



1. LE PÉTILLEMENT DES BULLES à la surface de la coupe de champagne provoque l'expulsion de minuscules jets de liquide qui se scindent en plusieurs gouttelettes. L'aérosol formé est chargé en molécules aromatiques.

Le champagne, vin pétillant qui a été notablement amélioré à la fin du XVII^e siècle sous l'impulsion du moine dom Pierre Pérignon (1639-1715), à l'abbaye de Hautvillers, près d'Épernay, est devenu synonyme de fête et de réussite. L'effervescence des bulles n'est pas étrangère à la notoriété de ce breuvage. Mais c'est seulement depuis quelques années que l'on commence à déterminer les mécanismes de la formation des bulles et leur rôle gustatif.

Quels sont les principaux acteurs responsables de l'effervescence du champagne ? Le dioxyde de carbone dissous est-

ouverte, est commune à tous les vins) qui a lieu en bouteille close, dans la fraîcheur des caves. Lors de cette seconde phase, dite prise de mousse, des levures sont ajoutées et transforment les sucres en alcool et en dioxyde de carbone.

Une bouteille de 75 centilitres contient environ neuf grammes de dioxyde de carbone dissous, ou cinq litres à pression atmosphérique, ce qui représente six fois le volume de la bouteille ! Sous le bouchon, du dioxyde de carbone s'accumule : la pression partielle de ce gaz atteint 6×10^5 pascals ou six bars, soit six fois la pression atmosphérique.

Champagne : l'arôme au cœur des bulles

G. Liger-Belair, R. Gougeon et Ph. Schmitt-Kopplin

Lorsqu'elles éclatent, les bulles dispersent au-dessus de la coupe de champagne un brouillard de minuscules gouttelettes, où se concentrent les molécules aromatiques.

il perçu par le consommateur ? Quel est le rôle joué par les bulles dans la perception des arômes du champagne ? Des analyses chimiques ont permis de répondre à ces questions. Nous préciserons les mécanismes physico-chimiques liés à l'éclatement des bulles à la surface d'une flûte et nous analyserons leur rôle dans la libération des arômes.

Rappelons comment les bulles se forment dans une flûte. Sous le bouchon de liège, le liquide est calme, aucune bulle ne se forme. Le champagne n'a pourtant rien d'un vin tranquille (appellation donnée aux vins non effervescents). Il contient en réalité du dioxyde de carbone dissous, mais ce n'est qu'au moment où l'on débouche la bouteille que les bulles apparaissent. C'est l'effervescence.

Le dioxyde de carbone se forme lors de la seconde fermentation alcoolique (la première fermentation alcoolique, en cuve

Selon la loi de Henry, à température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz. En appliquant cette loi, on trouve que sous six bars de dioxyde de carbone, le champagne peut dissoudre 12 grammes par litre de ce gaz. Dès l'ouverture, la surface du liquide est au contact de l'air extérieur, c'est-à-dire à la pression atmosphérique. La solubilité du gaz diminue brusquement et les premières bulles apparaissent.

Si l'effervescence est la seule visible à l'œil nu, elle ne représente que 20 pour cent de la totalité du dégazage. Dans une flûte classique, environ 80 pour cent du dioxyde de carbone dissous s'échappent par diffusion à travers la surface, à l'interface liquide-air. Cette forme de dégazage est plus importante dans une coupe que dans une flûte.

L'ESSENTIEL

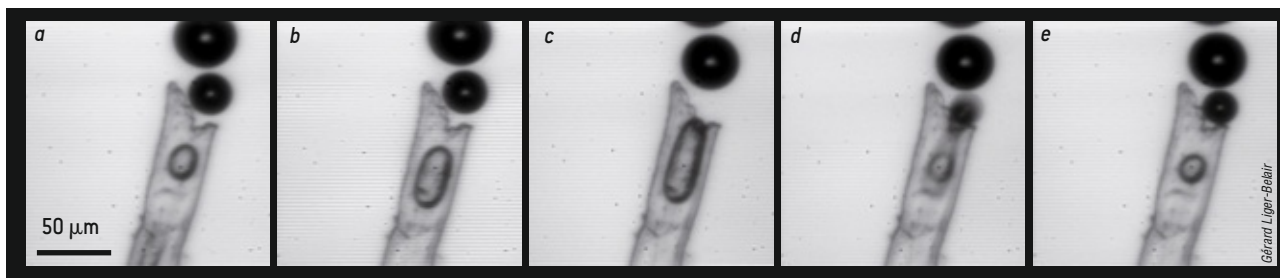
✓ Au-delà de leur aspect plaisant, les bulles favorisent la concentration des arômes du champagne.

