



Gérard Pajean*

Fabrication du verre creux

La fabrication du verre creux, évoque le travail du souffleur de verre qui, au cours de nombreuses décennies, a effectivement su trouver et optimiser les étapes essentielles du formage d'une pièce. Ces étapes comportent le cueillage d'une goutte de verre, la formation par soufflage d'une préforme, et son gonflage dans un moule à la forme de l'article désiré. Les évolutions réalisées depuis, ont en définitive consisté surtout à mécaniser ces pratiques manuelles de façon à augmenter la reproductibilité et la productivité horaire des fabrications. Ainsi nous sommes passés de quelques articles élaborés à l'heure, à plus de 40 000 sur les machines les plus puissantes pour le marché de la bière. Il est néanmoins intéressant de signaler que cette mécanisation a eu dans un premier temps pour conséquence une dégradation de la qualité de la peau de verre, et donc des propriétés mécaniques de l'article, si bien qu'il a fallu alourdir les bouteilles pour obtenir le même niveau de qualité. Depuis, des progrès ont été réalisés mais le soufflage à l'air et dans des moules en bois (voir encadré), toujours pratiqué pour des produits de très haut de gamme, donne encore le meilleur état de surface.

LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE FABRICATION

Progressivement, les procédés de fabrication se sont développés et spécialisés en fonction

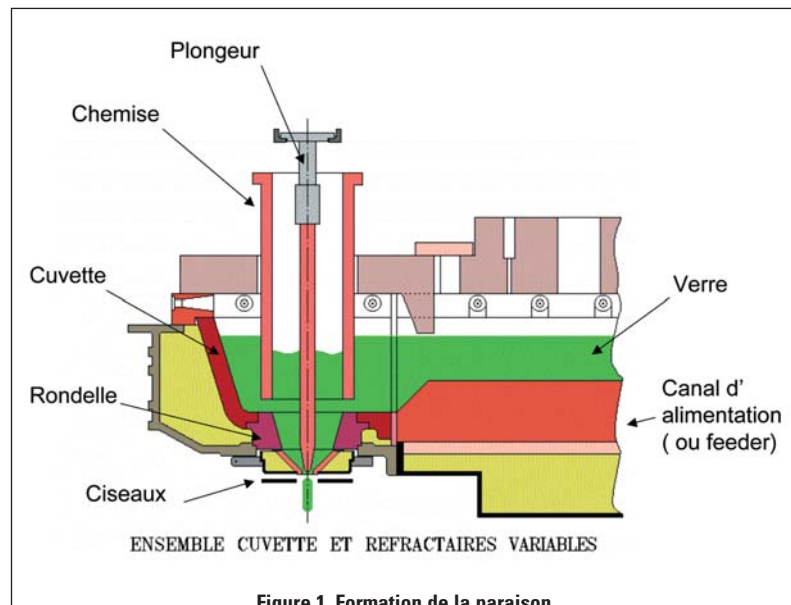


Figure 1. Formation de la paraison

des types de produits à élaborer ; on distingue en effet dans l'industrie du verre creux plusieurs segments de marché comme :

- les bouteilles pour l'emballage des boissons alimentaires et les flacons pour la parfumerie, se caractérisant tous les deux par une bague étroite, utilisant majoritairement un procédé appelé *Soufflé-Soufflé*
- les pots pour les produits alimentaires secs et pâteux et ceux de grande capacité pour les jus de fruits, avec une bague plutôt large, autorisant un procédé appelé *Pressé-Soufflé*
- les articles de table, verres, gobelets, assiettes, saladiers... donc sans bague et élaborés par une technologie de *pressage* dans un moule, ou par une technologie plus récente de *centrifugation* grâce à la rotation rapide du moule : cette dernière technologie ne peut évidemment

s'envisager que pour des articles ayant une symétrie de révolution

- les verres à pieds et autres (certains gobelets), demandant une surface sans défauts et sans marques de joints de moule, et utilisant une technologie associant pressage pour l'ébauche et rotation de l'ébauche pendant le soufflage dans le moule finisseur : procédé appelé *Pressé-Soufflé-Tourné*
- les produits d'ornementation de très haute qualité, souvent en cristal, et utilisant encore des procédés manuels ou semi-automatiques.

