

L'œuf dur : un festin de réactions chimiques

Hervé This

Évidemment, l'œuf dur ne semble pas être un fleuron de la cuisine française, mais avant de faire compliqué, faisons simple : il y a tant de chimie à découvrir dans un simple œuf dur que nous pallierons les insuffisances gastronomiques du plat par un festin de connaissance (nous sommes des « enfants gâtés » : nous oublions que nous sommes la première génération de l'histoire de l'humanité à ne pas avoir connu de famine) [1]. D'ailleurs, la question de l'œuf dur nous permettra de revenir sur les questions de science et de technologie, et aussi sur une certaine confusion entre la science, la connaissance et la mise en œuvre des connaissances.

Un mot à propos de ce texte, qui ne ressemble pas au précédent. D'une part, il est truffé de questions simples... qui nous conduisent soit à des révisions de nos savoirs, soit à des questionnements plus profonds. D'autre part, il n'est pas truffé de références... parce que l'observation des phénomènes est à la portée de chacun, et qu'elle doit l'emporter sur le jeu des citations, comme l'a bien dit Galilée : « *Un bon moyen pour atteindre la vérité, c'est de préférer l'expérience à n'importe quel raisonnement, puisque nous sommes sûrs que lorsqu'un raisonnement est en désaccord avec l'expérience il contient une erreur, au moins sous une forme dissimulée. Il n'est pas possible, en effet, qu'une expérience sensible soit contraire à la vérité. Et c'est vraiment là un précepte qu'Aristote plaçait très haut et dont la force et la valeur dépassent de beaucoup celles qu'il faut accorder à l'autorité de n'importe quel homme au monde* » [2].

Un objectif, une mise en œuvre

Revenons à notre œuf dur. N'importe quel ingénieur, à l'aube d'un projet industriel, pose un objectif, puis cherche une méthode rationnelle pour atteindre le but fixé, met en œuvre cette méthode et, en fin de travail, effectue une évaluation. Pour la cuisine, pourquoi en serait-il différemment ?

Pourtant, ce n'est pas ce qui se passe : le ou la même chimiste qui, la journée, est un esprit rationnel, lucide, efficace, celui-là ou celle-là même qui cherche absolument à comprendre les phénomènes qu'il ou elle observe, se laisse transformer en exécutant(e) guidé(e) par une moelle épinière plutôt que par un cerveau, quand vient le moment de la préparation du repas, le soir, dans la cuisine. Là, il ou elle abdique son statut de scientifique ou d'ingénieur pour ne plus être que l'opérateur qui exécute sans rechigner des protocoles centenaires et, surtout, désuets. Pour un œuf dur, la question semble sans intérêt : une casserole, de l'eau, on porte à ébullition, on met l'œuf et on le laisse dans l'eau pendant dix minutes. Mais... si la méthode n'était pas bonne ?

Poser la question, c'est chercher ce qui se passe lorsque ce protocole est mis en œuvre. Commençons par l'eau qui bout dans une casserole que l'on chauffe. À ce stade, qui

n'est que la préparation de la transformation culinaire, il y a déjà mille choses à découvrir, à observer, à comprendre. Par exemple, l'eau chauffée laisse voir des sortes de volutes, puis des bulles apparaissent au fond de la casserole. Ces bulles sont visibles... alors qu'elles sont transparentes ; pourquoi ? La réponse s'obtient si l'on sait regarder : on voit des reflets sur la surface des bulles, et la loi de Snyell-Descartes nous... éclaire sur cette question lumineuse.

Cela dit, pourquoi ces bulles ? De quel gaz sont-elles faites ? Le chimiste qui n'a pas fait l'impasse sur la physique et, notamment, sur la thermodynamique, se souvient de la loi de Henry selon laquelle la concentration en un gaz dissout est proportionnelle à la pression partielle du gaz au-dessus du liquide (en première approximation seulement bien sûr !). Et cette concentration diminue à mesure que la température augmente. Vous souvenez-vous pourquoi ? Et quel rapport avec le dégazage de l'eau chauffée ?

Tandis que les bulles de gaz qui se forment au fond de la casserole (on comprend que c'est l'endroit le plus chaud) quittent le liquide et montent vers la surface où elles éclatent, une fumée s'élève progressivement au-dessus de la casserole. Une mesure de la température de l'eau à diverses profondeurs montre qu'à cette étape, la température en surface de l'eau n'est pas de 100 °C, ce qui exclut les bulles de vapeur, sans exclure qu'elles puissent toutefois contenir de la vapeur d'eau, en plus de gaz dégazés. Pourquoi restent-elles accrochées assez solidement au fond de la casserole ? Cette fois, il faut invoquer des forces de tension superficielle, mais ce serait encore une autre histoire qui nous détournerait davantage de la cuisson de l'œuf.