✓ L'éclatement des bulles à la surface de la coupe forme un brouillard de gouttelettes chargées en molécules volatiles odorantes.

✓ Les bulles exercent un picotement mécanique et chimique lorsqu'elles éclatent sur la langue.

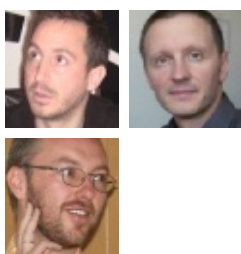
✓ L'aérosol créé lors de l'explosion des bulles rappelle les embruns qui se forment à la surface des océans.

Alain Cornu/Collection CIRC



2. LES FIBRES CREUSES DE CELLULOSE adsorbées sur la paroi de la flûte [provenant du torchon d'essuyage ou de l'atmosphère] piègent des bulles d'air qui grossissent à mesure de la diffusion du dioxyde de carbone dissous (a-c). Quand la bulle, enrichie en dioxyde de carbone, atteint une taille critique, elle s'échappe (d, e). Une milliseconde sépare deux clichés successifs.

LES AUTEURS



Gérard LIGER-BELAIR est professeur de physique au Laboratoire d'œnologie de l'Université de Reims. Régis GOUGEON est maître de conférences, dans l'Équipe Eau, Molécules actives, Macromolécules, Activités (EMMA), de l'Institut universitaire de la vigne et du vin, à l'Université de Bourgogne, à Dijon. Philippe SCHMITT-KOPLIN est directeur de recherche au Centre Helmholtz, à Munich.

✓ BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et G. Polidori, *Tempête dans un verre de champagne ! Pour la Science*, n° 362, pp. 66-70, 2007.

G. Liger-Belair et al., *Unraveling different chemical fingerprints between a champagne wine and its aerosols*, *PNAS*, vol. 106, pp. 16545-16549, 2009.

Chandrashekar et al., *The taste of carbonation*, *Science*, vol. 326, pp. 443-445, 2009.

G. Liger-Belair, *Effervescence : La science du champagne*, Odile Jacob, 2009.

Contrairement à une idée reçue, les bulles de champagne ne se forment pas sur les défauts du verre. Ce sont des particules, des fibres de cellulose provenant des torchons d'essuyage ou des microcristaux de tartre présents dans le vin, qui donnent naissance aux bulles. De minuscules bulles d'air ont été piégées dans les anfractuosités de ces particules au moment de verser le champagne. La pression à l'intérieur de ces microbulles d'air étant inférieure à la pression en dioxyde de carbone dissous, ce dernier y diffuse. La bulle gonfle à mesure de la diffusion du dioxyde de carbone, puis s'échappe de sa cavité quand elle a atteint une taille critique.

Ces microbulles d'air sont autant de mini-ascenseurs par lesquels le dioxyde de carbone dissous rejoint la surface en formant un train de bulles (voir la figure 2). Une fibre de cellulose émet plusieurs dizaines de milliers de bulles. On nomme « nucléation hétérogène » la formation de bulles de gaz carbonique à partir d'un germe de gaz préexistant dans le champagne (ou de toute autre boisson gazeuse).

Des centaines de bulles éclatent juste après le remplissage d'une flûte. Lorsqu'une bulle éclate à la surface de la coupe, elle projette un minuscule jet de champagne qui se brise en gouttelettes. La surface du liquide est alors piquetée de centaines de jets minuscules (voir la figure 3) se brisant à leur tour en plusieurs gouttelettes. Ce sont des centaines de gouttelettes, parfois des milliers, qui sont projetées chaque seconde, plusieurs centimètres au-dessus de la surface, sous la forme d'un « aérosol de champagne » qui picote le visage (voir la figure 1). Observons comment se forme cet aérosol.

Le jet de champagne se brise en plusieurs gouttelettes, car la somme des surfaces de multiples gouttelettes est inférieure à la surface du petit cylindre de liquide qui

jaillit de la surface. L'énergie de surface du système est ainsi minimisée. C'est l'instabilité de Rayleigh, également responsable d'un phénomène facile à observer : un mince filet d'eau qui s'écoule d'un robinet se scinde en gouttelettes.

