



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50<sup>th</sup> anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



**TOGETHER**  
*for a sustainable future*

## DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

## FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

## CONTACT

Please contact [publications@unido.org](mailto:publications@unido.org) for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at [www.unido.org](http://www.unido.org)

07459 - F

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

**LE VERRE  
ET  
SA FABRICATION**



**NATIONS UNIES**

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL  
Vienne

**LE VERRE  
ET  
SA FABRICATION**



**NATIONS UNIES**  
New York, 1979

Notes explicatives

Sauf indication contraire, le terme "dollar" (\$) s'entend du dollar des Etats-Unis d'Amérique.

Sauf indication contraire, le terme "tonne" désigne une tonne métrique.

Les signes suivants ont été utilisés dans les tableaux :

Trois points (...) indiquent, soit que l'on ne possède pas de renseignements, soit que les renseignements en question n'ont pas été fournis séparément;

Le tiret ( - ) indique que le montant est nul ou négligeable;

Un blanc dans un tableau indique que la rubrique est sans objet.

La somme des montants détaillés ne correspond pas nécessairement au total indiqué, les chiffres ayant été arrondis.

En plus des abréviations, signes et termes habituels, on trouvera dans le présent rapport :

Å	Angstrom = $10^{-8}$ cm
psi	Livre par pouce carré
η	Viscosité.

---

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention dans le texte de la raison sociale ou des produits d'une société n'implique aucune prise de position en leur faveur de la part de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI).

Les opinions exprimées dans le présent document sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement les vues du Secrétariat de l'ONUDI.

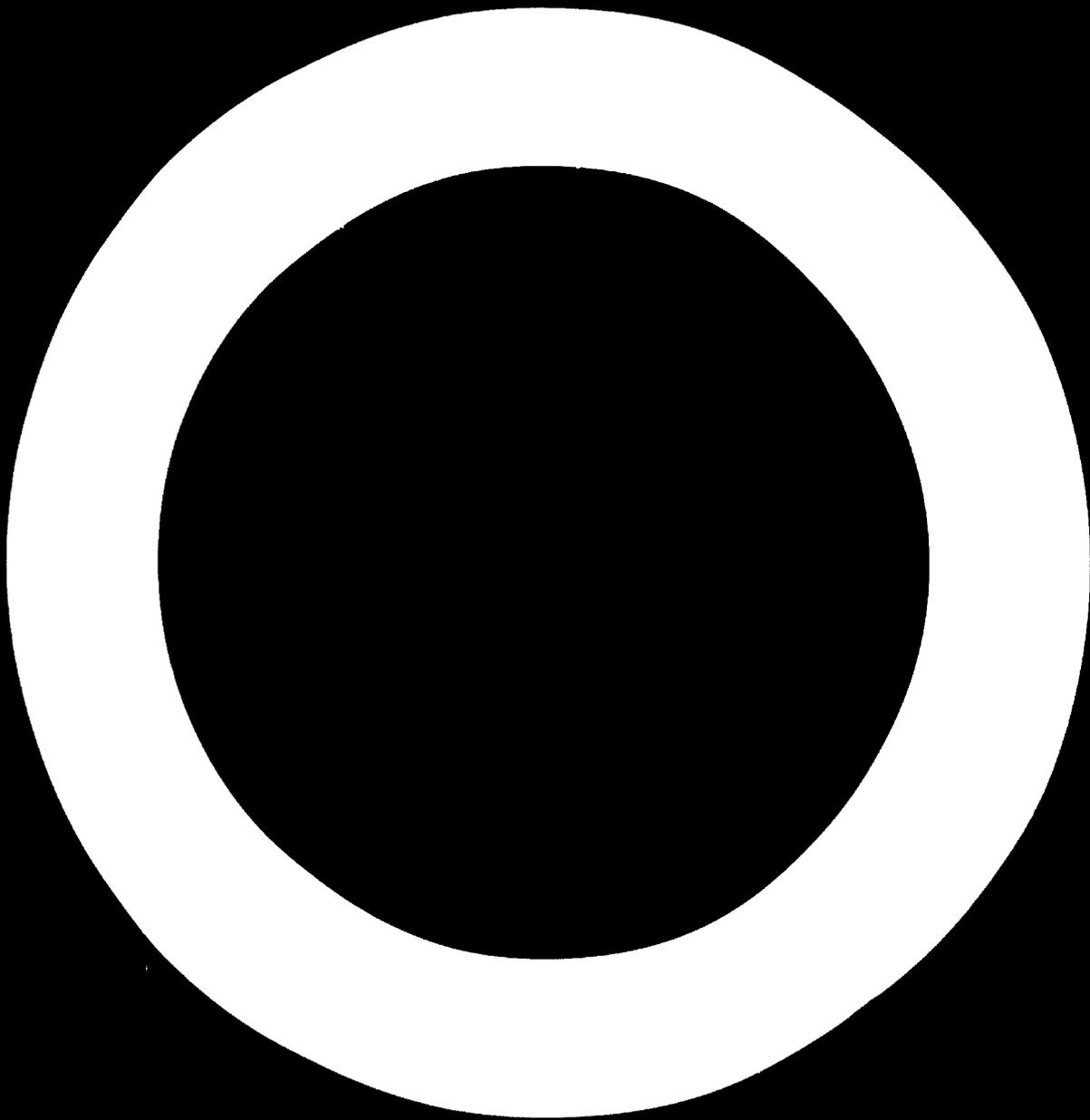


TABLE DES MATIERES

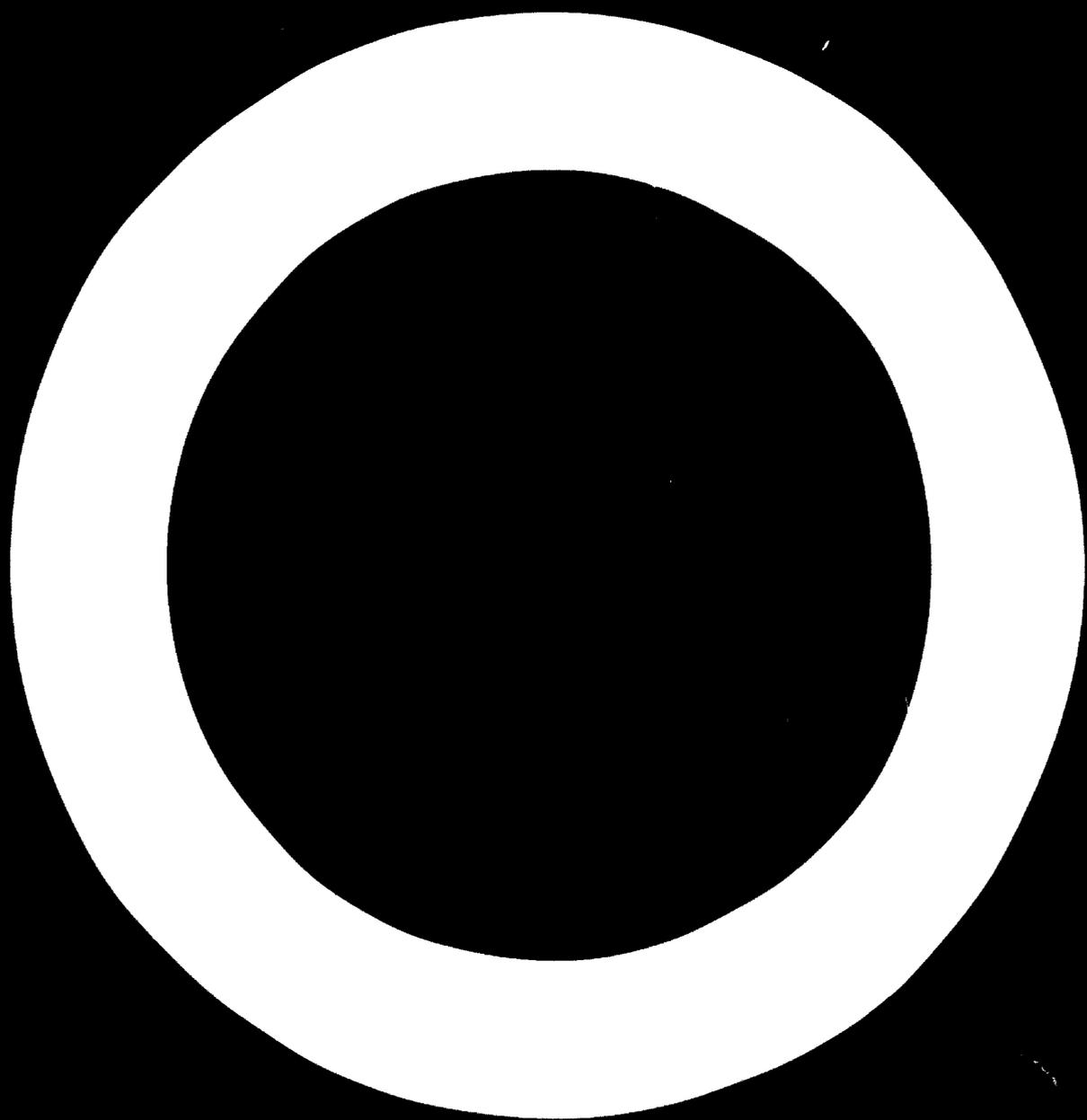
<u>Chapitre</u>	<u>Page</u>
INTRODUCTION	9
I. HISTORIQUE	12
II. NATURE ET PROPRIETE DU VERRE	18
Constitution	18
Propriétés physiques	21
Anomalies	23
Propriétés d'emploi	26
Vitrocéramiques	30
III. MATIERES PREMIERES ET ADDITIFS ENTRANTS DANS LA COMPOSITION DU VERRE	33
Matières premières	33
Additifs introduits dans le mélange vitrifiable	39
IV. FUSION DU VERRE	48
Fours	48
Fusion	51
Barboteurs	53
Pollution de l'air	53
V. LE TRAVAIL DU VERRE	55
Cueillage et alimentation par feeder	55
Pressage du verre et défauts de formage	57
Soufflage	59
Etirage, fabrication de tubes et de verres en feuilles	61
Verre laminé et glaces	63
VI. TRAITEMENTS SECONDAIRES	65
Poli au feu et découpe à chaud	65
Recuisson	66
Découpe par rayage et cassage	67
Doucissage et polissage	68
Reformage	69
Verre trempé	71
Décoration	73

	<u>Page</u>
VII. CONTROLE DE LA QUALITE ET DEPANNAGE	75
Contrôle statistique	75
Information en retour	77
Diagnostic des fractures	79
VIII. VIABILITE DE LA FABRICATION DU VERRE	82
Echelle des activités	84
Gamme, tendance et pénétration du marché	85
Optimisation de la technologie	87
Personnel d'une petite verrerie	89
IX. RAPPORT ENTRE LA DISTRIBUTION DES COÛTS ET LES TENDANCES DANS L'INDUSTRIE DES RECIPIENTS EN VERRE	90

Tableaux

1. Production de verre par type en France et en République fédérale d'Allemagne, 1973	15
2. Consommation de verre plat étiré dans différents pays, 1971	16
3. Production de bouteilles par habitant et répartition approximative de leur utilisations dans différents pays, 1970	17
4. Propriétés structurelles des ions et des équivalents ioniques de leur oxydes	22
5. Incidence des oxydes entrant dans la composition du verre sodocalcique sur ses propriétés physiques	24
6. Variation de température nécessaire pour rétablir la viscosité initiale et modification de la zone de transformation due au remplacement d'une unité de pourcentage en poids de $\text{SiO}_2$ par un autre oxyde	25
7. Fusion et décomposition des composés utilisés pour la fabrication du verre	37
8. Exemple de calcul de la composition du verre à partir de la composition du mélange vitrifiable	38
9. Effet de la substitution de $\text{MgO}$ à $\text{CaO}$ dans un verre renfermant 16 % de $\text{Na}_2\text{O}$ , 10 % de $\sqrt{x} \text{MgO}$ , $(1-x) \text{CaO}$ , 74 % de $\text{SiO}_2$	40
10. Temps que mettent les bulles de divers diamètres pour s'élever de 20 cm jusqu'à la surface d'un verre fondu de type normal, à différentes températures	43

	<u>Page</u>
12. Couleurs obtenues à l'aide des colorants généralement utilisés dans la fabrication de verre	45
13. Proportions de sélénium requises pour décolorer le verre, en fonction de la teneur de la pâte en arsenic et en fer	46
14. Verres plats et des verres creux : programmation de la recuisson	67
15. Ventilation des coûts d'investissement, de consommation d'énergie et de main-d'oeuvre dans une petite verrerie	91
16. Ventilation approximative des coûts de fonctionnement d'une petite verrerie	92



## INTRODUCTION

La fabrication du verre, l'une des industries les plus anciennes, n'a jamais cessé de fasciner l'homme. Transformer du sable et de la terre en un matériau rigide, transparent, semblable à une pierre précieuse tient du mystère de l'alchimie. De nos jours, le verre est pour l'essentiel obtenu par des moyens complètement automatisés, et la visite d'une usine moderne de bouteilles, par exemple, pourrait nous porter à croire que sa fabrication n'est plus qu'une simple question de technologie; mais un coup d'oeil dans la coulisse nous révélera que, comme par le passé, elle relève bien plus de l'art que de la science. Le technicien verrier est l'alchimiste qui, aidé par la science, doit user chaque jour de son art pour assurer le bon fonctionnement des machines.

A la différence des métaux et des matières plastiques, le verre ne peut être façonné par la seule force : il doit être encouragé ou contraint à épouser la forme voulue, jusqu'au moment où, à l'instar d'une mule indocile, il avance de son propre gré, mais dans la bonne direction. La tâche du technicien verrier ressemble à cet égard aux fonctions du cadre dirigeant, qui passe le gros de son temps non pas à s'occuper de l'administration courante mais à résoudre des difficultés dues à la nature récalcitrante de l'homme. Or, ces deux personnes ne parlent que rarement la même langue. Cela est particulièrement vrai pour les nouvelles verreries des pays en développement où la formation organisée à l'intention du personnel de ces deux catégories est souvent très différente. L'un des objectifs de la présente monographie est donc de fournir aux techniciens et aux cadres des indications sur la fabrication du verre qui leur permettent de se comprendre.

Il n'est pas sans intérêt de signaler que dans cette branche caractérisée par une très forte concurrence, les gros fabricants de verre bien organisés et fortement hiérarchisés n'atteignent souvent qu'une rentabilité marginale, alors même que certaines petites entreprises familiales mal équipées et peu structurées, marchent fort bien. La raison en serait-elle par hasard que dans le second cas, la même personne est souvent à la fois technicien verrier et directeur administratif ?

Le travail (de production et d'administration) courant d'une verrerie se réduit souvent à l'emploi de méthodes normalisées de fabrication, d'organisation et de comptabilité et un cadre expérimenté qui entre pour la première fois en contact avec cette industrie est facilement porté à croire qu'il s'agit-là d'une branche industrielle comme une autre et que son manuel d'organisation et de méthode lui permettra de faire face à toutes les éventualités. Certaines différences subtiles risquent de l'induire en erreur et il lui faudra peut-être des années pour se rendre compte que pendant qu'il essaye de guider la mule dont il a été question plus haut à l'aide de moyens peu appropriés à cette fin, celle-ci suit par pur hasard le même chemin que lui.

La plupart des difficultés proviennent des propriétés particulières du verre. A température élevée, le verre liquide commence à se comporter comme un solvant universel idéal : il est alors difficile de trouver des matières réfractaires et résistantes à des agents chimiques qui soient capables de le contenir. Mais le trait le plus frappant du verre

est qu'il passe progressivement de l'état de liquide visqueux (à une température de fusion de près de 1 500°C) à celui de solide rigide, lorsqu'il est refroidi jusqu'à 500°C et qu'il cesse d'être rouge. Au cours de ce processus, la viscosité du verre varie dans une proportion de 1 à 6 billions. Pour se faire une idée de ces énormes variations des propriétés du verre pendant qu'il est travaillé, on peut représenter sur un diagramme la viscosité du verre fondu dans un four par une ligne de 2,5 cm de long. A la sortie du four (à environ 1 100°C) la viscosité du verre prêt à être travaillé correspond alors à une ligne de 183 cm. Au cours du façonnage (mécanique, manuel ou par soufflage à la bouche), la ligne représentant la viscosité atteint 3,2 km. Enfin, il faut recuire le verre pour faire disparaître les tensions produites au cours du façonnage. A cet effet, on le refroidit progressivement jusqu'à une température où sa viscosité est représentée par une ligne qui correspond à la distance de la Terre au Soleil (150 millions de km).

Selon ses caractéristiques à l'état plastique, le verre peut être mis en forme de différentes façons : par soufflage (bouteilles et bocaux); par moulage à la presse (verrerie de table); par étirage (verre à vitre et tubes); et par laminage (verre à glaces).

On pourrait croire qu'il est facile de déterminer les caractéristiques de plasticité en mesurant la viscosité à différentes températures de travail et de régler les machines à façonner le verre selon des principes techniques ordinaires. Il n'en est pas ainsi. La viscosité est une mesure de la résistance à la coulée ou à un changement de forme à des températures stationnaires; or, lorsqu'on façonne du verre, la température est loin d'être stationnaire. Le verre se refroidit à une allure qui varie sensiblement selon la présence d'impuretés microscopiques et leur état d'oxydation. Au-dessous de 200°C, le verre est un bon isolant thermique, mais à des températures plus élevées le transfert de chaleur se fait essentiellement par radiation et la transparence du verre lui confère un coefficient élevé de transfert de la chaleur, qui dépend jusqu'à un certain degré, de sa couleur. De petits écarts de la vitesse de refroidissement entraînent donc d'importantes différences des caractéristiques de plasticité.

La variation de la viscosité du verre n'est qu'un des nombreux éléments qui empêchent de définir complètement un procédé de fabrication du verre. Le recours au doigté et aux compétences du technicien verrier est donc finalement indispensable. Grâce à sa formation, celui-ci sait user de son art de façon scientifique et de sa science avec art.

La présente monographie s'adresse non seulement aux personnes qui entrent pour la première fois en contact avec cette industrie, que ce soit en qualité de chef d'entreprise ou de garçon de bureau, mais aussi aux techniciens expérimentés qui, sans avoir reçu une instruction systématique dans ce secteur, occupent aujourd'hui des postes clefs pour la fabrication du verre. Le technicien verrier frais émoulu y trouvera peut-être aussi des passages qui l'intéresseront.

Comme l'indique la table des matières, l'ouvrage a une assez grande portée. Après avoir retracé l'histoire de l'industrie, il contient un examen technique de la théorie et de la pratique de la fabrication du verre et une analyse des problèmes économiques que pose la création de verreries, et se termine par un tour d'horizon des tendances actuelles de l'industrie.

On dit que la fabrication du verre est l'art de choisir un bon procédé et de l'appliquer sans faillir. A cet égard, le technicien verrier joue un rôle important. Chargé au premier chef de dépister les causes de pannes possibles, il doit savoir ajuster, parfois au jour le jour, le mélange de matières premières, pour maintenir ou améliorer le rendement des fours et des machines tout en obtenant des produits de qualité constante. Il doit utiliser de la façon la plus rationnelle les matières premières disponibles et compenser toute variation de leurs propriétés naturelles. Enfin, il doit connaître le fonctionnement économique général de l'usine. C'est à cet égard que le technicien verrier est souvent mal informé. Des mesures de contrôle économique imposées par la direction paraissent souvent illogiques et arbitraires au technicien; en effet celui-ci s'occupe du verre qui se trouve aujourd'hui au four et qui doit être usiné demain, et il ne s'intéresse donc guère à ce qui s'est passé la semaine dernière. Dans bien des cas, il n'a pas tort à cet égard. Les systèmes de contrôle de la production, de la qualité des produits et du rendement ont souvent pour but principal d'informer l'échelon suprême de la direction qui reçoit les chiffres trop tard pour prendre des mesures correctives efficaces - comme disent les médecins c'est un diagnostic fait à l'autopsie. Les chiffres ne perdraient rien de leur intérêt pour l'administration s'ils s'adressaient principalement au technicien affecté à des tâches de contrôle immédiat et s'ils ne rendraient compte qu'accessoirement des performances réalisées. Tel est particulièrement le cas des usines que les pays en développement ont fait construire en partant de l'hypothèse qu'une verrerie peut être achetée "clefs en main".

Si le dirigeant et le technicien verrier peuvent apprendre à envisager de la même manière le processus de fabrication du verre, ils pourront utiliser au mieux les machines, le matériel et les procédés qu'exige la production et exploiter la verrerie comme un ensemble cohérent, et indépendant.

En abordant quelques-uns des aspects scientifiques de la nature du verre, l'auteur s'est parfois servi de notions qui ne sont pas généralement admises. Son excuse est qu'il les a lui-même trouvées utiles. Si le lecteur averti était enclin à les contester, l'auteur n'en serait pas fâché, car il a rédigé le présent document dans l'intention de lui donner matière à réflexion.

## I. HISTORIQUE

Les historiens semblent s'accorder pour écarter comme mythique le récit rapporté par Pline au premier siècle avant notre ère à propos de la découverte du verre, sans parvenir toutefois à y substituer autre chose que des suppositions des plus vagues et en ignorant l'agencement logique de l'histoire. Pline écrit :

"Il existe, en Syrie, une région connue sous le nom de Phénicie ... C'est dans cette contrée que prendrait sa source le Belus qui, après avoir parcouru 5 milles, se jette dans la mer près de la Colonie de Ptolémaïs. Le courant du fleuve est lent ... Plein de dépôts limoneux et très profond, il ne découvre qu'à la marée descendante ses sables qui, agités par les vagues, se séparent de leurs impuretés et sont ainsi nettoyés ... Selon un récit, un navire, chargé de blocs de nitre, aurait mouillé à cet endroit et des marchands préparant leur repas sur le rivage et n'y trouvant pas de pierres pour y placer leurs marmites, se servirent de ces blocs pris à bord du bateau; ils furent alors témoins d'un phénomène étrange : sous l'action du feu les blocs de nitre mélangés au sable du rivage se transformèrent en un liquide transparent inconnu jusqu'à cette époque ; ce fut, dit-on, l'origine du verre."

Même si Pline ne relate la découverte du verre proprement dite, il pourrait fort bien s'agir de la naissance de la verrerie. On fait remonter à 12 000 ans avant notre ère les glaçures c'est-à-dire ces enduits vitrifiables appliqués à certaines poteries; or, les civilisations antiques de cette époque, qui fabriquent couramment de la poterie en terre doivent forcément "découvrir" le verre de temps à autre. Mais, ce faisant, elles n'ont que peu de chances de réunir cet ensemble significatif de trois éléments que l'on trouve chez Pline : 1) l'exposition du nitre à l'action d'un feu dégagant une température élevée; 2) l'existence d'un sable bien lavé qui confère au verre sa transparence spectaculaire; 3) la présence de marchands, qui sont sûrement incités à exploiter des perspectives d'un si grand intérêt parce qu'ils jouent à cette époque le rôle d'entrepreneurs.

La longue évolution de la fabrication du verre se caractérise par des périodes prolongées d'inactivité entre la mise au point de nouvelles techniques. Quelque 1 700 ans s'écoulaient ainsi entre la découverte de la faïence et la fabrication de récipients en verre évidés, qui sont les premiers articles authentiques en verre. On obtient en effet ces récipients en revêtant d'une couche de verre un noyau en sable moulé, monté sur une tige et en retirant le sable dès que le verre se solidifie. Cette technique servant à la fabrication de la plupart des récipients anciens en verre survit pendant un millier d'années avant d'être remplacée brusquement 500 ans avant notre ère par la technique du soufflage, encore employée de nos jours.

Depuis l'avènement de la technique du soufflage, la verrerie connaît une expansion rapide, qui n'est pas seulement due au perfectionnement sensible des techniques utilisées, mais qui s'explique incontestablement aussi par la stabilité commerciale de l'Empire romain. A Rome même, les récipients en verre soufflé sont très appréciés et se vendent donc à un prix élevé. Pline fait état de la vente de deux coupes coûtant 6 000 sesterces (environ 50 livres sterling). Cependant, le développement rapide de la concurrence entraîne un effondrement des prix. Les récipients en verre deviennent des objets d'usage courant et

cessent d'appartenir à la même catégorie d'objets de luxe que l'argent et l'or. En l'an 220 de notre ère, les artisans verriers sont si nombreux à Rome qu'un quartier de la ville leur est réservé et Sévère Alexandre les assujettit à un impôt spécial, ce qui n'est pas une façon inhabituelle de récompenser la réussite.

Les propriétés techniques et esthétiques du verre se sont certainement améliorées au fil des années mais il faut attendre le XIX<sup>ème</sup> siècle pour que des perfectionnements réellement décisifs soient apportés à la technologie du verre.

Sur des tablettes en caractères cunéiformes découvertes à Ninive on a trouvé le premier traité connu de technologie du verre qui remonterait, selon les estimations, à l'an 640 avant notre ère. En voici un extrait :

"Quand tu prépareras le sol pour un four ... tu choisiras un jour faste d'un mois propice ... tu déposeras des embryons (nés avant leur terme) ... tu répandras sur eux les libations d'usage."

(Si l'on considère les banques de développement comme l'équivalent moderne de ceux qui sont "nés avant leur terme", cette recommandation paraît raisonnable même aujourd'hui.) Après avoir ainsi expliqué les rites propitiatoires à observer, le texte donne des recommandations de caractère pratique : se servir de bois sec comme combustible, etc.

On trouvera dans l'ouvrage classique L'arte vetraria de A. Neri, prêtre florentin l'ébauche d'une approche plus scientifique. Publié pour la première fois en 1612, traduit en allemand, en anglais, en français et en latin, ce manuel paraît à une époque de grands progrès pendant laquelle les verreries se multiplient à travers l'Europe. Dès 1600, l'art de tailler le cristal s'est bien développé. Dès 1615, on essaye en Angleterre de chauffer les fours à verre avec du charbon à la place du bois et, toujours en Angleterre, on invente en 1675 le flint, ainsi nommé à cause des nodules de silice du même nom trouvés dans des gisements de calcaire et servant à sa fabrication. Sa teneur en peroxyde de plomb confère au flint un brillant inconnu dans le verre avec cette époque. Le terme "flint" est maintenant employé aussi pour d'autres verres clairs et incolores.

A quelques exceptions près, la technologie du verre est mal servie par les hommes de science jusqu'à une époque récente. D'abord, le verre est considéré comme un matériau anormal, qui ne cadre pas avec l'idée simpliste selon laquelle la matière n'existe qu'en trois états : gazeux, liquide et solide. Ensuite, l'étude scientifique du verre est sérieusement entravée par la théorie du phlogistique qui repose sur une conception erronée de la calcination et de la combustion, phénomènes dont l'importance est manifeste pour la fabrication d'un matériau comme le verre composé surtout d'oxydes. Mais l'optique évolue et réserve une grande place au verre; elle est à l'origine de nombreuses expériences dont la technologie bénéficie indirectement.

Dans la pratique, les propriétés naturelles du verre ne permettent pas d'effectuer en laboratoire les expériences qui rendent compte de manière satisfaisante des processus fondamentaux de la fusion et du travail du verre. Par exemple, un four de verrerie moderne représente un gros investissement en biens de production et doit durer de quatre à huit ans.

Il faut donc être sûr de son fait pour réaliser des changements importants qui ne peuvent être expérimentés qu'à grande échelle. C'est pourquoi la technologie ne progresse forcément qu'avec lenteur, la mise de fond étant aussi limitée que possible à chaque stade. Les procédés semi-automatiques et ensuite automatiques mis au point au début du siècle sont d'abord la réplique mécanique des opérations exécutées avec art par les ouvriers verriers. Plus tard on construit surtout d'après des principes de mécanique des machines qui donne un produit final de la façon la plus directe possible, augmentant ainsi la vitesse de production de plusieurs centaines de fois.

La fabrication manuelle du verre à vitre se faisait selon le procédé des couronnes ou le procédé des cylindres. Le procédé des couronnes consistait à souffler une boule de verre et à en détacher le col pour y laisser un trou. On agrandissait le trou ainsi obtenu en faisant tourner le verre réchauffé jusqu'à ce qu'il prenne la forme d'un dieu, ayant une encoche au centre où il était soutenu par une tige appelée "pontil". Considérée comme principal inconvénient du procédé, la "boudine" centrale est désormais si recherchée comme objet de collection que ce procédé continue à être utilisé uniquement pour répondre à cette demande. Le procédé des cylindres était plus productif. On formait un cylindre par soufflage, en détachant les extrémités et les étendant dans un four après l'avoir fendu en longueur. Le procédé moderne utilise lui une variante du procédé Fourcault mis au point en 1902 qui consiste à obtenir, par étirage direct du verre fondu, une feuille continue qui a souvent plus de 2 m de largeur.

Les machines modernes à faire des bouteilles s'écartent elles aussi de la suite des opérations manuelles. Pour la fabrication manuelle, le verre fondu est prélevé au bout d'une canne creuse et soufflé en deux fois. Le goulot est formé au stade final après enlèvement de la canne. De nos jours, le goulot est formé dès le début. Une certaine quantité de verre fondu, la "goutte" est introduite automatiquement dans la machine et toute la suite des opérations de soufflage, de recuit, voire d'inspection et d'emballage est entièrement automatisée.