Dans cette rubrique, nous traiterons plus particulièrement des procédés industriels dédiés aux bouteilles, pots et flacons en verre qui représentent aujourd'hui, en tonnage, la majorité des productions de verre creux.

*Membre du Comité scientifique et technique de la revue Verre

FORMATION DE LA PARAISSON

La première étape de la fabrication consiste à élaborer une *goutte de verre* appelée *paraison* ayant un poids bien précis (celui de l'article final) et une température bien fixée (d'environ 1150°C), à une cadence synchrone de celle de la machine porteuse des moules.

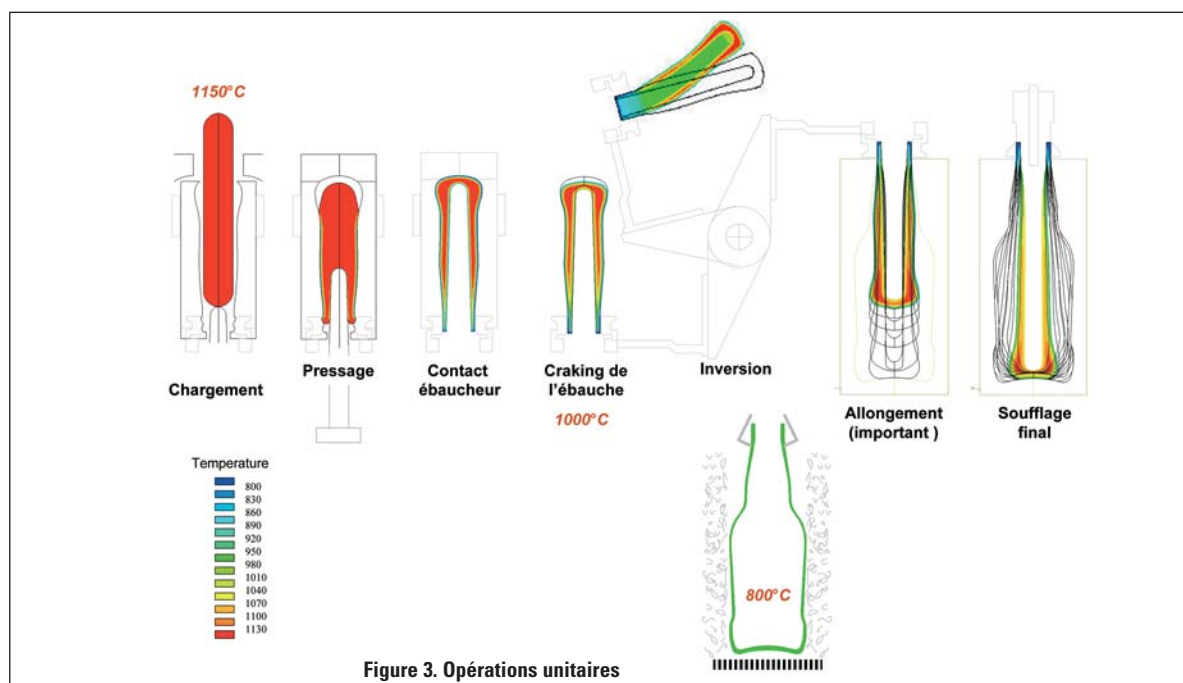
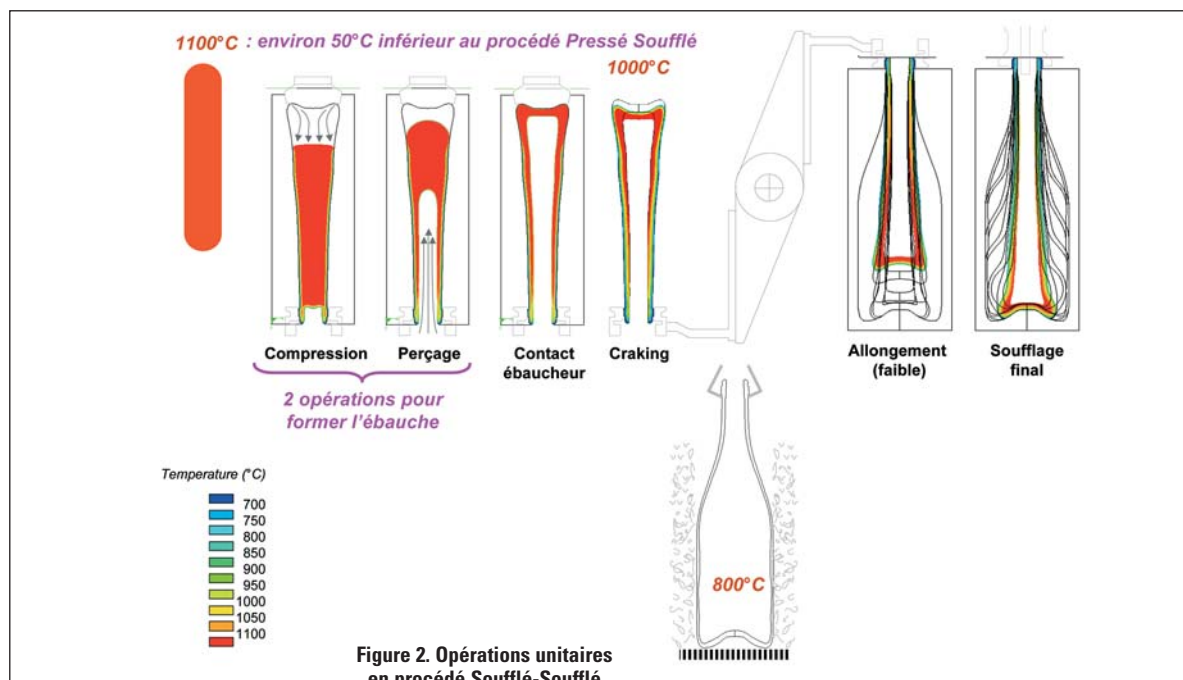
Ce résultat est obtenu grâce un système assez complexe représenté par le schéma de la figure 1 qui comporte :