Le jet de champagne parcourt une courte distance au-dessus de la coupe avant de se briser en gouttelettes. D'après les équations de la mécanique des fluides, on montre qu'il se fragmente au bout de quelques dixièmes de milliseconde. Pour des bulles millimétriques, comme celles du champagne, on compte environ cinq gouttelettes par bulle.

Piqûres mécaniques et chimiques

Le dioxyde de carbone dissous influe de deux façons sur la dégustation du champagne. Il exerce deux types de stimulations : une « piqûre » mécanique et une « piqûre » chimique, faisant intervenir des récepteurs sensoriels de la douleur et des récepteurs sensibles à l'acidité. Les gouttelettes de liquide projetées à la surface lors de l'éclatement des bulles stimulent d'abord les nocicepteurs (les récepteurs sensoriels de la douleur) situés dans le nez. Quant aux bulles de dioxyde de carbone qui éclatent dans la bouche lors de la dégustation, elles stimulent les nocicepteurs situés à la surface de la langue et du palais.

Ces picotements mécaniques sont véhiculés par le nerf trijumeau. Ce nerf se subdivise en trois branches innervant les muqueuses de la face, l'une dans la cavité buccale, une autre dans la région nasale et la troisième au niveau des yeux. C'est pourquoi lorsque nous consommons certains aliments (par exemple de la moutarde, du piment), la sensation de picotement remonte de la bouche vers le nez ou les yeux, et fait pleurer.

La piqure est d'autant plus forte que le champagne est effervescent (donc riche en dioxyde de carbone dissous). Ainsi, les vieux champagnes, appauvris en gaz car le bouchon poreux en a laissé s'échapper, sont perçus comme moins vifs que les champagnes jeunes.

Des picotements dus au dioxyde de carbone

En 2009, Charles Zuker et ses collègues, de l'Université Columbia à New York, ont montré qu'au contact de la langue, le dioxyde de carbone dissous dans le champagne exerce une piqure dite chimique. Chez la souris, des cellules de papilles gustatives portant des récepteurs sensibles à l'acidité (des chimiorécepteurs) sont activées en présence de dioxyde de carbone. Ils ont identifié le gène impliqué : *Car4*. Il code une enzyme, l'anhydrase carbonique 4, située dans la membrane des cellules sensibles à l'acidité.

Cette enzyme catalyse la réaction d'hydratation du dioxyde de carbone dissous en acide carbonique H_2CO_3 , lequel se dissocie en protons H^+ et en ions bicarbonates HCO_3^- . Dans la salive (dont le pH est dans les conditions habituelles proche de 7, c'est-à-dire neutre), l'apport de dioxyde de carbone déplace l'équilibre de dissociation de H_2CO_3 en faveur des ions H^+ . Ces derniers, libérés dans le milieu extracellulaire, activent ensuite les chimiorécepteurs PKD2L1 des cellules sensi-

bles à l'acidité, d'où le picotement chimique caractéristique.

Les expériences ont été menées sur la souris, mais les résultats obtenus sont-ils transposables à l'homme ? Pour vérifier les conclusions de Ch. Zuker et de son équipe, il faudrait organiser une dégustation de champagne dans une enceinte sous pression (autour de quatre ou cinq bars) pour empêcher l'effervescence, et par la même occasion la piqure mécanique. Dans ces conditions, le dioxyde de carbone dissous devrait activer les récepteurs sensibles à l'acidité – via la formation des ions H^+ –, et provoquer la piqure chimique attendue. Sans doute faudra-t-il trouver une autre façon de valider l'hypothèse...

Une anecdote vient conforter les conclusions de l'équipe de Ch. Zuker. En 1988, un médecin nommé Stephan Kelleher vient de gravir un sommet. Afin de se prémunir contre le mal des montagnes dont il souffre, il a pris un médicament à base d'acétazolamide. Or les enzymes des cellules sensibles à l'acidité sont inactivées par cette molécule. Pour célébrer leur ascension, S. Kelleher et ses compagnons décident de déboucher une bouteille de champagne. À sa grande surprise, le médecin rapporte que dans sa bouche le breuvage fut d'une grande platitude. En 1988, il ne s'expliquait pas le phénomène. On le comprend mieux aujourd'hui à la lumière des travaux de l'équipe américaine. Les enzymes des cel-

lules sensibles à l'acidité, neutralisées par l'acétazolamide, ne lui permettaient plus de ressentir la piqure chimique du dioxyde de carbone dissous.

