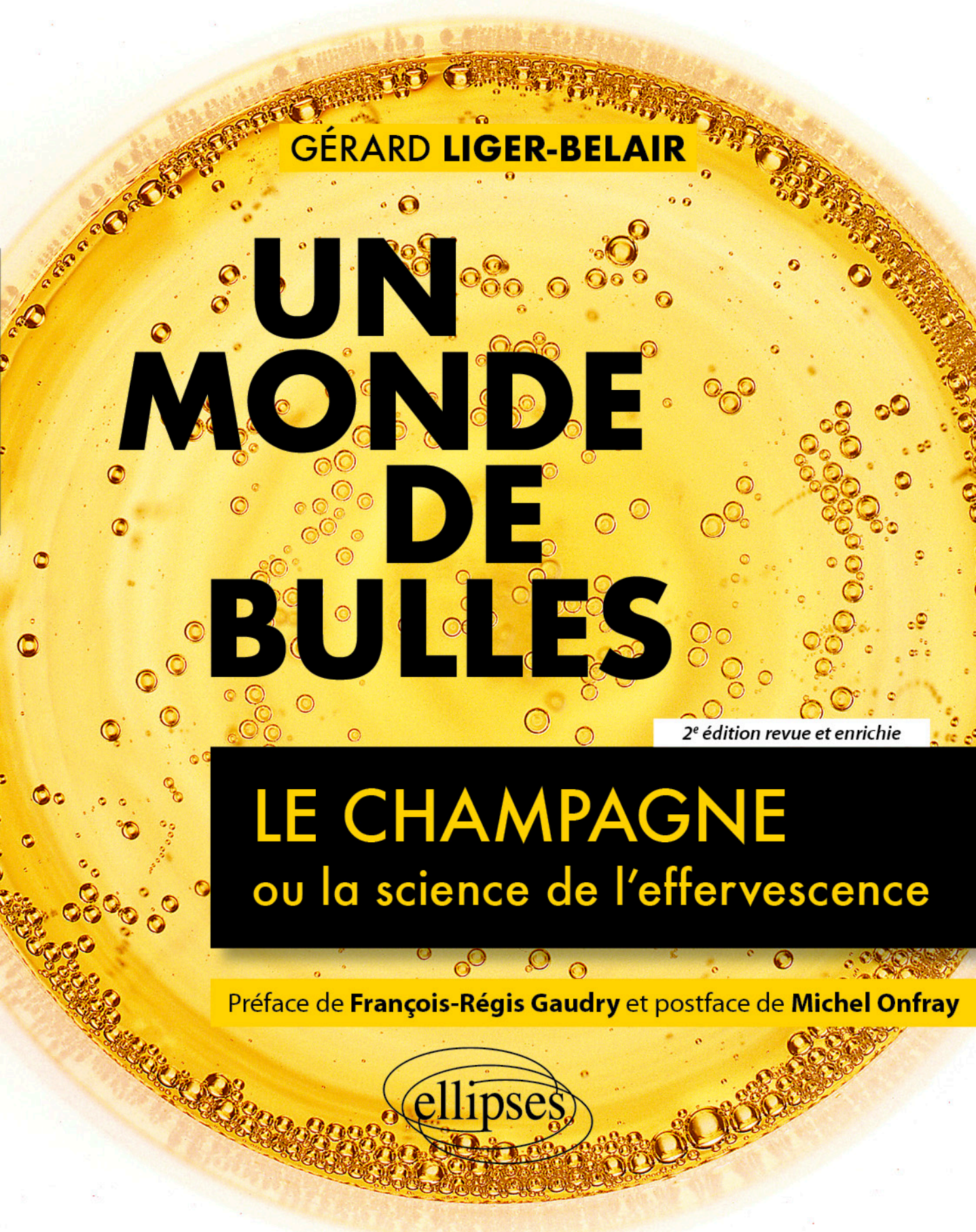


A circular, microscopic view of champagne bubbles, showing a dense layer of small, spherical bubbles along the top edge and scattered bubbles of various sizes throughout the golden liquid.

GÉRARD LIGER-BELAIR

UN MONDE DE BULLES

2^e édition revue et enrichie

LE CHAMPAGNE
ou la science de l'effervescence

Préface de **François-Régis Gaudry** et postface de **Michel Onfray**

ellipses

UN MONDE DE BULLES

LE CHAMPAGNE ou la science de l'effervescence

2^e édition revue et enrichie

Préface de François-Régis Gaudry
et postface de Michel Onfray

Gérard Liger-Belair



Conception graphique couverture : Éric VIGIER
Conception graphique intérieur : Bénédicte LE MÉLINAIRE
Mise en pages : Soft Office

ISBN 9782340-121492

Dépôt légal : septembre 2026

©Ellipses Édition Marketing S.A.
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Préface