- un canal de distribution connecté au four délivrant un filet de verre homogène chimiquement et thermiquement, qui est régulé au degré près
- un mécanisme de coupe du filet fait d'un véritable ciseau muni

de lames en acier réfractaire - et un système de distribution des gouttes de verre ainsi formées vers les moules de formage.

FORMAGE DE L'ARTICLE

Cette goutte de verre, ou paraison, est dirigée vers le moule ébaucheur. Dans le procédé soufflé-soufflé, ce dernier est équipé dans sa partie inférieure



d'un poinçon de 2 à 3 cm que le verre recouvre grâce à l'énergie cinétique qu'il a acquise pendant sa chute libre (ou guidée) depuis la coupe jusqu'à l'entrée du moule. Par la formation d'une empreinte dans le verre se termine la *phase de charge-ment*. Le moule est ensuite fermé par un fond ébaucheur et de l'air est immédiatement introduit à travers ce fond pour pousser le verre autour du petit poinçon et former ainsi la bague de la future bouteille: c'est la *phase de compression*. Le poinçon peut alors se retirer légèrement pour permettre un premier soufflage à l'air comprimé de l'empreinte: le verre va alors se déformer

et occuper l'espace libre du moule ébaucheur. C'est la *phase de formation de l'ébauche* (perçage). Au contact du moule, refroidi en permanence, l'ébauche se refroidit en surface, à environ 750–800°C, et acquiert une rigidité suffisante pour être, après ouverture du moule ébaucheur, transférée dans le moule finisseur en attente en position ouverte: c'est la *phase de transfert de l'ébauche*.