Outre les picotements mécaniques et chimiques, l'éclatement des bulles semble jouer un rôle majeur dans la libération des arômes du champagne. Des centaines de composés organiques sont présents dans le champagne. Or beaucoup d'entre eux sont amphiphiles, c'est-à-dire que leurs molécules ont une double affinité : une partie de la molécule amphiphile est hydrophobe, tandis que l'autre est hydrophile. C'est notamment le cas de quelques alcools, de certains aldéhydes ainsi que des acides organiques.

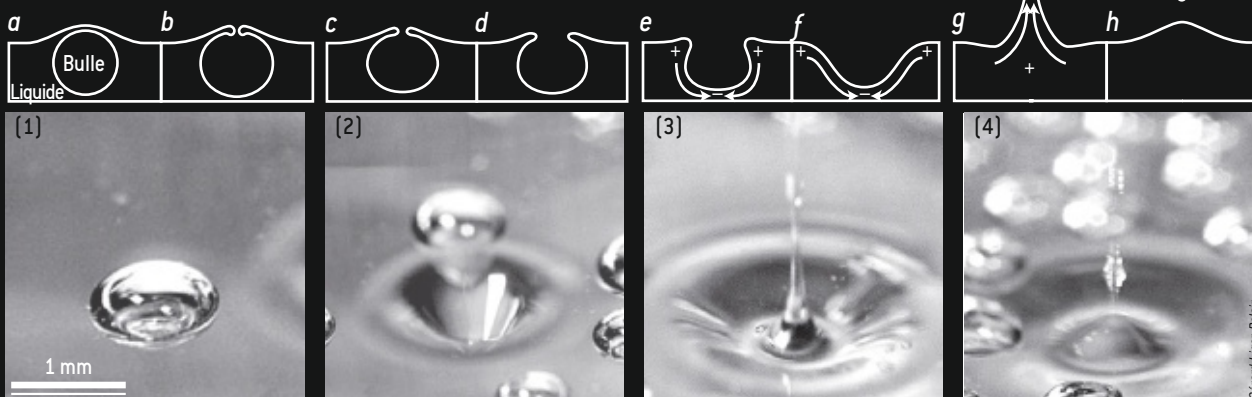
Les bulles, exhausteurs d'arômes

Les molécules amphiphiles tendent à se placer aux interfaces gaz-liquide. Leur partie hydrophile est orientée vers le liquide et leur partie hydrophobe vers le gaz. Les bulles participent à l'ascension des molécules amphiphiles – seule une partie d'entre elles ont des propriétés aromatiques – qui s'y adsorbent. On estime que la surface cumulée de toutes les bulles produites dans une flûte avoisine deux mètres carrés.

Pour cette raison, les mini-ascenseurs qui véhiculent le dioxyde de carbone devraient aussi transporter les molécules aromatiques. Ces dernières devraient se

3. LA SÉQUENCE DE PHOTOGRAPHIES illustre la formation d'un jet de champagne [3] suite à l'éclatement d'une bulle en surface [1] et qui se scinde en plusieurs gouttelettes [4]. Environ une milliseconde sépare deux clichés successifs. La séquence schématisée détaille les étapes de la formation de l'aérosol. La partie émergée de la bulle est séparée de l'atmosphère par un mince film de liquide (a). Ce film finit par se rompre sous l'effet de la poussée de la bulle ; l'ouverture s'élargit à la vitesse de dix mètres par seconde (b à f). D'après la loi de Laplace reliant courbure

d'une interface et pression, il se crée un gradient de pression autour de la cavité. Une surpression (signe +) apparaît dans le liquide au bord du film et une dépression (signe -) sous la partie renflée (e). Le liquide se déplaçant des fortes pressions vers les basses pressions (f), un jet de liquide se forme (g), puis se scinde en gouttelettes (h).



La chimie des arômes du champagne

Le champagne est élaboré à partir de trois cépages (Chardonnay, Pinot noir et Pinot Meunier) dits non aromatiques, c'est-à-dire ne contenant pas de molécules responsables d'arômes variétaux, contrairement au Muscat ou au Gewürztraminer (un cépage qui rentre dans la composition de vins alsaciens). Les arômes variétaux sont les arômes primaires, présents dans le raisin et que l'on retrouve dans le vin.

Les raisins des cépages utilisés en Champagne ne contiennent que des précurseurs d'arômes non volatils. Ils sont formés par l'association d'une molécule odorante et d'un glucoside (un dérivé du glucose), ce qui les rend inodores. Au cours de la fermentation alcoolique, des systèmes enzymatiques coupent la liaison glucosidique. Les molécules odorantes sont alors libérées.