Ma rencontre avec l'homme des bulles

L'émerveillement intact

Ma rencontre avec Gérard Liger-Belair remonte au 7 juin 2021. J'arrive en gare de Champagne-Ardenne TGV à 13 h 03, puis je prends un taxi jusqu'à l'Université de Reims. Mon micro de France Inter est branché, je suis prêt. Monture de lunettes épaisse, cheveu hirsute, chemise bleu ciel débraillée, le professeur de physique m'accueille avec le sourire et me guide jusqu'au saint des saints : un grand open space surpeuplé de machines, d'ordinateurs, de caméras et d'optiques en tous genres... Autant de joujoux qu'une poignée de jeunes scientifiques manipulent dans une ambiance monacale. « Bienvenue dans le seul labo au monde dévolu à l'étude des boissons à bulles ! » me dit Gérard au micro. Il y a partout des bouteilles mais on n'est pas là pour un pot de départ ou une fête de fin d'année. Ici, le champagne donne son corps à la science : Gérard et son équipe cherchent à tout comprendre, du débouchage jusqu'à l'éclatement des bulles dans le verre. En ouvrant un Brut Nature de la maison Drappier que j'ai apporté, il me cause « décompression adiabatique », « écoulements tourbillonnaires », « coefficient de frottement » mais sans jamais me perdre. Au contraire, cet agité de la bulle a cette faculté de mettre à la portée de tous, avec une limpidité rare, un quart de siècle de découvertes pointues et internationalement reconnues depuis sa thèse de doctorat qui portait déjà sur l'étude des processus physico-chimiques liés à l'effervescence des vins de Champagne. Mes auditeurs de France Inter ne s'y sont pas trompés : après la diffusion de l'épisode 8 consacré à l'effervescence de mon Podcast Saveurs Savantes,

c'est un flot inhabituel de mails que nous avons reçus, louant l'intelligence de notre savant fou, réclamant des précisions, trinquant même à la gloire de la recherche française !

J'admire Gérard pour sa bluffante capacité à captiver n'importe quel public avec des travaux de longue haleine sur ce qu'on considère a priori comme un petit sujet de rien du tout, cette éphémère et impalpable réalité des bulles, des « objets fragiles » comme les nommait le Nobel Pierre-Gilles de Gennes. Et je remercie ô combien Gérard d'avoir radicalement amplifié nos regards épicuriens sur le champagne. Au-delà de la jouissance festive et universelle de sa dégustation, la bulle a ce super pouvoir de nous transporter dans des contrées esthétiques et poétiques insoupçonnées ! Le livre que vous tenez entre les mains en est la preuve la plus aboutie : c'est un billet en première pour un voyage grandiose et éclairant au cœur de la bulle, de champagne et de bien d'autres boissons !

Vous l'aurez compris, je n'ai plus jamais lâché Gérard. Il a mis son grain de sel dans ma nouvelle encyclopédie *On Va Déguster le Monde* qui s'intéresse à tout ce qui a changé dans la gastronomie depuis les années 2000 et il s'est fendu d'une mini-conférence brillante et didactique dans un spectacle de théâtre que j'ai écrit, le *Cabaret Gourmand*, que nous avons eu le plaisir de jouer ensemble au Théâtre du Rond-Point à Paris en avril 2026. Il fallait voir les visages fascinés des 800 spectateurs chaque soir devant ses vidéos magnétiques : celles qui comparent le saut d'un bouchon de champagne et le décollage d'une fusée, ou celles qui démontrent que les mouvements des bulles dans notre verre obéissent aux mêmes lois que les courants marins à l'échelle de la terre. Après les représentations, ceux et celles qui sont venus le féliciter et lui poser des questions étaient le plus souvent des moins de 15 ans. Exactement l'âge qu'avait Gérard quand il s'interrogeait en silence devant son verre de soda... Les plus grands scientifiques ne sont-ils pas ceux qui ont su garder intacte leur capacité d'émerveillement ?

François-Régis Gaudry

Avant-propos

Les amours de la science et de la bulle

Gérard Liger-Belair

Équipe Effervescence (GSMA), UMR CNRS 7331,
Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France
gerard.liger-belair@univ-reims.fr

Il est des spectacles qui incitent à la méditation. Les flammes d'un feu de cheminée, le lent mouvement des nuages dans le ciel, le flux et le reflux des vagues sur une plage... les bulles du champagne qui s'égrènent verticalement dans une flûte. Sans bulles, le champagne perdrait tout son caractère, toute son âme. Pourtant, quoi de plus simple qu'une bulle, me direz-vous ? Quoi de plus banal, de moins intéressant, pour qui n'est pas guidé ? Se peut-il vraiment que l'âme de ce vin soit enfermée dans ces minuscules sphères de gaz carbonique qui remontent dans le verre ? De mon point de vue pourtant, quoi de plus sensuel, de plus merveilleux, de plus fascinant qu'une bulle, quand on sait la regarder avec les outils de la science... Ce sont des *objets fragiles*, comme les définissait avec poésie Pierre-Gilles de Gennes¹. Ces petites sphères de gaz carbonique qui prennent naissance dans le vin engendrent une kyrielle de phénomènes d'une complexité insoupçonnée, qui vont mettre en éveil la panoplie complète des sens du dégustateur. Bien que très attaché au monde du vin, je ne suis ni viticulteur ni œnologue, mais océanographe et physicien de formation. En quoi un physicien pourrait avoir son mot à dire à propos de l'effervescence des vins de Champagne me