Dans le moule finisseur fermé, l'ébauche s'allonge sous son propre poids et sa surface se réchauffe par un transfert des calories du cœur de l'ébauche vers sa surface: c'est l'opération importante de *réchauffage* qui homogénéise les températures, et donc les viscosités des couches de verre de l'ébauche; dès que l'ébauche touche le fond du finisseur, l'opération de gonflage se met en action, jusqu'à la mise en contact du verre avec la surface complète du moule finisseur: ce contact est maintenu quelques secondes pour extraire suffisamment

de calories et rigidifier définitivement l'article. Le moule finisseur est alors ouvert et l'article est transféré sur un

En résumé, le tableau suivant donne les avantages et inconvénients des 2 procédés et leur domaine d'utilisation:

	Procédé Soufflé-Soufflé	Procédés Pressé-Soufflé
Avantages (+)	- s'adapte à toutes les formes de bouteille - peau interne sans défauts : pas de contacts métalliques	- très bonne définition de la géométrie de l'ébauche - donc bon contrôle des épaisseurs de verre - donc procédé recommandé pour des articles allégés - seul procédé pour les articles à large ouverture
Inconvénients (-)	- répartitions d'épaisseur du verre plus irrégulières et très sensible aux hétérogénéités thermiques du verre - donc convient mieux aux articles lourds	- possibilités de contaminations de la peau interne du verre par le poinçon - difficultés avec des articles hauts et étroits demandant des géométries de poinçon difficiles à élaborer

convoyeur qui l'amènera vers les étapes ultérieures de la fabrication, comme la recuisson et l'application de traitements de surface.

Cette description est exactement celle du *procédé Soufflé-Soufflé* (figure 2): soufflage dans le moule ébaucheur pour former l'ébauche et soufflage dans le moule finisseur pour former l'article.

Dans le *procédé Pressé-Soufflé*, la formation de l'ébauche dans le moule ébaucheur s'effectue par pressage à l'aide d'un poinçon nettement plus grand que pour le procédé Soufflé-Soufflé, qui est animé d'un mouvement vertical relativement important de bas en haut: comme on peut le comprendre sur le schéma de la figure 3, ce poinçon forme l'ébauche en une seule étape, avec une meilleure maîtrise de l'épaisseur de verre qui est parfaitement définie par l'espace libre entre le moule ébaucheur et le poinçon en position finale haute. Ce procédé convient donc plutôt aux articles légers.

ECHANGES THERMIQUES

En définitive, la fabrication d'un article en verre se résume à une mise en forme par déformation du verre et à une *extraction rapide des calories* pour le rigidifier. Cette extraction, réalisée simplement par le moule refroidi à l'air, est en réalité conditionnée par des phénomènes complexes de transferts thermiques (voir figure 4):

- transfert des calories à l'intérieur de l'épaisseur du verre, du cœur vers la surface (transfert par rayonnement et conduction)
- transfert thermique du verre vers le moule (transfert par rayonnement et conduction à travers une couche d'interface)
- transfert des calories à l'intérieur du moule (transfert par conduction)
- transfert des calories de la surface extérieur du moule à l'air de ventilation (transfert par convection).

Au cours du cycle, ces transferts modifient donc continuellement les températures de tous les éléments actifs du processus,

c'est-à-dire le verre et l'ensemble des composants de la moulerie. La maîtrise des transferts thermiques joue évidemment un rôle très important sur la qualité de l'article fabriquée, en particulier sur la répartition finale du verre et sur la cadence de fabrication. Ces transferts sont donc gérés et contrôlés via divers paramètres de réglage du processus de fabrication comme :

- la température de départ de la paraison
- les temps verriers c'est-à-dire, les

durées de toutes les phases du cycle décrites précédemment et, en particulier, les temps de contact avec les moules

- les températures de surface des moules
- les temps de ventilation des moules
- les températures de l'air de ventilation,
- etc.

À titre d'exemple, les temps verriers de toutes les phases de la fabrication d'une bouteille en Pressé-Soufflé sont représentés sur la figure 5 où ils sont exprimés en

degrés d'angle par rapport à un cycle complet de 360°.