Ces progrès permettent au fabricant de verre de vendre un produit bien meilleur à peu près au même prix nominal que le verre fait à la main en dépit de la forte baisse de la valeur réelle de la monnaie au cours des années.

Les récipients en verre et le verre plat étiré représentent à l'heure actuelle plus de 83 % de la production mondiale de verre. Nous trouverons au tableau 1 des chiffres globaux pour la France et la République fédérale d'Allemagne, qui sont considérés comme représentatifs de l'industrie du verre.

Tableau 1

Production de verre par type en France  
et en République fédérale d'Allemagne

1973

<u>Types</u>	<u>Volume de la production (millions de tonnes)</u>	<u>Proportion de la production totale (%)</u>	<u>Production par habitant (kg)</u>	<u>Taux annuel de croissance (%)</u>
Verre de sécurité	0,536	7,8	4,8	3,72
Verre plat laminé	0,628	9,4	5,7	2,36
Verre plat étiré	0,627	9,4	5,7	1,28
Récipients	4,920	73,4	44,6	5,56

L'étude des taux de croissance porte à croire que le verre plat laminé était en 1973 sur le point de dépasser en importance le verre étiré. En dépit de l'absence de chiffres plus récents, il est fort probable que cela se soit réellement produit, non pas à cause de changements affectant les marchés mais par suite de l'invention d'une technique nouvelle de fabrication de verre laminé (le procédé par flottement) qui donne des faces d'un fini bien supérieur. Le verre obtenu par ce procédé n'est pas seulement un substitut peu coûteux du verre plat doux et poli, mais il envahit aussi le marché traditionnel des plaques épaisses de verre étiré.

On a affirmé que l'invention des fenêtres vitrées avait été pour beaucoup dans la progression des civilisations vers des régions nordiques. Il existe certainement une étroite corrélation entre la production de verre plat par habitant et la température moyenne au milieu de l'hiver. Quoiqu'il en soit, la production de verre à vitre continue à progresser à une allure spectaculaire. De 1963 à 1972, la production des 27 pays représentant une population de 1 milliard 550 millions d'habitants a progressé à raison de 5 % par an (en passant de 685 millions de mètres carrés à 990 millions de mètres carrés).

Le verre plat, facile à emballer si l'on doit l'expédier, entre en grandes quantités dans le commerce international. Les chiffres de production ne donnent donc pas la mesure exacte de la consommation du pays producteur et le volume de la consommation proprement dite est difficile à déterminer. On a essayé au tableau 2 de calculer la consommation de sept pays à partir des données relatives à la production, à l'importation et à l'exportation.

Tableau 2

Consommation de verre plat étiré  
dans différents pays, 1971

<u>Pays</u>	<u>Production (t)</u>	<u>Importations (t)</u>	<u>Exportations (t)</u>	<u>Consommation (t)</u>	<u>Population (millions d'habitants)</u>	<u>Consommation par habitant (kg)</u>
Allemagne, Rép. féd. d'	370 138	95 005	107 077	358 066	61,3	5,84
Danemark	24 000	22 294	15 847	30 000	5	6
France	216 000	33 553	60 970	189 000	51	3,7
Italie	562 000	68 190	91 245	539 000	54,5	9,9
Japon	1 145 000	1 785	363 855	783 000	103	7,6
Suède	52 000	30 786	-	83 000	8	10
Turquie	62 700	6 480	5 080	64 100	36	1,8

L'épaisseur du verre plat est normalement comprise entre 2 et 8 mm (moyenne 3,5 mm). Une tonne de verre de 3,5 mm correspond à 114,3 m<sup>2</sup>.

En raison de leur nature encombrante, les récipients en verre sont moins faciles à exporter, si bien que les chiffres de production donnent probablement une idée plus fidèle de la consommation. Cependant, les exportations indirectes (bouteilles ou bocaux contenant un produit exporté) peuvent, dans certains cas, être importantes. On trouvera au tableau 3 la production de 17 pays qui représentent près de 19 % de la population mondiale. En se fondant sur l'étude des conditions existant au Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, on y donne aussi des indications approximatives sur l'usage fait des bouteilles.

En dépit de la concurrence des matières plastiques et des conserves, le taux de croissance de la production de récipients en verre tend à être plus élevé que celui de verre plat.

Ces simples chiffres, qui permettent en tout cas une évaluation préliminaire des débouchés potentiels, peuvent éveiller un certain intérêt dans la mesure où ils indiquent que si ces taux de croissance persistent, il faudra créer, tous les ans, dans le monde, de nouvelles installations pour la production de quelque 800 000 tonnes de bouteilles et 160 000 tonnes de verre plat. À supposer qu'une usine doive fabriquer 200 000 tonnes de verre par an pour atteindre le seuil de rentabilité, 50 verreries nouvelles devraient donc être construites chaque année. Même s'il est vrai que les usines actuelles sont en mesure d'assurer une bonne partie de la production supplémentaire en augmentant leur rendement et que les marchés nationaux n'ont que rarement les dimensions nécessaires pour absorber la production d'une usines de taille minimale, il y a place, de toute évidence, pour la création de nombreuses entreprises nouvelles dans cette industrie en perpétuelle expansion.

Tableau 3

Production de bouteilles par habitant et répartition approximative de leurs utilisations dans différents pays, 1970

<u>Pays</u>	<u>Population (millions d'habitants)</u>	<u>Production par habitant (kg)</u>	<u>Taux annuel de croissance (%)</u>	<u>Utilisations</u>	<u>Proportion du total (%)</u>
Etats-Unis d'Amérique	202	65,0	3,7		
Bulgarie	8,3	43,0	10,5		
Royaume-Uni	55,0	40,0	2,8		
France	50,0	35,0	8,5		
Allemagne, Rép. féd. d'	60,0	35,0	8,2		
Suède	7,8	35,0	5,8	Denrées alimentaires	35,0
Italie	53,0	23,0	7,3	Boissons	32,8
Hongrie	10,2	19,3	11,0	Préparations pharmaceutiques	17,0
Autriche	7,3	18,0	8,5	Articles cosmétiques	8,1
Japon	100,5	14,6	8,2	Divers	4,1
Espagne	32,0	14,4	10,7	Exportations directes	3,0
Pologne	32,1	13,2	4,7		
Roumanie	19,3	12,7	9,2		
Finlande	4,8	12,5	6,9		
Cuba	7,9	11,8	5,8		
Portugal	9,2	10,9	9,3		
Yougoslavie	19,6	10,5	10,0		
				Total	100,0

## II. NATURE ET PROPRIÉTÉ DU VERRE

### Constitution

Un liquide qui se refroidit atteint généralement une température critique, le point de congélation, à laquelle les atomes ou molécules qui le composent, jusqu'alors animés d'un mouvement désordonné, s'organisent selon le schéma régulier qui est caractéristique des solides cristallins. Si le solide est à nouveau chauffé, les atomes abandonnent très brusquement la configuration cristalline à la même température critique, maintenant appelée point de fusion, et le chaos - la fluidité - se rétablit. On est donc amené à penser que pour qu'un liquide se cristallise il faut trois choses : tout d'abord la perte de l'énergie du mouvement désordonné; ensuite le temps nécessaire pour que les atomes s'arrangent selon la structure cristalline, et enfin un schéma cristallin selon lequel s'organiser. Il en est effectivement ainsi. Si par exemple, on refroidit un liquide si rapidement que ses molécules n'aient pas le temps de se mettre en ordre, et qu'on ait soin d'éliminer les impuretés et d'éviter le contact avec des surfaces dont la structure microscopique ordonnée pourrait fournir un germe d'organisation cristalline, le liquide peut être amené à l'état de surfusion au-dessous de son point de congélation normal.

En général, le degré possible de surfusion est fort limité. Il peut y avoir apparition spontanée de noyaux et par conséquent, cristallisation soudaine du liquide. Mais il existe certaines compositions liquides qu'il est très facile de mettre et de maintenir en état de surfusion. Le liquide en surfusion le plus important que l'on connaisse est à base de quartz fondu, le quartz se composant de sable siliceux ou de silicates naturels qui sont parmi les matériaux naturels les plus abondants et les plus répandus.

Bien entendu, c'est du verre que nous parlons. Ce matériau est-il donc véritablement un liquide encore qu'en surfusion ? À bien des égards il l'est - ne serait-ce que parce qu'il est si cassant - plus "solide" que bien des corps dont nul ne conteste cette qualité. Est-ce donc un solide ? En fait la question ne se pose que parce que les savants d'autrefois ont décrété qu'il n'y avait que trois états de la matière : solide, liquide et gazeux. Le verre, est un "verre", et les 100 000 tonnes au moins qu'on en fond chaque jour donnent bien le droit de parler d'un quatrième état de la matière : l'état vitreux.

L'état vitreux est curieux à bien des égards. Il y a plusieurs états dans cet état. Nous constatons que le temps y joue un grand rôle, de sorte que les propriétés du verre peuvent dépendre des traitements qu'il a subis. Heureusement, dans la pratique, le fabricant peut dans une large mesure ne pas tenir compte de ces bizarreries, pourvu qu'il se souvienne que dans une certaine zone de températures, dites "de transformation", la situation n'est pas normale, mais qu'il peut la maîtriser en observant quelques règles empiriques assez élémentaires.

Supposons que nous ayons affaire à un verre à bouteille normal, composé de 15 % d'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), de 10 % de chaux ( $\text{CaO}$ ), et pour le reste essentiellement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) à raison de 75 %. On y trouve 60 % d'ions oxygène de relativement grande taille, 26 % d'ions silicium qui sont assez petits, 10 % d'ions sodium, et 4 % d'ions calcium.

$\text{Na}_2\text{O}$  est ajouté comme "fondant" au verre c'est-à-dire, pour aider à la fusion de la silice et abaisser la température de cette fusion ( $1500^\circ\text{C}$  environ) car la silice par elle-même a un point de fusion trop élevé pour être fondue dans les récipients réfractaires dont on dispose. La chaux est également un fondant, mais son principal rôle consiste à rendre insoluble dans l'eau et dans les liquides d'usage courant le verre obtenu au terme du processus de production. Compte tenu du grand nombre et du volume des ions oxygène, nous pouvons nous représenter le verre fondu comme un conglomérat d'ions oxygène maintenus ensemble de façon assez lâche par les minuscules ions silicium, chacun de ceux-ci formant des liaisons avec les quatre ions oxygène les plus proches, tandis que les ions sodium et calcium sont éparpillés au hasard dans la masse, ayant perdu dans le conglomérat général les ions oxygène qui leur étaient associés à l'origine. C'est pourquoi, les ions silicium et les autres qui leur ressemblent sont souvent appelés ions constitutifs tandis que les ions dispersés sont appelés ions modificateurs.

A haute température, les ions sodium, et dans une moindre mesure les ions calcium, sont extrêmement actifs, se précipitant ça et là à la manière d'un chien de berger dans un troupeau de moutons. Il n'y a guère d'attraction qui les retienne en un point plutôt qu'en un autre, et ils se jettent avec force dans toutes les directions, tendant à désorganiser le réseau d'ions oxygène agrégée par les ions silicium, c'est-à-dire qu'ils aident à faire fondre le verre. A mesure qu'on abaisse la température, les ions calcium, qui sont plus gros et sont porteurs d'une charge électrique double, perdent leur mobilité bien avant les ions sodium. Les propriétés du verre, par exemple sa fluidité et son volume spécifique, suivent en gros ce schéma, c'est-à-dire qu'elles sont ce qu'on peut attendre d'un équilibre dans un conflit entre les ions mobiles qui tendent à disperser les ions oxygène, et les ions silicium qui tendent à les maintenir groupés.

A  $1000^\circ\text{C}$  environ, température à laquelle ce verre a la viscosité d'un sirop épais, le combat et la mobilité sont tels qu'une phase cristalline peut apparaître pour peu que l'on maintienne pendant quelque temps le verre à cette température. Ce phénomène est appelé dévitrification. Pour éviter la dévitrification en cours de fabrication il faut sortir le verre du four à une température supérieure à  $1000^\circ\text{C}$  et pendant le formage le ramener rapidement à environ  $750^\circ\text{C}$ , point auquel le danger sera écarté. A cette température le verre a plus ou moins la consistance du beurre, les ions calcium sont pratiquement en repos mais les ions sodium sont encore actifs et de temps à autre ils l'emportent sur les silicium; il est donc possible de modifier lentement la forme du verre.

A  $600^\circ\text{C}$  environ commence la zone des températures de transformation. Le comportement du verre devient anormal. De même s'il faut du temps aux ions pour s'agencer en formations cristallines, il en faut aussi à un ion mobile pour trouver un milieu où il puisse cesser son rôle actif. En théorie, il existe toujours des coins favorables car, bien que les ions soient porteurs d'une charge électrique, le verre dans son ensemble est neutre, de sorte qu'il y a forcément des "logements" vacants entourés d'ions porteurs de charges opposées. Mais l'ion peut se trouver à grande distance d'un de ces points, cas auquel il est condamné à errer longtemps après le moment normal de son "toucher". Il faut donc du temps pour que s'établisse l'équilibre correspondant à chaque température et pendant ce temps-là les propriétés physiques changent. Aux températures élevées, l'équilibre est atteint

si rapidement que les changements qui se produisent passent inaperçus. En revanche, la stabilisation prend plusieurs secondes à 600°C; il faut des minutes à 550°C, à 500°C des heures et des journées entières à 450°C. Il peut donc se faire que les propriétés physiques à température ambiante ne soient pas uniquement fonction de la composition chimique du verre, mais qu'elles dépendent aussi dans une certaine mesure de la façon dont il a été refroidi.

Dans la pratique, après la plupart des opérations de formage, les températures sont réparties de façon si peu uniformes que si on laisse refroidir le verre, les tensions imputables aux différences de contraction risquent de le briser. D'où l'habitude de recuire le verre à une température uniforme assez élevée pour qu'il se débarrasse de ces tensions et qu'elles disparaissent, mais pas assez élevée pour qu'il se déforme sous son propre poids, puis de le faire refroidir en évitant les écarts de température importants. La température de recuisson est généralement choisie au milieu de la zone des températures de transformation; ce procédé tend donc à définir la condition d'équilibre ou température "fictive" du verre, et par conséquent à créer des propriétés de température ambiante reproductibles.

Ces deux caractéristiques : une zone de températures où la dévitrification est probable, et une zone de températures de transformation où les propriétés physiques varient avec le temps semblent communes à tous les verres. Un autre phénomène d'importance technique considérable n'intervient que pour les verres de composition particulière. C'est ce qu'on appelle "séparation de phases" ou "séparation du verre dans le verre". De nombreux systèmes vitreux sont apparemment aussi incompatibles que l'huile et l'eau aux basses températures, ce qui ne les empêche pas de se mêler en une seule et même masse fluide à la température habituelle de fusion. Les articles fabriqués avec ce mélange n'ont apparemment rien de particulier pour ce qui est de leurs propriétés physiques; mais il peut cependant arriver que leur résistance aux produits chimiques soit très inférieure à ce qu'on attendait et qu'elle dépende étroitement de la durée du traitement thermique aux environs de 600°C. Ce qui s'est produit, c'est que le mélange s'est séparé en deux verres différents à échelle sub-microscopique, c'est-à-dire beaucoup trop petite pour être visible à l'œil nu. Les propriétés physiques moyennes restent inchangées, mais il n'en est pas moins vrai qu'on est en présence de deux verres, dont l'un risque éventuellement d'être soluble dans l'eau. Les verres au borosilicate, importants du point de vue technique, présentent des limitations à cet égard, mais on a exploité cette particularité pour produire des verres aux propriétés uniques (par exemple le Vycor) et pour mettre au point toute la technologie nouvelle des vitro-cérames.

### Propriétés physiques

En général, la constitution du verre est établie à partir de l'étude de ses propriétés physiques, mais dans le cas présent, on a adopté la démarche inverse. Tout d'abord, le verre a une structure ionique, c'est-à-dire qu'il est composé de particules porteuses de charge électrique, mais ne comportant pas d'électrons libres. Tous les électrons sont étroitement liés à leurs ions respectifs et n'absorbent pas les radiations visibles, comme c'est le cas pour les électrons de valence. Le verre est donc transparent. Faute d'électrons libres pour diffuser la chaleur et d'une structure périodique pour propager les ondes élastiques, le verre transmet difficilement la chaleur et constitue donc un isolant thermique. Comme il n'y a pas transmission d'électricité, à basses températures, le verre est un bon isolant électrique. (Lorsque la température est assez élevée pour que les ions sodium deviennent mobiles, un courant électrolytique peut se former). Il est possible de fabriquer des verres spéciaux qui n'obéissent pas à ces règles et contiennent des électrons de valence absorbant la lumière, mais ces cas sont exceptionnels.

La structure aléatoire implique que le verre est isotrope jusqu'au niveau de l'atome. Ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions. Les glissements de lits réticulaire, comme cela se passe pour les métaux, où des groupes d'atomes peuvent glisser par rapport à d'autres, et rendent le matériau ductile sont impossibles. Le verre demeure donc élastique jusqu'à la limite de sa résistance. Il est inconcevable qu'une structure de ce genre puisse se rompre par compression. En fait, le verre ne peut être brisé que par traction.

La forme sphérique des ions - semblable à celle des ions des gaz rares - témoigne que ceux-ci ont perdu la plupart des propriétés qui caractérisaient les atomes dont ils proviennent. Leurs propriétés découlent uniquement de leur charge électrique, de leur volume et de leur poids, de sorte qu'on s'attendrait à ce que la valeur numérique d'une propriété physique quelconque du verre ne soit que la somme des contributions faites par chacun des ions qui le composent à proportion de leur nombre. Bien que cette hypothèse ne se vérifie pas toujours pour des propriétés telles que la conductivité électrique, la résistance chimique et la viscosité, qui impliquent des mouvements internes des ions, elle est valable en gros pour les propriétés qui tiennent uniquement à la structure statique, telles que la densité, la dilatation thermique, la chaleur spécifique et l'élasticité. Aussi, le verrier a-t-il tout intérêt, lorsqu'il compose sa pâte (mélange de matières premières), à bien connaître la charge, la dimension et le poids des ions ainsi que certaines règles d'addition simples pour les combiner, qu'il se propose d'utiliser au mieux les matériaux disponibles ou de modifier les propriétés physiques du verre. Les tableaux 4, 5 et 6 donnent, sous une forme simple, des indications concernant la composition des charges.

Le tableau 4 indique, à gauche, la charge électrique, la dimension et le poids des ions entrant habituellement dans la composition du verre. La structure du verre est rapportée au plus grand et au plus nombreux des ions, l'ion oxyde ( $O^{-2}$ ) qui a un rayon de cristal ionique de  $1,40 \text{ \AA}$ . L'entassement serré des sphères de cette dimension laisserait des sites de deux tailles pour les autres ions. Le plus petit de ces sites pourrait loger un ion positif ayant un rayon  $0,315 \text{ \AA}$ , 4 ions oxyde comme plus proches voisins. Le plus grand pourrait contenir

un ion de 0,58 Å de rayon avec 6 plus proches voisins. L'ion silicium ( $\text{Si}^{+4}$ ) est trop grand pour le premier site, bien qu'il puisse former une structure stable, électriquement neutre, avec quatre oxygènes comme plus proches voisins. Il en résulte une distorsion de la structure ordonnée que donnerait un assemblage compact. L'ion bore ( $\text{B}^{+3}$ ), en revanche, est si petit qu'il peut se loger n'importe où, de sorte que l'addition de  $\text{B}_2\text{O}_3$  à la composition devrait donner des effets inhabituels.

Il ne faut pas considérer ces sites comme des cavités fermées; en fait, de petits atomes tels que ceux d'hélium peuvent passer d'un site vide à un autre, à condition qu'ils ne soient pas occupés par les ions sodium ou calcium, par exemple, qui ont tendance à s'y loger.

Tableau 4. Propriétés structurales des ions et des équivalents ioniques de leurs oxydes

Ion	Rayon Å	Poids atomique	Formule de l' oxyde	Equivalent ionique <sup>a/</sup>
$\text{B}^{+3}$	0,22	10,8	$\text{B}_2\text{O}_3$	1,73
4-0 site	0,32			
$\text{P}^{+5}$	0,34	31,0	$\text{P}_2\text{O}_5$	0,85
$\text{Be}^{+2}$	0,37	9,0	$\text{BeO}$	2,40
$\text{Si}^{+4}$	0,42	28,1	$\text{SiO}_2$	1,00
$\text{As}^{+5}$	0,47	74,9	$\text{As}_2\text{O}_3$	0,61
$\text{Al}^{+3}$	0,53	27,0	$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,18
6-0 site	0,58			
$\text{V}^{+4}$	0,60	50,9	$\text{V}_2\text{O}_5$	0,66
$\text{Ti}^{+4}$	0,62	47,9	$\text{TiO}_2$	0,75
$\text{Fe}^{+3}$	0,67	55,8	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,75
$\text{Li}^{+1}$	0,68	6,9	$\text{Li}_2\text{O}$	4,03
$\text{Cu}^{+2}$	0,70	63,5	$\text{CuO}$	0,76
$\text{Mg}^{+2}$	0,71	24,3	$\text{MgO}$	1,49
$\text{Zn}^{+2}$	0,74	65,4	$\text{ZnO}$	0,74
$\text{Na}^{+1}$	0,98	23,0	$\text{Na}_2\text{O}$	1,94
$\text{Ca}^{+2}$	0,98	40,1	$\text{CaO}$	1,07
$\text{Cd}^{+2}$	1,00	112,4	$\text{CdO}$	0,47
$\text{Sr}^{+2}$	1,15	87,6	$\text{SrO}$	0,58
$\text{Pb}^{+2}$	1,26	207,2	$\text{PbO}$	0,27
$\text{F}^{-1}$	1,33	19,0		
$\text{K}^{+1}$	1,33	39,1	$\text{K}_2\text{O}$	1,28
$\text{Ba}^{+2}$	1,35	137,3	$\text{BaO}$	0,39
$\text{O}^{-2}$	1,40	16,0		

<sup>a/</sup> Rapport entre le nombre d'ions positifs fournis par un poids donné de l'oxyde et le nombre fourni par le même poids de  $\text{SiO}_2$ .

Le poids des ions a peu d'importance sauf en ce qui concerne son effet sur la densité du verre. Il est indiqué dans le tableau 4 pour une raison d'ordre pratique : le verrier s'occupe normalement du poids des oxydes entrant dans la composition du verre, et peut oublier que des poids égaux de CaO et MgO, ne contiennent pas le même nombre d'ions. Le tableau 4 indique, à droite, l'équivalent ionique de chaque oxyde, c'est-à-dire le nombre d'ions métal pour un poids donné d'oxyde par rapport au nombre d'ions  $\text{Si}^{+4}$  fournis par le même poids de  $\text{SiO}_2$ . Les nombres indiqués pour CaO et MgO sont respectivement 1,07 et 1,49. Donc, si le verrier souhaite remplacer la chaux (CaO) par de la magnésie (MgO) sans modifier la proportion de terres alcalines, il doit utiliser une quantité plus faible de MgO, puisque cette substance donne, à poids égal, plus d'ions que l'oxyde de calcium. Le rapport du poids de MgO à celui de CaO pour un nombre égal d'ions est alors de 1,07/1,49.

Bien que cela ne soit pas très logique, les facteurs fondés sur le pourcentage (en poids) d'oxyde dans la charge sont d'un emploi plus facile que ceux fondés sur le pourcentage molécule-gramme (comme c'est le cas pour l'équivalent ionique). Les facteurs indiqués dans le tableau , qui sont présentés sous cette forme, peuvent être employés pour calculer les propriétés thermiques et élastiques du verre sodocalcique ordinaire. Toutefois, ils ne sont pas assez exacts lorsque la composition de la charge s'écarte sensiblement de la moyenne.

Il est évidemment essentiel d'avoir une certaine idée de l'effet des substitutions sur les propriétés du verre en fusion. La viscosité est une propriété dynamique et l'on ne saurait par conséquent s'attendre qu'elle soit vraiment une résultante des propriétés statiques des constituants du verre. néanmoins, s'agissant d'un problème aussi complexe, il est préférable de supposer que chaque constituant a sa fonction propre. Le tableau 5 indique les augmentations (+) ou les diminutions (-) de température nécessaires pour maintenir la viscosité à son niveau initiale, lorsqu'une unité de silice en pourcentage de poids est remplacée par un autre oxyde. En raison des variations énormes de la viscosité du verre selon la température, il est plus commode de se servir du logarithme de la valeur  $\eta$  de la viscosité (exprimée en poises) plutôt que cette valeur elle-même. Une viscosité de  $\log \eta = 2$  correspond en gros à la température de fusion, 3,5 à la température à laquelle le verre est retiré du four, et 13 à la température de recuit. L'intervalle entre  $\log \eta = 3,5$  et  $\log \eta = 5,5$  correspond à la "gamme utile" des températures du verre qui s'étend, approximativement de 1080° C à 850° C.

#### Anomalies

En plus des anomalies qui se produisent aux abords de la température de cuisson, on connaît deux anomalies liées à la composition du mélange de base : l'anomalie du bor et l'anomalie des alcalis mixtes.

Tableau 5. Incidence des oxydes entrant dans la composition du verre sodo-calciqye sur ses propriétés physiques

a) Coefficient (par unité de pourcentage en poids)

Oxyde	Coefficient de dilatation thermique (a) (10 <sup>-7</sup> par °C)	Volume massique (v) (10 <sup>2</sup> cm <sup>3</sup> par g)	Tension superficielle (γ) (dyne/cm)	Module de Young (e) (kilobar)	Chaleur spécifique	
					f	g
SiO <sub>2</sub>	0,05	0,44	3,25	6,9	.000468	0,1657
Li <sub>2</sub> O	6,56	0,350				
Na <sub>2</sub> O	4,32	0,324	1,27	9,8	.000829	0,2229
K <sub>2</sub> O	3,9	0,357		6,9	.000335	0,2019
MgO	0,45	0,322	5,77	3,9	.000514	0,2142
CaO	1,63	0,231	4,92	6,9	.000410	0,1709
BaO	1,40	0,122	3,7	6,9		
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,66	0,460	0,23	5,9	.000635	0,198
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,373	5,98	14,7	.000453	0,1765
ZnO	0,70	0,168		9,8		
ZrO <sub>2</sub>	0,23	0,173				
PbO	1,06	0,093				

b) Formules

Si les coefficients a) v) etc. et les pourcentages en poids p correspondant aux oxydes sont affectés des indices 1, 2, ..., on obtient les formules suivantes pour les propriétés du verre :

Coefficient de dilatation linéaire :  $a = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots$

Volume massique = 1/ densité :  $v = v_1 p_1 + v_2 p_2 + \dots$

Tension superficielle :  $\gamma = \gamma_1 p_1 + \gamma_2 p_2 + \dots$

Module de Young :  $E = E_1 p_1 + E_2 p_2 + \dots$

Chaleur spécifique moyenne, 0°-t° C:  $s = \frac{ft + g}{0,00146 + 1}$  ,

où  $100f = f_1 p_1 + f_2 p_2 + \dots$

et  $100g = g_1 p_1 + g_2 p_2 + \dots$

Tableau 6. Variation de température nécessaire pour rétablir la viscosité initiale et modification de la zone de transformation due au remplacement d'une unité de pourcentage en poids de SiO<sub>2</sub> par un autre oxyde.  
(°C)

Oxyde de remplacement	Viscosité initiale (log )			Modification de la zone de transformation (log = 3,5 - 5,5)
	2	3,5	13	
Na <sub>2</sub> O	-17,0	-12,5	-3,5	-4,3
MgO	- 9,0	- 5,0	+3,3	-3,5
CaO	-20,0	-11,8	+8,0	-5,6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-20,0	-11,6	+7,3	-7,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	+12,5	+9,6	+2,8	+2,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-11,5	-8,0	-	-3,4
PbO	-12,4	-9,8	-2,9	-2,3

L'anomalie du bore saute aux yeux lorsque l'on regarde le tableau 5 : B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est le seul oxyde ayant un effet négatif sur la dilatation thermique. Ce phénomène s'explique comme suit. Si l'on fait abstraction de sa charge, un ion confiné dans un site dans un corps solide se comporte comme une molécule de gaz exposée à une pression extrêmement élevée, c'est-à-dire resserrée dans un espace extrêmement restreint. Il bombarde les "parois" de son site et les pousse vers l'extérieur, ce qui provoque l'expansion du solide tout entier. Cependant, l'ion porteur d'une charge électrique positive est entouré de charges négatives. Si la charge positive est intégralement compensée, les forces électrostatiques résultantes tendent à maintenir l'ion en place et à réduire son agitation thermique. Dans le verre, les ions sont porteurs d'une charge simple qui n'est pas entièrement compensée; ils jouent donc un rôle important dans la dilatation thermique. Le tableau 5 confirme cette constatation : les ions alcalis porteurs d'une charge simple Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> contribuent le plus, et de loin, à cette dilatation. Par ailleurs, leur grande mobilité fait qu'ils peuvent s'évader vers des sites n'ayant pas de charge électrique, ce qui accroît encore leur contribution à la dilatation thermique. C'est ainsi que la dilatation thermique du verre est pour l'essentiel due aux ions alcalis, et aux températures situées entre 500° et 600°C, où leur mobilité augmente sensiblement, cette dilatation connaît un accroissement rapide.