Les arômes caractéristiques des vins de la région de Champagne résultent d'un mélange complexe de plusieurs composés d'origine fermentaire ou non (c'est-à-dire provenant du raisin pur). Parmi les molécules qui participent à l'arôme de ces vins, on détecte des acides organiques (acide méthylbutanoïque, acide

octanoïque...), avec des odeurs douces, épicées, rances; des alcools supérieurs (pentanol, hexanol...), avec des odeurs herbacées, vertes, des norisoprénoides (β -damascenone, β -ionone...) aux notes florales; et des esters (hexanoate d'éthyle, octanoate d'éthyle...) aux odeurs fruitées, de banane et de fraise.

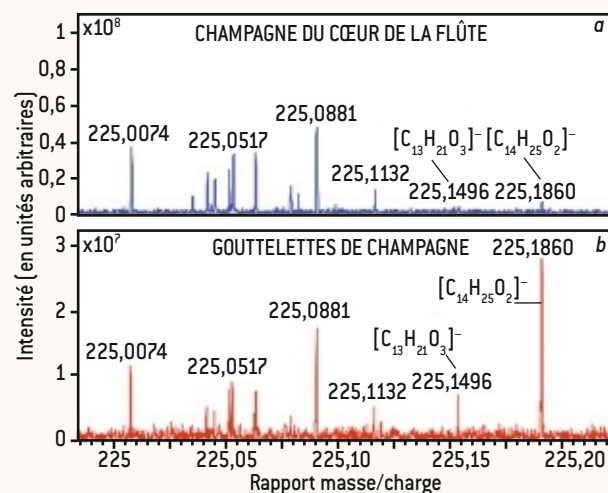
Les molécules qui participent à la saveur caractéristique du champagne sont libérées lors de la seconde fermentation correspondant à la prise de mousse. La période pendant laquelle le vin est au contact des levures peut durer plusieurs années. Les levures vont alors libérer les métabolites responsables des arômes secondaires du champagne. On y trouve des esters, des acides gras et des alcools. Au cours de cette étape, la concentration en ces composés peut varier parce qu'ils s'adsorbent sur les lies des levures. Il en va de même pour les tanins, les associations tanins-protéines ou les complexes tanins-anthocyanes (dans le cas des champagnes rosés), lesquels participent à l'astringence et à la couleur des vins.

Enfin, ce qui caractérise les vieux champagnes, c'est la note empyreumatique de leurs arômes qui évoque des odeurs de torréfac-

tion, de brioche ou de pain croustillant. Ces odeurs sont dues à la formation de composés soufrés volatils (mercaptopropionate d'éthyle, furaneméthanthiol...) dont la concentration augmente avec l'âge du champagne.

Pour les vins tranquilles, comme pour les champagnes, les parfums ne résultent pas seule-

ment de la présence de molécules odorantes spécifiques, mais des interactions de tous les composés du vin. Ainsi, de nombreux paramètres physico-chimiques – acidité, teneur en alcool, en tanins, en sucres, et, bien sûr, présence de dioxyde de carbone dissous – contribuent à la complexité du bouquet perçu par le dégustateur.



La spectrométrie de masse permet de comparer la composition du champagne au cœur de la flûte (a) à celle des gouttelettes projetées lors de l'éclatement des bulles (b). Chaque pic caractérise la présence d'une molécule de masse donnée. Plus le pic est haut, plus la concentration est élevée. Ainsi, les ions moléculaires [C₁₃H₂₁O₃]⁻ et [C₁₄H₂₅O₂]⁻ sont très concentrées dans les gouttelettes.

concentrer à la surface de la flûte à champagne. L'aérosol, formé lors de l'éclatement des bulles à la surface, serait donc plus concentré en molécules aromatiques que le cœur du liquide. C'est ce que notre équipe a vérifié par des analyses physico-chimiques.

Nous avons analysé la composition chimique du brouillard de gouttelettes avec un spectromètre de masse à ultrahaute résolution, au Laboratoire de biogéochimie analytique du centre Helmholtz de Munich, en Allemagne. Nous avons comparé la composition chimique de ce brouillard de gouttelettes avec celle du champagne du cœur de la flûte (voir l'encadré ci-dessus). Après analyse, nous avons montré que cet aérosol est beaucoup plus concentré – parfois jusqu'à 30 fois – en plusieurs dizaines de molécules organoleptiques que le cœur de la flûte.