Arrivons donc rapidement à la surface de l'eau. Ce que nous ne voyons pas, c'est que les bulles qui viennent y éclater projettent de minuscules gouttelettes d'eau quand le film liquide qui les limite finit par crever. Toutefois, ces projections sont indirectement visibles aux dépôts de sel qui viennent légèrement au-dessus du niveau du liquide, sur les bords de la casserole. Au fait, pourquoi salerait-on l'eau de cuisson d'un œuf dur ?

La « vapeur d'eau », évidemment, n'est pas visible : en phase vapeur, les gaz sont transparents parce que les molécules (ici d'eau) sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible. Ce que l'on voit donc, ce sont des gouttelettes d'eau, formées par la recondensation de la vapeur, dans l'air froid qui surmonte la casserole. D'ailleurs, observons bien : la fumée est d'abord bleuâtre, puis blanchâtre. Imaginez-vous pourquoi ? Une piste : la couleur est-elle la même dans toutes les directions ? Et, tant qu'à poser des questions : quelle est la température de l'eau qui frémit ?

L'œuf plongé

À l'ébullition, tout est plus simple. La température, notamment, est fixe, parce que la chaleur latente de

vaporisation de l'eau est considérable. Quand un œuf est immergé, il s'échauffe par conduction : la chaleur de l'eau est transmise à la coquille (du carbonate de calcium associé à des molécules organiques), ce qui chauffe l'intérieur. C'est ainsi que le blanc de l'œuf et que l'air de la poche d'air qui se trouve au « gros bout » sont d'abord chauffés. Puis le jaune est atteint, progressivement.

Que se passe-t-il alors ? On le sait... ou, du moins, on croit le savoir. D'une part, la dilatation thermique de l'air et du liquide contenus dans l'œuf, avec un coefficient de dilatation supérieur à celui de la coquille [4], provoque l'apparition de bulles à la surface de l'œuf : le gaz de l'intérieur s'échappe par les pores de la coquille. Puis le blanc d'œuf « coagule », et enfin le jaune. On sait que le jaune coagule après le blanc, parce que, si l'on sort l'œuf après environ trois minutes, le blanc est « pris » et le jaune reste liquide. En revanche, après dix minutes, les deux sont coagulés.

Si l'on cuit plus longtemps encore, des catastrophes ont lieu : le blanc devient caoutchouteux, le jaune devient sableux, une couleur verte apparaît tandis que se fait sentir une redoutable odeur « de soufre ». Évidemment, le chimiste sait que cette odeur n'est pas « de soufre », puisque le soufre n'a pas d'odeur, mais il admet l'expression, supposant que des gaz soufrés se forment.

Comment éviter la catastrophe ? La réponse traditionnelle du monde culinaire est qu'il faut cuire moins de dix minutes. Est-ce une bonne réponse ? Et comment obtenir un jaune d'œuf bien centré dans le blanc ? Là encore, la même réponse : mettre l'œuf dans l'eau bouillante et cuire dix minutes. Cette fois, on voit mal le rapport avec le centrage. De la chimie s'impose !

Tableau I - Les diverses parties de l'œuf.

Fraction [12]	% de la masse totale	Matière sèche %	Protéines %	Lipides %	Glucides %	Sels minéraux
Coquille	10,3	98,4	3,3	0	0	95,1
Blanc	56,9	12,1	10,6	0,03	0,9	0,6
Jaune	32,8	51,3	16,6	32,6	1,0	1,1

Enfin de la chimie !

Commençons par nous demander ce qu'est cet œuf, que nous évoquons sans beaucoup de précautions. Le plus souvent, il s'agit d'un œuf de poule, *Gallus gallus* : l'ovule produit par la femelle, après fécondation ou non, se transforme en une structure nommée œuf. Chez les oiseaux, seuls subsistent l'ovaire et les voies génitales du côté gauche... mais c'est là une curiosité zoologique hors sujet ! Huit à dix jours avant la ponte, des substances de réserve sont concentriquement déposées selon un rythme nyctéméral*, avec essentiellement des protéines hydratées pendant la nuit (vitellus blanc), des graisses et des pigments pendant le jour (figure 1). Alors que le noyau migre au pôle de la cellule, l'œuf séjourne 20 h dans l'utérus. Il grossit par absorption d'eau, puis une coquille poreuse se forme en trois couches : une couche externe (mince cuticule protéique), une couche moyenne – de texture spongieuse, faite de calcite – et une couche interne.

