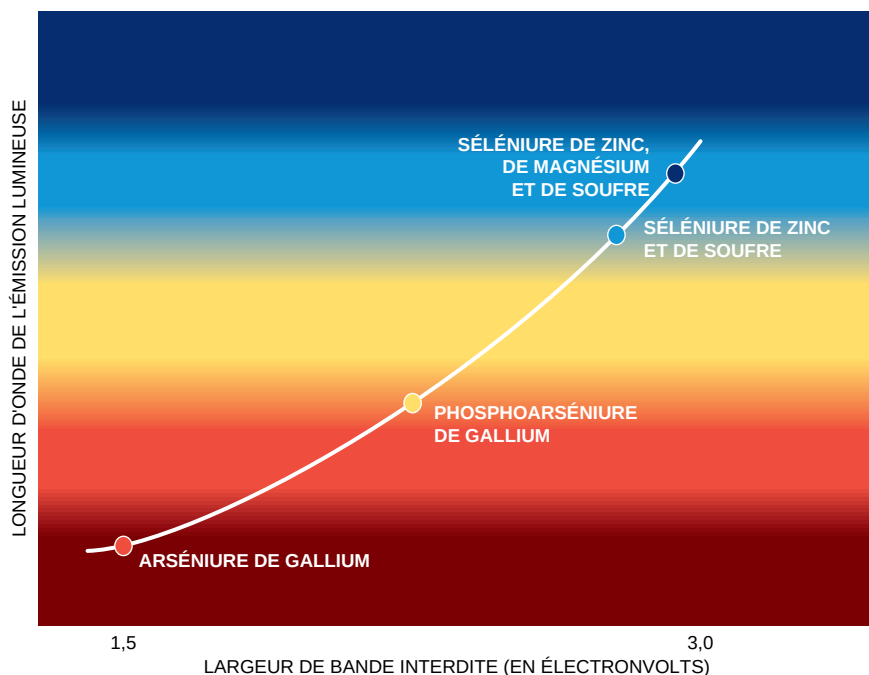




**3. LA LARGEUR DE LA BANDE INTERDITE d'un cristal semi-conducteur détermine l'énergie des photons qu'il émet, inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière. Un matériau ayant une large bande interdite, tel le sélénium de zinc et de soufre, produit une lumière de courte longueur d'onde située dans la partie bleu-vert du spectre.**

excitons sont si comprimés qu'ils subsistent malgré l'énergie thermique et la surpopulation. La probabilité qu'une paire électron-trou se recombine en émettant un photon est d'autant plus grande que sa durée de vie est longue : le puits quantique en sélénium de zinc et de cadmium favorise donc la recombinaison avec émission de photons, au détriment de la recombinaison par transfert d'énergie au réseau cristallin. Le rendement énergétique du laser est ainsi amélioré.

## Un guide bleu

Dans un tel laser, la longueur d'onde de la lumière (bleue ou verte) est 50 à 100 fois supérieure à l'épaisseur du puits quantique : la lumière n'y est donc pas confinée. On la piège alors dans la direction verticale avec deux couches d'un autre matériau, le sélénium de zinc, de soufre et de magnésium. En 1993, des physiciens de la Société *Philips* ont montré que ce guidage de la lumière améliore les performances du laser : par les méthodes de la micro-électronique, ils ont retiré de la matière dans la direction latérale, afin de créer un guide d'onde optique surélevé. L'indice de réfraction de l'air est beaucoup plus petit que celui du semi-conducteur : les photons restent donc confinés dans le matériau. De la sorte, la structure entière

canalise la lumière bleue ou verte, et le rayonnement est réfléchi à chaque extrémité, sur des faces clivées, qui forment des miroirs presque parfaits ; il sort finalement par l'une de ces faces.