Or, l'ion bore (0,22 Å), porteur d'une charge +3, se loge normalement dans l'espace minuscule (0,21 Å) qui subsiste après regroupement de trois ions oxygène, c'est-à-dire dans l'un des petits canaux qui relient dans le verre les sites réguliers. C'est ces sites que les ions bore occupent dans B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fondu, substance caractérisée par une dilatation thermique élevée. Cependant, si les sites voisins, sont occupés par des ions alcalis, les ions bore sont repoussés par leur charge positive vers un site 4-0, semblable à celui, ou vient normalement se loger le silicium dans la silice fondue, matériau, à faible coefficient de dilatation. C'est ainsi que l'adjonction de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à un verre contenant de l'alcali réduit dans un premier temps le

coefficient de dilatation, comme le ferait l'augmentation de la teneur en silice. Cependant, si l'on ajoute trop de bore, celui-ci peut former, concurremment avec le silicium, son propre système vitreux et provoquer des séparations de phases. L'adjonction de bore a donc des effets complexes, car la petite taille de cet ion lui permet de remplir de multiples fonctions.

L'anomalie des alcalis mixtes consiste en ce que, par exemple, la résistivité électrique ou chimique, qui sont liées aux mouvements d'ions mobiles, atteignent, lorsque l'on ajoute un mélange de deux alcalis, des valeurs bien plus élevées que cela ne serait le cas si l'on en ajoutait un seul dans la même proportion molaire. Ce phénomène tient probablement au fait que plus l'ion est petit, plus il passe facilement par les canaux de la structure vitreuse et moins il est facile de le rendre mobile, en l'enlevant d'un site chargé, le champ électrostatique étant plus grand. A une température déterminée, le verre au lithium contiendrait donc un certain nombre d'ions très mobiles alors que le verre au sodium compterait un nombre plus élevé d'ions mobiles, mais de mobilité plus réduite. Dans les deux cas, il y aura bien entendu autant de sites chargés vides qu'il y a d'ions rendus mobiles, cependant, les sites ainsi évacués sont caractérisés par leur structure statique et non pas par la nature des ions qui les occupaient auparavant. Or si l'on mélange ces deux verres, les ions lithium plus mobiles auront vite fait de se loger dans les nombreux sites évacués par les ions sodium, plus lents, qui continueront seuls à vagabonder. C'est une sorte de jeu des chaises musicales, où le joueur le plus agile gagne.

#### Propriétés d'emploi

Peu important à l'utilisateur moyen la structure ou la composition chimique des verres. Ce qu'il veut, c'est que les vitres ou les bouteilles conservent leur transparence et ne cassent pas facilement. En bref, il s'intéresse à la constance de leurs propriétés chimiques, mécaniques et thermiques. Sous réserve de satisfaire à ces exigences, le fabricant de verre a une grande marge de manoeuvre pour choisir une composition qui convienne à ses propres besoins.

#### Résistance aux agents chimiques

Comme nous l'avons vu, les verres sodocalciques ont en gros la structure suivante : de grands ions oxygène forment une sorte de grappe de raisin dont la cohésion est assurée par de petits ions silicium et un amas diffus d'ions sodium et calcium. Pour ce qui est de la résistance aux agents chimiques, les ions oxygène sont passifs : ils jouent à peu près le même rôle que dans le cas de l'aluminium soumis à l'oxydation anodique, où ils recouvrent d'une couche protectrice ce métal normalement très réactif. S'il est vrai que la structure d'un liquide en contact avec le verre peut être très voisine de celle du verre, la mobilité des ions y est bien plus grande. Si le liquide contient des ions alcalins, ceux-ci tendent à pénétrer dans le verre, en diluant la silice qu'il contient, parfois jusqu'au point de rendre la couche superficielle soluble dans l'eau. Les ions sodium, par exemple, forment à la surface une couche de silicate de sodium soluble (verre soluble). Lorsque cette couche superficielle se dissout, la couche sous-jacente est exposée à la solution alcaline, qui continuera donc à attaquer le verre tant qu'elle restera en contact avec celui-ci.

L'intensité de l'attaque est déterminée à la fois par la mobilité des ions dans le verre et par la composition chimique de la couche superficielle enrichie en alcalis. Si l'attaque est interrompue, un dépôt grisâtre de calcaire insoluble peut se former sur la surface du verre, lui conférant un aspect corrodé.

Si la solution ne contient pas d'ions alcalins, si elle est aqueuse ou acide, les ions alcalins s'échappent du verre et y sont remplacés par de petits ions hydrogène (souvent hydratés), si bien que la couche superficielle se transforme en verre hydrogénosilicaté et non pas en verre soluble. Cette couche superficielle ne s'altère pas et protège le verre contre d'autres attaques. Elle peut finir par se détacher, sous l'effet des contraintes dues à la différence de structure, exposant la surface sous-jacente à une nouvelle attaque. Ce type de corrosion a donc un caractère intermittent.

La réaction initiale de l'eau avec une surface de verre est remarquablement rapide. Si l'on prend deux bouteilles encore chaudes dans un four à recuire et qu'on les frotte l'une contre l'autre, le verre sera usé par le frottement. Si on laisse les bouteilles reposer pendant une ou deux heures, l'abrasion due au frottement est sensiblement réduite. Le verre se couvre apparemment d'une pellicule invisible d'eau atmosphérique, qui en lubrifie la surface. Cette pellicule semble être un gel superficiel; les taches provoquées par des ions métalliques (fer et cuivre par exemple) ayant pénétré dans cette pellicule sont difficiles à enlever.

On a constaté que les bouteilles présentant un voile après avoir séjourné dans un four à recuire chauffé à l'huile sont plus résistantes lorsque le voile a été enlevé par lavage. Le voile en question est une couche de sulfate de sodium qui se forme lorsque  $SO_3$  dégagé au cours de la combustion d'huile contenant du soufre, attaque la surface du verre. Comme on l'a indiqué ci-dessus, l'élimination des ions sodium de surface du verre améliore sa résistance chimique.

L'action de l'acide fluorhydrique ( $HF$ ) est particulièrement intéressante à cet égard. Dissolvant la silice, il attaque immédiatement le verre. On peut polir une surface de verre doux en la trempant dans l'acide. Cette technique, qui est aujourd'hui très largement utilisée pour polir le verre de cristal, est autrement plus rapide que les procédés mécaniques de naguère.

La mobilité des ions et la composition chimique ne sont pas les seuls facteurs perturbateurs. En cas d'augmentation de la température, la vitesse de corrosion peut s'accroître davantage pour un verre que pour un autre; la résistance chimique du verre peut se modifier sensiblement selon qu'il s'agit d'essais accélérés à température élevée ou d'essais à température normale. Toute tendance à la séparation des phases, réduira généralement cette résistance, auquel cas, l'adjonction de certains produits pourra avoir des effets complètement opposés aux résultats escomptés. Par exemple, bien qu'il semble à première vue erroné de remplacer une partie de  $CaO$  par  $BaO$  dans ce type de verre, cette opération peut en fait améliorer sensiblement la résistance en diminuant la tendance à la séparation des phases. Quelques-uns des éléments qu'un lessivage initial a fait passer du verre dans la solution corrosive peuvent intensifier (alcalis) ou entraver ( $Al_2O_3$ ,  $ZnO$ ) les attaques ultérieures. L'amélioration de la résistance chimique par l'adjonction de tel ou tel

produit pose donc des problèmes très complexes et nous nous contenterons d'indiquer approximativement l'influence de certains d'entre eux. Les chiffres figurant ci-dessous représentent l'accroissement ou le décroissement (-) en pourcentage de la résistance que l'on devrait obtenir en ajoutant 1 % d'oxyde au mélange normalement utilisé pour la fabrication de bouteilles.

Na <sub>2</sub> O	-50
MgO	28
CaO	12
BaO	9
ZnO	7
PbO	2

Pris séparément, K<sub>2</sub>O a un coefficient proche de celui de Na<sub>2</sub>O, mais si ces deux alcalis sont mélangés, la résistance du verre aux agents chimiques est meilleure que si l'on en n'en ajoute qu'un seul. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a un effet positif de 22 % environ, mais seulement sur les verres dont la teneur en aluminium ne dépasse pas 2 %. La substitution de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à Na<sub>2</sub>O a un effet positif jusqu'à concurrence de 4 %, car elle entraîne une réduction de la teneur en Na<sub>2</sub>O.

#### Résistance mécanique

Les propriétés mécaniques du verre, qui déterminent sa solidité à l'usage, sont surprenantes. La résistance du verre à la traction a beau être théoriquement près de 1 000 fois supérieure à celle de l'acier, le concepteur n'en sera pas moins bien avisé de retenir dans la pratique une valeur 10 fois plus petite, c'est-à-dire 1 000 psi. Cet écart énorme tient à la faiblesse de la surface du verre. Par ailleurs, la résistance dépend de la durée de l'essai et des dimensions de l'échantillon. Ces facteurs sont essentiels pour comprendre le comportement mécanique du verre qu'il est possible, dans la pratique, de faire abstraction des différences de composition chimique.

Deux grandes théories essaient d'expliquer ces caractéristiques. La première les attribue à une réaction entre le verre et l'humidité atmosphérique au cours de la rupture. Nous examinerons ici la seconde, qui fait appel à des considérations plus fondamentales.

Grâce à son homogénéité parfaite, le verre est un matériau idéal pour l'application de la théorie mathématique de l'élasticité. Selon cette théorie, si le matériau soumis à une traction comporte un défaut, l'effort de traction sera plus intense au voisinage de ce défaut, son fonctionnement étant fonction des dimensions et de la forme dudit défaut. Si la tension est suffisante pour que le défaut s'agrandisse, elle s'intensifiera encore et finira par provoquer une rupture brutale du verre. A la différence d'autres propriétés physiques, la résistance du verre à la rupture est donc censée dépendre non pas de sa structure moyenne mais de la présence d'anomalies locales. Bien entendu, il est aisé d'en faire la preuve : le verrier "coupe" le verre en provoquant une fissure à l'endroit même où il a tracé un trait avec une pointe dure (diamant par exemple). Le curieux de l'affaire c'est que le verre se comporte comme s'il contenait de nombreux petits défauts qui devraient en principe être visibles au microscope, mais qui n'ont en fait jamais été observés. Ces défauts hypothétiques

sont connus sous le nom de "défauts de Griffith", d'après le chercheur qui a été le premier à utiliser cette notion. Plus haut, nous avons comparé les ions mobiles qui rompent de temps à autre les liaisons silicium-oxygène dans le verre fondu, à des chiens lâchés dans un troupeau de moutons. L'action de ces ions se poursuit à la température de recuisson, et l'on peut se demander si à la température ambiante - réellement plus basse - cette action serait suffisante pour provoquer, par rupture de liaisons, la formation de défauts de Griffith. A première vue, il semblerait que ces ruptures soient trop rares pour qu'on puisse leur attacher de l'importance, mais lorsque l'on se rappelle que chaque centimètre cube de verre contient un trillion d'ions sodium dont chacun a chaque seconde de nombreuses occasions d'attaquer les liaisons silicium-oxygène, les chances de "succès" ne sont pas négligeables.

Dans cette optique dynamique, on pourrait dire que, chaque seconde, de nombreux défauts de Griffith apparaissent par hasard un peu partout dans le verre, pour probablement disparaître aussitôt. Bien entendu, l'examen microscopique ne permettrait pas de les détecter. Cependant, si le verre est soumis à une contrainte suffisante, l'un de ces défauts pourrait être "immobilisé" et, la contrainte s'intensifiant, se propager jusqu'à provoquer une rupture macroscopique.

Cependant, la probabilité qu'apparaisse un défaut qui ferait tâche d'huile est d'autant plus réduite que leur fonction nécessite l'action convergente de plusieurs de ces événements. En revanche, si le défaut se trouve à la surface du verre, le nombre d'événements requis est bien plus faible, si bien que le risque de rupture superficielle est bien plus grand que celui de rupture interne.

Si cette explication est correcte, les propriétés de résistance du verre devraient présenter un certain nombre de caractéristiques : le verre se casserait toujours à partir de la surface. Les risques de rupture seraient proportionnels à la superficie et à la durée de l'exposition à la tension. La rupture étant affaire de probabilité, des essais portant sur des échantillons identiques donneraient des résultats différents. La résistance augmenterait à de très basses températures à mesure que diminuerait la mobilité des ions. Dernière hypothèse assez surprenante : le nombre d'ions mobiles n'aurait qu'une faible incidence sur la résistance.

Toutes ces caractéristiques ont été réellement observées. Le verre se casse toujours à partir d'une surface, encore qu'il puisse s'agir d'une surface interne, délimitant une bulle ou une inclusion dure. Les échantillons dont la superficie est très petite sont très résistants; les fibres de verre fines offrent une résistance exceptionnelle. Le verre résiste trois fois mieux à des compressions intermittentes qu'à une tension prolongée. Les résultats des essais sur échantillons identiques accusent des variations de l'ordre de 13 %. A la température de l'azote liquide, la résistance du verre est bien plus élevée. La résistance de la silice fondue, qui ne contient que des traces de sodium, est moins du double de la résistance du verre sodo-calciqne contenant environ 15 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Il semble bien que le seul moyen pratique d'obtenir une résistance élevée soit de protéger la surface. Les verres boro-silicatés ont en général de meilleures propriétés parce qu'ils sont difficiles à rayer. Pour des raisons analogues, on applique parfois un mince dépôt de  $\text{TiO}_2$  ou  $\text{SnO}_2$  sur la surface des bouteilles. Tout procédé propre à conférer

aux couches superficielles une résistance permanente à la compression augmentera la solidité du verre, la rupture de la surface par tension ne pouvait se produire qu'une fois cette résistance surmontée. Bien entendu, il faut que cette compression soit compensée par une tension correspondante ailleurs dans le verre; cette tension peut cependant s'exercer dans le cœur du verre où la résistance est bien plus grande. La trempe du verre repose sur ces principes. Au lieu de le faire recuire, on porte le verre à une température voisine de son point de déformation, puis on le refroidit rapidement en l'exposant à un courant d'air balayant de façon uniforme toute sa surface. La distribution parabolique de la température ainsi obtenue provoque une distribution parabolique des tensions lorsque la température s'égalise finalement, et bien que la compression des faces est approximativement le double de l'extension maximum des couches centrales. De cette façon, la résistance peut être multipliée de 2,5 à 5 fois. En cas de bois, il se forme de petits morceaux aux arêtes émoussées qui sont moins dangereux que les éclats coupants de verre recuit. On peut obtenir une solidité à l'usage encore plus grande en régularisant la structure des couches de surface par un traitement additionnel, au cours duquel on échange par exemple certains alcalis superficiels en trempant le verre dans un bain d'alcali fondu. Tous les procédés précités ne peuvent être appliqués qu'aux articles finis, car en coupant le verre on libérerait les tensions internes et on le briserait.

#### Résistance aux chocs thermiques

La résistance thermique du verre est son aptitude à résister à de brusques variations de température. Comme sa résistance mécanique, la résistance thermique du verre a un caractère aléatoire et dépend de facteurs identiques; cependant, elle est également influencée par la composition chimique dans la mesure où celle-ci détermine le coefficient de dilatation thermique du verre (voir tableau 5). La résistance thermique est inversement proportionnelle au coefficient de dilatation thermique. De toute évidence, la contrainte créée est proportionnelle à la dilatation ou à la contraction correspondant à une variation de température donnée. La résistance thermique du verre sodocalcique ( $\alpha = 9 \times 10^{-6}$ ) représente à peine le tiers de celle du verre borosilicaté ( $3 \times 10^{-6}$ ); quant à la silice fondue ( $0,5 \times 10^{-6}$ ), elle ne se brise pour ainsi dire jamais sous l'effet du seul choc thermique.

#### Vitrocéramiques

La dévitrification peut être un cauchemar pour le technicien verrier. La présence, à l'aval d'un four de verrerie, d'un pan froid de réfractaire, auquel le verre adhère en se dévitrifiant, et dont il se détache de temps en temps pour former des particules cristallines, parfois dans tous les articles fabriqués - peut avoir des conséquences catastrophiques pour la production, à cause des tensions qui se créent autour de ces particules et de la casse qui en résulte. Cependant, depuis quelques années, on tire un excellent parti de la dévitrification contrôlée du verre pour fabriquer des vitrocéramiques.

Le succès de ces vitrocéramiques repose essentiellement sur deux facteurs dont il a déjà été question. Le premier est lié au principe selon lequel on peut conférer une très grande résistance au verre en en réduisant suffisamment les dimensions, comme dans le cas de la fibre de verre. C'est ainsi que si l'on soumet le matériau à une dévitrification uniforme et suffisamment poussée, il ne résistera pas seulement aux tensions internes que provoquent les contractions thermiques différentielles des diverses formations cristallines, mais la résistance pratique du produit obtenu peut être bien supérieure à celle du verre, dont il dérive. Le second facteur est l'extraordinaire variété des caractéristiques physiques que l'on peut conférer à ces matériaux.

Bien entendu, dans la mesure où les caractéristiques physiques d'un matériau sont la simple moyenne des apports dus aux différents ions constitutifs, l'éventail possible des propriétés est des plus restreints. Il en est ainsi pour le verre. Dans les matériaux céramiques traditionnels, en revanche, l'éventail est plus large, les ions étant arrangés selon les géométries complexes des minéraux constitutifs et les propriétés étant la résultante des apports des divers composés chimiques plutôt que des ions individuels. Les possibilités ne sont limitées que par les disponibilités en minéraux naturels et par l'efficacité des techniques utilisées pour en faire un mélange compact et plus ou moins exempt de vides. Pour ce qui est des vitrocéramiques, les types minéraux sont créés in situ (ils n'existent peut-être même pas dans la nature) et le problème des vides ne se pose pas. Il est donc possible de doter ce matériau d'une multiplicité de propriétés. Par exemple, on peut produire des vitrocéramiques ayant un coefficient de dilatation thermique égal à zéro, voire négatif, ce qui leur confère une résistance en choc thermique presque infinie. Et l'absence de vides permet de les rendre transparentes si l'on choisit des cristallites ayant les caractéristiques optiques voulues.

Les vitrocéramiques sont obtenues et travaillées comme les verres ordinaires. La nouvelle technique consiste essentiellement à provoquer la formation de cristaux qui doteront le produit des caractéristiques souhaitées. Cette nucléation peut être obtenue par la lumière ultraviolette ou par un agent de nucléation tel que  $TiO_2$ . La nucléation doit être suffisante pour surmonter la tendance naturelle qu'à la cristallisation à procéder uniquement à partir de la surface; sinon, on obtient une structure stratifiée et non aléatoire. A cet égard, une tendance à la séparation des phases joue en fait un rôle positif. Non seulement elle fournit un paramètre supplémentaire qui aide à contrôler la cristallisation, mais elle permet à la dévitrification de la masse vitreuse de se produire à partir de la multiplicité d'interfaces existant entre les phases. On utilise donc souvent comme matière première des verres contenant deux formateurs de verre concurrents, tels que  $SiO_2$  et  $P_2O_5$ .

Pour obtenir des articles en vitrocéramiques, on procède en général comme suit : mise en forme selon les méthodes traditionnelles, refroidissement jusqu'à la température de nucléation (qui est en général nettement inférieure à la température de dévitrification) et maintien à cette température pendant un certain temps. La température choisie correspond souvent à la température du début de ramollissement ( $600^\circ C$ ). On réchauffe alors assez lentement pour que les cristaux aient le temps de conférer à l'article la rigidité voulue, puis on la maintient à environ  $800^\circ C$  jusqu'à ce que le degré souhaité de cristallinité soit atteint.

Les principes généraux de la production des vitrocéramiques sont certes connus, mais pour l'essentiel cette technique progresse encore de façon plutôt empirique. Les nouveaux matériaux offrent cependant des possibilités d'utilisation si intéressantes que cette technologie continuera sans doute à se développer et promet d'égaliser en importance la technologie du verre ordinaire.

III. MATIERES PREMIERES ET ADDITIFS ENTRANTS  
DANS LA COMPOSITION DU VERRE

Matières premières

Il faut analyser la composition chimique des matières premières utilisées dans la fabrication du verre pour en déterminer la teneur en oxydes et pouvoir calculer avec précision la proportion de ces corps dans le mélange vitrifiable. Il faut aussi analyser le verre fini pour vérifier que ces proportions étaient exactes, car certains constituants peuvent se volatiliser ou être emportés par les flammes sous forme de poussières et, à cet égard, chaque four possède ses caractéristiques particulières.

Les verres sodocalciques contiennent généralement de la magnésie (MgO), de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) et, en petites quantités, divers autres oxydes, soit ajoutés intentionnellement, soit présent en tant qu'impuretés dans les minéraux utilisés. Avant d'utiliser des minéraux locaux pour la fabrication du verre, il faut tout d'abord s'assurer qu'ils ne contiennent pas de fer. Vu contre une nappe blanche, un verre contenant 0,06 % de  $Fe_2O_3$  présente une coloration peu agréable. En ajoutant des décolorants au mélange vitrifiable, on parvient à la dissimuler et à obtenir de la verrerie de table commercialisable en dépit de cette haute teneur en fer. On peut tolérer une teneur en fer plus élevée (0,1 %  $Fe_2O_3$ ) dans le verre à vitre, dont les bords sont marqués lorsqu'il est en place, et dont la coloration se remarque donc moins. Etant donné que la teneur en fer de la chaux ou de la dolomie utilisées dépasse souvent 0,1 %, et qu'une contamination ferreuse se produit presque inévitablement à l'usine, surtout si l'on utilise une proportion élevée de déchets de verre (groisil ou calcin), il faut veiller à ce que le sable siliceux, principal constituant du mélange vitrifiable, ne contienne pas plus de 0,025 % de  $Fe_2O_3$ . Une vigilance constante est nécessaire si l'on veut obtenir un verre incolore; car le succès ne dépend pas seulement des matières premières utilisées, mais aussi de l'atmosphère du four et du réglage des flammes.

Des considérations qui précèdent résulte déjà une liste impressionnante d'éléments dont le verrier consciencieux doit tenir compte. Bien entendu, les dimensions de la présente étude ne nous permettent de traiter que quelques points essentiels. Les ouvrages consacrés à la fabrication du verre sont le plus souvent de nature théorique et le technicien aux prises avec des problèmes concrets éprouve quelque difficulté à y puiser les renseignements techniques dont il a besoin pour les résoudre. L'effort que nous faisons pour simplifier les données en vue de leur application concrète a tous les inconvénients des tentatives de ce genre, et le lecteur voudra bien s'en souvenir en nous lisant.

Pour ce qui est du verre commun sodocalcique commun, aucun technicien ne part complètement à zéro. Ou bien la production existe déjà, ou bien il utilise un mélange vitrifiable indiqué dans un manuel, de sorte que s'il emploie des matières premières ou des formules de mélange nouvelles, il s'agira simplement de variantes, et il ne lui en sera pas moins possible, compte tenu de la relation additive et selon les procédés décrits au chapitre 2, de calculer les propriétés physiques du verre fini. La principale question qui se pose à cet égard est celle de savoir si ces changements auront ou non une influence défavorable sur la fusion ou le travail du verre. A l'inverse, il faudra peut-être modifier le mélange de manière à pouvoir remédier à un problème de fusion ou de formage.

La qualité du sable, qui entre pour près de 60 % dans la composition du mélange, est l'élément le plus important dont il faille tenir compte. Si le sable est trop riche en fer, il faut envisager de le soumettre à un traitement spécial de purification. C'est la teneur en fer qui détermine pour l'essentiel si, et dans quelles proportions, on peut employer d'autres matières premières locales ou si seule l'utilisation de sable importé ou de décolorants permet d'obtenir un verre de couleur acceptable. La qualité du sable doit être suffisamment stable, ou être rendue telle par un mélange préalable, de sorte que les calculs effectués demeurent à tout moment valables. Il en va bien entendu de même pour chacune des matières premières utilisées.

Il est bon de considérer à part les additifs secondaires comme les décolorants et les agents d'affinage; pour déterminer la composition du mélange, on ne tient habituellement compte que des principaux constituants, l'apport de certains additifs spéciaux pour opérer des ajustements au jour le jour. La proportion d'additifs dépend souvent de la proportion de groisil introduite dans le four, ce qui permet de modifier la quantité de groisil au jour le jour afin de ne pas accumuler trop de déchets de verre. En effet, cette accumulation est à éviter, non seulement dans l'intérêt d'une bonne gestion, mais parce que les déchets attirent la poussière et que si les lots sont d'âge incertain, le matériau réutilisé n'aura pas forcément la même composition que le verre qu'on est entrain de fondre, ce qui risque de fausser les calculs relatifs à la composition du mélange vitrifiable.

#### Sables

Pour se faire une idée approximative de l'aptitude à la vitrification de sables locaux, on peut les examiner sous un microscope à faible puissance. Facile à distinguer les grains de quartz peuvent paraître eux-mêmes incolores, mais il peut s'y trouver quelques grains plus foncés. Les grains de quartz sont souvent partiellement agglomérés par une substance jaunâtre, l'argile qui contient une grande partie du fer. En agitant les grains et en les lavant, on peut en général enlever cette argile. Dans ce cas, il est relativement facile de traiter le sable par des moyens simples, mais si les grains de quartz sont eux-mêmes teintés de jaune, ou si les grains foncés sont nombreux, les perspectives d'utilisation sont médiocres. Si les particules noires peuvent être d'origine organique et se laisser brûler sans difficulté, mais il peut s'agir souvent de granules de minerai de fer ou de titane. En raison de leur densité plus élevée ou de leurs propriétés magnétiques, il est possible de les éliminer par des procédés relativement complexes : on peut se faire une idée approximative de la mesure dans laquelle il y a contamination par ces éléments métalliques en leur attribuant une teneur de 10 % de  $Fe_2O_3$ . Si le sable en contient moins de 1 % par rapport aux grains clairs, sa teneur en fer sera inférieure à 0,1 %. Cet essai grossier peut indiquer si du point de vue qualitatif, le sable mérite d'être analysé plus avant.

Si les grains de quartz sont d'un diamètre supérieur à 0,6 mm, la fusion sera lente. Dans ce cas, on "précipite" généralement le sable pour éliminer les grains trop gros. Si les grains sont trop petits (0,1 mm), le dégagement de poussières à l'intérieur et à l'extérieur du four peut poser des problèmes. Par lévigation, le sable peut être souvent débarrassé de l'argile et des autres impuretés, mais lorsque le grain n'est pas assez uniforme (0,5 mm environ), le rendement en sable utilisable peut être insuffisant à cause des pertes importantes qui se produisent lors du tamisage ou de la lévigation.

La lévigation et le triage sont les principales phases de la purification du sable. Au cours de la lévigation, le sable additionné d'eau passe par une batterie d'agitateurs puissants dont les lames poussent le mélange en suspension alternativement vers le haut et vers le bas jusqu'à ce qu'il sorte de la machine. La teneur en solides de la suspension doit être élevée (70 à 80 %) afin que les particules s'usent en frottant les unes contre les autres. La suspension est ensuite diluée afin de pouvoir être pompée (à l'aide, parfois, d'un matériel sophistiqué mais de valeur douteuse) vers l'installation de triage où le sable et l'argile sont séparés par élutriation. Une vis d'Archimède tournant dans une cuve cylindrique remplie d'eau chasse l'argile et les particules fines en suspension, et le sable se dépose, puis est amené à une sortie plus élevée d'où il tombe dans le bassin de décantation. Il existe des tamis ultrasoniques très efficaces pour séparer les déchets des particules d'argile.

Ce qui complique la préparation du sable, c'est qu'il doit être, à certains stades, sec et à d'autres humide. Le faire sécher coûte cher et le sable sec peut dégager des poussières. Tel qu'il est livré de la sablière, le sable contient souvent des pierres ou des agrégats qu'il faut éliminer si l'on ne veut pas endommager le matériel. Si le sable est entreposé sous abri pendant quelques jours, son taux d'humidité tombe généralement assez bas pour qu'on puisse le passer sans séchage supplémentaire au tamis d'un quart de pouce avant le délayage. Après traitement, le sable obtenu aura un taux d'humidité de près de 40 %, qui pourra être ramené à 15 % dans des bassins d'égouttement bien aménagés. L'humidité restante s'évaporerait bien entendu au four de fusion, mais aux dépens de la consommation de combustible. Il est donc logique d'éliminer cette humidité au préalable ce qui permet de calculer la composition du mélange vitrifiable à partir de la quantité de sable sec, sans qu'il soit nécessaire d'en déterminer le taux d'humidité. Par ailleurs, le sable complètement exempt d'humidité coule facilement et se prête bien à la manutention mécanique, tout en posant, en ce qui concerne le dégagement de poussières et la ségrégation, certains problèmes que l'on peut en général atténuer en humidifiant le mélange en cours de préparation. Les résultats de l'analyse chimique du sable purifié permettent au technicien verrier de déterminer dans quelle mesure l'utilisation d'autres matières premières locales est possible. Par exemple, l'alumine contenue dans le sable peut avoir été éliminée au cours du lavage, ce qui oblige à rajouter 2 % d'alumine.