MATÉRIAUX DE MOULERIE

Les performances de la fabrication du verre creux dépendent fortement des matériaux utilisés pour les moules (ébaucheurs et finisseurs) et pour les accessoires (poinçons, moule de bague.). Ces matériaux doivent posséder des caractéristiques bien particulières au niveau de :

- la résistance à l'usure à haute température (appréhendée par la dureté à chaud et la tenue à la

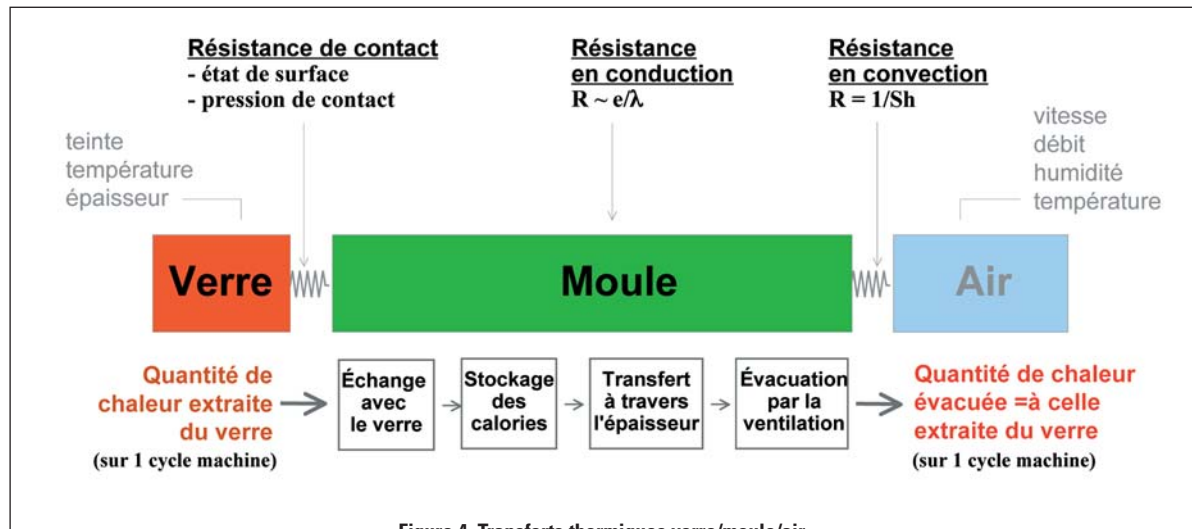


Figure 4. Transferts thermiques verre/moule/air

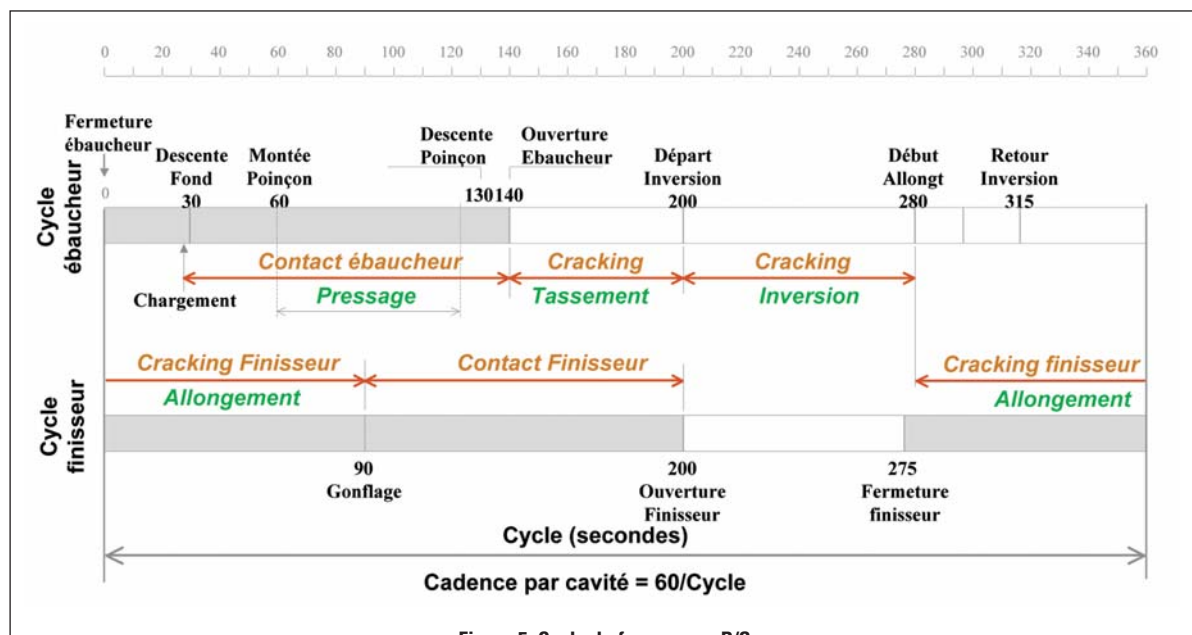


Figure 5. Cycle de formage en P/S

fatigue thermique)