Finalement, un œuf est pondu chaque jour. C'est une structure d'environ 60 g, avec environ 10 % de coquille, 57 % de blanc et 33 % de jaune (voir tableau I et figure 2). À noter que ces proportions changent quand l'œuf vieillit, l'eau du blanc s'évaporant par les pores de la coquille. Le chimiste, le vrai, n'est-il pas tenté de mettre un œuf à l'étuve pendant de longues heures afin d'accélérer le processus ? Je vous laisse faire l'expérience : le résultat est très amusant.

La composition chimique des produits en jeu ? Le blanc est assimilable, au premier ordre, à une solution aqueuse à 12 % de protéines, tandis que le jaune est composé pour moitié d'eau, de 17 % de protéines et de 33 % de lipides. La coquille, elle, est composée de carbonate de calcium (94 %), de carbonate de magnésium (1 %), de phosphate de calcium (1 %) et de matière organique (4 %) (la nourriture des poules détermine la composition de l'œuf). De la matière organique, dans la coquille ? Elle est facile à voir quand on plonge un œuf entier, avec sa coquille, dans un acide, tel le vinaigre : une sorte de « peau » rouge est libérée.

Évidemment, une telle description est notoirement insuffisante : on sait, d'une part, que les protéines sont rarement des enchaînements simples de résidus d'acides aminés, et qu'elles sont souvent glycosylées ou phosphorylées, par exemple ; d'autre part, les « lipides » forment une catégorie très hétérogène, regroupant aussi bien les phospholipides que les triglycérides. De plus, on sait que le blanc et le jaune sont structurés : pour le blanc, regardez-le quand vous cassez un œuf dans une poêle pour faire un œuf sur le plat ; pour le jaune, amusez-vous à le piquer localement, afin de voir, notamment, qu'il vous restera une sorte de « peau » faite de kératine et d'ovomucine. D'où les indications pour le blanc et pour le jaune que vous trouverez dans les annexes I et II sur le site de *L'Actualité Chimique***.

Il faut ajouter que les structures correspondent (évidemment ?) à des hétérogénéités de composition. Par exemple, la concentration en eau diminue de l'extérieur vers l'intérieur du blanc : le blanc liquide extérieur (23,2 % de la

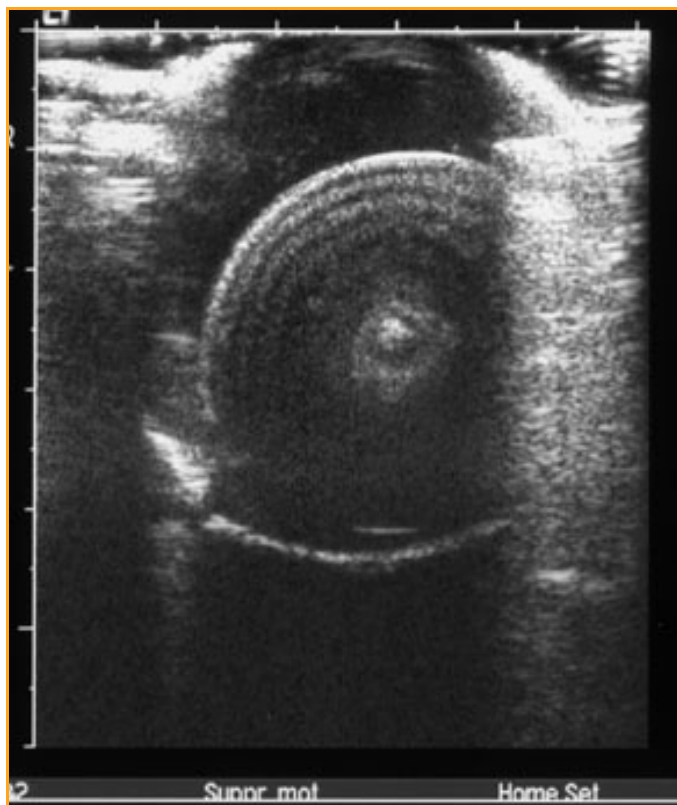


Figure 1 - Échographie de jaune d'œuf de poule.
Crédits photo : Bruno This.