Les premières diodes laser bleues et vertes ne pouvaient pas fonctionner en continu sans être refroidies : elles surchauffaient rapidement lorsqu'on leur appliquait une tension électrique. L'échauffement se produisait dans le contact électrique entre l'électrode métallique et le sélénium de zinc et de soufre de type *p* : une barrière électronique, dite de Schottky, empêchait le courant électrique de passer. Nous avons résolu ce problème en intercalant un empilement de couches de sélénium de zinc et de tellure de zinc alternées et d'épaisseur variable : la barrière électronique entre le métal et le sélénium de zinc et de soufre est remplacée par un «pan incliné», que les électrons franchissent plus facilement.

Les surchauffes étant évitées, la durée de vie des diodes laser en sélénium de zinc reste limitée par les défauts cristallins qui se forment lors du dépôt des premières couches semi-conductrices sur un substrat d'arséniure de gallium (les réseaux cristallins de l'arséniure de gallium et du sélénium de zinc ont à peu près les mêmes dimensions) : quelques atomes, un sur un million environ, s'alignent mal et provoquent l'éta-

blissement d'un plan atomique supplémentaire dans le cristal. Lorsque le cristal croît et que l'on dépose les autres couches semi-conductrices, ce défaut d'empilement se propage. S'il atteint un puits quantique, il crée des sites où les électrons et les trous peuvent se recombinaison sans émission de photon. En outre, chacune de ces recombinaisons non radiatives libère, sous forme de chaleur, une énergie d'environ 2,5 électronvolts dans le réseau cristallin environnant. Cette énergie est proche de celle qui maintient la cohérence du cristal : de nouveaux défauts sont créés, qui libèrent encore plus de chaleur, conduisant finalement à la détérioration du cristal. Les physiciens du solide utilisent des techniques telles que la microscopie optique à haute résolution et la microscopie électronique à transmission pour comprendre la formation de ces défauts dans les cristaux et tenter d'y remédier.

Les lasers qui équiperont demain les lecteurs de disques compacts seront-ils en sélénium de zinc ? C'est probable. D'autres matériaux restent toutefois en lice, tels les semi-conducteurs à large bande interdite de la famille du nitrure de gallium. Leurs liaisons chimiques sont plus solides : ils sont moins détériorés par les forts courants électriques. Toutefois, dans les nitrures que nous savons fabriquer aujourd'hui, les défauts cristallins sont si nombreux qu'ils entravent l'obtention de l'effet laser.

La Société *Nichia* a malgré tout obtenu, à température ambiante, une émission laser bleue, sous haute tension (30 volts) et en mode pulsé, avec des diodes en nitrure de gallium ; le puits quantique était en nitrure d'indium et de gallium, tandis que les couches de confinement électronique et optique étaient respectivement formées de nitrure de gallium et de nitrure d'aluminium et de gallium. Quel que soit le semi-conducteur utilisé dans le futur, l'avenir des lasers bleus est assuré.

---

Robert GUNSHOR est professeur de micro-électronique à l'Université Purdue. Arto NURMIKKO est professeur de physique à l'Université Brown.

A.V. NURMIKKO et R.L. GUNSHOR, *Physics and Device Science in II-VI Semiconductor Visible Light Emitters*, in *Solid State Physics* (Academic Press), vol. 49, pp. 205-282, 1995.

Govind AGRAWAL, *Semiconductor Lasers : Past, Present and Future*, American Institute of Physics Press, 1995.

---

# Les secrets des bières lambic

JACQUES DE KEERSMAECKER

*Une ancienne technique de brassage produit une boisson si complexe que la science l'explore encore.*

**D**epuis 2 000 ans, la région qui est aujourd'hui la Belgique est un des lieux les plus traversés d'Europe. Initialement occupée par les Celtes, elle est envahie par les Romains en l'an 57 avant notre ère ; plus tard, les Normands y déferleront. Au fil des siècles, les envahisseurs viennent et repartent : après les Romains, ce sont les Mérovingiens francs, les Germains, les Hollandais, les ducs de Bourgogne, les Autrichiens, les Espagnols, les Français et à nouveau les Hollandais. Chacun d'eux contribue à la culture belge, célèbre pour ses peintres,

ses orfèvres, ses cuisiniers et ses brasseurs de bière.

