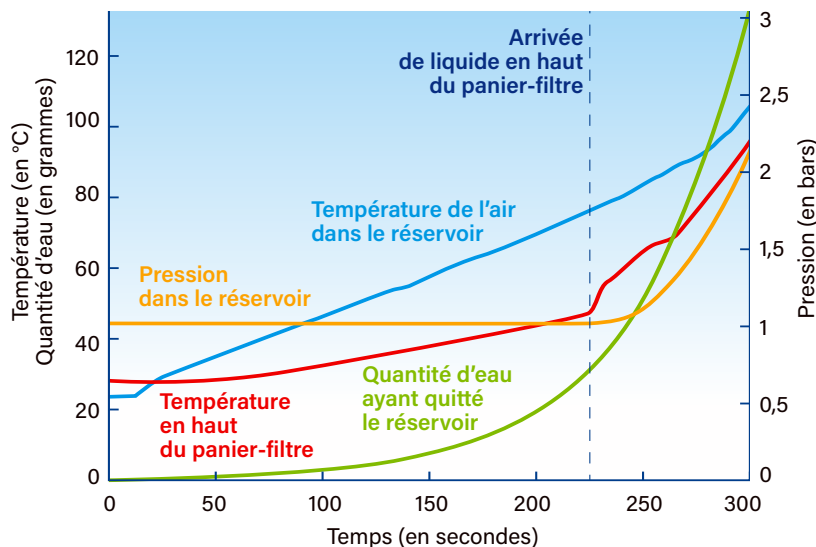
Cette grandeur représente la quantité de fluide qui peut traverser le milieu par unité de temps en fonction de la chute de pression en son sein. Sa valeur correspond ici à celle du sable très fin, et c'est pourquoi l'extraction peut débuter sans surpression notable.

Cependant, l'eau se charge progressivement en composés solubles et volatils, ce qui modifie ses propriétés rhéologiques; en outre, les particules de café se réarrangent et gonflent à cause de la présence de polysaccharides insolubles. Il s'ensuit une chute de la perméabilité (d'un facteur 4 environ pendant la durée du processus). Pour que le liquide continue de s'écouler, il faut donc des surpressions plus élevées.

En fin de compte, avec une mouture fine (des particules de 0,3 millimètre) et non tassée, on a besoin de laisser la cafetière sur le feu 5 minutes, dont environ 2 minutes correspondent au temps d'extraction. C'est bien plus que les 30 secondes recommandées pour un espresso, mais en cohérence avec une température d'extraction plus basse. Avec une mouture plus fine ou tassée, le café obtenu risque d'être trop fort...

LA CAFETIÈRE ITALIENNE AUSCULTÉE

En 2009, Luciano Navarini et ses collègues, en Italie, ont publié une étude de la thermodynamique de la cafetière italienne, réalisée en équipant celle-ci de capteurs de température et de pression. Leurs mesures, dont quelques-unes sont reproduites ici, ont notamment montré que l'eau n'a pas du tout besoin de bouillir pour commencer à monter et traverser la mouture de café.



Enfin, malgré ces bonnes pratiques, sans doute regretterez-vous que votre café, aussi délicieux soit-il, ne présente pas ou peu de mousse, comme dans un espresso! Pourquoi? Parce qu'il est extrait à trop basse pression (entre 1 et 2 bars).

Cette mousse a en effet pour origine le gaz carbonique naturellement présent dans les grains de café à la suite de leur torréfaction. Quand on prépare un espresso avec du café fraîchement moulu, le CO₂ qu'il contient se dissout, pendant l'extraction, dans de l'eau à 90 °C et à 9 bars, pression usuelle dans une machine à espresso. Mais lorsque le café jaillit du percolateur à 1 bar et se refroidit immédiatement, il devient sursaturé en CO₂. Comme avec l'effervescence du champagne, ce gaz forme des bulles, sans doute autour des particules microscopiques arrachées au café moulu par l'écoulement de l'eau et qui constituent des sites de nucléation. Ces particules donnent aussi la couleur caractéristique de la mousse de l'espresso.

C'est pourquoi Bialetti a équipé ses cafetières italiennes du modèle Brikka d'un dispositif à valve pressostatique qui retarde l'écoulement du café dans la verseuse tant qu'une pression seuil n'est pas atteinte. La Brikka fonctionne donc à une pression plus élevée, avec un temps de préparation augmenté, mais elle donnera aussi une mousse comme pour un véritable espresso. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Folmer (dir.), **The Craft and Science of Coffee**, Elsevier, 2017.

L. Navarini et al., **Experimental investigation of steam pressure coffee extraction in a stove-top coffee maker**, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 998-1004, 2009.

W. D. King, **The physics of a stove-top espresso machine**, *American Journal of Physics*, vol. 76, pp. 558-565, 2008.

E. Illy, **L'alchimie du café**, *Pour la Science*, n° 298, pp 40-45, août 2002.