Parmi ces molécules, on retrouve des acides gras, des composés terpéniques et

d'autres molécules impliquées dans l'arôme des vins. Notons que le mécanisme que nous avons mis en évidence concentre les arômes jugés agréables par un dégustateur, mais aussi les arômes herbacés ou déplaisants (pour peu que les molécules responsables de ces anomalies organoleptiques soient suffisamment amphiphiles pour se lier aux bulles de dioxyde de carbone).

Des arômes dispersés un peu comme les embruns de la mer

Une analogie peut être établie entre le « pétilllement » de l'océan et celui du champagne. Le bouillonnement à la surface de l'océan résulte de l'action des vagues combinée à celle de la pluie, les deux phénomènes piégeant de l'air dans l'eau de

mer sous forme de bulles. Lorsque les bulles éclatent à la surface de la mer, elles diffusent un brouillard de gouttelettes analogue à celui du champagne.

Dès le début des années 1970, des océanographes ont établi que ces gouttelettes concentraient certaines molécules présentes dans l'eau de mer. Plus récemment, lors d'une campagne dans les océans Atlantique et Antarctique menée sur le brise-glace allemand *Polarstern*, le transport vers l'atmosphère, sous forme d'embruns, de centaines de composés organiques dissous dans l'océan a été décrit.

Tout comme les bulles de champagne dispersent des molécules aromatiques à la surface du vin, les gouttelettes produites par le pétilllement des océans, riches en composés organiques dissous, parfument l'air marin. De quoi voir d'un autre œil votre prochaine séance de dégustation d'un vin effervescent! ■

Le champagne

de la tradition à la science

NOUVEAU

Aucun livre récent ne traitait exclusivement et de manière complète du procédé d'élaboration du champagne ou des vins effervescents selon la méthode traditionnelle. Cette lacune est désormais comblée avec *Le champagne, de la tradition à la science* qui développe toutes les spécificités liées à cette œnologie.

Après un rappel historique qui permet de comprendre pourquoi le champagne a atteint la notoriété mondiale qu'il occupe aujourd'hui, cet ouvrage expose :

- les **spécificités de la culture** de la vigne en champagne
 - les différentes étapes de l'**élaboration** du champagne : pressurage, fermentations et assemblage
 - les étapes propres à l'élaboration des champagnes et des vins préparés **selon la méthode traditionnelle** en explicitant les étapes de tirage, de prise de mousse, de vieillissement sur lies en bouteilles, de remuage et de dégorgement
 - les différents **éléments extérieurs** (verre, température du champagne, etc.) qui contribuent à une effervescence généreuse et à un cordon stable
 - les **caractéristiques analytiques** du champagne et le sens des différents termes utilisés par les professionnels ou les œnophiles lors des dégustations
 - les différents **aspects toxicologiques et sanitaires** liés à une consommation modérée du champagne
 - les différents **modes d'élaboration** des vins effervescents existant de par le monde
 - les **problèmes d'environnement et de développement durable** liés à la culture de la vigne et à l'élaboration du champagne.
- En conclusion un essai de prospective sur ce que sera le champagne dans les années à venir est proposé.

Conçu pour les élaborateurs de vins effervescents, en particulier les récoltants manipulateurs, désirant mieux comprendre leur travail au quotidien, *Le champagne, de la tradition à la science* s'adresse aussi bien aux œnologues, qu'aux amoureux du champagne désirant mieux connaître ce produit qu'ils apprécient particulièrement.



Le champagne
de la tradition à la science
Bruno DUTEURTRE

Éditions Tec & Doc - Lavoisier
ISBN : 978-2-7430-1272-2
364 pages • 15,5 x 24 cm • broché • 2010
75 €

L'auteur

Bruno DUTEURTRE, Ingénieur-docteur ENSAIA de Nancy, a travaillé pendant 11 ans pour les Brasseries Kronenbourg, particulièrement comme chef de projet microbiologie au centre de recherche Tepreal, avant de rejoindre Moët & Chandon pour développer et diriger pendant plus de 20 ans le service de recherche dans différents domaines tels que la recherche viticole, les fermentations, le vieillissement sur lies du champagne, la mousse et l'effervescence.

En vente chez votre libraire habituel

ou à la librairie Lavoisier : 11, rue Lavoisier F-75008 Paris • www.Lavoisier.fr