Les historiens supposent que l'un de ces envahisseurs, peut-être les Romains, apporta dans la région un procédé de brassage sans doute déjà ancien : les brasseurs exposaient leur décoction à l'air, l'enseménant ainsi (ou, plus précisément, l'inoculant) avec toutes les levures sauvages emportées par le vent. Toutefois, c'est seulement dans une région d'environ 500 kilomètres carrés autour de Bruxelles et dans le Payottenland (autour de la Senne, à l'Ouest de la ville) que le

mélange adéquat de spores en suspension dans l'air permet une fermentation spontanée et correcte.

Après bien des siècles, nombre de bières sont toujours produites suivant ce procédé de brassage, considéré comme le plus ancien de ceux qui sont encore appliqués commercialement. Certaines de ces bières sont à la fois aci-

**1. LES DIVERS LAMBICS ont leur verre particulier. Les lambics à la cerise, à la pêche, à la framboise ou à la mirabelle sont mis dans des flûtes. Les gueuzes et les faros sont servis en bocks.**



dulées et moelleuses ; d'autres, qui ont subi une maturation plus longue, ont un bouquet plus complexe et plus développé. Certaines variétés ont été refermentées en présence de fruits et d'autres sont édulcorées au sucre candi. Elles ont toutes un goût particulier, lié au terroir, une rémanence légèrement musquée qui surprend même l'amateur de bières le plus averti.

Jadis, toutes les bières étaient fermentées avec des levures sauvages, comme le sont les lambics encore aujourd'hui. Un breuvage fermenté, nommé sikaru, était ainsi fabriqué il y a 5 000 ans par les Sumériens de Mésopotamie. Le houblon était inconnu, mais la bière était parfumée avec des épices comme la cannelle. Au fil des siècles, la plupart des brasseurs perfectionnèrent des techniques qui réduisaient les aléas de l'ensemencement sauvage. Puis, au XIX<sup>e</sup> siècle, l'utilisation de cultures de levures isolées s'imposa. La fermentation devint alors plus efficace et prédictible... mais les lambics perpétuèrent les anciennes traditions.

Dans la Belgique du XVI<sup>e</sup> siècle,

les lambics devinrent rapidement un fondement de la vie sociale. Nombre de peintres contemporains de Pieter Brueghel l'Ancien peignirent des villageois qui vidaient d'énormes cruches de lambic, alors nommée bière jaune. Cette bière reste aujourd'hui au cœur des festivités locales de Bruxelles et de ses environs.

Les grands brasseurs belges produisent également et exportent même des lambics, comptant sur la curiosité alimentaire grandissante des consommateurs et sur leur goût pour des produits du terroir. Très répandus en Belgique et dans certaines parties de la France et de la Hollande, les lambics deviennent de mieux en mieux distribués dans l'ensemble de l'Europe et en Amérique du Nord. Toutefois la méthode de production en limite la disponibilité : la production de l'ensemble des brasseries de lambic s'élève à environ 370 000 hectolitres par an (en comparaison, le premier brasseur français, le groupe *Danone*, produit 25 millions d'hectolitres de bières par an).

L'intérêt scientifique pour des analyses d'évolution de goûts et d'arômes,

ainsi que pour la compréhension des différentes étapes de fermentation est assez récent. S'il est clair que le profil gustatif d'une bière résulte directement de la souche de levure utilisée, une fermentation complexe comme celle du lambic donne des résultats difficiles à cerner. Le goût particulier des lambics résulte d'une série d'étapes où l'activité des bactéries – honnies par le brassage industriel moderne – se superpose à la fermentation levurienne, réduisant les dextrines en différents sucres et engendrant les nombreux composés aromatiques. Ainsi les recherches qui ont commencé au milieu des années 1970, à l'Université de Louvain, ont finalement élucidé une grande partie de la chimie de cette fermentation séculaire.