1. de Gennes, P.-G., Badoz, J. 1994. *Les objets fragiles*. Plon, Paris.

direz-vous ? J'y viens. L'observation des phénomènes naturels m'a toujours fasciné. Je suis un grand contemplatif. Depuis le mouvement orbital des planètes à très grande échelle, jusqu'à celui des électrons qui gravitent autour du noyau des atomes, en passant par la propagation de la lumière ou des ondes sonores, les lois qui décrivent les phénomènes naturels s'adosent au formalisme mathématique. Les bulles du champagne ne dérogent pas à cette règle. L'apparition et le mouvement des bulles obéissent à des équations, parfois complexes, qui permettent de prédire un certain nombre d'éléments essentiels en dégustation, comme le nombre de bulles produites, leur taille, leur vitesse ascensionnelle, la façon dont elles dispersent le gaz carbonique et les arômes du vin... Et quelle merveilleuse illustration, directement issue de notre quotidien, de la présence des mathématiques là où on ne les attend peut-être pas !

Après une thèse de doctorat soutenue en 2001, c'est donc à l'université de Reims Champagne-Ardenne que j'ai posé mes valises afin d'étudier toutes les facettes de ce sujet fascinant. Voilà une vingtaine d'années maintenant que je consacre mon énergie et mon imaginaire de chercheur à tenter de décrypter les phénomènes à l'origine de la formation des bulles dans un verre. Je les scrute, je les traque, je les filme, je les photographie sous toutes leurs coutures, je tente de saisir leurs moindres soubresauts. À l'échelle microscopique, le spectacle de l'effervescence est saisissant !

Je tente de comprendre le mouvement des bulles, et les mécanismes qu'elles induisent en dégustation. J'essaye de mettre en équations chacune des étapes qui jalonnent leur existence, de leur naissance à leur mort. Aujourd'hui, nous savons par exemple qu'elles apparaissent sur de fines poussières ou des imperfections du verre, qu'elles remontent vers la surface en se chargeant du gaz carbonique dissous, et qu'elles éclatent en projetant de minuscules gouttelettes de champagne, dispersant ainsi efficacement les arômes du vin. Nous savons aussi pourquoi le gobelet en plastique est à proscrire en dégustation. Les bulles s'y accrochent irrésistiblement et grossissent avant de remonter dans le verre, créant ainsi une effervescence très grossière. Nous avons également appris que servir le champagne dans une flûte penchée permet de mieux préserver le gaz carbonique dissous et donc de former d'avantage de bulles lors de la dégustation. Je me souviens d'ailleurs avec

amusement du grand bruit médiatique que cela avait provoqué à l'époque en Champagne. Pour certains, servir le champagne comme la bière serait un crime de lèse-majesté. Les codes ne sont-ils pas faits pour être cassés de temps en temps ? Qui aurait imaginé il y a une trentaine d'années que l'on puisse proposer du champagne à déguster à la paille. Et pourtant, une prestigieuse Maison l'a fait, avec le succès que l'on sait. Plus récemment, plusieurs Maisons ont proposé des cuvées destinées à être dégustées sur glace ? Impensable il y a quelques années !

En 2012, je crée une équipe de recherche pluridisciplinaire, spécifiquement dévolue à l'étude des phénomènes effervescents. Nos travaux permettent d'appréhender sous un jour nouveau des pratiques œnologiques et des observations empiriques parfois séculaires. Certaines des idées reçues qui existent encore dans l'univers du champagne et des vins effervescents ne sont d'ailleurs plus compatibles avec une œnologie moderne et rationnelle qui dispose aujourd'hui d'outils susceptibles d'apporter des éclairages scientifiques nouveaux. Grâce aux progrès de la science, nous avons aujourd'hui une bonne idée de la complexité des phénomènes qui se jouent lors d'une dégustation de champagne. On m'a parfois fait le reproche qu'à force de vouloir ainsi lever le voile sur ce phénomène naturel qu'est l'effervescence, je risquais d'en extraire la magie. Je ne le crois pas. En quoi une meilleure connaissance de l'origine des choses pourrait-elle altérer le plaisir qu'on a à les vivre ou à les observer ? Je n'éprouve pas moins de plaisir ni moins d'émotion en observant un arc-en-ciel depuis que je sais qu'il est dû à la réfraction et à la réflexion des rayons du soleil dans les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Bien au contraire, j'éprouve probablement encore plus d'émotions en décryptant la Nature à l'œuvre. C'est dans cet esprit que j'essaie de transmettre la passion qui m'anime et que j'inscris mes pas dans ceux des générations d'œnologues et de chercheurs qui m'ont précédé afin d'apprivoiser cette bulle, patiemment...