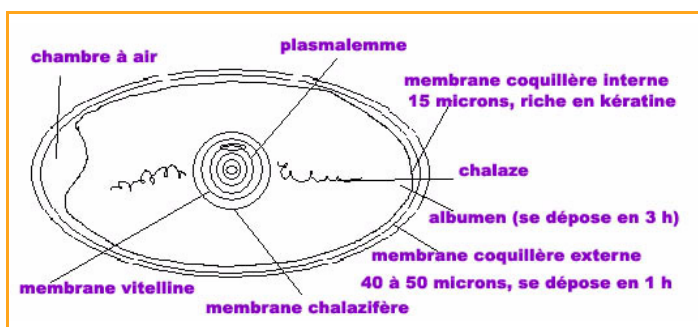


Figure 2 - La structure interne de l'œuf de poule.

masse) contient 88,8 % d'eau, le blanc épais (57,3 % de la masse) en contient 87,6 %, le blanc liquide interne (16,8 %) en contient 86,4 %, et les chalazes (2,7 %), sortes de tortillons blancs, en contiennent 84,3 %. Pour le jaune, limitons-nous à dire que c'est une suspension de « granules » dispersés dans un plasma.

Cuire d'abord le blanc

Tout cela est bien joli... mais c'est l'œuf cuit qui nous intéresse. Qu'est-ce que cette « coagulation » qui est observée depuis la nuit des temps ? Dire le mot coagulation n'est pas une explication ; c'est seulement une étiquette posée sur un phénomène. Début de la connaissance, mais début seulement !

Commençons par le plus simple : la « coagulation » du blanc d'œuf. Une théorie périmée, mais que l'on trouve encore dans des livres de science des aliments, stipulait que les protéines du blanc étaient dénaturées par l'agitation thermique, formant un gel. Il est exact que le blanc d'œuf coagulé est un solide qui renferme l'eau du blanc d'œuf, mais de quelle nature est le gel ?

Pour le savoir, il suffit de chercher quelles forces peuvent s'exercer entre les protéines. N'importe quel chimiste peut dire que ces forces sont, par ordre d'énergie croissante, les forces de van der Waals, les forces hydrophobes, les liaisons hydrogène, les liaisons covalentes, les liaisons électrostatiques [5]. La question est plutôt : quelles sont les liaisons les plus énergétiques dans un blanc d'œuf coagulé ?

Les forces de van der Waals étant toujours présentes, elles sont nécessairement à l'œuvre, tout comme les forces hydrophobes, qui contribuent au repliement des protéines globulaires (toutes les protéines du blanc d'œuf sont globulaires, à l'exception du lysozyme).

Des liaisons hydrogène ? L'examen des groupes latéraux des acides aminés conduit à penser qu'il en existe nécessairement aussi : avec le groupe latéral de la sérine, de l'acide aspartique, de la thréonine... Mieux encore, il peut en exister plusieurs centaines entre deux protéines, puisque les résidus d'acides aminés se comptent par centaines, de sorte que des associations puissantes pourraient résulter de ces liaisons. Des liaisons covalentes ? Cette fois, on voit mal comment les groupes latéraux réagiraient... sauf par l'oxydation des cystéines, conduisant à la formation de ponts disulfure [6]. Des liaisons électrostatiques ? Il peut également y en avoir... mais elles semblent être plutôt répulsives : au pH du blanc d'œuf, les groupes acides sont généralement tous protonés, et les groupes basiques sont chargés, tous avec la même charge positive. Le fait que les protéines assurent une coagulation montre que ces

liaisons ne sont pas suffisantes pour expliquer le phénomène.

Les ponts disulfure seraient-il alors responsables de la coagulation ? Leur formation correspondant à une oxydation, l'expérience qui consiste à ajouter un agent réducteur, tel le borohydrure de sodium [7-8], à du blanc d'œuf « cuit » montre que l'hypothèse est la bonne : en quelques secondes, le blanc d'œuf se met à mousser (le borohydrure, ou tétrahydroborate, produit un gaz), et l'on obtient finalement un blanc d'œuf liquide, « décuit ». Pour ceux qui veulent faire l'expérience, il n'y a guère de difficulté : on cuit un blanc d'œuf à la poêle ou au four à micro-ondes, on ajoute une cuillerée à café d'eau et une cuillerée à café de borohydrure (vous voyez que je fais ici dans la cuisine... mais attention : le borohydrure ne se mange pas !). Une mousse abondante se forme (le gaz semble être de l'hydrogène), puis après quelques minutes, le volume de mousse cesse d'augmenter ; si on laisse la mousse redescendre, on récupère un liquide, sans parties solides. L'œuf est ainsi « décuit ». Les ponts disulfure semblent bien être les forces les plus énergétiques responsables de la coagulation.