### Source l'alcalis et d'oxydes alcalins-terreux

La source d'alcalis - en général le carbonate de sodium) - est le deuxième constituant du mélange, et le plus coûteux. Il faut en général l'importer. Le carbonate de soude spécialement fabriqué pour l'industrie du verre se présente en granules extra-pures qui coulent aisément et ne posent aucun problème particulier pourvu que les précautions nécessaires soient prises pour leur stockage. Ca et Mg sont généralement introduits sous forme de carbonate alcalins-terreux qui se décomposent à la chaleur rouge; le dégagement de  $\text{CO}_2$  est considéré comme favorisant le brassage de la masse fondue. L'utilisation des carbonates se justifie cependant surtout par leur faible coût et leur excellent comportement au stockage sous forme de calcaire. L'adjonction de  $\text{MgO}$  est facultative pour les mélanges servant à fabriquer du verre à bouteilles, et indispensable pour la fabrication du verre plat, où elle permet de parer aux problèmes de dévitrification.

La forme et la taille des grains de ces matériaux sont importantes. Même à sa température maximale, le verre fondu est mille fois plus visqueux que l'eau, et il ne faut pas compter sur la fusion pour obtenir un brassage intime des matières. L'homogénéité du verre produit dépend donc largement du soin avec lequel elles auront été mélangées à froid, et, au cours de la fusion, de la non-ségrégation des composants. La qualité du mélange de matières premières dépend de son côté de la forme et de la dimension des grains. S'il ne s'agissait que de grains sphériques de la même granulométrie, les procédés mécaniques de mélange suffiraient puisque tous les grains seraient traités de la même façon. Dans ce cas, le diamètre idéal des grains serait de 0,5 mm, calibre assez faible pour permettre une fusion suffisamment rapide, et assez fort pour éviter une production excessive de poussières. Si les particules sont de taille inégale, les plus petites seront en quelque sorte piégées au cours de la fusion, ce qui modifiera par endroits la composition du mélange. Si elles sont de dimension uniforme, mais trop grosses, il y aura dans la masse fondue des zones riches et des zones pauvres.

Dans la pratique, il existe une durée optimale de brassage, déterminée par la tension-activité qui varie d'un matériau à l'autre. Si le brassage dure trop longtemps, certains constituants peuvent s'agglomérer en boules de grosseur tout à fait excessive, à la manière d'une boule de neige roulant sur une pente. Aussi faut-il préférer les mélangeurs à mouvements alternatifs à ceux qui fonctionnent par simple mouvement de bascule.

Etant donné que le point de fusion de la plupart des oxydes entrant dans la composition du mélange est plus élevé que celui du verre lui-même, la "fusion" à 1 500 °C environ est en réalité une réaction chimique entre les constituants acides et les constituants alcalins plutôt qu'un phénomène physique de fusion et dissolution proprement dites (voir tableau 7). L'alumine pure ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), qui est ni acide ni alcaline, est difficile à "dissoudre" dans ce sens. On a avantage à l'introduire sous forme d'un minéral où l'alumine fait partie intégrante de la structure, comme par exemple le feldspath ( $\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) qui fond à une température se situant entre 1 100 °C et 1 200 °C.

Les carbonates se décomposent progressivement à différentes températures et si la séquence des phénomènes qui se produisent au cours de la fusion est de toute évidence importante, il n'est pas possible d'en définir au préalable les conditions. Des chiffres présentés au tableau 7, ou des données d'expérience, on peut dégager les conclusions suivantes : si le nitrate  $\text{NaNO}_3$  (point de fusion  $307^\circ\text{C}$ ) est la seule source de  $\text{Na}_2\text{O}$  dans le mélange, il peut fondre complètement et échapper de la masse fondue avant que le mélange ait atteint une température suffisante pour que la réaction avec la silice ait le temps de se produire. Le gaz carbonique  $\text{CO}_2$  se dégageant de  $\text{CaCO}_3$  atteint une pression de 1 atmosphère à environ  $950^\circ\text{C}$ , mais se résorbera à  $800^\circ\text{C}$  dans le carbonate alcalin fondu et entrera ainsi en contact étroit avec le sable quartzueux avec lequel il réagira. Si le sulfate  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est réduit en sulfite par adjonction de poussières de charbon, il réagit encore plus facilement avec le quartz. Pour ces raisons, il est indiqué d'apporter les alcalis sous au moins deux formes.

Si on remplace de petites quantités de  $\text{CaO}$  (point de fusion  $2572^\circ\text{C}$ ) par  $\text{MgO}$  (point de fusion  $2800^\circ\text{C}$ ), on ne modifie guère la vitesse de fusion. Au cours d'expérience portant sur un verre commun contenant 14 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 12 % de  $\text{CaO}$  et 74 % de  $\text{SiO}_2$ , on a constaté que c'est en remplaçant 2 % d'unités de poids de  $\text{CaO}$  par  $\text{BaO}$  (point de fusion  $1923^\circ\text{C}$ ) qu'on obtenait le résultat optimum en ce qui concerne la réduction du temps de fusion.

Tableau 7

Fusion et décomposition des composés utilisés  
pour la fabrication de verre

Composés	Point de fusion ( $^\circ\text{C}$ )	Température de décomposition ( $^\circ\text{C}$ )	Produit de décomposition	Propriétés du produit	
				Point de fusion ( $^\circ\text{C}$ )	Température de décomposition ( $^\circ\text{C}$ )
$\text{SiO}_2$	1725				
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	618	...	$\text{Li}_2\text{O}$	$\sim 1700$	
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	851	700-1000	$\text{Na}_2\text{O}$	1275 <sup>a/</sup>	
$\text{NaNO}_3$	307	380	$\text{Na}_2\text{O}_2$	460	657
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	884				
$\text{K}_2\text{CO}_3$	891	...	$\text{K}_2\text{O}$	490	
$\text{MgCO}_3$		$\sim 700$	$\text{MgO}$	2800	
$\text{CaCO}_3$		$\sim 800$	$\text{CaO}$	2572	
$\text{BaCO}_3$		1450	$\text{BaO}$	1923	
$\text{B}_2\text{O}_3$		490			
$\text{Al}_2\text{O}_3$		2050			
$\text{As}_2\text{O}_3$					
Cristallin	193 <sup>a/</sup>				
Amorphe	315 <sup>b/</sup>				

a/ Se sublime.

b/ Avec sublimés.

Elle est en effet de l'ordre de 40 %. Si 0,2 % de l'oxyde de sodium contenu est fourni sous forme de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  au lieu de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , on obtient une réduction analogue, et une réduction de moitié moins importante si l'on remplace (en poids) de  $\text{SiO}_2$  par  $\text{B}_2\text{O}_3$ .

Tableau 8

Exemple de calcul de la composition du verre  
à partir de la composition du mélange vitrifiable

<u>Composition du mélange vitrifiable</u>					<u>Composition du verre</u>		
Matières premières	Poids relatif	Apports d'oxyde			Oxyde	Poids relatif	Proportion du total (%)
		Oxyde	Proportion en poids des matières premières	Poids relatif dans le mélange			
Sable	1 000	SiO <sub>2</sub>	0,997	997	SiO <sub>2</sub>	1 099	72,5
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	3			
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00025	0,25			
Carbonate de sodium	335	Na <sub>2</sub> O	0,580	194	Na <sub>2</sub> O	221	14,6
Gateau de sel	5	Na <sub>2</sub> O	0,430	2,2	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	0,7
Borax	30	Na <sub>2</sub> O	0,163	4,9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30	2,0
		B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,365	11,0	CaO	90	5,9
Feldspath	150	SiO <sub>2</sub>	0,680	102	MgO	64	4,2
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,180	27			
		Na <sub>2</sub> O	0,130	20			
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,001	0,2			
Dolomie	160	CaO	0,560	90	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	0,04
		MgO	0,400	64			
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,001	0,2			
Total	1 680			1 516	1 516	100	

Note : Dans le rapport théorique verre/mélange ( $1516/1680 = 0,902$ ) il n'est tenu compte que des pertes de gaz et d'eau se dégageant des matières premières. Dans la pratique on corrige les fractions en poids déterminées par analyse chimique (quatrième colonne) pour chaque four en fonction des pertes par volatilisation et des pertes de poussières emportées par les flammes vers les fumées. Ces pertes supplémentaires représentent généralement entre 5 et 10 % de l'ensemble et dans la pratique, le rapport verre/mélange (coefficient de poids fondu) peut se situer entre 0,80 et 0,85.

La façon la plus pratique de déterminer la composition théorique du verre à partir de la composition du mélange vitrifiable est exposée au tableau 8. On prend habituellement pour point de départ les poids relatifs des matières premières entrant dans le mélange, en admettant que le poids du sable est égal à 1 000. Les apports d'oxydes de chaque matériau sont ensuite calculés à partir de leur poids relatif (tel qu'il est mis en évidence par analyse chimique). (Les valeurs figurant au tableau 8 ne sont données qu'à titre indicatif.) Les constituants secondaires, tels que les agents colorants ou d'affinage peuvent être négligés dans cette première approximation.

Les pertes par volatilisation sont également négligées dans le présent exemple. Elles peuvent cependant être importantes. Les valeurs données ci-après, extraites d'ouvrages techniques, se rapportent aux constituants et non pas au verre, et varient en pratique d'un four à l'autre, dans la mesure sans doute où le mélange en fusion est exposé aux flammes.

Na <sub>2</sub> O du carbonate de sodium	3,2
Na <sub>2</sub> O du gateau de sel (sulfate)	6,0
K <sub>2</sub> O	12,0
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,0
ZnO	4,0

Grâce à un cheminement inverse on peut, en partant de la matière première la plus complexe et en déduisant les oxydes apportés par elle, déterminer au moyen de coefficients réciproques la composition du mélange à partir de la composition souhaitée du verre. Cependant, pour des produits légèrement différents, il est souvent tout aussi facile de procéder par tâtonnements dans la direction voulue.

#### Additifs introduits dans le mélange vitrifiable

##### Additifs servant à prévenir la dévitrification

Dans le cas des articles fabriqués par pressage ou soufflage du verre dans un moule, la dévitrification ne pose guère de problèmes majeurs, le verre refroidi par contact avec le moule traversant rapidement la gamme des températures de dévitrification. Dans le cas du verre étiré destiné à la fabrication de plaques ou de tubes il n'y a pas de refroidissement brusque et il est donc vital de le maintenir à une température qui lui permette de prendre la forme requise sans intervention d'un outil de de formage.

Pour chaque mélange vitrifiable, il existe une température critique (la température de liquidus) au-dessus de laquelle la masse fondue est un liquide stable et au-dessous de laquelle des phases cristallines commencent à se former. A la température de liquidus, les phases liquides et les phases cristallines sont en équilibre; et il n'y a ni croissance ni dissolution des cristaux. Pour un verre renfermant 16 % de Na<sub>2</sub>O, 12 % de CaO et 72 % de SiO<sub>2</sub>, cette température est de 1 010 °C et la vitesse maximale de croissance cristalline est atteinte à une température légèrement moins élevée (955 °C). La croissance des cristaux commence généralement à la surface et progresse vers l'intérieur à une vitesse de 1 mm par heure environ. Au-dessous de 955 °C, la tendance croissante à la cristallisation est contrebalancée par la mobilité décroissante des ions. Bien entendu, la viscosité augmente elle aussi dans la mesure où la température baisse, sans cependant influencer sur la vitesse de croissance des cristaux, qui dépend d'une certaine mise en ordre des ions, sans rapport direct avec la viscosité. La mobilité des ions n'en diminue pas moins vite avec la température et on s'attendrait donc à une réduction rapide de la vitesse de dévitrification en fonction de la baisse de la température de liquidus.

Un léger apport de quasiment n'importe quel oxyde soluble autre que les trois oxydes principaux (SiO<sub>2</sub>, CaO et Na<sub>2</sub>O) devrait réduire la tendance à la dévitrification, en rendant plus difficile l'intégration des ions dans les réseaux de cristaux; c'est-à-dire en abaissant la température de liquidus. Des apports trop importants peuvent provoquer la formation d'une nouvelle espèce de cristaux dotés d'une vitesse de croissance relativement plus élevée.

A titre d'exemple, on peut mentionner la substitution partielle de MgO à CaO dans le verre sodocalcique, qui présente un grand intérêt pratique. Dans un verre initial renfermant 16 % de Na<sub>2</sub>O, 10 % de CaO et 74 % de SiO<sub>2</sub>, deux cristaux différents, la cristobalite (SiO<sub>2</sub>)

et la dévitrite ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ ), se développent à la température de vitesse de croissance maximale. Le remplacement du calcium arrête la dévitrification, mais de nouveaux cristaux renfermant de la magnésie apparaissent de la façon indiquée au tableau 9. Il ressort de ces chiffres que l'on peut réduire de 20 % environ l'ampleur de la dévitrification en introduisant CaO et MgO dans une proportion de 6 à 4, à condition que le comportement du verre au façonnage n'en souffre pas. Il existe précisément un minéral, la dolomie ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{CO}_2$ ) qui contient CaO et MgO dans une proportion de 5,82 à 4,17. Les roches dolomitiques qui se sont formées naturellement à partir de solutions riches en carbonates de calcium et en carbonates de magnésium, ont une teneur élevée en dolomie minérale et une composition très homogène dans des régions étendues. Il existe une roche beaucoup plus commune, le calcaire dolomitique, qui a été enrichie en MgO par suite d'échanges d'ions avec des solutions de magnésium qui ont filtré à travers elle et dont le rapport CaO/MgO est bien plus variable.

Tableau 9

Effet de la substitution de MgO à CaO dans un verre  
renfermant 16 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10 %  
de  $x$  MgO,  $(1-x)$  CaO, 74 % de  $\text{SiO}_2$

X (%)	Température de liquidus (°C)	Température de vitesse de croissance maximale (°C)	Vitesse de croissance (mm/h)	Type de cristal
0	1000	910	0,095	Cristobalite ( $\text{SiO}_2$ )
	970	910	0,31	Dévitrite ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ )
2	995	895	0,02	Cristobalite
	950	895	0,11	Dévitrite
4	970	860	0,01	Cristobalite
	925	860	0,06	Dévitrite
6	920	850	0,008	Cristobalite
	880	850	0,005	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$
8	950	860	0,018	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$
	970	910	0,008	Diopside ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ )
10	1100	910	0,05	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$

Pour juger, à partir des chiffres du tableau 6, des effets que le remplacement de 4 % de CaO peut avoir sur la viscosité, on peut imaginer que 4 % de CaO sont tout d'abord remplacés par 4 % de  $\text{SiO}_2$ , et que la silice est à son tour remplacée par 4 % de MgO. A cet effet, la température correspondante à  $\log \eta = 2$  devrait être augmentée de  $4(20-9) = 44$  °, ce qui rendrait la fusion plus difficile.

L'adjonction d'alumine dans le mélange (qui équivaut à peu près au remplacement de la silice par  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a des effets analogues. Un apport de 2 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  donne les meilleurs résultats. La température de liquidus est ainsi abaissée de 40 °C (écart qui correspond grosso modo à celui que l'on obtient en remplaçant 4 % de silice par MgO, comme on le montre au tableau 9), alors que la température de fusion augmente de 25 °C environ et la température de travail de 19 °C.

L'objectif visé est toujours de produire un verre homogène dont on a calculé la composition, mais dans la pratique, la dissolution de matériaux réfractaires et plus spécialement la volatilisation différentielle des constituants peut provoquer des écarts considérables par rapport à la composition calculée. La couche superficielle du verre en fusion est fort probablement pauvre en  $\text{Na}_2\text{O}$ . Il est intéressant d'étudier un verre sodocalcaire de composition typique (16 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10 % de  $\text{CaO}$ , 74 % de  $\text{SiO}_2$ ) et de suivre les variations de la température de liquidus en fonction de l'élimination progressive de  $\text{Na}_2\text{O}$  :

Teneur en $\text{Na}_2\text{O}$ (%)	16	14	12	10	8	6	4
Température de liquidus (°C)	1000	1120	1240	1400	1470	1520	1580

De toute évidence, la surface appauvrie en alcalis par la volatilisation, se dévitrifiera même à une température de fusion de 1500 °C, si cet appauvrissement n'est pas compensé par une diffusion provenant de l'intérieur. Ceci explique la formation dans le four de fusion de l'écume dont il sera question au prochain chapitre. Par ailleurs, divers verres soucalciques simples travaillés à la flamme se dévitrifient également et leur surface devient mate. La forte coloration jaune de la flamme révèle la présence de vapeurs de sodium; depuis fort longtemps, les verriers savent établir le poli de la surface en y faisant fondre du sel ordinaire.

#### Agents de dégazage

Pour dissoudre l'ensemble des matières premières il faut beaucoup moins de temps que pour éliminer les bulles du verre (dégazage) et pour le rendre homogène (affinage).

On ignore le mécanisme exact du dégazage mais on peut s'en faire une idée (comme du problème de formation des bulles en général) en étudiant l'interaction entre les gaz et le verre. Le verre est un composé d'oxydes renfermant des ions métalliques et des ions oxygène dans des proportions stoechiométriques presque exactes; il peut cependant y avoir des variations légères mais importantes pour certaines propriétés comme la couleur qui dépendent de la présence en traces de certaines impuretés. C'est ainsi qu'on parle de verre oxydé ou réduit, bien qu'en fait le potentiel oxygène ne varie guère. Ces différences ont souvent pour cause l'atmosphère du four au-dessus du verre en fusion. Le verre fondu s'adapte à cette atmosphère et la teneur en gaz dissous reflète les pressions partielles des gaz dans l'atmosphère du four. Si, à pression et à température normales, les gaz dissous ont à peu près le même volume total que le verre, la proportion en poids évidemment très faible, environ 5 parties par 10 000. A certains égards, les gaz dissous se comportent comme s'ils étaient chimiquement combinés; à d'autres, comme s'ils avaient en simple absorption physique. Si le verre contient un oxyde comme  $\text{As}_2\text{O}_3$ , qui se transforme facilement en  $\text{As}_2\text{O}_5$ , il peut absorber à peu près 20 fois la quantité normale d'oxygène.

En chambre à vide, le verre fondu produit généralement de la mousse qui atteint 6 fois son volume antérieur. Il s'ensuit tout d'abord qu'il n'est pas particulièrement difficile de déclencher la formation de bulles (comme pour l'eau surchauffée qui "soubresaute" et "cogne"), et ensuite que le gaz dissous n'atteint pas tout de suite la surface, d'où il pourrait s'échapper sans former de nouvelles bulles. Le temps de diffusion est proportionnel au carré de la

distance : il faut 100 fois plus de temps pour progresser de 1 cm que de 1 mm. Le gaz tendra donc à venir grossir d'autres bulles au lieu de monter jusqu'à la surface plus éloignée, mais plus vaste. Même si en moyenne le gaz renfermé dans le verre est en équilibre avec le gaz contenu dans l'atmosphère du four, il y aura des écarts locaux et passagers à proximité de chaque bulle de gaz qui se forme dans le verre.

On sait que le gaz est d'autant moins soluble dans le verre que la température est élevée. En revanche, la vitesse de diffusion augmente rapidement en fonction de la température. Bien entendu, la solubilité et la vitesse de diffusion varient d'un gaz à l'autre. La petite molécule d'hydrogène peut traverser aisément le verre à une température moyenne, surtout si les canaux du réseau ne sont pas obstrués par des ions modificateurs, alors que les grosses molécules de  $\text{CO}_2$  semblent avoir une vitesse de diffusion très basse. Le gaz qui se propage peut évidemment aussi réagir avec les ions du réseau vitreux ou avec d'autres gaz en diffusion. Comme on l'a déjà indiqué,  $\text{As}_2\text{O}_3$  peut absorber de l'oxygène pour former  $\text{As}_2\text{O}_5$ . Par oxydation, l'hydrogène peut se transformer en eau et l'oxyde de carbone en bioxyde de carbone dont les molécules plus grosses, risquent d'être physiquement piégées, leur diffusion étant moins facile. Il s'agit là d'un problème pratique que pose souvent la fusion de verre en milieu réducteur. Un verre affiné dans une atmosphère contenant de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone renferme une certaine quantité de ces gaz après que l'équilibre a été atteint. Si le verre se trouve ensuite placé en milieu oxydant dans le compartiment de travail de l'unité de fusion, les gaz qui s'en échappent rencontrent l'oxygène qui y pénètre, et des bulles de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  peuvent se former juste au-dessous de la surface. Ces bulles peuvent être très difficiles à éliminer étant donné que la phase d'affinage est passée et que leur petite taille ne leur confère pas une poussée suffisante pour leur permettre de s'élever jusqu'à la surface. De même, en milieu oxydant, les particules de carbone se formant à la base du brûleur peuvent se détacher et tomber sur le verre oxydé. L'oxyde de carbone qui se forme pénètre dans le verre, et, s'oxydant encore plus, donne du  $\text{CO}_2$ , qui se précipite sous forme de bulles fines qui gâtent le produit.

Outre d'importantes quantités d'air et d'humidité, des gaz comme  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , etc. se dégagent au cours de la fusion des matières premières, le plus souvent sous forme de grosses bulles qui montent rapidement à la surface, où elles émergent et éclatent. A cause de leur poussée moindre, les petites bulles remontent bien moins vite. Nous indiquons au tableau 10 le temps qu'il faut aux bulles selon leur grosseur, pour s'élever de 20 cm à la surface de mélanges en fusion de viscosités différentes. Les températures correspondantes se rapportent à un verre sodocalcique normal.

Il n'existe que deux possibilités en ce qui concerne l'élimination des bulles : elles peuvent s'élever à la surface pour y éclater, ou le gaz qu'elles contiennent peut se résorber dans le verre. Selon les chiffres présentés au tableau 10, il faudrait plus de trois heures à toute bulle d'un diamètre inférieur à 1 mm pour remonter de la sole d'une cuve profonde de 1 m, même à la température maximale. Puisqu'il existe dans la cuve des courants de convection de "vitesse" à peu près égale, on peut dire que toute vitesse de propagation inférieure, est insuffisante et que les bulles de diamètre inférieur à 1 mm doivent être éliminées par d'autres moyens.

La résorption des bulles dépend de la solubilité du gaz qu'elle contiennent, de la concentration du même gaz dans le verre entourant la bulle, et de la pression du gaz à l'intérieur de la bulle. A cause de la tension superficielle agissant sur la surface incurvée de la bulle, la pression du gaz à l'intérieur de la bulle est plus élevée que la pression hydrostatique extérieure; la surpression théorique est présentée à la dernière colonne du tableau 10.

Tableau 10

Temps que mettent les bulles de divers diamètres pour s'élever de 20 cm jusqu'à la surface d'un verre fondu de type normal, à différentes températures (Minutes)

Diamètre des bulles (cm)	Température (°C)					Surpression (en atmosphère)
	1542	1451	1373	1305	1245	
	log $\eta = 2,2$ $\eta = 158,5$	log $\eta = 2,4$ $\eta = 251,2$	log $\eta = 2,6$ $\eta = 398,1$	log $\eta = 2,8$ $\eta = 631,0$	log $\eta = 3,0$ $\eta = 1000$	
1,0	0,4	0,6	0,9	1,5	2,4	0,0012
0,5	1,5	2,5	3,8	6,2	9,8	0,0024
0,1	38,9	61,5	97,3	154,3	244,7	0,0118
0,05	155,2	245,8	389,7	617,5	978,7	0,0239
0,01	388,3	615,4	975,3	1545,9	2449,9	0,1184

Tableau 11

Expérience mettant en évidence la résorption différentielle de petites bulles dans le verre<sup>a</sup>

Temps écoulé (minutes)	Diamètre observé de quatre bulles a, b, c, d (0,25 mm)				Remarques
	a	b	c	d	
	0	3	4	5	
25		4	6		La bulle s'est résorbée
45		3	7		
50		2	6	20	Approche de la grande bulle d
55		1	3	20	
60				20	Les bulles b et c se résorbent, ne laissant que la grosse bulle d

<sup>a</sup>/ D'après l'examen microscopique d'un verre borosilicaté à 1 300 °C.

Si elles ne sont pas suffisante pour accroître sensiblement la concentration générale des gaz dissous, ces surpressions sont d'une grande importance locale, c'est-à-dire dans un rayon suffisamment limité pour que la diffusion y soit rapide. En état d'équilibre, une petite bulle devrait être entourée de gaz dissous plus concentrés qu'une bulle plus grosse; or, si

les bulles sont proches les unes des autres, la diffusion égalisera le gradient de la concentration, si bien que les petites bulles tendront à se résorber et les grosses à se développer. L'expérience consignée au tableau 11 au cours de laquelle on a observé au microscope trois bulles séparées de 3 ou 4 mm et ultérieurement une quatrième, plus grosse démontre que cette situation est bien réelle. Il s'agissait de verre borosilicaté à une température de près de 1300 °C. On constate que même si elles sont séparées par une distance 10 fois plus grande que leur diamètre, les petites bulles sont absorbées par les bulles plus grosses.

De toute évidence, l'exploitation éventuelle de cette différence de solubilité permettrait d'accélérer le dégazage du verre, puisque les petites bulles de poussée négligeable se résorbent pendant que la poussée ascensionnelle des grosses s'accroît. On pourrait par exemple saturer le verre d'un gaz qui se diffuse aisément. Pour des verres oxydés, ce sera bien entendu l'oxygène; à cet effet, on introduit généralement des oxydes d'arsenic ou l'antimoine et suffisamment de nitrate pour obtenir les oxydes supérieurs  $As_2O_5$  ou  $Sb_2O_5$  qui sont eux aussi solubles dans le verre. Ces oxydes tendent à conserver leur excédent d'oxygène jusqu'à la température de fusion maximale pour le libérer lorsqu'il est le plus nécessaire. Des apports trop élevés d'oxydes pourraient provoquer la formation de mousse et il n'y a guère intérêt à en ajouter au mélange vitrifiable plus d'une livre pour 1000 livres de sable. Si le mélange est riche en groisil, qui renferme du nitrite arsénieux, il ne faut pas oublier que celui-ci doit être réoxydé par adjonction de nitrates. La soude apportée sous forme de nitrates devrait être suffisante pour oxyder la totalité de  $As_2O_3$ .

Un autre moyen d'accélérer le dégazage consisterait à provoquer la coalescence des bulles. Lors de l'affinage en présence d'arsenic, la coalescence est apparemment très rare. L'auteur ne l'a observée qu'une fois au cours de ses expériences. Les bulles de même diamètre peuvent rester accolées longtemps jusqu'à ce que l'équilibre se rompe et que l'une se développe aux dépens des autres. Cependant l'introduction de sulfates dans le mélange modifie complètement la situation si bien que la coalescence se produit normalement. Il s'agit là apparemment d'un effet dû à la tension superficielle, le sulfate servant d'agent anti-mousse. Etant donné que le contact direct est en l'occurrence indispensable la tension superficielle ne peut guère faire sentir ses effets aux phases ultérieures de l'affinage lorsque les bulles fines sont bien dispersées.

#### Agents colorants et décolorants

Des oxydes colorés peuvent être introduits en petites quantités dans le mélange pour colorer le verre. Certains oxydes, comme l'oxyde de cobalt qui donne des teintes très intenses, sont utilisés en quantités minimales. Par exemple, il suffit d'une partie par million seulement d'oxyde de cobalt pour obtenir du verre bleu pâle.

La teinte réelle obtenue à l'aide d'un agent colorant dépend du milieu dans lequel se trouve l'ion colorant dans le verre et surtout du potentiel oxygène de celui-ci. L'atmosphère du four joue donc souvent un rôle. Nous indiquons au tableau 12 quelques-uns des colorants les plus employés et les couleurs qu'ils permettent d'obtenir dans différentes atmosphères.

Il arrive souvent que le technicien verrier s'efforce d'éliminer une teinte non souhaitée, comme par exemple la coloration verte que provoque la présence inévitable, dans les matières premières, d'un quelconque oxyde de fer. Il y a alors deux solutions : la fusion en milieu oxydant, qui fait que le fer donne au verre une coloration vert jaunâtre moins gênante, ou l'adjonction d'un colorant (appelé alors agent décolorant) d'une teinte complémentaire qui dissimulera la couleur résiduelle (tout comme l'on ajoute à la blanchisserie du bleu pour transformer un blanc jaunâtre en un blanc bleuâtre moins gênant). Dans le cas du verre, il faut beaucoup de savoir-faire. Il ne s'agit pas seulement de tenir compte des variations de la teneur en fer des matières premières, mais aussi des problèmes quantitatifs et qualitatifs que pose la variation des conditions de fusion, car où la couleur fondamentale tirera d'autant plus vers le bleu verdâtre et la coloration sera d'autant plus intense que l'atmosphère du four sera plus réductrice. Dans un four continu, il faut quatre à cinq jours pour qu'un changement de la composition du mélange vitrifiable se fasse sentir à 50 %, et quatre à cinq jours supplémentaires pour qu'il devienne efficace à 75 %. Lorsqu'on prend des mesures d'urgence pour remédier par exemple à une subite coloration verte d'un verre supposé incolore on risque donc en fait d'obtenir un verre rose, les éléments ayant provoqué la coloration verte s'éliminant d'eux-mêmes avant que le changement de composition devienne effectif.