Je vous invite à m'accompagner pour une dégustation de champagne un peu particulière, que nous effectuerons sous l'angle de la science. Ce vin à bulles dont l'origine remonte à la fin du XVII^e siècle n'a pas fini de nous surprendre et de susciter engouement et curiosité partout dans le monde. Cet ouvrage vous propose une vue d'ensemble des résultats acquis au cours

des vingt-cinq dernières années, depuis le débouchage d'une bouteille de champagne, jusqu'à l'éclatement d'une bulle, en passant par le rôle essentiel du verre en dégustation. Profondément ancrée dans l'imaginaire collectif, la bulle de champagne devient prétexte à une flânerie scientifique qui nous entraîne dans le monde fascinant des bulles, des gaz dissous, des changements de phase et des fluides en mouvement.



Gérard Liger-Belair dans son laboratoire de l'université de Reims Champagne-Ardenne.
(© Emmanuel Goulet).



Chapitre 1

L'élaboration du champagne : de la vendange à la bouteille

Du point de vue strictement législatif, le champagne est un **vin mousseux de qualité** produit dans une **région déterminée**, en l'occurrence en Champagne (un VMQPRD, comme on l'exprime dans le langage communautaire). De nos jours, la technique de production moderne du champagne n'est pas fondamentalement différente de la méthode empirique mise au point vers la fin du **xvii^e** siècle. Beaucoup d'élaborateurs de vins mousseux de qualité l'utilisent aujourd'hui de par le monde. Les vins mousseux élaborés de cette manière sont labellisés *Méthode traditionnelle*. Cette méthode comporte différentes étapes bien distinctes décrites dans ce chapitre.

Les vendanges en Champagne

Le vignoble champenois est le plus septentrional des vignobles français. L'aire de production de l'Appellation d'origine contrôlée (AOC) Champagne couvre quelque 34 300 hectares (**figure 1**).



Figure 1. Le vignoble champenois couvre quelque 34 300 hectares. Ci-dessus, le phare de Verzenay, qui domine le vignoble au cœur de la Montagne de Reims. (© Emmanuel Goulet)

Son étendue est relativement modeste puisqu'il ne représente en effet que trois à quatre pour cent de la surface du vignoble français, tout au plus. Trois variétés de raisins (on parle de cépages) y sont cultivées : le chardonnay (un raisin blanc), le pinot noir et le meunier, qui sont deux variétés de raisin noir (figure 2).



Figure 2. Quelques grappes de chardonnay à maturité (a), et réseau vasculaire périphérique d'une baie de chardonnay (b). (© Emmanuel Goulet)

Une fois vendangés, généralement vers la mi-septembre (figure 3), les raisins sont ensuite rapidement pressés pour obtenir un jus très sucré qu'on appelle le « moût ». Les raisins sont pressés séparément en fonction de chaque cépage, mais également de leur parcelle d'origine. En séparant les moûts, le viticulteur disposera ainsi d'une large palette de goûts et de saveurs au moment de l'étape cruciale de l'assemblage.



Figure 3. Scènes de vendanges en Champagne, où la cueillette du raisin se fait exclusivement manuellement. (© Emmanuel Goulet)

Une première fermentation alcoolique

Une fois les raisins pressés, les différents moûts sont alors ensemencés en levures (une variété de champignon unicellulaire connue sous le nom de *Saccharomyces cerevisiae*), puis transférés dans des contenants plus ou moins volumineux. Jusqu'au début du xx^e siècle, les vinifications étaient conduites dans des contenants en bois, essentiellement des fûts de chêne d'une contenance de 205 litres. Certains élaborateurs ont conservé ce mode de vinification. On parle alors de vinification « sous bois » (figure 4).



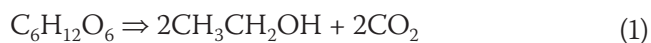
Figure 4. Foudres et fûts de chêne dans les caves du champagne Lanson, à Reims. (© Emmanuel Goulet)

De nos jours, la vinification est néanmoins le plus souvent réalisée dans des cuves en acier inoxydable et thermorégulée (figure 5). L'inox est généralement préféré au bois pour son inertie et sa neutralité vis-à-vis du vin. En effet, le choix d'un fût en bois n'est pas neutre. Le bois libère des composés qui participent au bouquet aromatique des vins, apportant des caractères vanillés, parfois toastés. De plus, les douelles d'un fût ne sont pas hermétiques aux transferts de gaz. Il s'ensuit alors une micro-oxygénation progressive du vin, qui lui confère plus de rondeur et de gras¹.