Les théories scientifiques sont fausses... disons insuffisantes

Si la phrase précédente laisse évidemment en suspens une foule de questions, nous progressons... mais nous sommes loin de comprendre pourquoi les dix minutes de cuisson stipulées dans les recettes ont quelque réalité expérimentale. En effet, la théorie précédente indiquait que la dénaturation thermique des protéines provoquait la formation d'un gel par formation de liaisons disulfure. Toutefois, le chimiste sait bien que les protéines ont des températures de dénaturation qui dépend de leur séquence en résidus d'acides aminés. De ce fait, les dénaturations des diverses protéines doivent se produire à des températures différentes. Regardons de plus près.

Mesurer les températures de dénaturation des différentes protéines n'est pas difficile, pour qui s'amuse à les séparer. C'est ainsi que l'on peut établir le *tableau II* où

Tableau II - Les températures de dénaturation [13-14].

* Pendant la conservation des œufs, l'ovalbumine se transforme en S-ovalbumine. Si l'on chauffe à 10 °C/min, pH = 9, la température de dénaturation est de 84,5 °C pour l'ovalbumine et de 92,5 °C pour la S-ovalbumine.

Protéines	Temp. de dénaturation
Du blanc :	
Ovotransferrine	61 °C
Ovomucoïde	70 °C
Lysozyme	75 °C
Ovalbumine*	84,5 °C
Globuline	92,5 °C
Du jaune :	
LDL	70 °C
HDL	72 °C
Livetine alpha	70 °C
Livetine bêta	80 °C
Livetine gamma	62 °C
Phosvitine	plus de 140 °C
Jaune complet	65-70 °C (parce que LDL)



Figure 3 - Œuf cuit à 69 °C (à gauche) et à 70 °C (à droite).

l'on voit notamment que la première dénaturation a lieu à 61 °C pour l'ovotransferrine, suivie par une deuxième dénaturation à 70 °C pour l'ovomucoïde, avec ensuite une transition à 75 °C pour l'ovomucoïde, et une transition à 84,5 °C pour l'ovalbumine. Les gels nécessitant environ 1 % d'agent gélifiant pour se former, on voit que la première transition peut avoir lieu à 61 °C... et l'expérience qui consiste à placer un blanc d'œuf dans un four bien réglé montre qu'il en est ainsi : le blanc devient laiteux et solide, mais très délicatement pris. Les transitions sont brusques : il suffit d'une différence d'un degré pour les observer, comme le montre la *figure 3*. Sur ces images, on voit d'ailleurs que chaque transition correspond à un raffermissement et l'on comprend ainsi pourquoi le blanc d'œuf cuit trop longtemps devient caoutchouteux : progressivement, de nouveaux réseaux s'ajoutent, tenant l'eau de plus en plus fermement (d'ailleurs, on sait bien que des gelées de gélatine à 1 % et à 10 % sont bien différentes !). Une question scientifique pour ceux – j'espère tous – que cela amuse : les réseaux formés par les diverses protéines sont-ils indépendants, juste enchevêtrés, ou bien connectés ?

Dans la cuisson traditionnelle de l'œuf dur, le blanc passe évidemment par toutes les températures jusqu'à atteindre la température d'ébullition de l'eau, et l'équilibre n'est pas atteint : ce ne sont plus les températures qui sont importantes, mais les temps... d'où les 8-10 min de cuisson réglementaires, nécessaires pour coaguler la totalité du blanc et du jaune sans avoir trop de durcissement.

On le voit aussi, le fait de considérer notre première description – disons modèle, ou théorie, puisque c'est de cela qu'il s'agit – comme fausse nous a mis sur la piste d'innovations culinaires : les œufs à divers stades de coagulation.

Et le jaune ?

Pour le jaune, les choses sont plus compliquées... parce que sa composition chimique et microstructurale est plus complexe. D'abord, nous avons annoncé précédemment qu'il est fait de granules dispersés dans un plasma. Selon le moment de la journée, les couches déposées par la poule sont différentes, et visibles en imagerie ultrasonore : de fait, le jaune est une succession de couches de jaune clair, formé pendant la nuit, et de jaune profond, formé pendant le jour.