## Naissance d'une bière

On connaît si mal les origines des bières lambic que leur nom même a trois étymologies concurrentes. Certains soutiennent que le mot «lambic» vient du nom de l'un des quatre villages belges suivants : Lembeek, Borch-Lombeek, Onze-Lieve-Wrouw-Lom-





beek ou Sint-Katelijne-Lombeek. D'autres supposent qu'il vient du mot espagnol *lambicado*, qui signifie «préparé avec soin». Enfin l'invention des lambics a été attribuée au duc Jean IV de Brabant qui, fatigué de boire toujours la même bière, aurait eu l'idée de faire macérer et bouillir de l'orge et du houblon dans un alambic, d'où le nom.

Les vieux lambics non coupés, proches de ceux que l'on buvait aux siècles précédents, ne se trouvent aujourd'hui facilement qu'aux environs de Bruxelles et dans le Payottenland. Acidulés et à peine gazeux, ils ressemblent plus à de bons xérès qu'aux bières courantes. La gueuze, le faro et les divers lambics édulcorés et parfumés aux fruits sont beaucoup plus communs.

La gueuze, comme le champagne, résulte d'une fermentation secondaire qui a lieu en bouteille, après l'assemblage de lambics jeunes et vieux. Apparemment la gueuze a été commercialisée pour la première fois au début du XIX<sup>e</sup> siècle : pour l'exportation, on voulait une boisson plus pétillante, ressemblant davantage à la bière. Des documents datant de 1844 attestent l'exportation de gueuze vers Constantinople et Rio de Janeiro.

Le faro est un mélange de lambic et de bière de mars, liquide pâle, faiblement alcoolisé, obtenu en rinçant les drêches, c'est-à-dire la matière solide résultant du brassage du lambic. Le faro est généralement additionnée de sucre candi. Il doit son nom aux soldats de Charles Quint, qui le nommaient «liqueur dorée» ou «liqueur d'orge», *farro* en espagnol. Les lambics fruités comprennent les lambics traditionnels à la cerise (les krieks, du mot flamand qui signifie «cerise») et à la framboise (simplement nommés framboise). D'autres fruits ont été utilisés : la pêche, le raisin, le cassis, la mirabelle et la banane.

### Au commencement, il y a le moût

Les bières sont toutes fabriquées à partir d'ingrédients de base communs, tels le malt et le houblon. Le malt est de l'orge qui a été trempé dans l'eau, a germé, puis a été séché dans une touraille. Plus le séchage est long et à haute température, plus le malt grille et, de blond, vire au brun. Le maltage produit, dans les grains d'orge, les enzymes qui transforment l'amidon en sucres, durant le brassage. Selon les conditions de traitement, on obtient des caractéristiques

variées : ainsi le malt de lambic est pâle et riche en enzymes. Le houblon est une plante grimpante cultivée en France depuis le VIII<sup>e</sup> siècle. Son intérêt dans la fabrication de la bière, à laquelle il confère son parfum, son amertume et sa digestibilité, a été découvert par Hildegarde, abbesse de l'abbaye de Bingen, au XI<sup>e</sup> siècle. Il est disponible dans des dizaines de variétés et sous de nombreuses formes. Pour le brassage du lambic, on utilise généralement les fleurs séchées, nommées cônes.

Toutes les fabrications de bière commencent de la même façon. Après avoir été séché (touraillé) et dégermé, le grain malté est moulu. Des grains non maltés, tels que le maïs, le riz ou le froment, peuvent également être utilisés comme source de matières amylacées (amidon). Après mouture, ces grains sont additionnés d'eau chaude (dont la qualité contribue au goût final), le réchauffement étant contrôlé, de sorte que les enzymes du malt restent actives : c'est le brassage.