1. Comité Champagne « Champagne: De la cave à la table » <https://www.champagne.fr/assets/files/brochure%20champagne/Champagne-Cave-Table.pdf>



Une fois qu'il estensemencé en levures, le moût va alors subir une première fermentation alcoolique. Il s'agit d'un processus biochimique à la base de l'élaboration d'un vin, quelle que soit son origine géographique. La fermentation alcoolique s'exprime par l'équation bilan ci-dessous :



En termes simples cela signifie que, lors de la fermentation alcoolique, chaque molécule de glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) contenue dans le moût de raisin se transforme sous l'action des levures pour libérer deux molécules d'éthanol (l'alcool éthylique de formule brute $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) et deux molécules de dioxyde de carbone (de formule brute CO_2) – on évoque parfois le gaz carbonique, par abus de langage.

Figure 5. Cuves thermorégulées de la maison de champagne Deutz, à Aÿ. (© Emmanuel Goulet)



Figure 6. Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) est un chimiste et physicien français. En 1815, il établit pour la première fois l'équation brute de la décomposition du glucose en éthanol.



Figure 7. Louis Pasteur (1822-1895) est un chimiste et physicien français, pionnier de la microbiologie. En 1857, il établit que la fermentation alcoolique est due à l'activité métabolique de la levure de bière. (Félix Tournachon, dit Nadar)

C'est probablement en observant la fermentation des fruits mûrs tombés des arbres sur le sol que nos lointains aïeux découvrirent l'alcool. C'est le chimiste français Joseph-Louis Gay-Lussac (**figure 6**) qui, le premier, décrivit scientifiquement le processus de la fermentation en 1815, démontrant que le glucose constituait le matériau de base indispensable pour produire de l'éthanol.

La façon dont la levure intervient dans la fermentation ne fut pas clairement établie avant 1857, date à laquelle Louis Pasteur (**figure 7**) découvrit non seulement que le processus ne requiert pas d'oxygène, mais que la production d'alcool est même réduite par sa présence.

Les volumes de gaz carbonique qui s'échappent hors des cuves au cours de cette première fermentation sont gigantesques (**encadré 1**). On compte environ 50 litres de CO_2 rejetés pour chaque litre de moût qui fermente, d'où l'importance de posséder de puissants extracteurs d'air au sommet des cuves afin de renouveler régulièrement l'atmosphère d'une cuverie et ne pas risquer d'intoxication au CO_2 . Le pourcentage volumique d'éthanol généré par cette première fermentation alcoolique est de 11 % environ. À ce stade, le vin de Champagne est encore un vin blanc tranquille (on parle alors d'un vin clair), non effervescent, le gaz carbonique s'échappant des cuves laissées ouvertes au cours de cette première fermentation alcoolique.

Encadré 1. Fermentation alcoolique et effet de serre

Le CO_2 est un gaz dit « à effet de serre », tout comme le sont la vapeur d'eau (H_2O), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) ou l'ozone (O_3), pour n'en citer que quelques-uns. Dans l'atmosphère terrestre, comme tous les gaz à effet de serre, le gaz carbonique agit à la manière d'une couverture qui piège le rayonnement infrarouge émis par la surface du globe, réchauffant ainsi notre planète. Dans le contexte actuel d'un dérèglement climatique et du réchauffement global de notre planète lié aux activités anthropiques, une question se pose légitimement : « À l'échelle mondiale, la totalité du gaz carbonique fermentaire issu de la transformation des moûts de raisin en vin a-t-il un rôle important à jouer sur l'effet de serre ? ». Compte tenu de l'importance des volumes de gaz carbonique rejetés au cours de la fermentation alcoolique, cette interrogation revient très souvent chez les étudiants mais également chez les journalistes désireux d'estimer la part du CO_2 fermentaire issu de l'industrie du vin dans ce réchauffement climatique. Essayons de répondre à cette question en commençant d'abord par un rapide calcul d'ordres de grandeurs qui permet très vite d'évaluer les volumes totaux de CO_2 en jeu.

En 2018, la production annuelle mondiale de vin était de presque 300 millions d'hectolitres, soit 3×10^{10} litres/an. Puisqu'une cinquantaine de litres de CO_2 sont rejetés dans l'atmosphère pour chaque litre de vin produit, ce sont donc près de $1,5 \times 10^{12}$ litres de gaz carbonique qui sont rejetés dans l'atmosphère chaque année au moment de la fermentation alcoolique (soit plus de mille milliards de litres !). Ce chiffre, certes colossal en valeur absolue, peut provoquer un effet de surprise. Cependant, avant de conclure quant à l'importance relative de ce volume de CO_2 rejeté au cours de la fermentation alcoolique, il convient de le comparer aux autres sources de CO_2 anthropique. La plus familière de ces sources étant liée à l'activité automobile, je propose donc d'évaluer le volume moyen de CO_2 rejeté chaque année par une automobile. Une automobile effectue en moyenne 15000 kilomètres par an. En moyenne, un véhicule rejette environ 120 grammes de gaz carbonique par kilomètre parcouru. Compte tenu de la masse molaire du gaz carbonique (44 g/mol) et du volume occupé par une mole de gaz (environ 25 litres), ces 120 grammes de gaz carbonique correspondent à 68 litres de CO_2 rejeté par kilomètre parcouru. En définitive, une automobile rejette en moyenne chaque année environ un million de litres de CO_2 (soit 10^6 litres/an). Le volume total de CO_2 fermentaire rejeté chaque année par la transformation des moûts de raisin en vins correspond donc à l'activité annuelle d'environ un million cinq cent mille véhicules. Ce chiffre semble finalement bien dérisoire compte tenu du parc automobile mondial qui dépasse aujourd'hui le milliard de véhicules en activité !