La différence provient du rythme de l'alimentation : pendant la nuit, la concentration en pigments xanthophylles (autrement dit jaunes) du sérum est plus faible que pendant le jour. L'épaisseur du jaune profond est de 2 mm, celle du jaune clair de 0,25-0,4 mm [9].

Les températures de dénaturation ? Elles se mesurent... mais s'observent aussi : à 65 °C, le jaune reste liquide bien qu'épais ; à 67 °C, il prend une consistance de pommade ; etc. Et c'est ainsi que pour différentes températures de chauffage, on obtient des jaunes de consistances différentes. Une remarque « centrifuge » encore : Jules Vernes signale que les œufs de tortues marines ne coagulent pas dans l'eau bouillante. Est-ce vrai ? Et pourquoi ?

Le cerne vert autour du jaune lors des cuissons prolongées ? Cette fois, le « nez » du chimiste doit s'exercer : il reconnaît facilement une odeur de sulfure de dihydrogène. D'où vient ce gaz ? L'expérience qui consiste à chauffer du blanc ou du jaune d'œuf dans un erlenmeyer au-dessus duquel on place un papier filtre imbibé d'acétate de plomb révèle que le blanc comme le jaune libèrent le gaz nauséabond... et toxique (les fiches de sécurité rappellent que le premier signe d'intoxication par le sulfure de dihydrogène est le fait qu'on ne le perçoit plus).

La couleur verte ? L'ovotransferrine, comme son nom l'indique, contient du fer, qui précipite en présence du composé soufré. Décidément, si la formation de ce gaz contribue au bon goût d'œuf cuit en petite concentration, il faut bien admettre que la couleur verdâtre, associée à une odeur et à un goût puissants en concentrations supérieures, est le signe d'une cuisson mal conduite.

Vers l'œuf dur idéal

L'œuf idéal... Question naïve parce qu'elle laisse penser que nous aurions accès à autre chose que les ombres sur le fond de la caverne platonicienne ? Peut-être, mais si nous analysons nos préférences, nous aurons quelques chances de faire mieux qu'un œuf au blanc caoutchouteux et au jaune sableux et cerné de vert...

Mon œuf dur idéal, à moi, doit avoir un blanc cuit mais tendre, salé dans la masse afin que le sel combatte cette fadeur délicate. Son jaune doit être cuit sans être sableux. Il ne doit naturellement avoir aucune odeur soufrée, et ne doit pas être cerné de vert. Le jaune doit être parfaitement centré

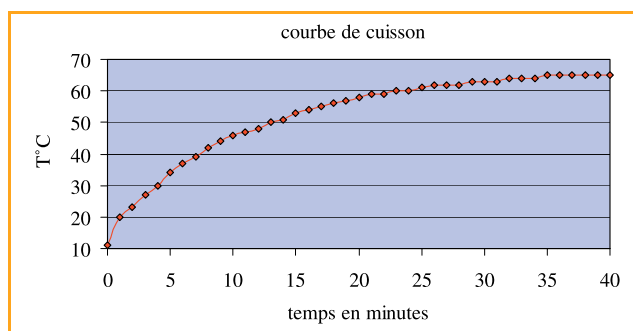


Figure 4 - Évolution de la température à cœur d'un œuf placé dans de l'eau à 65 °C.

dans le blanc et, touche finale, il doit s'écaler facilement. Comment obtenir ces qualités ?

Le salé du blanc a été évoqué sous la forme d'une question que je vous laisse. La tendreté du blanc sera obtenue au terme d'une cuisson un peu longue, à une température qui aura été déterminée par considération du tableau des températures de coagulation (voir figure 4). Idem pour le jaune. Désolé de faire état de mes goûts (le moi est haïssable !), mais je vous invite à tester 67 °C.

Centrer le jaune dans le blanc ? Examinons ce qu'en dit la cuisine classique. Madame Saint-Ange, par exemple, écrit que les œufs doivent être mis dans l'eau bouillante pour que le jaune soit bien au centre [10]. Auguste Colombié indique lui « Si nous mettions les œufs à l'eau froide, un autre phénomène aurait lieu. Le jaune pèse plus que le blanc, la chaleur atteint plus vite celui-ci puisqu'il est en dehors, et l'allégit encore ; le jaune retombe sur la coquille et d'un côté, vous voyez alors l'œuf étant cuit, une grosse couche de blanc d'un côté et, de l'autre, le jaune affleurer au dehors » [11].