Le liquide résultant du brassage est appelé moût : ce moût est filtré, puis transféré dans une chaudière à moût. C'est là qu'a lieu l'ébullition, opération durant une heure ou plus, au cours de laquelle sont ajoutés le houblon et, éventuellement, d'autres épices. Le brassage

## La fabrication d'une bière



Le brassage commence par le mélange de malt d'orge, de blé et d'eau tiède dans une cuve-matière (*ci-dessus*). Des disques métalliques remuent l'infusion, favorisant l'extraction des composés aromatiques et des enzymes. Puis le brasseur ajoute de l'eau chaude à ce mélange, et il décante le liquide dans une chaudière à moût. Un chauffage active alors les enzymes.

Après le débourbage, le liquide où ont infusé les grains est filtré. Le brasseur contrôle continuellement la limpidité du liquide par transparence dans des conduits de verre (*ci-dessous*).



pose les fondements des deux éléments gustatifs essentiels d'une bière finie : son fruité et sa douceur, conférés par le malt et le blé, sa siccité et son amertume, données par le houblon.

Après le brassage vient la fermentation : des colonies de levures dissocient les sucres issus du malt et du grain, et les transforment en éthanol, en dioxyde de carbone et en d'autres composés. Cette fermentation se déroule en l'absence d'oxygène. Les diverses souches de levures confèrent chacune un parfum caractéristique. D'ailleurs l'une des nombreuses différences entre les ales et les lagers est le type de levures utilisées pour inoculer le moût ; suivant la souche utilisée, les levures se retrouvent en haut ou en bas de la cuve après la fermentation. Les brasseurs conservent jalousement leurs souches de levures : elles

ont un rôle primordial dans le développement de la saveur de la bière.

Si toutes les fabrications sont analogues, la diversité des bières résulte des détails de fabrication : les variétés et les proportions d'eau, de malt, de céréales, de houblon et de levures, la durée du brassage et la fermentation, la maturation et, éventuellement, le coupage. Les brasseurs de lambics, secrets et possessifs, gardent précieusement des recettes affinées depuis des décennies, voire des siècles.

Les lambics ont plusieurs particularités. Ils sont toujours brassés avec une proportion relativement élevée de blé non malté, habituellement autour de 35 pour cent (les bières allemandes, en revanche, ne comprennent jamais de grain non malté). Cette céréale est riche en protéines et en amidon, qui sont habituellement indésirables dans le brassage.

D'importantes teneurs en protéines rendent les lambics légèrement troubles, mais elles engendrent une mousse crémeuse et stable. En outre, l'amidon du blé conduit à de fortes concentrations en dextrines, que les levures ne peuvent pas dissocier. L'activité bactérienne réduit progressivement ces concentrations : dans les lambics ayant fermenté moins d'un an, les dextrines donnent du moelleux ; puis, après trois ans de garde, toutes les dextrines disparaissent. Enfin, comme le blé non malté est pauvre en enzymes requises pour un brassage réussi, les brasseurs de lambics comptent sur le malt d'orge pâle, très riche en enzymes.

Le brassage des lambics fait également un emploi particulier du houblon : non seulement ce dernier parfume, comme dans les autres bières, mais il contribue également à la conserva-



Le liquide est ensuite bouilli dans la chaudière à moût pendant quatre ou cinq heures, durant lesquelles le brasseur ajoute le houblon (*en haut à gauche*). Pour les lambics, les brasseurs préfèrent les fleurs de houblon (*en bas à gauche*), souvent importées d'Angleterre. Le houblon libère des composés qui assurent la conservation ainsi que la saveur de la bière lambic. Avec des houblons surannés, la bière n'est pas excessivement amère. Durant l'ébullition, on mesure les concentrations en sucres dans des échantillons (*à droite*).