Nous voici donc parvenus au bout de ce calcul qui nous montre que les volumes de CO_2 rejetés chaque année par la transformation du jus de raisin en vin restent négligeables en comparaison de ceux rejetés annuellement par l'activité automobile. Néanmoins, même s'il nous permet de conclure quant au rôle présumé du CO_2 fermentaire sur l'effet de serre, ce rapide calcul est trompeur. En effet, nous avons comparé deux sources de gaz carbonique fort différentes quant à leurs origines respectives. Le CO_2 fermentaire issu de la transformation du jus de raisin en vin ne peut pas être comparé au CO_2 rejeté par l'industrie automobile. En fermentant, le jus de raisin ne fait que « rendre à l'atmosphère » le gaz carbonique pompé par la vigne dans l'atmosphère pour croître et se développer grâce à la photosynthèse. Ce CO_2 fermentaire fait partie d'un cycle naturel, à la différence du gaz carbonique issu de la combustion du pétrole. Le pétrole est un combustible fossile dont la combustion produit du gaz carbonique qui ne sera pas pompé par ailleurs.

Cependant, n'allez pas conclure hâtivement que l'industrie du vin ne rejette pas de gaz carbonique. Comme toutes les industries, l'industrie du vin rejette du gaz carbonique. Elle utilise des sources d'énergie qui nécessitent l'utilisation de combustibles fossiles (pour faire fonctionner des machines agricoles, pour produire de l'électricité, etc.). C'est le CO_2 issu des combustibles fossiles utilisés pour faire fonctionner ces sources d'énergie qu'il faut estimer, et pas le CO_2 fermentaire qui fait partie du cycle naturel et dont le bilan est globalement nul.

L'Art de l'assemblage

Il est rare qu'un vin clair issu d'une même récolte, d'un même terroir et d'un même cépage présente le parfait équilibre requis entre l'arôme, la teneur en sucre et l'acidité nécessaire pour obtenir un bon champagne. C'est pourquoi un maître de chai (en Champagne, on parle d'un chef de cave) mélange plusieurs vins différents en procédant à l'assemblage, étape qui prend place juste après la fin de la première fermentation. On assemblera parfois des dizaines de vins clairs issus de récoltes, de parcelles et de cépages différents pour produire un champagne. L'assemblage est considéré comme la clé du savoir-faire en matière de champagne. Il est réalisé par le chef de cave (figure 8), aidé généralement de plusieurs œnologues, afin de déterminer les bonnes proportions du mélange au terme de plusieurs séances de dégustation. Cette étape requiert une grande attention et un immense savoir-faire car il est extrêmement difficile de prévoir le résultat final pour un champagne qui ne sera souvent dégusté que des années plus tard. Le vin ainsi assemblé constitue alors la base qui sera soumise à la « prise de mousse », une seconde fermentation alcoolique destinée à conférer au champagne son indispensable effervescence.

Figure 8. L'assemblage est une étape cruciale. Le talent du chef de cave et des œnologues en charge de ce processus consiste à anticiper l'évolution du vin en cave et la date à laquelle il aura atteint le style recherché. Ci-contre, Thierry Gasco, l'ancien chef de cave de la maison Pommery, à Reims. (© Alain Cornu/Collection CIVC)



La prise de mousse, une seconde fermentation alcoolique en milieu clos

Une fois l'assemblage réalisé, on rajoute à ce vin de base du sucre (environ 24 grammes par litre de vin) et des levures. Le vin de base assemblé et sucré, est alors versé dans d'épaisses bouteilles, généralement scellées par des capsules identiques à celles qui obturent les bouteilles de bière ([figure 9](#)).