Mettons un œuf dans l'eau froide et un autre dans l'eau bouillante. Après la cuisson réglementaire, ouvrons les œufs et comparons les sections : aucune différence n'apparaît. Troublant non ? Prenons la question avec un peu de recul. Pourquoi le jaune serait-il décentré dans un œuf ? La première hypothèse est évidemment que la densité différente du jaune et du blanc devait être responsable d'une montée ou d'une descente du jaune au sein du blanc.

Montée ou descente ? La majorité des personnes interrogées à brûle pourpoint, répondent, comme Colombié, que le jaune doit être plus dense que le blanc. Pourtant l'expérience simple qui consiste à placer un jaune dans une éprouvette, puis à ajouter quatre blancs par-dessus, révèle au contraire que le jaune est moins dense : il monte

lentement dans les blancs. Inversement, si on le place en surface, au-dessus des blancs, il y reste.

Cette densité inférieure s'explique bien, *a posteriori* : le jaune contient des lipides (des « graisses »), alors que le blanc n'est presque que de l'eau. Autrement dit, pour obtenir un œuf dur au jaune bien centré, le jaune doit être centré avant la cuisson, et cuit dans de l'eau bouillante, ou bien, si l'on cuit à partir d'eau froide, manipulé en cours de cuisson. Et c'est ainsi que l'œuf dur est idéal.

Note et références

* *Nyctéméral* : qui a une durée de 24 h, avec un jour et une nuit.

** www.lactualitechimique.org, page liée à la présentation du présent article (fichier pdf téléchargeable gratuitement).

- [1] *À table ! Peut-on encore bien manger ?*, B. Hervieu, P. Delannoy (eds), Édition de l'Aube, 2003.
- [2] Galilée, *Lettre à Liceti*, 1640.
- [3] Nyss Y., La coquille d'œuf, *Pour la Science*, 2001, 289, p. 48.
- [4] Papon P., Leblond J., *Thermodynamique des états de la matière*, Hermann, Paris, 1990.
- [5] *Fundamentals of adhesion*, L.-H. Lee (ed), Plenum Press, New York, 1991.
- [6] *Organic Sulfur Compounds*, N. Kharasch (ed), Pergamon Press, New York, 1961, p. 83.
- [7] Gonzales N.O., Levin M.E., Zimmermann L.W., The reactivity of sodium borohydride with various species as characterized by adiabatic calorimetry, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142(3), p. 639.
- [8] Borohydrure de sodium, NaBH₄ (CAS 16940-66-2), corrosif, inflammable, http://laurylab.com/ressources/10588/99/sodium_borohydrure.pdf
- [9] Anton M., communication personnelle.
- [10] Saint-Ange E., *La bonne cuisine de Madame E. Saint-Ange*, Larousse, 1925, Paris.
- [11] Colombié A., *Traité pratique de cuisine bourgeoise*, 1895, In Octavo, p. 70.
- [12] Belitz H.D., Grosch W., *Food Chemistry*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987, p. 513.
- [13] Thapon J.-L., Bourgeois C.M., *L'œuf et les ovoproduits*, Tec & Doc Lavoisier, Paris, 1994.
- [14] Li-Chan E., Nakai S., Biochemical basis for the properties of egg white, *Critical Reviews in Poultry Biology*, 1989, 2, p. 21.



Hervé This

est physico-chimiste INRA* et directeur scientifique de la Fondation « Science et culture alimentaire » de l'Académie des sciences.

Photo : L. Monier

* Équipe de gastronomie moléculaire, UMR 214, INRA/Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris.

Courriel : hervé.this@paris.inra.fr

www.inra.fr/la_sciences_et_vous/apprendre_experimenter/gastronomie_moleculaire

www.inra.fr/fondation_sciences_culture_alimentaire



www.lactualitechimique.org
Connaissez-vous bien le site de l'AC ?

Vous y trouverez :

- le sommaire et l'éditorial du dernier numéro
- des actualités
- un moteur de recherche

Et aussi :

- les articles en ligne (certains accessibles gratuitement, d'autres au prix de 4€)
- les archives des numéros thématiques (depuis 1999) ou à rubriques (depuis 2000)

Sans oublier que vous pouvez également :

- acheter un numéro en pdf
- vous abonner à la version électronique

Alors vite, à votre souris !

Compléments à l'article « L'œuf dur : un festin de réactions chimiques », d'Hervé This (*L'Act. Chim.*, 2008, 316, p. 5).

Annexe I - Les protéines du blanc d'œuf [1].