tion, car certains de ses composés inhibent la prolifération des bactéries qui feraient pourrir le moût, riche en sucres et autres substances énergétiques. Comme la conservation par le houblon habituel imposerait l'emploi de quantités excessives, qui rendraient la bière trop amère, les brasseurs de lambics utilisent seulement des houblons âgés, de plus de trois ans. L'âge provoque l'oxydation des acides alpha, responsables de l'amertume, en composés moins amers ; simultanément l'oxydation du houblon développe des arômes désagréables de foin et de fromage, mais la longue ébullition du moût élimine ensuite ces faux goûts. Le houblon traditionnel était la variété Coigneau, cultivée dans la région d'Asse-Alost, en Belgique, mais les surfaces cultivées de houblon ont fortement diminué en Belgique, raréfiant cette variété ; des houblons anglais de la région du Kent leur sont souvent substitués.

La méthode de brassage traditionnelle, nommée méthode à moûts troubles, a peu changé depuis sa description par G. Lacambre, en 1851 : dans un récipient nommé cuve-matière, le brasseur place un mélange de 40 pour cent de blé et de 60 pour cent de malt d'orge, avec de l'eau, à une température comprise entre 40 et 45 °C. L'ajout d'eau

bouillante porte ensuite la température à 62 °C, puis le liquide est décanté dans une chaudière à moût. Le brasseur verse à nouveau de l'eau bouillante dans la cuve-matière pour obtenir une température de 72 °C, et il mélange à nouveau. Après une nouvelle décantation, la partie liquide est ajoutée à la chaudière à moût. Le contenu de cette chaudière (le liquide produit par les deux extractions successives) est ensuite bouilli pendant 20 minutes et reversé dans la cuve-matière pour être filtré.

Le moût résultant de cette filtration deviendra le lambic. Les drêches restant dans la cuve-matière sont rincées à l'eau chaude pour produire un second moût, dont on fera de la bière de mars. Le moût du lambic, lui, retourne dans la chaudière à moût, où on lui ajoute des cônes de houblon et où on le fait bouillir pendant quatre ou cinq heures (un procédé similaire donne la bière de mars). Quand les moûts ont suffisamment bouilli, le brasseur les filtre pour en retirer le houblon.

### Que la fermentation commence !

À ce stade, le brassage est achevé, et la fermentation commence ; cette dernière est une succession de réactions

bactériennes, levuriennes et chimiques qui créeront le lambic. Pour la fabrication des lambics, le moût chaud est d'abord pompé jusqu'à une cuve ouverte (située sous les toits de la brasserie), peu profonde. Les brasseurs aèrent la surface du moût au maximum, éventuellement à l'aide de ventilateurs, et ils laissent refroidir le liquide toute la nuit. C'est pendant cette opération de refroidissement que les levures sauvages et d'autres micro-organismes présents dans l'air ambiant viennent inoculer le moût.

Les conditions locales sont de toute première importance : non seulement la fermentation spontanée ne donne le résultat attendu que dans une petite région autour de Bruxelles, mais cette fermentation n'a lieu qu'entre octobre et avril, quand la température extérieure est inférieure à 15 °C. Quelle est l'importance exacte des conditions de la fermentation ? L'ignorance actuelle laisse la place aux superstitions et aux conjectures. On raconte qu'un brasseur de lambic a refusé d'abattre le toit branlant qui abritait ses bacs refroidissoirs, parce qu'il était convaincu que celui-ci abritait certaines colonies de micro-organismes importants ; plutôt que de remplacer le vieux toit, il fit construire un nouveau toit par-dessus l'ancien.



Après l'ébullition, le liquide est pompé jusqu'à une cuve de refroidissement, dans le grenier de la brasserie (à gauche). Cette opération n'est pas pratiquée pour les bières classiques. La microflore locale, notamment des levures sauvages, inoculent le brassin. Des ventilateurs font circuler l'air au-dessus du liquide, tandis que sa température descend à 15 °C environ (cartouche ci-dessus).