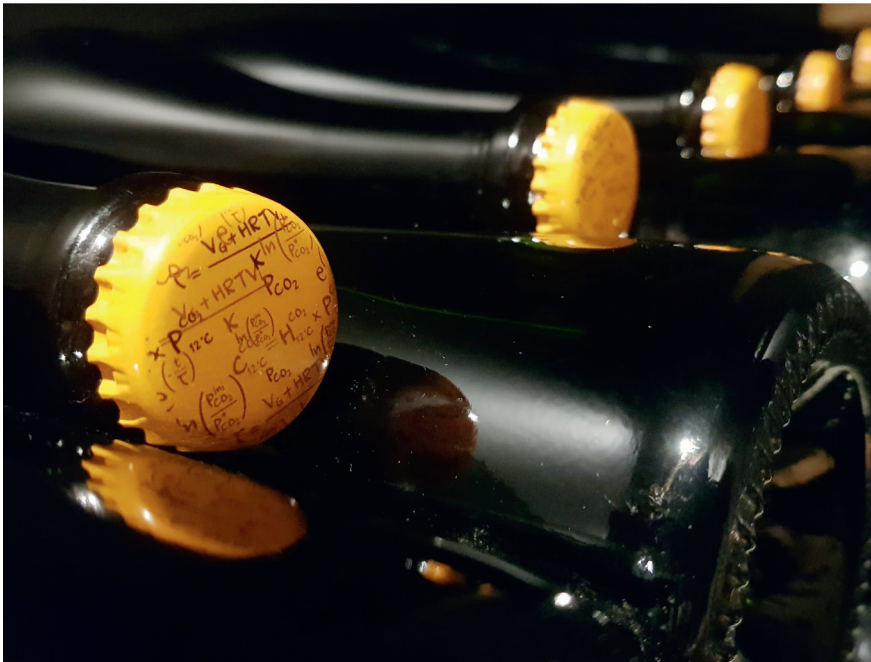


Figure 9. Le vin de base entame une seconde fermentation alcoolique (la prise de mousse) dans d'épaisses bouteilles généralement scellées par des capsules identiques à celles qui obturent les bouteilles de bière. (© Virginie Thollin)

Les bouteilles sont ensuite disposées à l'horizontale dans une cave dont la température (12 à 14 °C) et l'hygrométrie demeurent constantes ([figure 10](#)).



On laisse le vin fermenter lentement une seconde fois afin qu'il produise à nouveau de l'éthanol et du gaz carbonique. La consommation du sucre par les levures entraîne une augmentation du degré volumique d'alcool de 1,4 % environ dans le vin (qui atteint ainsi son degré alcoolique final de l'ordre de 12,5 %). Cette seconde fermentation alcoolique produit aussi environ 9 grammes de gaz carbonique dans chaque bouteille standard de 75 cl. Néanmoins, lors de cette prise de mousse, les bouteilles sont scellées de sorte que le gaz carbonique fermentaire ne parvienne pas à s'en échapper. Il reste donc physiquement piégé dans la bouteille. Le CO_2 étant sous forme gazeuse dans les conditions normales de température et de pression, il est plus pertinent d'évoquer le volume qu'il occuperait à l'état gazeux plutôt que de parler de sa masse. Pour une bouteille de 75 cl, les 9 grammes de gaz carbonique produits lors de la prise de mousse sont équivalents à près de 5 litres de CO_2 gazeux, qui se retrouvent ainsi piégés dans la bouteille. On comprend mieux dès lors pourquoi la bouteille de champagne est sous pression, puisqu'elle retient, en plus du précieux liquide, un volume de CO_2 gazeux six fois supérieur à son propre volume ! En fin de prise de

Figure 10. La seconde fermentation a lieu à l'abri de la lumière, dans la fraîcheur des caves champenoises, comme ici dans les caves de la maison Pol Roger, à Épernay. (© Emmanuel Goulet)

mousse, à la température de 12 °C qui règne dans une cave champenoise, la pression dans une bouteille atteint presque 6 bars (soit une pression six fois supérieure à la pression qui règne au niveau de la mer). Il faudrait descendre à 50 mètres sous la mer pour ressentir une telle pression.

Cependant, il n'est pas encore question de bulles à cette étape de l'élaboration du champagne. En effet, au cours de la prise mousse, un équilibre thermodynamique s'établit progressivement entre les vapeurs de gaz carbonique qui restent piégées sous pression dans l'espace de tête de la bouteille et le gaz carbonique qui se dissout lentement au sein de la phase liquide. Dans une bouteille scellée par une capsule, ce sont près de 97 % des molécules de CO₂ produites lors de la prise de mousse qui envahissent la phase liquide et demeurent ainsi à l'état dissous, sans possibilité de s'en échapper tant que la bouteille reste close et sous pression. De plus, la capacité du gaz carbonique à se dissoudre dans le vin étant très dépendante de la température (la solubilité d'un gaz diminue lorsque la température du liquide augmente), la pression dans une bouteille de champagne dépend en retour de la température du vin (**encadré 2**).

Encadré 2. La pression dans une bouteille augmente avec sa température

Les vins de Champagne se chargent en CO₂ dissous au cours de la prise de mousse. Or, la solubilité du gaz carbonique étant très sensible à la température, la pression dans la bouteille le sera aussi. Conformément à la loi dite de Henry, exprimée ci-dessous, la concentration c_L en CO₂ dissous dans le vin est proportionnelle à la pression partielle P_B de CO₂ dans le col de bouteille :

$$c_L = k_H P_B \quad (2)$$

où le coefficient de proportionnalité k_H (qu'on appelle aussi la constante de Henry du CO₂ dans le vin) s'avère être très dépendant de la température du vin.