- la conductibilité de la chaleur (évaluée par la conductibilité thermique)

- l'usinabilité

- l'aptitude au démoulage (mesurée par la résistance à l'oxydation).

Les matériaux les plus utilisés à ce jour sont les fontes, les aciers, les alliages de cuivre et les alliages de nickel et cobalt. Voici les performances comparatives de ces différentes familles de matériaux :

	Conductibilité thermique	Fatigue thermique	Résistance à l'oxydation	Dureté
Fontes	élevée	très faible	faible	faible
Aciers	moyenne	élevée	faible	faible
Alliages cuivre	très élevée	élevée	faible	moyenne
Alliages nickel	faible	faible	élevée	élevée

L'aptitude des matériaux de moulerie au *démoulage du verre* constitue une des propriétés critiques pour ce processus automatisé de fabrication du verre creux. Cette aptitude au démoulage est la conséquence de phénomènes physicochimiques pouvant se traduire par un véritable *collage du verre* dans le moule. Avec les matériaux à base de fer, ce problème n'est pas encore complètement résolu, à ce jour : à la suite d'un contact prolongé avec le verre, le moule s'oxyde et établit alors des liaisons chimiques métal/verre, d'où le collage. Pour diminuer cette sensibilité deux solutions sont possibles :

- interposer entre le verre et le moule une couche d'air, de vapeur d'eau ou de gaz : c'est le rôle du graissage des moules, opérations encore manuelles mais en cours d'automatisation.
- utiliser des matériaux ou des revêtements particulièrement inoxydables comme le nickel ou le cobalt.

PRODUCTIVITÉ DES MACHINES VERRIÈRES

La productivité des machines de formage du verre creux est un des paramètres économiques essentiels de cette industrie. Elle se décline suivant deux indicateurs :

- le *rendement de fabrication*, c'est-à-dire le rapport entre le nombre d'articles bons à la vente et le nombre de gouttes de verre utilisées pour cette fabrication ; en moyenne ce rapport se situe entre 85 et 95 %

selon la complexité de l'article ; les pertes de production de 5 à 15 % sont constituées de défauts de pâtes de verre (inclusions gazeuses, particules non fondues...) et de défauts de fabrication (épaisseurs de verre insuffisantes, micro défauts de surface, défauts dimensionnels...)

- la *production horaire de la machine*, c'est-à-dire le nombre d'articles pouvant être élaborés théoriquement par heure, par une même machine. Cet indicateur est évidemment fonction du type de machine et de la cadence de fabrication, laquelle dépend elle-

même du poids de l'article selon la relation assez précise suivante : cadence (nombre d'articles fabriqués /cavité moulante /minute) = K/poids

Ainsi par exemple :

- pour une bouteille bière de 130 g, cadence = 15 articles/cavité /minute

- pour une bouteille champagne de 900 g, cadence = 8 articles/cavité /minute

En général, l'unité de fabrication est constituée d'un moule ébaucheur et d'un moule finisseur positionnés sur un bâti métallique appelé section. Chaque section peut comporter de 1 à 4 moules ébaucheurs et finisseurs et donc fabriquer de 1 à 4 articles en même temps, selon la taille de ces derniers. Plusieurs sections peuvent être associées en ligne sur une même machine (on parlera alors de machine à sections individuelles en ligne ou machine IS) ou en cercle sur une machine