Pour dissimuler la teinte vert jaunâtre du fer oxydé, il faut une couleur violette complémentaire. A cet effet, on peut utiliser l'oxyde de nickel s'il s'agit d'un verre potasse-chaux mais non pas pour le verre sodocalcique beaucoup plus commun. Malheureusement, la couleur violette n'agit pas dans les verres sodocalciques. Excellent agent décolorant, le néodyme est trop cher pour être utilisé pour la fabrication de la plupart des verres. Le bioxyde de manganèse peut être introduit dans les verres fondus en pot, mais le produit obtenu est sensible à la "solarisation", c'est-à-dire qu'il prend une coloration pourpre lorsqu'ils est exposé longtemps à la lumière du soleil. Le plus souvent on emploie donc du sélénium (rose) en association avec l'oxyde de cobalt (bleu). Même si ces produits chimiques sont coûteux, ils ont tous les deux un tel pouvoir colorant qu'il suffit de les employer en quantités infimes.

Tableau 12

Couleurs obtenues à l'aide des colorants généralement utilisés dans la fabrication de verre

Colorant	Conditions de fusion	
	Milieu oxydant	Milieu réducteur
Oxyde de cobalt	Bleu-violet	Bleu-violet
Oxyde de chrome	Jaune-vert	Vert-émeraude
Oxyde de fer	Jaune-vert	Vert-bleu
Bioxyde de manganèse	Améthyste à pourpre	Néant
Oxyde de néodyme	Violet	Violet
Oxyde de nickel	Violet (dans les verres de potasse)	
	Brun (dans les verres sodiques)	
Sélénium	Couleur instable	Rose
Se-CdS	Néant	Rubis (après réchauffement)
Soufre	Néant	De jaune à ambre
Uranium	Jaune avec vert fluorescent	Vert fluorescent

Tableau 13

Proportions de sélénium requises pour décolorer le verre,  
en fonction de la teneur de la pâte en arsenic et en fer  
(parties par million (ppm) du mélange vitrifiable)

Teneur en $Fe_2O_3$ du verre (%)	Teneur en $As_2O_3$ du mélange vitrifiable (%)			
	0,00	0,05	0,10	0,25
0,01	1,9	5,0	6,9	16,9
0,02	3,8	9,4	13,7	32,5
0,03	5,6	13,1	20,6	50,0
0,04	7,5	17,5	30,6	67,4
0,05	11,2	25,0	41,2	89,8
0,06	16,9	36,2	60,0	125,0
0,07	28,7	63,0	100,0	

Le technicien se trouve ici en présence d'exigences contradictoires. Il ressort du tableau 12 que le sélénium, produit coûteux, est instable en milieu oxydant, et ce milieu oxydant est cependant nécessaire pour éviter la coloration vert-bleue par le fer. Si pour l'obtention de la couleur voulue, on comptait uniquement sur l'atmosphère du four, les résultats seraient variables. Le recours à un agent stabilisateur s'impose et, comme on l'a dit à propos de l'affinage,  $As_2O_3$  qui sert de tampon oxygène stabilise très bien la couleur, même s'il provoque la perte d'une grande partie de sélénium. On trouvera au tableau 13 quelques indications sur les apports de sélénium dont on a généralement besoin pour fabriquer des verres d'une teneur en fer et en arsenic donnée. L'arsenic servant également d'agent d'affinage, l'introduction dans le mélange de 0,05 % de  $As_2O_3$  paraît une solution de compromis satisfaisante. Si l'on préfère une proportion d'arsenic nettement plus élevée, il faudra tenir compte du fait que la teinte est sensiblement influencée par la recuisson.

On peut logiquement supposer que la quantité d'oxyde de cobalt doit être directement liée à la teneur en  $Fe_2O_3$  et à la teneur en sélénium qui n'a pas été rendue instable par l'arsenic. En pratique, on n'analyse guère la teneur en fer; on la déduit de la coloration du verre et ajoute environ 0,5 ppm d'oxyde de cobalt.

Lorsqu'un verre transparent se colore par suite de la réduction du potentiel oxygène, il est théoriquement possible d'y remédier en augmentant les apports d'agents colorants complémentaires, ce qui réduit cependant la transparence générale du verre qui devient trouble. Il vaut de toute évidence mieux agir sur les causes de ce phénomène qu'essayer de le dissimuler. Le technicien verrier s'efforcera donc d'en déterminer les causes et d'y remédier plutôt que de modifier la composition d'un mélange qui a fait ses preuves. Les teintes qui apparaissent et la vitesse à laquelle elles se développent sont révélatrices; par exemple l'apparition rapide d'une teinte vert-bleue est probablement due à l'action de la flamme. Le fer contenu dans les matières premières a-t-il été complètement éliminé dans le séparateur magnétique? Le mélange vitrifiable ou le groisil renferment-ils une poussière de charbon à effet réducteur? L'atmosphère du four est-elle soumise à un contrôle suffisant et contient-elle au moins 2 % d'air excédentaire? Les flammes viennent-elles au contact du verre parce que des dépôts de carbone

se formant à la buse des brûleurs les ont déviées, ou qu'elles sont mal réglées ? Dès qu'il aura obtenu une réponse satisfaisante à ces questions, le technicien devra se demander s'il y a suffisamment de nitrates pour oxyder l'arsenic. S'il suffit d'ajouter la quantité voulue de nitrates, la solution est facile, mais s'il faut un apport supplémentaire d'arsenic, il faudra sans doute aussi un apport accru de sélénium, comme l'indiquent les chiffres présentés au tableau 13.

Les appareils disponibles ne permettent guère d'évaluer ces légères variations de couleurs. Pour les comparer, on tire chaque jour du four des tiges longues de 15 cm, dont on retient celles qui forment une gamme de couleurs en vue des comparaisons ultérieures. Il convient de rappeler que les apports d'agents colorants doivent en général être modifiés de 10 %, si l'on veut obtenir une modification perceptible de la coloration.

#### IV. FUSION DU VERRE

Pour fondre du verre, il ne suffit pas d'atteindre une température de fusion. L'opération prend du temps, et la majeure partie du combustible utilisé est employée à maintenir la température pendant le processus, dont la rentabilité est d'autant meilleure qu'il prend moins de temps et par conséquent entraîne une moindre consommation de combustible.

La quantité d'énergie que nécessite la fusion de 1 kg de verre fini n'est que de 0,017 kWh supérieure à ce qu'exige la fusion d'un même poids de matières premières. Si l'on considère qu'il faut environ 0,45 kWh/kg pour porter le verre à la température requise pour le travailler, il est clair qu'il est assez indifférent qu'on emploie au départ des matières premières brutes ou des déchets de verre. Il faut quatre fois plus d'énergie, soit 2 kWh/kg, pour maintenir le four à la température voulue pendant la fusion. Cette consommation d'énergie est bien entendu proportionnelle au temps de chauffe plutôt qu'au volume traité, et représente un coût à peu près fixe pendant tout le temps où le four fonctionne. En fait, la fraction variable de la consommation de combustible est plutôt supérieure aux 20 % que les chiffres ci-dessus semblent suggérer, car lorsque le débit augmente, il faut non seulement consommer plus de combustible pour maintenir la température, mais élever la température elle-même pour compenser la réduction du temps disponible pour la fusion. Il arrive fréquemment que des fours de modèle identique, et réglés pour la même température, aient des rendements bien différents. Cela tient notamment, on l'oublie souvent, à ce que si dans des conditions idéales (pas de pertes de chaleur) l'apport thermique ne dépend que de la température à laquelle le verre est retiré du four, et non pas des températures plus élevées auxquelles il peut avoir été porté, en réalité la rapidité du processus de fusion dépend largement de ces dernières et, de leur répartition à l'intérieur du four. En raison des pertes de chaleur, l'apport thermique local correspondant à la différence entre les zones surchauffées et la température de retrait n'est pas intégralement récupéré à l'intérieur du four. Il n'en demeure pas moins que la répartition de l'apport thermique est aussi importante que son volume.

#### Fours

Avec les fours à mazout, il faut beaucoup de chaleur pour réchauffer la masse d'air nécessaire à la combustion. On compte environ 10 pieds cubes d'air pour chaque millier de Btu de valeur calorifique. Si, au lieu de servir à réchauffer l'air, la chaleur s'échappe avec les gaz de combustion évacués vers la cheminée à la température de 1450 °C, la perte est de 475 Btu, ce qui ramène à 525 Btu la valeur calorifique effective. La pratique consiste donc à préchauffer l'air en utilisant à cet effet les gaz brûlés. Dans les fours à régénérateurs, ces gaz traversent une grande chambre où sont empilées des briques réfractaires non jointives qui jouent le rôle d'accumulateurs de chaleur; en même temps, on fait passer l'air de combustion à travers une chambre symétrique que les gaz brûlés viennent de réchauffer au cycle précédent. Toutes les demi-heures environ, on inverse les flux et les rôles des deux chambres sont intervertis.

Avec ce système, la température de l'air de combustion est d'environ 930 °C, et la valeur calorifique du combustible est utilisée à raison de 83 %. L'inconvénient est que le four doit être équipé de deux jeux de brûleurs et d'un système complexe de soupapes qui permet d'inverser la flamme et les flux d'air et de gaz de combustion. Cette opération (elle est en général automatique) doit être rapide et complète, car le processus de fusion ne doit en aucune manière en être affecté. Les régénérateurs occupent souvent plus d'espace que le four proprement dit.

Les fours à récupérateur emploient un système plus simple. Les gaz brûlés et l'air de combustion circulent dans des canalisations parallèles dans un échangeur de chaleur réfractaire ou métallique, et aucun dispositif inverseur n'est nécessaire. En revanche, l'installation est très délicate, car l'air froid et les gaz brûlants circulent dans un système complet de canalisation juxtaposées et la moindre fuite dans le circuit peut empêcher le fonctionnement. C'est pourquoi la température de l'air réchauffé dépasse rarement 700 °C, ce qui limite à 75 % l'utilisation effective de la valeur calorifique du combustible.

Pour les fours de grandes dimensions, les économies supplémentaires que le système à régénérateurs permet de réaliser, justifient l'investissement additionnel que nécessite son installation; c'est pourquoi il est plus employé que le système à récupérateur.

Les fours à fonctionnement continu chauffant au mazout présentent aussi ce problème que la flamme doit avoir un volume et une longueur tels qu'elle ne risque pas d'être aspirée dans la cheminée avant que la combustion soit complète. Les fours de grandes dimensions ont une largeur suffisante pour que la flamme puisse se développer transversalement, ils sont donc en général équipés de quatre ou cinq brûleurs latéraux, dont le réglage permet de répartir les températures. Pour les fours de petite dimension un chauffage transversal exigerait de grand nombre de petits brûleurs (voir ci-dessous fours unitaires) et on préfère en général un système de chauffe longitudinale, dans lequel la flamme est projetée dans le sens de la longueur de la cuve; arrivée au bout, elle décrit une boucle et revient vers l'extrémité opposée, où les gaz sont évacués vers le récupérateur ou le régénérateur. La répartition correcte des températures peut aussi être obtenue par isolation différentielle. Assurément, cette technique doit être utilisée avec prudence, l'effet corrosif du verre fondu et des gaz croissant rapidement avec la température des surfaces de contact, qui est dans une large mesure déterminée par le degré d'isolation externe. Le tableau ci-dessous met en regard les pertes de chaleur de deux fours à régénérateurs d'une capacité de 90 tonnes par jour, le premier type classique construit en 1955, et le second d'un type analogue mais construit 20 ans plus tard.

	<u>1955</u>	<u>1975</u>
Fusion du verre et distribution de la pâte à température de travail	19,1	19,1
Parois et sole de la cuve	<u>16,9</u>	<u>9,01</u>
	36,0	28,1
Cheminée	18,3	18,3
Voûte	9,8	3,04
Murs d'appui	2,8	1,68
Gorge	<u>2,7</u>	<u>1,26</u>
Total partiel	33,6	24,3
Régénérateur	13,3	6,10
Eau de refroidissement et air	8,4	8,40
Origine indéterminée	<u>8,7</u>	<u>6,38</u>
Total partiel	<u>30,4</u>	<u>20,88</u>
Total	100,0	73,3

Le fait que la perte de chaleur soit inférieure de 27 % dans le cas du four le plus récent est imputable à une meilleure isolation, rendue possible par les progrès réalisés dans la fabrication des matériaux réfractaires entre 1955 et 1975. La consommation spécifique d'énergie des deux fours a été de 42 kWh/kg et de 1,77 kWh/kg.

Dans le choix d'un modèle de four, les considérations de rendement thermique ne sont pas les seules qui interviennent. Si par exemple la couleur du verre fabriqué doit changer fréquemment, il importe de pouvoir passer le plus rapidement possible d'une composition à une autre. Normalement, il faut vider la cuve, "rincer" avec le nouveau groisil, et remplir avec la nouvelle charge de matières premières. Outre, le temps que prend l'opération et le combustible consommé dans l'intervalle, il se forme un volume important de groisil s'il s'agit d'une cuve de grande capacité. On résoud en partie le problème avec le four "unitaire", de faible capacité, de construction peu coûteuse, et conçu pour n'alimenter qu'une seule machine de formage. L'adaptabilité compte ici davantage que l'économie de combustible. Un four unitaire se compose de longs canaux étroits le long desquels le verre progresse en passant par les stades successifs de sa fusion. Chauffé transversalement, il est équipé de nombreux petits brûleurs latéraux, mais les gaz d'échappement sont ramenés vers la zone de départ, ce qui lui donne quelques-unes des caractéristiques d'un four à flamme longitudinale. Le four unitaire a eu un tel succès qu'on en construit maintenant de beaucoup plus grands que les premiers modèles, et il arrive même qu'on les munisse de récupérateurs afin d'économiser le combustible.

D'un emploi encore plus souple sont les fours exclusivement électriques, dont le rendement thermique est très élevé. Ils ont l'inconvénient de consommer une énergie coûteuse. La chaleur est produite par l'effet Joule d'un courant électrique dans le verre lui-même; les pertes thermiques sont extrêmement faibles. La fusion s'opère à partir de l'intérieur de la masse plutôt que de la surface. Bien entendu, le verre doit être dans un conteneur, dont les parois absorbent une partie de la chaleur, mais comme le montrent les chiffres qui aboutissent au premier total partiel sous la rubrique 1975 du tableau ci-dessus, un rendement d'au moins 19,1/28,1, soit 68 %, doit être possible. Dans la pratique, des rendements se situant entre 60 et 80 % ont été obtenus parce que le verre peut être porté à des températures plus élevées et que la cuve peut être beaucoup plus petite que dans les fours de types classiques.

Une formule communément adoptée consiste à combiner les avantages du chauffage au mazout et ceux du chauffage électrique en plaçant des électrodes dans un four au mazout pour en accroître le rendement grâce à l'appoint de chaleur ainsi fourni. On a commencé à construire des fours "mixtes" utilisant le mazout pour fournir la température de fond et compenser les pertes de chaleur, et l'électricité pour la fusion proprement dite.

Nous avons vu plus haut que le rendement d'un four de fusion dépend largement de l'habileté de ceux qui en règlent le fonctionnement et de la qualité du verre à produire. Néanmoins, les indications fournies au tableau suivant sur le rendement nominal des diverses techniques de fusion pourront donner une première base de comparaison. Les expressions indiquent la consommation journalière (24 heures) d'énergie en kWh en fonction de la capacité nominale C (tonne par jour et de la quantité prélevée T (tonnes par jour). Dans chaque expression, les deux premiers termes (entre parenthèses) représentent les taux de consommation fixes, et le troisième terme les taux de consommation variables.

#### Fours chauffant au mazout

A régénérateurs	(14 654 + 1407C) + 1612T
A récupérateur	(17 100 + 885,8C) + 1783T
Four unitaire	(15 322 + 720,6C) + 2363T

#### Fours mixtes

Au mazout, à récupérateur avec appoint électrique de 50 %	(17 100 + 1445,9C) + 500T
Four unitaire mixte	(17 100 + 40,72C) + 600T

#### Fours électriques

Exclusivement électrique	(1143,8 + 171,8C) + 460T
--------------------------	--------------------------

Si l'on examine les coûts de combustible, on constate que pour les fours de grandes dimensions le système à régénérateurs est le plus économique, mais que pour les fours de petites dimensions le choix est plus large et peut être déterminé par d'autres considérations. Bien entendu, des combustibles autres que le mazout peuvent être employés - on s'est servi de grains de café au Mexique - et les fours sont parfois équipés d'un système double qui permet par exemple de passer rapidement du gaz naturel au mazout en cas de difficultés d'approvisionnement.

Le rendement exceptionnel des fours électriques a pour contrepartie le coût élevé de l'énergie employée; en fait, l'inefficacité thermique est transférée de la verrerie à la centrale électrique, et il faut de toute manière en payer le prix.

#### Fusion

Un fondeur expérimenté, capable de tirer le rendement optimum du four utilisé, est guidé par deux principes. Le premier et le plus important est que le bon verre, une fois formé, ne doit pas être contaminé par du verre incomplètement fondu. Le second a déjà été mentionné : une surélévation locale de la température, et par conséquent une fusion rapide, n'entraîne pas nécessairement une consommation supplémentaire de combustible, pourvu que

l'excédent de chaleur résultant de cette surélévation soit utilement employé par la suite. Il est clair que le premier de ces deux principes peut être appliqué en chauffant le mélange de matière vitrifiables de façon uniforme, de manière que toutes les parties de la charge subissent le même traitement au même moment, et qu'aucune contamination par du verre incomplètement fondu ne vienne retarder le processus. Tel est le cas avec les fours à pots et les fours à cycle journalier. Une charge suffisante pour couvrir les besoins d'une journée est introduite à froid dans le pot ou le four; elle est chauffée jusqu'à ce qu'elle fonde, puis travaillée. Le pot, qui peut être couvert, est placé dans un four continu, tandis que dans le four à cycle journalier les matières vitrifiables constituent elles-mêmes le four et sont en général chauffées directement par une flamme projetée au-dessus du bain. Lorsque le niveau du verre devient trop bas pour que les prélèvements manuels puissent continuer, le cycle recommence. Il est clair que ce procédé ne convient pas pour l'alimentation des machines automatiques, mais il a sa place dans la production d'articles coûteux fabriqués à la main.

Le four unitaire permet lui aussi d'éviter la contamination. Le mélange vitrifiable est introduit en continu à une extrémité d'un long canal, et passe par les divers stades de la fusion en progressant vers l'aval et la machine de façonnage. Le second principe énoncé plus haut n'est pas négligé, puisqu'une partie de l'excédent thermique de la zone surchauffée est ramenée par les gaz brûlés vers l'amont et les zones moins chaudes.

Pour les fours à cuve de type classique, la situation est loin d'être aussi simple. Le bassin de fusion qui peut n'être que de moitié plus long que plus large, communique avec le bassin de travail, qui est beaucoup moins vaste, par une "gorge" ou ouverture située au bas du "barrage" qui sépare les deux cuves. On pourrait croire que cette gorge sert à séparer le verre fondu du verre qui ne l'est pas; en fait, la partie supérieure du barrage ne peut retenir que les contaminations les plus proches de la surface, et des éléments incomplètement fondus arrivant au barrage seront presque certainement entraînés vers le bas par la viscosité de la pâte et parviendront dans le bassin de travail. Le rôle réel du barrage est de servir de barrière thermique de manière que le verre atteigne le bassin de repos à une température assez basse pour qu'on puisse le travailler. Il faut trouver d'autres moyens de s'assurer que le verre, dans la région du barrage, sera déjà totalement fondu et affiné. Une barrière mécanique est hors de question, mais on peut créer une barrière thermique en établissant à travers le bassin une zone surchauffée commençant au dernier tiers de la longueur de la chambre de fusion. Le verre, surchauffé en cet endroit, tend à s'élever et lorsqu'il atteint la surface il s'écoule à la fois vers l'aval en direction du barrage, et vers l'amont en repoussant les matières non fondues flottant à la surface. La surchauffe, par conséquent, non seulement empêche la contamination par les matières non vitrifiées mais en outre aide à les faire fondre. Quand le verre surchauffé est refroidi à leur contact, il plonge vers le fond, puis est de nouveau attiré vers la zone de température maximale, et le cycle recommence, avec les mêmes effets bénéfiques.

Pendant ce temps, le verre surchauffé s'écoule vers l'aval en s'affinant rapidement en raison de sa température, et plonge vers le fond lorsqu'il se refroidit au contact du barrage. Ces courants de convection étant d'une intensité bien supérieure à celle du mouvement engendré par la simple tirée du verre, la plus grande partie du verre fondu qui plonge au contact de la paroi du barrage reflue en atteignant la sole, remonte vers la zone surchauffée, et repasse par le même cycle d'affinage.

Avec un four bien réglé par conséquent, il y a application du premier principe et, puisque la moitié au moins de l'excédent thermique est ramenée vers la matière vitrifiable en cours de fusion, il y a aussi application du second. Mais il est clair que la barrière thermique requiert un maintien rigoureux des températures, car si la zone surchauffée se déplace, ou si la température y faiblit, une poche de matières ayant résisté à la fusion peut franchir l'obstacle et être entraîné dans la progression de la masse. Pour contrôler la situation, il ne suffit pas de surveiller les indicateurs de température : il faut examiner fréquemment la surface du verre en fusion. Elle doit présenter l'aspect d'un lac limpide depuis le barrage jusqu'à une bande d'écume qui s'avance jusqu'à la moitié environ de la longueur de la cuve. En avant de cette ligne, ce n'est plus du verre fondu que contient le four, mais de la charge en cours de fusion. Il peut y avoir aussi une mince ligne d'écume le long du barrage : il s'agit en général d'un dépôt de silice résultant de la perte d'éléments volatils issus du verre surchauffé. Ce dépôt ne doit pas s'accroître, parce qu'il est constamment léché et dissous par le verre surchauffé.

Des "regards" convenablement situés, permettant le contrôle visuel des opérations, sont des plus utiles; on se sert parfois aussi de circuits de télévision.

#### Barboteurs

Un déversoir noyé et des barboteurs sont parfois placés en travers de la cuve afin d'accroître la stabilité de la barrière thermique. Les barboteurs sont des appareils très simples qui permettent d'injecter dans le verre, par des tuyaux placés au fond de la cuve, des bulles d'air de 6 pouces de diamètre environ; ces bulles remontent librement à la surface où elles éclatent. On croit fréquemment, et à tort, que les bulles en remontant poussent le verre vers le haut, comme le feraient des corps solides; en fait, aucun effort de cisaillement ne peut s'exercer au contact d'un globule gazeux et du verre. Le mouvement ascensionnel se produit parce que la densité moyenne d'une colonne de verre contenant des bulles est inférieure à celle de la colonne voisine qui n'en contient pas, d'où la tendance du verre à se déplacer. Comme le déplacement du verre aux endroits où se forment les premières bulles peut provoquer l'érosion du revêtement réfractaire de la sole, il faut installer les tuyaux un peu au-dessus de celle-ci. L'air doit être pulsé ou son débit régularisé, car la pression nécessaire pour surmonter la tension superficielle et causer la formation d'un globule gazeux entraînerait si elle se maintenait, l'émergence d'une bulle géante.

#### Pollution de l'air

On a rappelé à propos de la composition du mélange de base (chapitre III), qu'il fallait tenir compte des pertes dues à la volatilisation de certains constituants pendant la fusion, pertes qui dans certains cas dépassent 10 %. Une forte proportion des matières volatilisées se condensent dans les régénérateurs et les cheminées, qu'elles encrassent, mais une partie s'échappe et pollue l'atmosphère. S'agissant du verre sodique ordinaire, le polluant principal est le sulfate de sodium, mais dans le cas des verres au plomb et des verres opales au fluorure, les polluants sont beaucoup plus nocifs et il faut parfois un équipement coûteux pour les éliminer par un procédé ou un autre des gaz brûlés.

Dans un four classique, la principale source de matières volatiles est la couche superficielle du verre qui est tout entière exposée aux flammes dans la chambre de fusion. Dans un four exclusivement électrique où la pâte est recouverte d'une couche de mélange froid, les matières volatiles sont emprisonnées in situ et les pertes de fluor, par exemple, tombent caractéristiquement de 30 à 2,5 %. Pour la fusion continue de verres de ce genre, on préfère donc employer des fours exclusivement électriques. Lorsque le verre, destiné à être travaillé manuellement, est fondu en pots ceux-ci sont fermés et le problème ne se pose pas.

Il est instructif de passer en revue tous les composants d'une charge d'un four de verrerie en s'efforçant de déterminer la proportion de chacun d'eux qui se perd dans l'atmosphère. Prenons le cas d'un four à mazout qui fabrique 50 tonnes de verre par jour en brûlant 10 tonnes de combustible. Si la teneur du mazout en soufre est de 5 %, la combustion dégage journellement 0,5 tonne de soufre; le répandre dans l'atmosphère sous forme d'acide sulfurique (1,5 tonne par jour), ce n'est pas précisément agir en bon voisin. En fait, une forte proportion de soufre réagit dans le four avec les vapeurs de soude pour former 2 tonnes de sulfate de sodium qui se condensera pour une bonne part dans les cheminées, les régénérateurs, etc. Certes, la soude éliminée de la composition du verre coûte chère (90 dollars par jour dans le cas étudié); mais si le mazout employé à une teneur élevée en soufre, elle ne l'est pas en pure perte car on parvient ainsi à neutraliser un polluant beaucoup plus nocif.

D'une manière générale, plus le système de récupération de la chaleur est perfectionné (c'est-à-dire plus la température de sortie est basse), plus est réduite la quantité de polluants évacués par la cheminée. Toutefois, les systèmes perfectionnés exigent des nettoyages plus fréquents. Le coût et les frais d'entretien élevés de chaudières et autres appareils utilisant la chaleur ainsi récupérée, n'ont pas favorisé l'emploi de ces moyens de réduire la consommation d'énergie. Etant donné, cependant, la sensibilisation croissante aux dangers de la pollution, il est prudent d'infléchir les décisions fondées sur des considérations purement économiques de manière à atténuer ces dangers.

## V. LE TRAVAIL DU VERRE

Epais comme du sirop, tendre comme le beurre, dur comme l'acier : autant de comparaisons dont on peut se servir pour décrire le verre suivant sa température. Toutefois, il n'a jamais la ductivité ou la plasticité de nombreux autres matériaux en ce sens que l'application de la force ne suffit pas pour le rendre malléable. S'il est fluide en raison de sa température, il réagira à la force de manière prévisible, s'il ne l'est pas, il se brisera. Le formage du verre est donc toujours une question de température, combinée à la force et aux contraintes mécaniques, mais comme en général la température du verre façonné se modifie rapidement, ce qui entraîne des variations très brusques de la fluidité, il importe d'organiser en conséquence le processus de fabrication.

En revanche, le verre, de par sa nature même, se prête à de nombreuses transformations qui seraient impossibles avec d'autres matériaux. Il peut être soufflé en pièces à parois très minces ou étiré en feuilles, tubes ou fibres, le refroidissement spontané, et l'accroissement de la viscosité qui en résulte, produisant une auto-régulation du processus. Ces deux procédés (le soufflage et l'étirage), plus une technique relativement simple comme le moulage, ont fait du verre le matériau universel qu'il est aujourd'hui.

### Cueillage et alimentation par feeder

Un des problèmes que pose le travail du verre est celui du transport de la quantité requise de verre fondu à l'endroit où il sera façonné. Autant essayer de débiter du sirop à la cuillère; il en adhère tant à l'ustensile que tout dosage précis devient impossible. Dans l'étirage en continu, le problème est résolu en laissant se refroidir la pièce étirée, puis en la débitant en morceaux de la longueur voulue. Dans le moulage, tout comme dans la fabrication des glaces, on fait basculer le pot et le verre qu'il contient est versé sur la table de coulée, ou bien on laisse le verre déborder en continu dans les machines à laminier. Toutefois, la fabrication directe de certains articles continue à poser des problèmes.

Dans la fabrication manuelle, on ne se sert pas d'une cuillère mais d'un "fêret", longue tige de fer avec à une extrémité une boule, en général de terre. En trempant et en faisant tourner cette boule dans le verre fondu, on peut cueillir la quantité voulue de paraison, la transporter au poste de travail et la laisser s'écouler en sectionnant le filet de verre quand on estime en avoir recueilli suffisamment. Cette technique exige de l'adresse et du discernement tant chez le cueilleur que chez le cisailleur.

Quand le verre est soufflé à la bouche dans un moule, on se sert pour le cueillir d'un tube creux; l'excédent de verre est exclusé, également à la bouche, et forme une excroissance bulbeuse de l'objet façonné, excroissance suffisamment mince pour qu'on puisse la détacher du tube en la brisant. L'ébarbage de l'article intervient ultérieurement. Même dans la production semi-automatique, on utilise encore cette méthode de cueillage assez peu satisfaisante, le moulage seulement étant assuré mécaniquement.

Comme le cueillage manuel est incommode, inéconomique (30 % ou plus du verre cueilli se retrouvent dans la boîte à déchets), et que manifestement, il ne convient pas à la fabrication automatique, deux méthodes de cueillage mécanique ont été mise au point. Dans la première, utilisée pour fabriquer des objets soufflés, le verre est aspiré à sa surface par une sorte de coupe métallique renversée ayant les dimensions et la forme voulue. Normalement, cette coupe joue aussi un rôle dans l'ébauchage de l'article (on l'appelle alors moule à paraison pour la distinguer du moule finisseur). Le moule à paraison, rempli par succion, sert à transporter le verre. Si l'objet à souffler est symétrique, la température du verre cueilli doit, bien évidemment être elle aussi répartie symétriquement. Un des inconvénients de cette méthode de cueillage est que l'immersion d'un moule froid dans le verre fondu provoque une chute localisée de température, d'où la nécessité de faire tourner le creuset ou de brasser le verre de sorte que le moule aspirant se trouve chaque fois plongé dans du verre frais.