Protéine	% de la masse sèche du blanc	Masse moléculaire	Point isoélectrique	Commentaires
Ovalbumine [2-3]	58	45 000	4,6	4 groupes thiols libres, 1 pont disulfure, 3,2 % de sucres, acide phosphorique lié à des résidus de sérine, environ 400 acides aminés, dont 355 hydrophobes. On distingue trois ovalbumines : A1, A2 et A3 (avec respectivement 2, 1 ou 0 groupes phosphate) [4]
Conalbumine (ovotransferrine)	13	80 000 (autre valeur trouvée : 77 000)	6,6 (6,0)	Glycoprotéine pouvant fixer 2 atomes de Fe ³⁺ (ou Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Al ³⁺) par molécule. 1 seule chaîne de 686 acides aminés. 1 glycanes sur Asn 473 : 3 mannoses et 6 N-acétylglycosamines. 2 lobes tenus par 15 ponts disulfure.
Ovomucoïde	11 (10)	28 000	3,9 (4,1)	Pas de tryptophane. 186 résidus, 3 domaines avec 3 ponts disulfure chacun. Glucide : D-glucose, D-mannose, 2-amino-2-désoxy-D-glucose, acide sialique.
Lysozyme (ovoglobuline G1)	3,5	14 600 (14 300)	10,7	129 résidus, 4 ponts disulfure Enzyme N-acétylmuranidase ou N-acétylhexosaminidase qui attaque les mucopolysaccharides des parois des bactéries Gram +.
Ovoglobuline G2	4	30 000/45 000	5,5	3,2 % de glucose, 2,4% d'hexosamine. Moussante
Ovoglobuline G3	4	45 000	5,8	3,7 % de glucose, 2,5% d'hexosamine. Moussante
Ovomucine	1,5 (3)	210 000 (10 000 000)	4,5 (5)	Très glycosylée, microfibrilles de 2 à 10 nm de diamètre et 2 à 3 µm de long, responsable de la viscosité du blanc. Trois sous unités α1, α2, β. Inhibe les hémagglutinations virales
Flavoprotéine	0,8	35 000 (29200)	4,1 (4,2)	219 résidus, 15 % de glucides, lie la riboflavine. Phosphoglycoprotéine responsable de la couleur verdâtre du blanc d'œuf
Ovoglycoprotéine	0,5	24 000	3,9	
Ovomacroglobuline ou ovostatine	0,5	760 000/900 000	4,5/4,7	3,5 % hexose, 5,2 % hexosamine
Ovoinhibiteur	0,1	49 000 (44 000)	5,2	Inhibiteur des protéases
Avidine	0,05	67 000 (63 800)	9,5 (10)	128 acides aminés, 1 pont disulfure, 10 % de glucides. Se lie à la biotine
Cystatine		12 700		2 ponts disulfure. Inhibiteur des protéases à cystéine (comme ficine et papaïne)

- [1] Thapon J.-L., Bourgeois C.M., *L'œuf et les ovoproduits*, Tec & Doc/Lavoisier, Paris, **1994**.
 [2] Fothergill J.A., Fothergill J.E., Thiol and disulphide contents of hen ovalbumin: C-terminal sequence and location of disulphide bond, *Biochem. J.*, **1970**, 116(4), p. 555.
 [3] Thompson E.O.F., Fisher W.K., Amino acid sequences containing half-cystine residues in ovalbumin, *Australian J. Biol. Sci.*, **1978**, 31, p. 433.
 [4] Li-Chan E., Nakai S., Biochemical basis for the properties of egg white, *Critical Reviews in Poultry Biology*, **1989**, 2, p. 21.

Annexe II - Le jaune d'œuf [1].

Eau	Lipides	Protéines	Glucides	Cendres
50 %	<p>30 (32) % de la matière sèche du jaune, avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> • triglycérides, 46 % • phospholipides, 20 % • stérols, 3 % <p>64 % des acides gras sont insaturés (17,7 g/100 g) et 36 % sont saturés (10,1 g/100 g).</p> <p>Les phospholipides (5 g) sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • phosphatidylcholine (lécithine), 70 % • phosphatidyléthanolamine, 34 % • phosphatidylsérine, 1 % • phosphatidylinositol, 1 % • sphingomyéline, 4 % 	<p>20 (16) % de la matière sèche du jaune, avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> • livetines, 4 à 10 % • vitelline, 4 à 15 % • vitellinine, 8 à 9 % • phosvitine, 5 à 6 % 	1 %	1 %

- [1] Anton M., Structure and functional properties of hen egg yolk constituents, *Recent Res. Devel. in Agricultural & Food Chem.*, **1998**, 2, p. 839.