Quand le moût inoculé est froid, des ouvriers le versent dans des tonneaux de bois, où il fermente et vieillit. On utilise toujours des fûts de chêne ou de châtaignier qui ont déjà contenu auparavant du vin, parce que le bois neuf contient trop de tannins astringents (le vin les extrait au cours de sa maturation). Avant l'emploi, les tonneaux sont raclés, nettoyés et «méchés»: on y a fait brûler une mèche au soufre afin d'éliminer les moisissures indésirables, qui donneraient de mauvais goûts. Toutefois ces traitements n'éliminent pas complètement des fibres du bois les levures, sous forme de cellules ou de spores; ces micro-organismes contribuent au démarrage de la fermentation.

La fermentation, complexe même avec les levures spécialement cultivées utilisées pour les ales et les lagers, l'est encore plus avec les levures sauvages et les bactéries qui donnent les lambics. L'activité bactérienne ne présente pas de danger pour la santé humaine, car l'acidité du liquide, la présence des résines du houblon, la forte concentration en alcool éthylique évitent la prolifération des micro-organismes pathogènes. Cette propriété explique pourquoi les consommateurs de bières et de vins échappèrent à bien

des épidémies et des intoxications, au Moyen Âge.

## Festin de levures

Hubert Verachtert et ses collègues de l'Université de Louvain étudient la chimie organique de la fermentation des lambics depuis les années 1970. Ils ont identifié 100 souches différentes de levures, 27 souches de bactéries acétiques (qui forment de l'acide acétique en présence d'oxygène) et 38 souches de bactéries lactiques (qui forment de l'acide lactique) dans un seul type de lambic.

La fermentation du lambic peut être schématisée en quatre étapes principales qui se superposent. Des levures sauvages, *Kloeckera apiculata*, et des entérobactéries sont les premiers micro-organismes installés. Les entérobactéries apportent un arôme doux, fruité ou végétal. Les levures *Kloeckera* ont peu d'influence sur le goût, mais leurs enzymes dissocient les protéines, ce qui améliore la limpidité de la bière à basse température. Puis des levures *Saccharomyces* produisent l'alcool éthylique qui sera présent dans le produit fini, ainsi que les esters aromatiques qui confèrent aux lambics des saveurs semblables à celles des ales. Des bac-

téries lactiques font alors de l'acide lactique, qui donne à la bière sa légère acidité. Enfin des levures *Brettanomyces* engendrent de nombreux autres esters, qui font la spécificité des lambics: un goût fruité et vineux.

La première étape de la fermentation commence, trois à sept jours après la mise en fût, par la prolifération des entérobactéries et des levures sauvages. Les entérobactéries se multiplient très rapidement et donnent lieu à une fermentation acide mixte, où les molécules de glucose sont transformées à la fois en alcool éthylique et en dioxyde de carbone, et aussi en acide lactique et en acide acétique. Cependant ces entérobactéries ne survivent pas dans l'acide acétique ou dans l'alcool éthylique; elles meurent progressivement en 30 à 40 jours. La levure *Kloeckera apiculata* se développe en consommant le glucose, mais pas les sucres plus complexes; aussi disparaît-elle assez rapidement, après avoir épuisé le glucose et après avoir produit une petite quantité d'alcool éthylique et l'essentiel de l'acide acétique trouvé dans le produit final.

Après 10 ou 15 jours, c'est le début de la fermentation principale, productrice d'alcool éthylique. Les levures sauvages sont supplantées par les levures *Saccharomyces*, du même genre



Quand le brassin a refroidi, habituellement toute une nuit, il est versé dans des fûts de bois (à gauche) qui ont contenu du vin (le bois de fûts neufs conférerait un goût déplaisant). Même après avoir été nettoyés et désinfectés, les tonneaux contiennent encore des spores de levures qui favorisent la fermentation. Après une semaine environ, la fermentation est si violente que de la mousse jaillit de l'orifice de dégazage des fûts.



La bière vieillit durant un an ou plus. Puis, sur la seule base de dégustations, elle sera éventuellement coupée avec des lambics plus jeunes ou plus âgés.