La deuxième méthode de cueillage automatique est beaucoup plus répandue. Un canal étroit assure le transport du verre fondu depuis le four jusqu'à un "feeder", qui sert à débiter des gouttes de dimensions fixées ("paraisons") à l'autre extrémité. Pendant ce trajet, des dispositifs de chauffage et de refroidissement permettent de modifier la température du verre pour l'adapter aux conditions nécessaires pour fabriquer un objet déterminé. Le verre est quelquefois maclé pour en améliorer l'homogénéité, et l'on peut également y ajouter des verres de couleur, de sorte que le feeder permet de fabriquer des articles colorés alors que le four produit du verre incolore.

Un feeder comprend essentiellement un orifice, percé au fond d'un bassin situé à l'extrémité du canal, et un piston plongeur en terre réfractaire qui pousse le verre à travers l'ouverture, à la manière d'un piston de seringue. Le verre ne s'écoule donc pas de manière continue et régulière; le débit est discontinu et des cisailles tranchent le filet de verre pour former des gouttes qui alimentent la machine de formage. Le plongeur, animé d'un mouvement rectiligne alternatif, est généralement commandé par un mécanisme à cames, de sorte que son mouvement peut être synchronisé avec celui des cisailles automatiques pour régler la forme de la paraison. Le poids de celle-ci, qui dépend, en gros, de la taille des rondelles calibrées que l'on adapte sur l'orifice de la température est réglé plus finement par le mouvement du plongeur. Le plongeur est souvent entouré d'un manchon ou d'un cylindre suspendu qui tourne lentement; ce manchon aide à homogénéiser la température du verre et on peut le faire descendre au fond du bassin pour interrompre l'écoulement du verre pendant qu'on remplace les rondelles ou les pistons.

Ce système offre de nombreux avantages. Il peut être utilisé pour alimenter des presses automatiques, mais aussi des machines à souffler; le poids de la paraison peut être réglé sans qu'on ait à interrompre la fabrication; et la longueur du canal fait que les machines se trouvent à une distance convenable du four, ce qui simplifie la tâche du personnel d'exploitation et d'entretien et lui permet de travailler dans une température moins pénible. Un autre avantage tient à la possibilité d'adapter sur l'orifice des plateaux percés de deux, voire de trois trous, ce qui permet de débiter simultanément plusieurs paraisons, si l'article à fabriquer est suffisamment petit pour que la machine puisse être équipée de moules ayant plusieurs cavités.

Pressage du verre et défauts de formage

Même pour la plus simple opération de pressage, on utilise des moules. Un moule se compose de trois parties : le poinçon ou plongeur; le corps et la bague. Le plongeur détermine la forme intérieure de l'objet, le moule en détermine la forme extérieure, et le moule de bague celle de l'extrémité supérieure. Le moule de bague, étroitement ajusté, guide le poinçon et permet de comprimer le verre en l'empêchant de s'échapper.

Une paraison ou charge de verre fondu de volume correspondant à celui de l'objet à fabriquer est introduite dans le corps du moule. Pour faciliter l'opération, le corps du moule doit être exactement positionné par rapport au poinçon. Ainsi, que l'opération soit automatique ou manuelle, les mouvements sont simples : mise en position du moule, et mouvement vertical du poinçon pendant que le moule est en position fixe. En général, le moule de bague est monté sur une cage commandée par ressort et montée sur le plongeur, ce qui permet de l'amener sur le corps du moule avant que le plongeur ait achevé son mouvement descendant. De même, lorsque le plongeur remonte, le moule de bague sert à maintenir l'ébauche dans le corps du moule tandis que le poinçon est retiré et cesse d'être en contact avec le verre. Souvent, le corps du moule comporte aussi une partie centrale mobile qui, soulevée, permet de retirer l'ébauche du corps du moule lorsqu'elle est assez refroidie pour conserver sa forme. S'il s'agit d'un objet de forme complexe qu'on ne pourrait retirer d'un moule d'un seul tenant, on construit le corps du moule en deux parties ou plus, assemblées par des charnières. Nous avons vu plus haut que le pressage n'est pas une simple affaire de force. Les changements de température du verre doivent être pris en compte. Si nous considérons en détail la séquence des opérations, nous voyons que la charge de verre fondu, dont la température est peut être de 1100 °C, arrive dans un moule dont la température moyenne est d'environ 450 °C. Au premier contact, la température de l'interface peut être d'environ 650 à 700 °C, c'est-à-dire qu'elle est modifiée par le métal, dont la conductivité thermique est supérieure à celle du verre. Si la température des surfaces de contact est nettement plus élevée - c'est-à-dire si le moule est trop chaud, le verre mouillera le métal et y adhérera, arrachant sa pellicule d'oxyde ou reproduisant les détails de sa structure cristalline. Dans les deux cas, l'objet terminé présentera une surface terne aux endroits intéressés. Si le moule est trop froid, et que la température des surfaces de contact soit inférieure à la température de solidification, la pression exercée sera pratiquement nulle. Le verre sera grossièrement façonné, présentera des rugosités qui lui donneront l'aspect d'une écorce d'orange. La marge de températures auxquelles le verre peut être mis en contact intime avec la surface métallique sans vraiment la mouiller est donc assez étroite.

C'est de façon analogue que se forment les ondulations, rides ou "tassements" c'est-à-dire les séries de courbes échelonnées qui peuvent se former autour de la surface de contact de la charge déposée dans le moule. Elles sont dues à l'écoulement trop lent du verre, qui fait que la frange périphérique incurvée, refroidie par la proximité du métal, est chevauchée par du verre plus chaud qui la suit, lequel se refroidit à son tour, est recouvert par d'autre verre, etc. Les ondulations ne disparaîtront au pressage que si le refroidissement n'a pas été trop brusque.

Quand le poinçon commence à comprimer le verre dans le moule, la pâte est forcée de couler trop rapidement pour qu'il puisse se former d'ondulations. Mais si le verre contient des éléments volatils, le verre fluide chassé du centre de la charge peut émettre des vapeurs qui se condensent sur le métal froid avant que le flux de verre ne l'atteigne. Elles s'y accumulent, de sorte qu'au bout d'un certain temps un "halo", ou anneau de verre terné, peut se former à l'endroit où le verre (ou le métal) réagit en présence du résidu de condensation.

Si, en raison de la forme du moule ou de celle de la charge qui y a été déposée, le verre forme deux coulées qui finissent par se rejoindre, le confluent sera marqué par un défaut qui ressemble à une fissure de la surface. Comme celle-ci présente un chevauchement, le défaut est souvent désigné par ce vocable. Un "cisaillement" est une autre mal façon qu'on trouve souvent associée au chevauchement. Il se forme si le refroidissement provoqué par les cisailles n'a pas été compensé par la chaleur de l'ensemble avant le pressage.

Finalement, si le moule est trop froid, la surface du verre fondu peut se solidifier et subir un choc thermique tel qu'elle se fendille, tandis que la masse de verre reste assez fluide pour subir le formage. Si la masse elle-même s'est trop refroidie, ces fendillements peuvent gagner tout l'ensemble. Si les parties du moule tendent à se desserrer sous l'effet de la pression (dans le cas par exemple d'un moule de bague mal ajusté) il peut se former un réseau de fendillements analogues. C'est souvent le moule de bague, qui a le moins de contact avec le verre chaud et par conséquent tend à se refroidir, qui est à incriminer, et on peut avoir à rejeter l'objet fabriqué parce que le goulot ou le bord supérieur se sont fissurés.

Nous avons décrit ces défauts pour indiquer les points où des malfaçons peuvent se produire au cours du formage. Ce n'est pas seulement au cours de cette opération qu'elles sont possibles, mais dans de nombreux autres cas. Il est essentiel de bien les connaître pour pouvoir y remédier.

Le moule ne sert pas seulement à donner sa forme à l'objet fabriqué : il sert aussi à absorber la chaleur du verre fondu et en abaisser la température suffisamment pour qu'il puisse se solidifier. La température du moule et la répartition de la température dans ses diverses parties sont d'une importance cruciale. La température moyenne du moule dépend de la cadence de fonctionnement, de la rapidité avec laquelle la chaleur qu'il a retirée au verre se diffuse dans l'air ou se perd sur le plateau de pressage, ainsi que de sa capacité thermique, de ses propriétés thermiques et de sa forme extérieure. La répartition de la température dépend surtout de sa forme extérieure, et un modèle de moule bien conçu à cet égard contribuera beaucoup à éliminer un certain nombre des malfaçons susmentionnées.

Une autre méthode de pressage utilise des moules à points d'injection multiples, particulièrement utiles lorsqu'il s'agit de fabriquer des objets de forme complexe, et qui ressemblent beaucoup à ceux qu'on emploie pour le moulage des plastiques, à ceci près que le mécanisme de pression fait partie du matériel de moulage. Le moule est un simple moule de pressage du type décrit plus haut, avec cette différence que le corps du moule comporte des orifices d'injection par lesquels le verre est introduit sous pression dans une ou plusieurs cavités de la forme requise. Le corps se compose de deux parties ou plus pour permettre d'accéder à l'ébauche moulée, qu'on retire en brisant le verre au niveau des orifices. Les irrégularités résultant de la cassure sont éliminées au cours d'une opération ultérieure.

### Soufflage

Tous les enfants savent qu'on peut faire des bulles de savon de forme parfaitement sphérique, à paroi si mince qu'on y voit apparaître des iridescences. Cela n'exige aucune adresse spéciale. La tension de surface agissant librement sur le liquide mobile produit la forme sphérique en le forçant à occuper le plus petit espace capable de contenir le volume d'air enfermé, le savon ajoutant cette propriété que, lorsque la bulle devient trop mince en un point donné, la tension de surface y augmente, attirant un supplément de liquide pour le renforcer, et donnant ainsi une certaine stabilité à la bulle.

Lorsqu'il s'agit de bulles de verre, la tension de surface ne peut jouer que partiellement le même rôle, parce que le verre n'est pas suffisamment fluide pour qu'il y ait redistribution, sous l'effet de la tension, mais les sections minces se refroidissant et se solidifiant plus rapidement que les parties épaisses, un mécanisme dont les effets sont assez semblables à ceux que produit le savon tend à donner une certaine uniformité à l'épaisseur finale. Les parties initialement plus épaisses se "ballonnent" jusqu'à devenir elles aussi minces et résistantes. La forme finale dépend de la répartition de l'épaisseur dans la paraison juste avant le soufflage. La fabrication par "soufflage libre", c'est-à-dire sans moules, exige donc beaucoup d'habileté et une grande partie du temps de l'opération est consacrée au "marbrage" qui consiste à placer la paraison sur une table lisse et roulée pour lui donner une première mise en forme, à laquelle succédera le soufflage. Même, si on utilise un moule pour le soufflage final, une préparation est nécessaire et elle exige de l'habileté. En fait dans la production entièrement automatisée de verres creux par soufflage, le formage préliminaire est une partie essentielle du processus, bien que lui aussi se fasse par moulage (dans un moule ébaucheur du type décrit plus haut).

Au temps où on fabriquait les bouteilles à la main, le formage de la bague venait en dernier et bien qu'aujourd'hui, même dans la production automatique ou semi-automatique, ce soit elle qui reçoit en premier sa forme finale, les Anglais continuent de l'appeler "finish". Le goulot d'une bouteille, ou la bague d'un pot ont en général une forme complexe présentant des creux et des saillies (pour le vissage des couvercles ou le renforcement du bord) et c'est lorsque le verre est le plus chaud que cette partie doit être formée par pressage (parfois pneumatique). C'est par cette bague que l'ébauche à demi-solidifiée sera saisie pour son transfert en vue de l'opération suivante. Elle est par conséquent la première partie de la paraison à subir le formage, et c'est la partie du moule d'ébauche qui la contient qui sera transférée au moule finisseur, entraînant le reste de la paraison avec elle.

La forme du moule ébaucheur est très importante puisque c'est elle, et le refroidissement provoqué par le contact avec le moule qui déterminent la façon dont le verre se dilatera par soufflage dans le moule finisseur, et par conséquent aussi la répartition de l'épaisseur dans la paroi de la bouteille.

Lorsque le verre est "cueillé" par aspiration, la coupelle à succion constitue elle-même le moule ébaucheur et le formage de la bague se fait par le vide. La forme finale est donnée dans un moule finisseur par insufflation d'air à travers la bague. Ce sont là des

exemples de fabrication par aspiré-soufflé. Dans le procédé soufflé-soufflé, une paraison est placée dans un moule ébaucheur renversé, et le soufflage chasse le verre vers le bas pour y former la bague. La paraison est retournée au cours de son transfert au moule finisseur. Ce système convient particulièrement bien pour les bouteilles à col étroit. Pour les pots à col largement ouvert, on utilise un système de pressé-soufflé. Le formage de la paraison, en position droite ou renversée, se fait par pression mécanique.

Une machine à fabriquer les bouteilles entièrement automatique est un équipement complexe où s'effectuent toutes les 12 secondes, et pour chaque article, une douzaine de mouvement mécaniques réglés avec une extrême précision. Le nombre d'articles fabriqués à ce rythme - 5 bouteilles à la minute - n'est pas suffisant pour rendre le processus rentable. C'est pourquoi on multiplie la production en faisant se chevaucher les opérations, non sans un accroissement de la complexité mécanique. Dans certaines machines, les parties mécaniques sont montées sur des plateaux tournant autour d'un axe vertical (soit un seul plateau, soit deux, avec dans ce cas transfert de l'ébauche de l'un à l'autre). D'autres machines comprennent un certain nombre de sections identiques, constituant chacune une machine indépendante, alimentée successivement en paraisons par une goulotte de distribution. Ce type de machine a de nombreux avantages; il peut fabriquer en même temps des bouteilles de types différents pourvu que les poids des articles et les cadences de production soient identiques, et une section peut être arrêtée pour l'entretien sans que la production soit complètement interrompue. Ces machines peuvent fonctionner avec le procédé soufflé-soufflé et le procédé pressé-soufflé.

Avec des machines aussi complexes, trouver les réglages convenant le mieux à un type de bouteilles déterminé exige beaucoup de temps. Les moules sont préchauffés mais leur température de fonctionnement n'est établie que lorsque les réglages sont définitifs. Il faut donc plusieurs heures pour que la machine produise des articles de bonne qualité avec un rendement d'environ 90 %. Il faut peut être plusieurs jours pour récupérer les frais encourus au cours de la période d'essai. Les commandes doivent donc porter sur la fabrication de 100 000 à 150 000 bouteilles au minimum pour que la production entièrement automatique soit justifiée.

Les articles fabriqués par soufflage dans des moules chauds présentent une "couture" à la hauteur du plan de contact des deux moitiés du moule. S'il s'agit d'articles (verrerie de table par exemple) où cette marque est indésirable, on peut les fabriquer sur des machines à moules "chemisés" c'est-à-dire garnis d'un revêtement en pâte poreuse (en général du liège réduit en poudre) maintenu humide par immersion ou par pulvérisation. La chaleur du verre provoque un dégagement de vapeur à la surface du moule et c'est contre ce coussin de vapeur que le verre sera soufflé. Au cours du soufflage, un mouvement rotatif est imprimé soit au verre soit au moule. Puisqu'il n'y a pas de friction entre le coussin de vapeur et le verre, il y aura un mouvement de rotation relatif entre le moule et le verre, ce qui supprimera la "couture". Des ouvertures pratiquées dans le moule permettent à la vapeur de s'échapper.

La conception mécanique générale de la plupart des machines à moules "chemisés" n'est pas différente de celle d'une machine pour pressé-soufflé, à ceci près que la partie de la paraison correspondant à la bague est cassée ou sectionnée et rejetée dans le cas de ces produits sans couture. Il n'y a donc aucune raison de mouler avec précision la partie qui

sera rejetée. Dans certaines machines, la paraison se présente sous forme d'un disque épais grossièrement façonné, qui est déposé sur une plaque mince de métal percée de trous de diamètre un peu inférieur à celui du disque. Le disque commence à faire saillie à travers l'orifice, et une tête de soufflage descend pour chasser le verre dans le moule chemisé placé en-dessous. Le verre est sectionné, dessus et dessous, par les arêtes de la plaque perforée, et s'en détache, la débarrassant pour le cycle suivant. La machine à ruban, à haut rendement, utilisée pour fabriquer les ampoules électriques, est du même type avec cette différence qu'elle est alimentée en continu à partir du four par un ruban de verre obtenu par écoulement de la pâte entre deux rouleaux. L'un des rouleaux comporte des creux qui forment sur le ruban des sortes de lentilles régulièrement espacées qui se placent sur les ouvertures d'une courroie métallique. Les moules chemisés et les têtes de soufflage sont aussi supportés par des chaînes sans fin, ce qui permet le fonctionnement en continu et donne un mouvement linéaire plutôt que circulaire. La production peut atteindre 250 ampoules à la minute.

La complexité des machines de formage et les conditions extrêmement sévères dans lesquelles elles fonctionnent, notamment en ce qui concerne les variations de température et l'effet abrasif des débris de casse, rend absolument nécessaire leur entretien régulier. Mais chaque machine représente une partie si importante de la production de l'usine que les temps d'arrêt reviennent extrêmement cher. Il est donc très important que l'entretien se fasse autant que possible pendant que les machines fonctionnent. Si cela n'est pas possible, les travaux d'entretien doivent être faits pendant les temps morts au cours desquels les moules ou les pièces servant à l'alimentation doivent être changés. La planification de l'entretien exige une liaison étroite avec le personnel employé au contrôle de la qualité, ce qui permet de recevoir en temps utile des informations sur les travaux nécessaires; elle exige aussi une planification soigneuse de la production pour que les équipes chargées de l'entretien et du changement des moules soient disponibles au bon moment et puissent faire leur travail aussi rapidement que possible.

#### Étirage, fabrication de tubes et de verres en feuilles

Nous avons souligné plus haut l'importance qu'à l'ébauche, dans le cas du verre soufflé. Dans l'étirage, l'ébauchage est en fait le seul formage positif que subit le verre. Les dimensions finales sont déterminées dans le sens longitudinal par l'étirage, et transversalement par la contraction qui en résulte. Le formage définitif est terminé lorsque le verre, en se refroidissant, devient trop rigide pour se déformer.

Si l'on forme un cylindre creux à paroi épaisse et qu'on l'étire, le rapport entre le diamètre intérieur et l'épaisseur de la paroi demeurera le même, mais comme le volume du verre n'est pas modifié, la section transversale elle-même sera réduite en proportion inverse de l'extension de la longueur. Etant donné que la perte de chaleur, et avec elle la perte de ductilité, dépend du temps, l'extension obtenue dépend de la rapidité de l'étirage, on peut donc par étirage obtenir des tubes de diamètre aussi réduit qu'on le désire en faisant varier la rapidité de l'opération. Mais le rapport entre le diamètre intérieur et l'épaisseur de la paroi est déterminé par le formage préliminaire.

Bien entendu, s'il s'agit de production continue, le formage préliminaire doit lui aussi se faire en continu. Avec la machine Danner, un filet de verre est déversé sur un manchon supporté par un axe légèrement incliné, comportant un canal pour le soufflage. Le verre, entraîné par la rotation de l'axe, s'enroule autour de lui; il en résulte une ébauche cylindrique, qu'on étire par la base. Le formage est déterminé par le diamètre de l'axe, par l'épaisseur du verre amassé à sa partie supérieure, et par la pression de l'air soufflé par le canal. L'afflux de verre au niveau du manchon est en général réglé par un dispositif analogue à celui des feeders qui alimentent les machines en paraisons, à cette différence près que le poinçon est stationnaire, et joue le rôle de soupape d'admission.

Dans le procédé Vello, on obtient l'ébauche en coulant le verre à travers une bague entre des parois réfractaires le flux de verre, qui s'écoule d'abord à la verticale est ensuite redressé à l'horizontale pour l'étirage pendant qu'il est encore suffisamment plastique. Dans certaines machines, le verre est étiré à partir d'une cuvette dont la base comporte un orifice central où le verre ne peut s'engager qu'après avoir franchi un manchon annulaire réglable en hauteur par rapport au niveau de la nappe, ce qui permet de contrôler le débit et l'épaisseur du tube. Dans d'autres, le verre est étiré vers le haut à partir d'une pré-ébauche en forme d'oignon placée dans une cuvette circulaire d'un cône central, par le sommet duquel l'air est soufflé. Ces machines permettent de fabriquer des tubes de fort diamètre (18 cm).

Toutes les machines que nous venons de décrire se prêtent bien entendu à la fabrication de tiges, c'est-à-dire de tubes à diamètre intérieur nul : il suffit pour cela de laisser à l'arrêt le système de soufflage. En fait, les tiges peuvent être fabriquées directement à partir d'un orifice de feeder. Un cas extrême de la fabrication de tiges est la production de fibres de verre. L'un des problèmes qui se posent dans la fabrication des fibres de verre de faible diamètre est de réaliser un étirage suffisamment rapide pour obtenir la taille désirée. Une autre difficulté est d'arriver à produire, sous forme de fils de pareille longueur (un seul gramme de verre peut donner un filament long de 5 à 7 kilomètres) des tonnages suffisants pour un prix de revient acceptable.

Diverses méthodes sont employées pour fabriquer la fibre de verre selon que l'on veut obtenir des filaments continus et uniformes pour textiles ou pour le renforcement des matières plastiques, ou des fibres plus courtes pour panneaux d'isolation thermique ou sonore. Un procédé utilise des baguettes de verre chauffées à leur extrémité; un fil est étiré à partir de chaque baguette et s'enroule sur un tambour. Dans un autre système, le verre en fusion est contenu dans une cuve de platine dont le fond est percé d'environ 35 trous de faible diamètre à partir desquels se fait l'étirage, et les fibres sont amincies par un jet de vapeur ou d'air. Il existe aussi un procédé d'étirage : par centrifugation : les fibres sont expulsées à la périphérie d'un disque tournant à grande vitesse. On emploie souvent une combinaison de ces deux systèmes.

Dans la fabrication des tubes, des tiges, ou des fibres de verre, la tension superficielle ne pose pas de problème puisque ses effets sont contrecarrés dans le sens longitudinal par l'étirage, et que transversalement, il s'exercent de façon symétrique. Dans la

fabrication du verre en feuilles, on est obligé de combattre la tendance qu'à la nappe de verre à se rétrécir et à s'incurver sous l'effet de la tension superficielle. Dans le procédé Fourcault, l'étirage se fait de bas en haut à partir d'un bain de verre à la surface duquel on plonge une longue pièce réfractaire appelée "débiteuse", qui présente en son milieu une fente longitudinale par laquelle le verre s'introduit et adhère à une pièce métallique appelée "amorce". La feuille est entraînée dans une tour ou puits d'étirage. Des molettes striées empêchent la contraction latérale et refroidissent les bords de la feuille, ce qui a pour effet d'en maintenir la largeur. Le refroidissement de la feuille doit être exactement contrôlé afin qu'elle se solidifie correctement et ne soit ni trop chaude - cas auquel elle serait endommagée par les rouleaux - ni trop froide, cas auquel il pourraient la briser. En passant dans la tour d'étirage, la feuille doit être réchauffée suffisamment pour faciliter la découpe, qui se fait au sommet et dans laquelle il s'agit d'obtenir le plus grand nombre possible de feuilles parfaitement rectangulaires. Si la feuille continue n'est pas correctement réchauffée, elle peut se fendre dans le sens verticale, ce qui force à interrompre la production et à répéter le processus d'amorçage. Les bords de la feuille, épaissis par les striures, sont eux aussi découpés.

Le procédé Fourcault est plus facile à contrôler que ses variantes plus récentes, parce que l'étirage se fait à partir d'une forme prédéterminée, qui est la fente de la débiteuse. C'est pourquoi ce procédé est celui que l'on recommande en général lorsqu'il s'agit de créer une industrie pour la fabrication de feuilles de verre. Les variantes n'emploient pas la débiteuse (qui doit être remplacée tous les deux mois environ); la forme préliminaire est alors déterminée par la feuille elle-même, par le réglage de la température et par les molettes striées. L'étirage est alors plus rapide et la surface exempte des marques verticales que peuvent laisser les rugosités de la débiteuse. Dans une machine, la feuille de verre, d'abord entraînée à la verticale, tourne autour d'un rouleau pour être amenée à l'horizontale quand le verre est encore plastique, ce qui facilite les opérations de recuit et de découpe.

#### Verre laminé et glaces

Comme n'importe quel autre liquide, le verre fondu, s'il est versé sur une surface plane qu'il ne mouille pas, s'écoulera dans toutes les directions, jusqu'à ce que la tension superficielle agissant sur la courbure des bords équilibre la pression hydraulique ou "charge". Pour un verre d'un type donné, l'épaisseur finale est toujours la même; elle est d'environ 6 mm dans le cas des verres à la soude et à la chaux. Sauf à proximité des bords, la surface est parfaitement plane. Bien entendu, si le verre se refroidit trop vite pendant l'écoulement, le processus sera interrompu, le verre s'accumulera de façon inégale, et l'épaisseur ne sera pas uniforme.

Une plaque de fonte ne peut être soumise aux températures du verre fondu sans qu'il se produise un effet de mouillage. Si l'on coule du verre sur une table métallique, il faut donc la refroidir, et accélérer l'écoulement et l'aplanissement de la nappe en passant un rouleau sur la surface. Le dessus et le dessous de la couche de verre sont donc refroidis au contact du métal et les deux surfaces peuvent présenter les défauts dont nous avons parlé dans le cas du verre coulé dans un moule de pressage. Après recuit, les surfaces doivent être doucies et polies si l'on veut obtenir une transparence parfaite. Le produit fini s'appelle

la glace. Si au lieu d'une table horizontale, on emploie un autre rouleau pour le dessous du verre, la texture de la surface sera plus homogène, parce que la température d'un rouleau est beaucoup plus facile à régler que celle d'une plaque. Le laminage peut se faire en continu : le verre fondu provenant du four passe entre deux rouleaux refroidis à l'eau, à une vitesse suffisante pour permettre le formage tout en laissant à la nappe assez de plasticité pour qu'elle puisse être aplanie avant la recuisson. Si les rouleaux sont gravés ou striés, le verre gardera l'empreinte des motifs; on peut donc avec ce procédé fabriquer des vitrages semi-transparents. Si l'on introduit dans le verre en amont des rouleaux lamineurs un treillis métallique qui restera emprisonné dans l'épaisseur de la feuille, on obtiendra du verre armé dont les fragments seront maintenus ensemble en cas de bris. On a donc intérêt à l'utiliser, pour des raisons de sécurité, dans la fabrication des lucarnes, des portes, des fenêtres d'usines, etc.

Tous les produits laminés dont nous venons de parler se fabriquent en continu, et sont découpés au bout de la chaîne de production selon les spécifications des commandes. S'il s'agit de glaces polies, le doucissage et le polissage peuvent aussi se faire en continu en tant que parties intégrantes de la chaîne de production, qui dans ce cas peut être longue de 400 mètres. Les panneaux de glace brute progressent lentement entre des têtes doucisseuses et polisseuses. Mais ce dernier système est en train d'être rapidement remplacé par le procédé du verre flotté.

Le procédé du verre flotté est en fait un retour aux premiers principes, rendu possible par le remplacement de la table coulée par un bain de métal fondu qui n'adhère pas au verre en fusion bien qu'il soit assez chaud pour ne pas le refroidir. La surface en contact avec le métal liquide a la même qualité finale que la face supérieure. Le métal utilisé est l'étain, qu'on protège contre l'oxydation en créant une atmosphère réductrice au-dessus du bain. Ce procédé emploie aussi des rouleaux lamineurs, mais leur rôle est de répartir le verre fondu sans vraiment le refroidir. Le ruban de verre qui s'en écoule est mis en contact avec le bain de métal fondu, flotte à sa surface et acquiert son épaisseur finale, puis passe dans le tunnel de recuisson (étenderie). On peut obtenir des feuilles plus minces que l'épaisseur minimum théorique en étirant les bords de la plaque avec des rouleaux à molettes, comme dans la fabrication du verre en feuilles. Le produit obtenu a une qualité d'optique presque égale à celle de la glace polie, et il est plus résistant.

Un verre flotté de type spécial permettant de limiter l'accumulation de chaleur solaire dans les bâtiments peut être fabriqué par un simple processus électrolytique. Pendant que le verre à demi-fondu flotte sur le bain d'étain, un alliage métallique en fusion est déversé sur la surface du verre. On fait passer un courant électrique entre la nappe métallique en dessus et le bain d'étain en dessous, et les ions métalliques pénètrent dans la surface du verre, qu'ils colorent dans en affecter la transparence.

## VI. TRAITEMENTS SECONDAIRES

Toute opération secondaire exigeant une température supérieure à 450°C oblige en principe à procéder à une recuisson; on a donc intérêt à l'effectuer si possible pendant que le verre est encore chaud, c'est-à-dire avant la première recuisson, ce qui évite de répéter une opération qui demande beaucoup de temps. En règle générale, pour ces traitements à température élevée, on utilise la tension superficielle pour remodeler une partie des articles sans se servir d'outils, ce qui permet d'obtenir des produits propres et exempts de marques.