AIS 12 Section 6 1/4" DG, Servo Extraction. © Emhart Glass

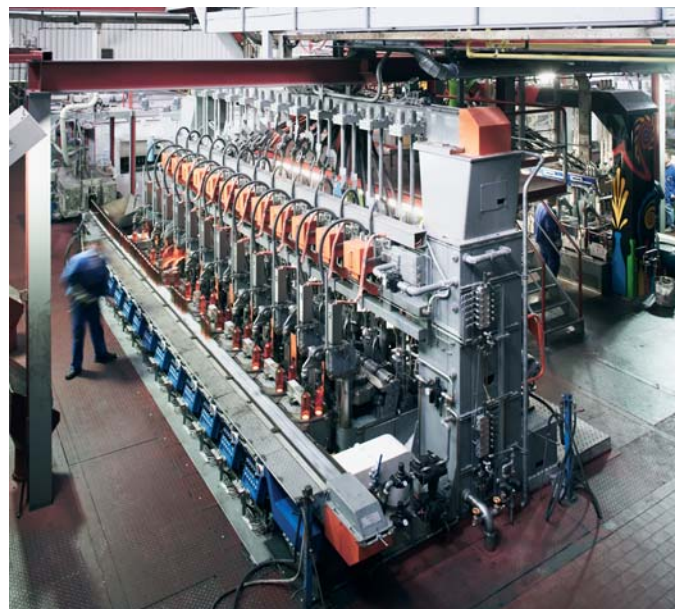
rotative. Sur une machine IS, ce nombre de sections (N) varie par exemple de 6 à 12 (mais 2 machines peuvent être assemblées en série, constituant une machine tandem, pour avoir jusqu'à 2 x 10 sections), ce qui donne habituellement pour le nombre de cavités moulantes (ébaucheurs ou finisseurs), les configurations indiquées dans le tableau ci-dessous. Pour reprendre les exemples précédents, on pourra ainsi fabriquer une petite bouteille bière avec une machine du type IS à 4 paraisons et 12 sections d'où la productivité :

- production horaire bière

= cycle/cavité/mn x 4 x 12 x 60 = 15 x 48 x 60 = 43 200 articles/heure. Pour une bouteille lourde, on ne pourra utiliser qu'une machine IS à 2 paraisons et 10 sections d'où la productivité :

- production horaire "champagne" = cycle/cavité/mn x 2 x 10 x 60 = 8 x 20 x 60 = 9600 articles/heure.

Le choix d'une taille de machine pour une tranche de fabrication donnée, c'est-à-dire pour un nombre d'articles à fabriquer sans interruption, aura donc un impact important sur le prix de revient de cet article ■



AIS 12 Section 6 174" DG – Côté soufflage. © Emhart Glass

	Nombre de sections N	6	8	10	12	16	20
Nombre de paraisons par section	1	6	8				
	2	12	16	20	24	32	40
	3		24	30	36		
	4			40	48		

Le moule en bois, une innovation relativement récente

Georges Bontemps écrit en 1868 dans son célèbre Guide du verrier (p. 567-569) : «Ce n'est guère que de nos jours que commencèrent les visites internationales d'usines. Les fabricants de chaque pays, confiants dans leurs douanes prohibitives, se souciaient généralement peu du mode de travail des étrangers ; cependant il vint heureusement un temps où l'éveil des concurrences étrangères poussa à exercer sa salutaire influence ; les efforts des associations pour la défense du travail national en Angleterre, en France, en Allemagne, associations qu'on aurait pu appeler d'associations contre les consommateurs nationaux, ne donnèrent plus une sécurité suffisante aux chefs d'industrie ; on commença à s'inquiéter du mode et des conditions de travail des étrangers. À l'époque dont nous avons parlé, tous les voyageurs qui revenaient des eaux d'Allemagne en rapportaient ces mille produits, variés de forme et de couleur, de l'industrie verrière de Bohême, prohibés par la douane, mais dont chaque voyageur avait la faculté de rapporter quelques échantillons, par tolérance, et avec un droit excessivement élevé. La contrebande avait aussi réussi à en introduire dans les magasins ; l'attention fut donc attirée sur cette fabrication ; plusieurs directeurs de cristalleries françaises allèrent visiter les verreries de Bohême, et le résultat le plus saillant de leur voyage fut l'importation du moulage en bois. »

P.R.