Dans une solution aqueuse composée à plus de 85 % d'eau en volume, comme le champagne, le CO_2 est très soluble. Sa constante de Henry est donc très élevée. La constante de Henry du CO_2 est d'environ 2 g/l/bar à 12 °C, alors qu'elle n'est que de l'ordre de 40 mg/l/bar pour l'oxygène, par exemple. Or, la dépendance exponentielle en température de la constante de Henry d'un gaz en solution aqueuse induit une très forte sensibilité de sa solubilité avec la température (plus la solution est froide et plus la constante de Henry augmente). La pression du gaz carbonique dans la bouteille sera donc en retour inévitablement très sensible à la température de ladite bouteille.

En combinant la loi de Henry et la loi des gaz parfaits, on peut déterminer très précisément par un calcul théorique la pression de gaz carbonique qui règne dans une bouteille close, ainsi que la concentration en CO_2 dissous dans le vin, en fonction de sa température T :

$$\begin{cases} P_B = \frac{n_T RT}{V_G + k_H RT V_L} \\ c_L = \frac{n_T k_H RT}{V_G + k_H RT V_L} \end{cases} \quad (3)$$

où n_T est le nombre de moles de CO_2 produit dans la bouteille au cours de la prise de mousse ($\approx 0,2$ mole dans chaque bouteille de 75 cl pour un champagne qui a classiquement effectué sa prise de mousse avec une concentration en sucre de 24 grammes par litre), V_L est le volume de champagne, V_G est le volume du ciel gazeux dans le col de la bouteille (de l'ordre de 20 ml) et R est la constante des gaz parfaits (qui vaut 8,31 J/K/mol)¹.

Par application de l'équation qui précède (en tenant bien compte de la variation de la solubilité du CO_2 avec la température du vin), on peut tracer la dépendance en température de la pression et de la concentration en CO_2 dissous dans une bouteille de champagne de 75 cl ([figure 11](#)).

1. Il est important de préciser que dans l'équation (3), chaque paramètre s'exprime dans son unité internationale; ainsi la température s'exprime en degrés Kelvin (K), les volumes de champagne et de ciel gazeux s'expriment en m^3 et la constante de Henry du CO_2 s'exprime $\text{mol}/\text{m}^3/\text{Pa}$.

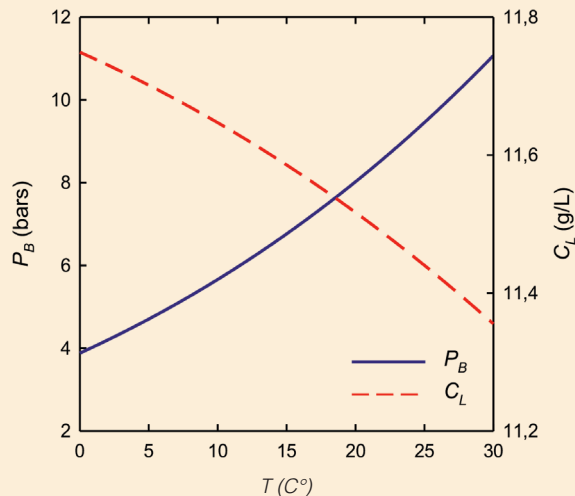


Figure 11. Dépendance en température de la pression et de la concentration en CO_2 dissous, dans une bouteille de 75 cl, à la fin de la prise de mousse. (© Équipe Effervescence/GSMA)

La concentration du champagne en CO_2 dissous atteint environ 11,5 grammes par litre en fin de prise de mousse, et varie assez peu avec la température de la bouteille, contrairement à la pression qui elle varie considérablement avec la température. La pression passe de 4,5 bars pour une bouteille à 5 °C, à presque 8 bars pour une bouteille à 20 °C. La courbe de la **figure 11** nous montre aussi le potentiel danger que pourrait représenter une bouteille exposée trop longtemps à une forte température. Une bouteille de champagne oubliée sur la plage arrière d'une voiture en été peut aisément atteindre une température de l'ordre de 30 °C. À cette température, la pression sous le bouchon peut atteindre une dizaine de bars, ce qui représente évidemment un réel danger au moment de la manipuler.

Il existe bien entendu d'autres espèces gazeuses que le CO_2 en équilibre thermodynamique dans une bouteille de champagne (comme le diazote, l'eau ou l'éthanol, par exemple). Cependant, compte tenu de la très grande quantité de CO_2 produite lors de la prise de mousse, la pression partielle des autres espèces gazeuses en présence est totalement négligeable devant celle du CO_2 . Nous reviendrons néanmoins un peu plus loin sur le cas particulier de la vapeur d'eau, qui va s'avérer jouer un rôle majeur et très inattendu lors du débouchage de la bouteille.