### Poli au feu et découpe à chaud

La tension superficielle a toujours pour effet de rétrécir la surface sur laquelle elle s'exerce; elle tend donc à en faire disparaître les aspérités. L'effet est strictement superficiel et seule la surface du verre doit être fluide. Cela veut dire que si l'on chauffe uniquement la surface d'un article de forme complexe, on peut le polir au feu sans qu'il perde sa forme.

Le bord d'un gobelet pressé, par exemple, tend à présenter des rugosités sur sa face interne, à cause du mouvement relatif du poinçon par rapport à la bague qui se produit au cours du pressage. On peut éliminer ces rugosités avant la recuisson dans une installation pour le poli au feu, en faisant passer l'objet pressé, monté sur un socle tournant, par un tunnel chauffé au gaz. La conception de ces installations laisse souvent à désirer. Il s'agit de chauffer la surface de l'objet, en ne communiquant à ses parties internes qu'une chaleur suffisante pour empêcher le refroidissement et la rupture, mais trop faible pour que l'article se déforme. A cause de la transparence du verre, la chaleur rayonnante pénètre dans la masse de l'objet et le rechauffe en profondeur, ce qui n'est pas le but visé. Mais c'est par conviction que la chaleur dégagée par la flamme chauffe la surface, et l'installation doit donc être conçue de manière à permettre à cette chaleur d'atteindre la région à polir. Les parois du tunnel doivent donc maintenir une température ambiante d'environ 700°C, empêcher les courants d'air et confiner les flammes, afin que celles-ci ne soient pas source de chaleur rayonnante.

Si une tige ou fibre de verre est exposée à une flamme, son extrémité fond, et sous l'effet de la tension superficielle, se rassemble en une perle presque sphérique, qui grossit de plus en plus, tant et si bien que la tension superficielle qui agit sur la circonférence ne parvenant plus à supporter le poids accumulé, la tige s'étrangle et se sectionne, et la perle se détache. L'extrémité de la tige commence immédiatement à former une nouvelle perle. De même, si l'on chauffe fortement une étroite bande circulaire d'un cylindre de verre suspendu par le haut, la partie inférieure dont le poids ne peut plus être supporté par la tension superficielle se détache à l'endroit réchauffé et tombe. Le bord inférieur de la partie suspendue se ramassera immédiatement pour former un bourrelet renforteur parfaitement lisse. On peut par exemple fabriquer de solides gobelets en soufflant des ébauches plus longues que l'article à fabriquer, puis en sectionnant la "rallonge" de la manière décrite ci-dessus.

L'épaisseur du bourrelet dépend évidemment de la quantité de verre ramolli, c'est-à-dire de l'épaisseur du verre et de la largeur de la flamme. Sa forme tend à ressembler à celle d'une poire à moins que le verre ne soit très mince, auquel cas sa section sera plus circulaire et présentera à sa base un retrait, où la crasse finira par s'accumuler à l'usage. Pour fabriquer de la gobeletterie de première qualité, on procède donc d'abord à la recuisson, puis on coupe ou casse la "rallonge", après quoi on élimine les aspérités en exposant l'objet à une flamme délicatement réglée, qui donne juste assez de chaleur pour lisser le verre sans provoquer la formation d'un bourrelet.

#### Recuisson

Les verres ordinaires peuvent se casser sous l'effet d'un choc thermique provoqué par un écart de température de plus de 50°C. Un verre soufflé ou pressé sortant du moule risque d'être exposé à des écarts de température bien plus élevés. Il ne se brise pas parce qu'il possède encore une élasticité suffisante pour se prêter aux tensions, mais si on le laisse se solidifier sans le protéger contre ces écarts de température, des tensions correspondantes persisteront lorsqu'il atteindra finalement une température uniforme à la température ambiante. Pour éviter que ces tensions ne provoquent la rupture, le verre doit être soumis à la recuisson.

La recuisson comprend deux phases : au cours de la première, on laisse la température s'égaliser en maintenant le verre à une température suffisamment élevée pour que les tensions se relâchent, sans néanmoins que le verre risque de se ramollir au point de se déformer, sous son propre poids. Dès que le verre est débarrassé de ses tensions et à température uniforme, on le refroidit assez lentement pour empêcher l'apparition de nouveaux écarts de température. On peut augmenter la vitesse de refroidissement dès que le verre est assez refroidi (450°C) pour supporter de nouveau les tensions d'origine thermique; celles-ci finiront par disparaître lorsque les gradients qui en sont la cause auront eux mêmes disparu lorsque l'objet aura atteint la température ambiante.

Les tensions se relâchent d'autant plus vite, au cours de la première phase que la température d'entrée est élevée; mais si elle est excessive, le refroidissement initial sera si lent que la recuisson prendra beaucoup trop de temps. Inversement, si la température d'entrée est basse, il faudra plus de temps pour que le verre se débarrasse des tensions, mais le deuxième stade, celui du refroidissement, sera plus court. C'est donc en évitant les extrêmes qu'on obtiendra la durée globale de recuisson la plus courte, et le temps qu'elle exige dépendra de l'épaisseur du verre et du degré de perfection qu'on souhaite donner à l'opération. Nous avons vu au chapitre II que les propriétés physiques du verre changent avec le temps aux températures de recuisson, ce qui oblige à appliquer des règles empiriques pour optimiser le processus. Pour les verres optiques, une recuisson très soignée est essentielle; elle peut durer plusieurs jours ou même des mois si l'article est de grande dimension, mais pour les objets en verre ordinaire, l'ensemble de l'opération peut être terminée en moins de trois heures, les objets étant transportés sur une bande continue le long d'un tunnel, ou ils traversent diverses zones de températures. Pour les verres plats et les verres creux, les températures critiques sont en général le point supérieur de recuit (545°C) et le point inférieur de recuit (510°C). La méthode habituellement employée consiste

à maintenir d'abord le verre à 5 °C au-dessus du point supérieur de recuit pendant un temps qui dépend de son épaisseur, puis à le refroidir, à un rythme qui dépend aussi de l'épaisseur, jusqu'à ce que la température soit tombée à 10 ° en dessous du point inférieur de recuit. On peut alors accélérer le rythme du refroidissement d'environ 20 % à chaque nouvelle baisse de température de 10 °. Le tableau 14 contient des données chiffrées au sujet de la recuisson.

Tableau 14

Verres plats et des verres creux :  
programmation de la recuisson

<u>Epaisseur du verre</u> <u>(mm)</u>	<u>Temps de maintien</u> <u>à 550 °C</u> <u>(min.)</u>	<u>Vitesse initiale</u> <u>de refroidissement</u> <u>(°C/min.)</u>
3	4	4,2
5	10	1,8
10	20	0,5

Découpe par rayage et cassage

Le tour de main du vitrier, qui découpe une feuille de verre selon une ligne tracée avec une pointe de diamant ou une molette d'acier, s'acquiert par la pratique et n'est pas facile à analyser ni à expliquer. Les caractéristiques de la rayure sont importantes. La pression exercée sur le verre par une pointe de diamant ou une molette d'acier est énorme, même si l'effort n'est fourni que par les muscles des doigts. Si la pression est étroitement localisée, c'est-à-dire si la pointe est suffisamment aiguë, ou la molette assez coupante, le verre cède sans se craqueler (pour la même raison qui fait que les fibres fines résistent à la rupture). Un sillon est tracé dans le verre, et le déplacement maximum se situe au fond du sillon. C'est la distorsion qui persiste après le passage de la pointe qui guide le mieux la rupture subséquente.

Si le diamant est émoussé ou si la pression exercée est suffisante pour que les côtés de la pointe attaquent le verre, celui-ci tend à s'écailler des deux côtés de la ligne tracée. Le résultat est une ligne de faiblesse qui bien évidemment aura tendance à guider la cassure, mais chacune des écailles a son propre système de fracturation qui peut être pour la rupture une source de déviations. La meilleure façon de procéder est donc de tracer la ligne d'un seul coup en appuyant juste assez pour ne pas provoquer l'écaillage latéral. Avec un diamant, l'angle selon lequel on présente la pointe est un facteur essentiel; s'il s'agit d'une molette, l'angle d'attaque a moins d'importance.

Pour casser la feuille de verre, on commence par donner un coup léger du côté opposé à la rayure. Le principe est que la feuille de verre cassera le long de la ligne d'affaiblissement correspondant au sillon. Cependant, l'effort qui s'exerce à l'extrémité de la fissure n'est pas permanent : c'est une intensification de toute tension temporaire d'origine externe. Si l'effort exercé n'est pas symétrique de part et d'autre de la rayure, il est probable que

la cassure déviara. Mais un effort symétrique exercé au commencement de la rayure peut ne pas demeurer symétrique alors que la cassure progresset modifie la géométrie de la pièce travaillée. C'est ici qu'intervient un autre tour de main du vitrier : il sait s'y prendre de manière à exercer un effort qui demeurera symétrique pendant tout le développement de la cassure.

Dans la production en série, il est en général possible de rayer et casser le verre mécaniquement. Souvent, dans le cas d'objets cylindriques, le sectionnement peut se faire par la méthode thermique, et avec une précision telle qu'il suffit d'une très courte entaille pour amorcer la rupture; il n'est pas nécessaire que l'entaille fasse tout le tour du cylindre.

#### Doucissage et polissage

Tout comme un diamant mal orienté, le frottement d'un abrasif dur sur le verre provoque des rayures et l'écaillage latéral. Si on rait le verre dans tous les sens, la surface sera uniformément affectée. Pour un abrasif donné, la quantité de matière enlevée est proportionnelle à la dimension des particules abrasives : le carborundum à grains de calibre 100 donnera une rugosité deux fois supérieure à ce que l'on obtiendrait avec le calibre 200; le verre est enlevé deux fois plus vite, et les rayures sont environ deux fois plus profondes. Si le doucissage doit être suivi par un polissage, on économisera donc du temps en utilisant des abrasifs à particules de plus en plus fines et en procédant par étapes successives, chaque rodage allant jusqu'à la profondeur des rayures laissées par le rodage précédent. Il ne restera donc finalement à polir que les rayures correspondant à un abrasif de dureté décroissante - corindon, sable fin - dont les rayures sont moins profondes.

Si l'on désire une surface dépolie, il suffit d'interrompre le doucissage dès que le résultat souhaité a été obtenu. Une autre méthode consiste à projeter par soufflage du sable sur le verre (certains règlements sanitaires sont à observer) à moins que l'on ne préfère substituer au sable un autre abrasif. Pour l'opération normale de doucissage, on emploie de l'eau, qui sert à distribuer les particules, refroidit le verre, et entraîne les débris.

La nature du polissage, art pratiqué avant même la découverte du verre, est difficile à expliquer en termes macroscopiques. Une théorie est que la chaleur produite à la surface de contact entre le verre et le polissoir est suffisante pour fondre le verre, et que l'opération équivaut à un polissage par la flamme. On emploie en général le "rouge à polir", (oxyde de fer  $Fe_2O_3$ ) ou parfois l'oxyde ferrique  $Fe_2O_3$  en suspension dans l'eau, sous forme de bouillie crémeuse que l'on applique avec un feutre ou un polissoir. Il est certain que le polissage est le plus rapide lorsque l'eau est presque complètement évaporée et que la friction atteint son maximum, mais une température censée être supérieure à 600 degrés ne s'accorde guère avec le fait que l'eau est encore en contact intime avec la surface. Le paradoxe s'explique lorsqu'on comprend que l'effet de cisaillement des menues particules de poudre à polir communique aux ions de la surface une énergie de translation suffisante pour qu'ils soient aussi libres de se mouvoir dans la direction du cisaillement qu'avec l'énergie cinétique aléatoire, moyenne correspondant à une température élevée.

Quoiqu'il en soit, il est très facile, avec un feutre et de la potée, de transférer le verre des crêtes dans les creux des irrégularités, et par conséquent de polir le verre. Il est possible, par le polissage, de faire disparaître des creux de 0,02 mm de profondeur et de rendre tous les défauts invisibles. Ce sont ces défauts invisibles qui empêchent le verre poli mécaniquement d'être aussi résistant que le verre poli à la flamme.

Une méthode toute différente est le polissage à l'acide, qui consiste à dissoudre la surface dans une solution d'acide fluorhydrique. Si l'on suit le processus au microscope, on constate que la dissolution commence à partir de noyaux situés à la surface et gagne de proche en proche sur un front sphérique, de sorte que la surface présente comme un pointillé microscopique dont la texture dépend de la densité des noyaux et de la longueur de l'attaque. Ces variables peuvent être si bien contrôlées par la température et l'addition d'acide sulfurique, qu'on arrive à obtenir des finis allant du satiné jusqu'à un poli parfait différant peu de celui qu'on obtient par polissage mécanique. Le polissage à l'acide est largement employé dans la production du cristal taillé, mais convient rarement pour les verres optiques. La surface, tant qu'elle demeure intacte, est plus résistante que celle qu'on obtiendrait par polissage mécanique. La robustesse des ampoules électriques dépolies doit beaucoup à cette action durcissante de l'acide, et comme c'est la surface interne de l'ampoule qui est traitée, l'article conserve indéfiniment sa solidité.

#### Reformage

Le formage primaire, notamment lorsqu'il s'agit de tubes, n'est souvent qu'un premier stade de la production de l'article fini. Parfois l'article est de forme complexe, comme certains appareils de laboratoire, et des opérations complémentaires de formage sont nécessaires, mais le plus souvent il s'agit d'une modification simple de la forme ou de l'assemblage de deux parties d'un appareil. Ce n'est que lorsque les objets sont fabriqués en très grande série (ampoules électriques ou de radio, bouteilles Dewar) que le travail est entièrement mécanisé; même dans ce cas les machines ne font que copier les opérations manuelles. Certaines opérations exigent un reformage si poussé que l'article ou certaines de ses parties, doivent être portés de nouveau à la température de travail initiale. D'autres ne nécessitent qu'un cambrage (pare-brise d'automobile par exemple) et des températures de 700-800 °C sont suffisantes pour que le verre prenne la forme désirée en un temps raisonnable. Si l'on veut une courbure double, une température plus élevée est nécessaire. Et si l'on veut souder deux pièces, des températures d'environ 1200 °C doivent être atteintes car si l'on veut obtenir des transitions lisses d'une pièce à l'autre dans l'article fini, le verre doit être assez fluide pour céder aux tensions de surface. Il est clair que les deux volumes qu'on veut assembler ne peuvent être portés à une température supérieure à celle à laquelle ils perdraient leur forme; la chaleur doit être localisée. La solution adoptée est donc le chauffage à la flamme. Pour des articles de taille assez réduite pour être tenus à la main, l'opération se fait avec une lampe à souder.

Les ouvriers qui travaillent à la lampe sont probablement les plus adroits de tous ceux qu'emploie l'industrie verrière. Les mouvements des deux mains doivent être parfaitement coordonnés; l'ouvrier doit savoir exactement à quel moment faire donner la flamme, à quel

moment permettre à la tension de surface d'agir, et s'il doit laisser la chaleur pénétrer dans le corps du verre ou au contraire se disperser; il doit encore se rappeler, de façon instinctive, les températures de chacune des pièces, sous peine de les voir se déformer ou de voir s'y produire une tension suffisante pour amorcer une fracture en un point éloigné de la partie sur laquelle il travaille.

Les condensateurs et autres appareils de laboratoire ont des homologues industriels qui sont trop lourds pour être travaillés à la main. Des tours remplacent les mains, et des brûleurs se substituent à la simple lampe à souder. Une grande partie de la chaleur produite par les brûleurs étant gaspillée, on les remplace parfois par un système électrique de chauffage dans lequel deux petites flammes d'hydrogène diamétralement opposés projetées à travers des buses de cuivre frappent le tube qui doit être chauffé ou assemblé. Les flammes d'hydrogène ont un effet calorifique direct suffisant pour rendre conductrice une bande circulaire du verre en rotation; un voltage élevé envoyé à travers les buses provoque un arc à travers les flammes d'hydrogène ionisé, et le verre traversé par le courant est chauffé en profondeur par effet Joule.

Si l'on veut faire un scellement entre deux volumes de verre sans que la chaleur risque de les endommager, on peut se servir de verre soudable, sorte de verre très tendre qui ne gêne pas l'expansion thermique des volumes à assembler et qu'on peut écraser et appliquer comme une pâte aux surfaces à joindre. Il se liquéfie à 550-600 °C et s'insinue entre les parties à joindre pour former le scellement. Le verre soudable peut être considéré comme un vitrocérame (chapitre II) qui, une fois céramisé, peut supporter une température plus élevée que la température de cuisson. Cette technique est particulièrement utile, notamment pour raccorder aux écrans de télévision l'embouchure conique des tubes, ce qui évite le problème d'avoir à chauffer uniformément sur un tour le raccord rectangulaire.

Il y a d'autres produits qu'on fabrique à partir du verre broyé. Des particules soigneusement calibrées de verre borosilicaté résistant aux agents chimiques sont placées dans des moules et chauffées à 800 °C jusqu'à obtention de disques poreux de verre fritté utilisés pour la filtration chimique. De même, de la poudre de verre enrobée dans un liant plastique combustible peut être pressée à froid dans un moule approprié, et cuite comme une céramique. Les pièces prémoulées de cette manière sont de dimensions très précises et possèdent exactement les mêmes propriétés physiques que le verre broyé utilisé pour leur préparation. Elles peuvent être intégrées à des structures complexes fabriquées à partir du même verre, ou servir de manchons isolants dans les composants électroniques.

La poudre de verre peut aussi être utilisée pour fabriquer des blocs de verre mousse, (ou cellulaire). On mélange les particules de verre avec un agent gazéifiant, tel que la poussière de carbone, et on chauffe le tout dans un moule grossier jusqu'à la température à laquelle le verre se liquéfie et les gaz se dégagent. Le produit final est un matériau rigide dont le volume se compose, pour plus de 90 %, de vide, c'est-à-dire de bulles piégées qui ne peuvent emprisonner l'humidité. Les blocs ainsi obtenus se laissent facilement découper et râper; on peut donc leur donner n'importe quelle forme. Ils constituent un excellent matériau isolant, notamment aux températures basses où la condensation pourrait nuire au comportement des matériaux isolants perméables.

### Verre trempé

Le verre a un inconvénient : il est fragile, et lorsqu'il se casse, il se divise en fragments dangereux; son emploi est donc sujet à de sérieuses limitations. Bien que les essais puissent indiquer des résistances de l'ordre de 5 à 6 000 psi, il est préférable d'admettre une résistance théorique limitée à 1 000 psi pour donner une marge de sécurité qui tienne compte de l'affaiblissement provoqué par les entailles et les fissures de surface consécutives à un choc. Cependant, il s'agit là d'une valeur indicative destinée à éviter les erreurs grossières, plutôt que d'un coefficient de sécurité au sens où l'entendent les ingénieurs.

La trempe du verre fournit un double moyen de surmonter les divers problèmes que pose ce matériau. En précontrainant le verre par procédé thermique ou procédé chimique, de manière à ce que toutes les surfaces exposées soient mise en état de compression permanent, le verre est immunisé contre des dommages superficiels qui ne pénètrent pas à l'intérieur de la zone de compression. Il en résulte une multiplication par 3 à 5 de la résistance en service. Bien entendu, il s'ensuit une tension de compensation dans l'intérieur du verre, mais il se trouve qu'elle est avantageuse. Lorsqu'il y a pénétration d'une détérioration produite à la surface, le verre trempé se fragmente en une multitude de petits morceaux cubiques dont les arêtes sont beaucoup plus émoussées que celles d'un verre recuit, dont les fragments sont aussi coupants qu'un rasoir. C'est pourquoi le verre trempé est classé parmi les verres de "sécurité". Les résultats du traitement thermique dépendent du succès avec lequel on parvient à obtenir un schéma de compression symétrique. Pour une glace plate, ce schéma est en général parabolique, avec une compression maximum sur les deux surfaces égale au double de la tension provoquée dans la région centrale. La pellicule protectrice est alors de l'ordre d'un sixième de l'épaisseur de la glace.

Nous avons dit au sujet de la cuisson que la tension résiduelle est forte si la température d'entrée est élevée et si le refroidissement subséquent est rapide. La trempe thermique exploite à fond cette situation. La température d'entrée est aussi élevée que le verre pourra le supporter sans se déformer, et le refroidissement est aussi rapide que le verre pourra le tolérer sans se rompre sous l'effet des tensions temporaires engendrées par le refroidissement. En fait, on dépasse légèrement la température de déformation et l'objet présente en général des signes de distorsion ou des marques de pinces. Une température élevée est nécessaire pour garantir qu'une répartition parabolique de la température, et par conséquent un schéma de compression parabolique, s'instaureront avant que le verre ne devienne rigide, à un moment qui se situe entre la température supérieure et la température inférieure de cuisson. Dans ce cas, toutes les parties du verre passeront par la température critique à la même vitesse de refroidissement, et toutes les parties auront les mêmes caractéristiques physiques. Au cas contraire, le verre, à différentes profondeurs, se refroidira à des vitesses différentes, et comme il été dit au chapitre II, les caractéristiques physiques ne seront pas identiques sur toute l'épaisseur. Dans le premier cas, lorsque toutes les parties du verre auront atteint une température uniforme, les différences de température "figées" donneront un schéma de compression qui est une réplique exacte de la répartition des températures. Dans le second, le schéma de compression sera déformé.

Le refroidissement rapide est en général obtenu au moyen de jets d'air soigneusement distribués de manière à assurer un refroidissement uniforme et permettre à l'air échauffé de s'échapper. Des bains liquides de sels fondus ou d'huiles sont parfois aussi utilisés. Ils donnent un schéma de compression légèrement différent parce que le processus de transfert de la chaleur n'est pas le même, et peuvent donner un produit final de meilleure qualité si l'article présente de fortes différences d'épaisseur sans transitions.

A cause du refroidissement rapide, auquel il a été soumis, le verre trempé conserve certaines caractéristiques liées aux températures élevées, et son point de ramollissement est inférieur de 100 °C à celui du verre recuit. Sa température de service la plus élevée est par conséquent d'une centaine de degrés plus basse.

Il existe aussi des procédés chimiques qui permettent de produire une pellicule de compression sur le verre et par conséquent de le durcir. La constitution chimique des couches de surface peut être modifiée soit en remplaçant un alcali par un autre, soit en produisant une conversion du type vitrocéramique dans les couches superficielles. Si l'on plonge une plaque de verre à base de soude et de chaux dans un sel fondu à forte concentration d'un autre ion alcali, on constate qu'un échange d'ions a tendance à se produire et que cet échange est particulièrement actif aux environs du point de trempe. Lorsqu'elles sont refroidies à température ambiante, les couches superficielles sont mises en état de tension selon les différences d'expansion thermique provoquées par le change d'ions. Il s'agit donc de "figer" des différences d'expansion plutôt que des différences de température, comme dans la trempe thermique. On peut obtenir une très forte compression de surface, et par conséquent une très grande résistance, mais la pellicule protectrice est plus mince et moins efficace contre les entailles profondes. Le schéma transversal de tension est bien entendu loin d'être parabolique.

Un autre traitement de surface, souvent adopté pour rendre les bouteilles plus solides, consiste à les recouvrir d'une pellicule superficielle au lieu de renforcer le verre lui-même. Un traitement appliqué à l'extrémité froide du tunnel de cuisson consiste à pulvériser sur le verre une pellicule organique. Cette pellicule se comporte à la manière d'un lubrifiant; les contacts entre les bouteilles risquent donc moins de produire des éraflures. Le traitement appliqué à l'extrémité chaude (revêtement par dépôt de titane) est en général plus efficace à cet égard, probablement parce que la pellicule d'oxyde d'étain constituée à la surface du verre est rigide, et, ayant un coefficient d'expansion thermique moindre, est mise en état de compression et contribue par conséquent à la solidité de l'article. Dans les deux cas, les pellicules sont chimiquement liées au verre, c'est-à-dire que les liaisons oxygène-silicone du verre se prolongent dans la pellicule protectrice, dans le premier cas parce que la pellicule organique est un silicone, et dans le second parce que la liaison SnO est compatible avec la liaison SiO du verre. Dans les deux cas, les pellicules protectrices sont trop minces pour être visible.

### Décoration

Au cours de la période de deux mille ans, marquée par relativement peu d'innovations techniques, qui s'est écoulée entre la découverte du soufflage à la canne et le développement de la technologie moderne, au début de notre siècle, l'art de la décoration du verre a été pratiqué de façon extrêmement variée. Nous voyons donc, et c'est une constatation qui incite à la modestie, que l'homme n'est aujourd'hui pas plus intelligent qu'il ne l'était il y a vingt siècles. Seuls, la somme des connaissances et l'environnement technique ont changé. De nombreux procédés modernes qui n'ont rien à voir avec la décoration sont en fait des adaptations de méthodes anciennes et de pratiques inventées à des fins artistiques. Par exemple, le traitement par dépôt de titane dont nous venons de parler repose en somme sur le fait, parfaitement connu des anciens, qu'on peut donner au verre une irisation permanente aux couleurs de l'arc-en-ciel en l'exposant lorsqu'il est chaud à la vapeur du chlorure d'étain. On voit donc que la décoration est moins une affaire de progrès des techniques que de choix de celles qui sont le plus compatibles avec les idées modernes de production de masse. Nous considérerons ici qu'une seule de ces techniques.

Maintes décorations utilisées pour la poterie manquent de vigueur lorsqu'on les utilise sur un verre transparent; elles ont besoin d'un fond opaque pour produire un contraste satisfaisant. Sur le verre, les couleurs doivent être épaisses et vigoureuses. Elles doivent donner un émail à une température suffisamment basse pour éviter la déformation du verre et, comme elles sont épaisses, il faut que leur coefficient de dilatation à la cuisson soit compatible avec celui du verre. Etant donné que pour fabriquer du verre ordinaire il faut déjà utiliser des matières premières soigneusement sélectionnées sous le rapport de la qualité, du coût et de la facilité de fusion, on conçoit qu'il ne faille pas trop rechercher l'économie si l'on veut obtenir un verre intensément coloré, qui s'émaillera à une température à laquelle le verre-support reste virtuellement rigide. La décoration constituant une très faible partie de l'ensemble, le coût n'importe guère et on peut dans certains cas employer même des métaux précieux tels que l'or ou le platine sans qu'il en résulte de frais excessifs. Mais la stabilité chimique de la décoration, notamment si la cuisson se fait à basse température, est presque toujours sensiblement inférieur à la longévité du verre-support.

La technique avec laquelle il est le plus facile d'appliquer une épaisseur suffisante de couleur est celle de l'écran de soie, utilisé soit directement, soit par le relais d'un papier transfert. Une bouillie ou pâte colorée est appliquée à travers un écran très fin de nylon sombre ou d'acier inoxydable formant pochoir. On presse l'écran contre le verre au moyen d'un rouleau qui sert aussi à faire passer la couleur à travers le pochoir. On retire l'écran et le motif apparaît comme une série de points, que la fusion fera se rejoindre. Si une bouteille doit porter une étiquette vitrifiée, on y fait au moment du soufflage un petit creux qui sert de repère de centrage pour l'étiquetage automatique. Pour éviter d'avoir à attendre que la couleur sèche entre l'application des diverses teintes, on emploie ordinairement aujourd'hui une cire comme support des pigments, et des écrans chauffés. La cire se solidifie sur la bouteille froide et l'on peut immédiatement appliquer la couleur suivante sans qu'il y ait contamination réciproque des teintes.

La cuisson se fait dans un tunnel dont la partie aval est analogue à celle d'un tunnel de recuisson et joue le même rôle. A l'entrée, un compartiment spécial permet de chauffer les bouteilles froides, tout d'abord jusqu'à une température d'environ 400 °C pour faire brûler le support des couleurs, et puis à 580 °C pendant une courte période pour faire fondre l'émail. Si le support organique n'est pas complètement brûlé au cours de la première opération, on se trouvera dans une situation analogue à celle qui a été décrite plus haut à propos de la production du verre mousse, c'est-à-dire qu'il y aura production de bulles décolorées. Si la température de cuisson n'est pas assez élevée, la décoration manquera de brillant et la stabilité chimique s'entrouvera diminuée, la surface étant accrue par son irrégularité.

La préparation et le mélange des couleurs vitrifiables est une technique hautement spécialisée, qu'on laisse normalement aux fournisseurs de couleurs. Mais les écrans de soie sont préparés à la verrerie. On se sert presque exclusivement de méthodes photographiques. L'écran est verni avec un alcool de polyvinyle ou une préparation de gélatine sensibilisée au bichromate, et placé sous lumière ultraviolette au contact d'une épreuve photographique positive. Les zones exposées du vernis - celles où l'épreuve est claire ou incolore - deviennent insolubles à l'eau chaude. Les zones qui ne sont pas exposées - zones sombres du positif - demeureront solubles. Lorsqu'on lave l'écran à l'eau, les zones qui doivent laisser passer la couleur sont lavées pour dissoudre le vernis qui fait écran.

Certains fabricants préparent leurs propres couleurs s'ils ont besoin de teintes très diverses, comme dans l'industrie des cosmétiques. On constate aussi une tendance croissante à employer des couleurs organiques pour les travaux qui n'exigent pas une perfection absolue. Ces couleurs peuvent être cuites à une température beaucoup plus basse (environ 180 °C), ce qui permet d'employer des pigments organiques et des finis métalliques à base de métaux non précieux et de disposer d'une gamme presque illimitée de couleurs.

## VII. CONTROLE DE LA QUALITE ET DEPANNAGE

La qualité du verre proprement dit n'est pas la préoccupation majeure de la plupart des utilisateurs d'articles en verre. L'acheteur de bouteilles par exemple tient à ce que ses récipients contiennent la quantité correcte de liquide; que le bouchon, la capsule achetés à un autre fournisseur s'adaptent bien et que la hauteur, le diamètre et la résistance des bouteilles correspondent aux conditions de fonctionnement de ses machines de remplissage (qui doivent pouvoir supporter des cadences de 500 bouteilles par minute). C'est l'acheteur qui, après tout, a à faire au consommateur final et a envers lui certaines obligations juridiques en ce qui concerne le poids ou la capacité et la robustesse de l'article.

Quant au fabricant de bouteilles, il sait que la précision des moules qui servent au soufflage n'est qu'une petite partie de son problème. Il opère avec un matériau qui, à la différence du métal, n'épouse pas toujours exactement la forme du moule. Le volume dépend aussi du poids de la paraison, qui peut varier, et des déformations qui peuvent se produire lorsque la bouteille est extraite du moule. L'épaisseur des parois, elle aussi, dépend du poids de la paraison, et sa répartition est variable. Même si l'on fabrique des bouteilles à la modeste cadence d'environ 80 unités par minute, il faudrait une armée d'inspecteurs munis de calibres à coulisse pour vérifier les dimensions critiques de chaque bouteille. Il est vrai qu'on peut employer des machines automatiques et électroniques qui peuvent faire très rapidement la plupart de ces mesures mais cela ne résout pas le problème du coût du contrôle : au lieu de payer les salaires d'une troupe d'inspecteurs, il faut investir des capitaux considérables dans l'achat des machines, puis employer un personnel hautement qualifié pour les régler et les entretenir.

Bien entendu, le prix payé par l'acheteur doit couvrir tous les coûts : celui de la fabrication des bouteilles, celui des articles rejetés, et le coût du contrôle. Il a donc intérêt tout d'abord à s'assurer que la précision dimensionnelle qu'il demande n'est pas supérieure à ses besoins réels, et ensuite à accepter, pour le contrôle des dimensions, une méthode qui ne soit pas exagérément coûteuse. Evidemment, si l'on se contente de faire porter le contrôle sur une partie seulement de la production, le coût du contrôle sera réduit de façon proportionnelle. Mais quelle garantie a-t-on alors que ces échantillons seront réellement représentatifs de tout le lots fabriqué ? Et jusqu'à quel point ne court-on pas le risque que, la livraison une fois acceptée, quelques bouteilles mal dimensionnées détériorent la remplisseuse ou se brisent en y passant ? La méthode statistique de contrôle de la qualité répond à ce genre de question.

### Contrôle statistique

Le mot "moyenne", qu'on utilise dans la langue de tous les jours, est en fait un terme strictement défini de statistiques. Dire qu'en moyenne on inscrit 1,8 buts dans chaque rencontre de football a un sens statistique, même s'il est impossible dans une vraie rencontre d'inscrire une fraction de but. L'emploi de ce mot implique que les grandeurs auxquelles on se réfère

dont dispersées ou distribuées d'une façon spécifique de part et d'autre de valeur appelée "moyenne". L'un des termes employés pour caractériser la distribution est l'expression "écart type". Cette valeur est définie de telle sorte qu'elle aussi, comme la moyenne, peut être calculée. Les statisticiens ont découvert que, pourvu que les variations soient dues à des causes aléatoires, la répartition peut être décrite de façon si ces deux valeurs, la moyenne et l'écart type, sont connues.

Pour être plus précis, si, dans une série de mesures qui varient pour des causes aléatoires, on porte sur un axe les valeurs relevées et sur l'autre la fréquence de leur apparition, on obtient une courbe dite normale, ou courbe de Gauss. C'est une courbe en forme de cloche, symétrique de part et d'autre d'une certaine valeur, la moyenne (M). Sa forme ressemble assez à celle de la lettre f en caractères italiques accolée à son image symétrique, les deux f se rejoignant au sommet. La distance horizontale entre le point ou la barre horizontale de l'une des f traverse le tracé vertical de la lettre et A est égal à l'écart type (ET). Si l'écart type est grand, la courbe est ample; si l'écart type est petit, la courbe est resserrée. Mais ce qui est intéressant, c'est que la forme de la courbe est pleinement définie par l'écart type : à partir de l'écart type, il est possible de calculer la probabilité de voir apparaître une valeur donnée dans le groupe de mesures. Il faut donc s'attendre à ce que 16 % de toutes les valeurs se situent au-dessous de  $M - ET$  (et 16 % au-dessus de  $M + ET$ ); 2,3 % au-dessous de  $M - 2ET$  et 0,13 % au-dessous de  $M - 3ET$ , pourvu que les variations soient vraiment dues à des causes aléatoires.

Les statistiques, bien entendu, vont beaucoup plus loin, mais pour les besoins de la présente étude, ce début sera suffisant. En fait, dans bien des cas, il suffit d'appliquer le principe de façon grossière. Supposons par exemple que la densité du verre provenant du four soit mesurée avec précision chaque jour et qu'on reporte sur un axe les valeurs obtenues, et sur l'autre l'échelle des temps. Si les variations sont dues à des causes aléatoires, on obtiendra au bout d'un certain temps une série de points, et ces points seront dispersés autour d'une valeur centrale, sans tendance marquée vers le haut ou vers le bas. A main levée, on peut tracer à travers les points une ligne qui semble représenter la valeur moyenne M. On peut aussi tracer au-dessus et au-dessous de M des lignes entre lesquelles 68 % environ des points se situeront, ce qui en laissera environ 16 % au-dessus de la ligne supérieure et 16 % en-dessous de la ligne inférieure. Ces lignes correspondent alors à  $M + ET$  et à  $M - ET$ . En doublant et triplant l'espacement, on peut aussi tracer des lignes correspondant à  $M \pm 2ET$  et  $M \pm 3ET$ . Le graphique qui en résulte est appelé graphique de contrôle. Tant que les pointages journaliers continuent à se situer principalement entre les lignes 1ET, et parfois entre les lignes 2ET et rarement en dehors d'elles, la fabrication se déroule correctement et il n'est pas nécessaire d'intervenir. Mais si les points s'écartent constamment du centre, c'est le signe qu'un élément non aléatoire est apparu, et des mesures doivent être prises pour établir un diagnostic et remédier au problème. Dans le présent exemple, il peut s'agir d'une défectuosité permanente du système de pesage, d'un changement de la composition de la charge de matières premières, ou d'une perte excessive d'éléments volatils au cours de la fusion. Si les points deviennent plus (ou moins) dispersés, cela signifie qu'un nouveau facteur aléatoire est apparu (ou a disparu); il se peut par exemple que le fonctionnement des machines de pesage soit devenu irrégulier, et qu'elles aient besoin de réparations.

Les graphiques de contrôle sont extrêmement utiles, mais ils ne sont pas une fin en eux-mêmes : ils n'influent en rien sur le fonctionnement des machines. Ils fournissent simplement des informations, en fonction desquelles les mesures peuvent être prises. Incidemment, il faut indiquer sur le graphique et en détail, les mesures prises.

Les ordinateurs électroniques de poche, peu coûteux, capables de faire les calculs statistiques, se sont rapidement répandus. Ils permettent de faire les calculs à l'usine même et, ce qui est essentiel, de déterminer rapidement la signification des variations enregistrées et de prendre immédiatement des mesures correctives où, ce qui n'est pas moins important, d'éviter de modifier le réglage des machines pour tenter en vain de corriger ce qui n'est qu'une variation aléatoire.

La fixation des normes de qualité fondées sur les statistiques est souvent assez arbitraire, et ce ne sont par conséquent pas les meilleurs que l'on puisse adopter dans l'intérêt de tous. Etant donné que la courbe normale n'atteint jamais effectivement le zéro à ses extrémités, il existe toujours une possibilité théorique de laisser passer un article qui, dans des conditions idéales, aurait pu être rejeté. Dans la pratique, la distribution effective, encore qu'assez proche d'une distribution normale pour permettre l'application de règles mathématiques simples, n'a pas de prolongements infinis. Dans la fabrication des bouteilles par exemple, il se produit un certain nombre de rejets automatiques : la machine est incapable de fabriquer des bouteilles présentant des déviations extrêmes par rapport à la moyenne sans les briser.

La spécification doit avoir deux buts : elle doit réduire à un niveau acceptable la probabilité qu'une bouteille anormale atteigne la machine de remplissage, tout en réduisant à un minimum les dimensions de l'échantillon nécessaire pour avoir cette garantie. Par exemple, un fabricant de bouteilles constate qu'en moyenne il a perdu 5 bouteilles sur 1 000 cassées sur les machines de remplissage. Il est donc peu probable qu'il se plaigne si seulement une sur 1 000 des bouteilles qui lui sont livrées risque de se briser. Avec cet objectif (spécification) en vue, en connaissant l'écart type et en utilisant des tables de la courbe normale des erreurs, le fabricant de bouteilles peut déterminer la marge de tolérance à admettre, s'il ne veut par exemple vérifier que 10 % du lot qui doit ne pas contenir plus d'une bouteille défectueuse sur mille. Plus l'échantillon vérifié est réduit, plus les limites de la tolérance doivent être strictes.

#### Information en retour

Le service du contrôle de la qualité n'est pas simplement chargé de surveiller ou de juger la qualité des articles : il joue aussi un rôle de régulation de la qualité de la production. Il est essentiel que le personnel responsable du bon fonctionnement de la chaîne de production soit immédiatement informé lorsqu'une tendance, bonne ou mauvaise, se dessine dans le processus de fabrication. La cuisson et le refroidissement à température ambiante durent environ trois heures. Avec les machines modernes à grande vitesse, cela peut signifier qu'un lot tout entier de peut-être 15 000 articles risque d'être rejeté. Il faut au moins que le poids de la paraison ait été déterminé et que des contrôles par sondages aient été effectués avant que le verre passe dans le four à cuisson.

Il appartient au personnel du contrôle de la qualité de signaler de façon directe, au mépris s'il le faut de la voie hiérarchique, et à quiconque lui semble pouvoir remédier à la situation, toutes les irrégularités constatées. Les rapports en bonne et due forme et l'enregistrement des données sont d'importance secondaire. Ce personnel doit donc apprendre à identifier les défaillances, et établir avec les personnels de la production à tous les échelons des rapports tels, que ses interventions soient considérées comme un service qu'ils rendent et non pas comme une critique. A la tête du service du contrôle de la qualité, on trouve donc un spécialiste des techniques de fabrication, et le directeur de la production ne le supervise pas de façon directe. En général, les personnes chargées du triage font partie du personnel de production parce qu'elles s'occupent aussi souvent de l'emballage des articles. Dans ce cas, le rôle du personnel préposé au contrôle de la qualité ressemble à celui d'un arbitre : il veille au respect des "règles du jeu" c'est-à-dire des normes que doivent appliquer les employés chargés du triage.

Le service du contrôle de la qualité est appuyé par le laboratoire, principalement chargé du contrôle de la qualité en profondeur. De fréquentes analyses des matières premières doivent être faites pour vérifier la stabilité du dosage; il faut en outre déterminer la teneur en humidité des matières premières stockées pour avoir la certitude que le pesage des composants ne sera pas faussé. Des opérations de contrôle simples, en ce qui concerne par exemple la fraction soluble aux acides du mélange préparé indiqueront si des opérations de pesage et de mixage se sont correctement déroulées. Autrefois, la composition du verre fondu était déterminée par l'analyse chimique. Une analyse complète prenait environ 5 jours, ce qui était trop lent pour permettre un contrôle effectif. Les méthodes modernes et rapides ont réhabilité l'analyse chimique comme moyen de déterminer de façon directe les caractéristiques de la composition. Néanmoins, la méthode qui consiste à les déduire à partir de mesures des caractéristiques physiques est encore très répandue à cause de sa rapidité. Puisque c'est aux caractéristiques du verre que l'acheteur s'intéresse plutôt qu'à sa composition, l'emploi de cette méthode de contrôle est assez logique.

Certaines mesures des caractéristiques physiques sont si précises et si faciles à effectuer qu'elles constituent un moyen étonnamment efficace de prévenir les problèmes. Il est par exemple possible de mesurer facilement la densité (ou plus exactement à celle d'un échantillon de référence) avec une précision de 1 pour 100 000, à partir de menus fragments du verre examiné. Cette méthode permet non seulement de déceler toute variation de la composition, mais aussi de mesurer l'homogénéité du verre en soumettant au test de nombreux fragments d'un même article. La densité est déterminée par rapport à celle de l'échantillon type par une méthode de flottation : les fragments sont placés dans un liquide dense dont on accroît la densité par adjonctions successives jusqu'à ce que les fragments atteignent la surface à température ambiante. On chauffe légèrement, et les fragments commencent à plonger à une température qui dépend de leur densité; l'échelle des températures peut être étalonnée en tant qu'échelle des densités. La grande sensibilité de ce test permet souvent de déceler les signes de mauvais fonctionnement longtemps avant que leur cause ait pris des proportions telles que le rejet du lot devienne inévitable.

Un essai qualitatif de sensibilité analogue consiste à examiner la coupe transversale de l'article fini sous lumière polarisée. On découpe une section circulaire comme par exemple le col d'une bouteille avec une meule abrasive, ou en rayant le verre et en détachant la pièce au moyen d'un fil métallique chauffé au rouge. La pièce est plongée dans un liquide d'indice de réfraction correspondant, les irrégularités de la surface sectionnée disparaissent, et si l'on place la pièce entre des pellicules polaroid croisées, les parties non homogènes du verre apparaissent sous forme de bandes alternées claires et sombres. On peut donner au test une valeur grossièrement quantitative en numérotant une série graduée d'échantillons non homogènes.

Le personnel affecté au contrôle de la qualité dans l'usine proprement dite constitue la première ligne de défense contre les difficultés qui peuvent surgir au cours de la fabrication. Lorsqu'il se pose des problèmes qui dépassent sa compétence, il doit faire appel à des techniciens plus expérimentés ou aux experts du laboratoire. Les problèmes sont souvent liés au bris d'articles. Le diagnostic que ces experts peuvent formuler à ce sujet joue un grand rôle dans la recherche d'une solution.

#### Diagnostic des fractures

Il est presque toujours possible de situer le point d'origine d'une fracture, pourvu que tous les fragments de l'article brisé aient été conservés pour examen. On peut aussi détecter l'état de tension existant au moment où le bris s'est produit, ce qui permet de déterminer la raison de l'accident.

Le diagnostic des fractures est assez facile pour trois raisons. Tout d'abord, la résistance du verre est suffisante pour que la possibilité qu'il cède instantanément à partir de plusieurs points à la fois, sous des tensions normales, soit pratiquement nulle; il faut des tensions extrêmement élevées pour que cela se produise. Ensuite, le verre étant amorphe à l'échelle submicroscopique, toute anomalie constatée sur l'arête des fragments ne peut être imputée qu'aux tensions existant dans le verre au moment où la cassure s'est produite à cet endroit. Enfin, la vitesse maximum de propagation d'une cassure est égale au tiers de la vitesse de propagation du son dans le verre. Pour que cette vitesse maximum soit atteinte, il faut que la tension, à l'extrémité de la cassure, soit extrêmement élevée.

Considérons d'abord ce dernier principe. On comprendra aisément que la tension à l'extrémité de la cassure dépend de la longueur de celle-ci, puisque toute la tension initialement supportée par le verre de part et d'autre de la ligne de fissuration avant la fracture se concentre à l'extrémité une fois que la fracture s'est produite; en deçà de l'extrémité, le verre est séparé par la cassure et ne subit plus de tension. Par conséquent, une cassure tend à s'accélérer à mesure qu'elle s'allonge. Cependant, comme la vitesse finale est limitée, mais que l'intensification de la tension en raison de la longueur croissante ne l'est pas, il vient un moment où le premier principe cesse de s'appliquer. La fracture multiple est alors possible, et la cassure se divise en trois ou quatre branches, ou davantage. Cette division donne à la cassure une structure caractéristique des types de tension existant au moment où elle s'est produite, et le chemin parcouru avant que le fourchement se produise est en raison inverse de la force de la tension qui a provoqué la fracture.

Supposons par exemple qu'une bouteille cylindrique dont la résistance est amoindrie par une profonde entaille latérale, soit soumise à une pression interne suffisante pour la faire éclater. Cette pression tend à fendre la bouteille d'un bout à l'autre. L'entaille intensifie la tension localement, mais peut n'être pas exactement parallèle à l'axe. Par conséquent, la première cassure se produit à partir de l'entaille, d'où elle gagne vers le haut et vers le bas, et tend à devenir parallèle à l'axe dès qu'elle échappe à l'influence déviatrice de l'entaille, mais bientôt la tension aux deux extrémités devient si forte que la cassure se divise au sommet et à la base pour former comme des pointes de flèche, qui renvoient au point d'origine. Celui-ci se situera à mi-chemin environ de ces deux pointes, et se reconnaît à un rentrant au point où le réalignement s'est amorcé. Le fourchement primaire peut être suivi par un fourchement secondaire, mais quelques-unes des branches subsidiaires peuvent s'arrêter brusquement lorsque la pression se relâche. La cassure peut aussi être complexe à cause de la forme de la bouteille.

Supposons maintenant, pour donner un deuxième exemple, qu'une bouteille identique, sans être soumise à une pression intérieure, reçoive un coup de marteau sur le côté. La tension qui en résulte est extrêmement forte et localisée. Les cassures se divisent et se subdivisent à l'intérieur d'une zone écrasée par la pénétration du marteau, de sorte que le tout ressemble à une étoile centrale d'où rayonnent une multitude de fêlures. La cassure, dans ce cas également, devient complexe à cause de la forme de la bouteille et parce que les fêlures interfèrent les unes avec les autres lorsqu'elles se rencontrent en faisant le tour de la bouteille.

En réunissant les fragments d'une bouteille brisée, on arrive en général à reconstituer la configuration de la cassure, à en déterminer l'origine et par conséquent la raison de l'accident. Dans les deux exemples que nous venons de donner, ce sont des forces extérieures qui ont provoqué le bris. Lorsqu'il s'agit d'une cause d'origine thermique, la situation est différente parce qu'à chaque tension thermique doit correspondre une tension compensatrice dans un autre endroit, et à mesure qu'une fissure progresse, toute la répartition des tensions se modifie dans tout le corps de la bouteille. Par conséquent, le système de fissuration suit au début un modèle imposé, mais se met ensuite à décrire des méandres sous l'effet des variations de la répartition des tensions. Des fourchements peuvent apparaître, mais il y a peu de chances qu'ils soient symétriques par rapport au point d'origine, parce que la forme de la bouteille n'est pas symétrique par rapport à ce point. D'autre part, la rapidité de propagation demeure en général faible, parce que la fêlure relâche la tension à mesure qu'elle progresse, ce qui contrebalance en partie la tendance de la tension à s'intensifier vers l'extrémité de la fêlure. L'origine de la cassure est en général difficile à trouver, c'est pourquoi on est la plupart du temps obligé d'appliquer le second principe et d'étudier la configuration des arêtes.

L'étude attentive des arêtes des fragments du verre brisé fournit une moisson d'indications. Une fêlure progresse précédée d'un bord d'attaque convexe. Si pour une raison quelconque elle hésite, il est à peu près certain que la répartition des tensions aura changé légèrement dans l'intervalle, et quand la fêlure reprendra sa progression, elle le fera dans une direction légèrement différente, laissant une trace de son hésitation sous forme d'une

saillie incurvée indiquant la direction précédemment suivie. Si en raison de la forme de l'article, ou parce qu'il a subi un effort de torsion pendant le bris, le plan de la cassure a eu tendance à se déformer, il en résulte des marques en forme d'éventail, orientées dans le sens de la progression. Elles révèlent deux tendances concurrentes : l'une à rester dans un certain plan, et l'autre à céder à la torsion. L'éventail est lui aussi un indicateur de direction.

Si la "casse" s'est accompagnée de bruit, des ondes sonores se sont propagées dans le verre d'avant en arrière et d'arrière en avant pendant que la fêlure progressait, et celle-ci en gardera les traces sous forme de séries de minuscules rides qui en marquent les arêtes. Observées à la loupe sous lumière rasante, ces ondulations indiquent le sens dans lequel la fissuration s'est propagée, de la même manière que les "marques d'hésitation" susmentionnées.

Il y a donc comme des "panneaux indicateurs" sur les arêtes d'un article brisé. Si, à partir de ces signes, on marque des flèches sur les arêtes de chaque fragment, et qu'on reconstitue l'objet brisé, on constatera que tout le système de fractures a son origine en un seul et même point. Ce point d'origine lui-même peut être presque impossible à distinguer si la rupture a été provoquée par une tension anormalement faible, mais il y aura en général une saillie, parce qu'il est peu probable que le défaut où la cassure a commencé se soit trouvé exactement dans l'alignement de la tension maximum, et qu'un certain réalignement a donc été nécessaire. Mais, souvent, la zone d'origine est très identifiable et apparaît comme une aire lisse comme un miroir et entourée de marques en forme de coquille, qui sont en fait des "marques d'hésitation" orientées vers l'origine. Un examen microscopique révélera en général quelque défaut à cet endroit. Les fragments "concordants" devant avoir des marques correspondantes, leur examen fournit des indices confirmateurs.

Parfois, la zone lisse où se trouve le point d'origine est entourée par une zone "grise", qui semble avoir été légèrement dépolie, et au-delà de laquelle peut se trouver une zone endommagée, dont des éclats se sont détachés. La zone grise indique que la tension locale a été très forte qu'il y a eu une tendance latente au fourchement; en fait, les éclats en sont la conséquence. Si la zone grise est proche du vrai point d'origine, cela veut dire que la tension initiale était très forte, puisque la faible dimension de l'aire lisse prouve que l'intensification de la tension, ne peut pas avoir été très marquée. C'est une source de renseignements sur l'état de tension au moment de l'accident. Nous en avons déjà mentionné deux autres, à savoir que la torsion tend à produire des marques en éventail, et, si elle est forte, des éclats; et que les ondes élastiques ou sonores laissent des marques (rides) dont la dimension dépend de l'amplitude des ondes.

Etre capable de formuler un bon diagnostic en matière de fractures est un avantage énorme lorsqu'il s'agit de déterminer les causes de mauvais fonctionnement, mais il y faut de l'expérience, et l'acquérir avant que les difficultés surgissent. Fort heureusement, l'expérimentation est facile, et l'étude des fractures est un sujet passionnant.

### VIII. VIABILITE DE LA FABRICATION DU VERRE

La fabrication moderne du verre par des machines automatiques représente une industrie à forte intensité de car·taux dont la viabilité repose sur une production importante. Toutefois, dans les verreries où les machines ont un bon réglage, un pourcentage de déchets d'environ 10 % est normal, de sorte que de toute évidence, la réussite exige un haut degré de compétence, d'expérience et de savoir-faire; la viabilité risque d'être perdue aussi facilement par l'absence de ces éléments que par l'inaptitude d'atteindre la production envisagée à cause d'une demande insuffisante. Pour le rendement, un objectif de quelque 60 % la première année, atteignant 90 % la troisième paraît raisonnable et correspondra probablement au temps nécessaire pour pénétrer sur le marché, mais cela exigera un notable fonds de roulement au cours de cette période.

D'ordinaire, on propose aux pays en développement de créer une industrie de fabrication du verre afin de remplacer les importations de verrerie et par conséquent, en théorie, on connaît la demande par les statistiques douanières. Dans la pratique, toutefois, on ignore le degré de pénétration du marché auquel on doit s'attendre, à moins que l'industrie ne soit protégée par des barrières douanières au moins au cours des premiers stades de développement. Mais, dans ce cas, on ne peut recourir à l'exportation pour accroître la demande; en effet l'industrie se développe rarement au-delà des premiers stades atteints, les prix demeurent élevés et la qualité tend à rester médiocre. Il est très difficile de prévoir la tendance des marchés au cours des trois premières années consacrées à la mise en place de l'industrie ainsi qu'après, car la création de l'industrie elle-même peut avoir un effet notable sur cette évolution. Si le projet est vraiment viable, on pourra vraisemblablement créer des marchés éventuels, parce que le verre sera disponible sur place, mais au cas où l'industrie n'a qu'une viabilité apparente à cause des barrières douanières, on risque d'obtenir l'effet contraire en incitant, par exemple, les acheteurs de bouteilles à employer d'autres récipients, comme les boîtes métalliques et les plastiques.

On croit généralement pouvoir régler le problème de l'aptitude et du savoir-faire en réalisant le projet par un appel d'offres clefs en main. Pour beaucoup de raisons, cette méthode implique une dépense en capital disproportionnée et des coûts de production élevés pour les postes relatifs aux biens d'équipement, comme l'amortissement et l'intérêt. En outre, avec la meilleure volonté possible, le fournisseur d'une usine livrée clefs en main ne peut faire plus que d'offrir une formation dans des usines étrangères d'un bon renom, où les choses vont rarement mal et où les stagiaires acquièrent à tort une confiance tout à fait insuffisante pour surmonter les épineuses difficultés qu'ils pourront éprouver dans le milieu très différent où se trouvera leur usine.

Une solution plus satisfaisante consiste à inviter des verriers étrangers à participer à l'entreprise, car ceux-ci pourront aussi fournir du savoir-faire sur une base continue. Toutefois, d'ordinaire des participants de ce genre ne sont pas désintéressés et peuvent exercer une influence qui ne correspondra pas à l'intérêt bien compris de

l'industrie locale. En outre, ils auront naturellement tendance à recourir à une technologie fondée sur la pratique qu'ils emploient chez eux afin de rendre le transfert d'informations plus facile; or, leur technologie peut ne pas être celle qui convient le mieux au pays en développement, ce qui condamnera peut-être l'industrie locale à rester indéfiniment dans un état de subordination.

Quand il existe un marché important, on peut juger assez facilement la rentabilité possible de l'exploitation d'une verrerie envisagée, et faire une étude assez superficielle. Mais dès le moment où la viabilité de l'exploitation est en cause, une étude plus approfondie s'impose, mais il reste une certaine liberté de choix du point de vue de l'ampleur des activités envisagées. Si, toutefois, comme c'est d'ordinaire le cas dans les pays en développement, le marché est limité, l'étude de faisabilité présentera plus de difficultés et exigera l'établissement d'un avant-projet d'exploitation viable. En raison de l'importance du volume, et parfois pour des raisons de prestige politique, on a tendance à faire des estimations optimistes des tendances futures et même d'inclure des produits incompatibles, comme des récipients et du verre à vitres pour gonfler le volume. Cette méthode, qui est pleine de risques, a souvent été suivie; elle est encouragée, semble-t-il, par le fait curieux qu'il est plus facile d'emprunter de grosses sommes d'argent que des petites.

Une autre formule, moins prestigieuse, consiste à s'efforcer de réaliser une exploitation moins importante, mais vraiment viable, en écartant, s'il est nécessaire, les parties du marché qui sont gênantes, et en adoptant, le cas échéant, une technologie plus classique afin de tirer tout le parti possible de la situation. Dès le moment, où, dans un pays, fonctionne une verrerie viable, elle peut constituer une tête de pont pour développer cette industrie. Il est possible de justifier un par un les stades successifs, tout en obtenant une plus grande certitude de réussite et en ayant un savoir-faire interne qui soit disponible. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle exige une étude beaucoup plus importante aux stades de la planification. Les planificateurs doivent aussi suivre au stade final la mise en route parce qu'il est peu probable qu'un fournisseur clefs en main ou un participant étranger acceptent la technologie et les méthodes employées. Il faut aussi engager au préalable certaines dépenses que le projet aboutisse ou non : ces dépenses concernent les honoraires du consultant et le traitement du personnel recruté pour l'aider. Ce personnel, qui constituera les futurs cadres, bénéficiera évidemment beaucoup de l'expérience.

D'après les chiffres de la consommation par habitant qui figurent au chapitre I, la branche de l'industrie vraisemblablement la plus viable dans un pays en développement est la fabrication de récipients et c'est elle qui doit donc nous servir le mieux à illustrer les trois stades de l'élaboration d'une proposition :

- a) Etude de préaisabilité afin de déterminer si une étude détaillée se justifie;
- b) Etude de faisabilité pour déterminer le meilleur choix à faire pour le produit et la technologie, pour faire une estimation de la viabilité du projet et pour établir les règles de base des appels d'offres;

- c) Préparation des documents relatifs à l'appel d'offres. Dans le cas des appels d'offres "clefs en main", il convient de spécifier et définir la technologie et de stipuler les conditions juridiques seulement dans la mesure nécessaire pour avoir la certitude que les offres sont comparables, laissant au soumissionnaire une marge suffisante pour qu'il puisse recommander ses propres solutions au sujet de la fabrication de produits déterminés. Quand on n'envisage pas une livraison clefs en main, la technologie doit être élaborée de façon suffisamment détaillée pour pouvoir obtenir des offres pour tel ou tel matériel et telle ou telle partie de l'usine. Dans ce cas, il convient d'établir un plan provisoire de production pour tirer le meilleur parti possible du matériel et de la main-d'oeuvre.

La comparaison des soumissions et une nouvelle évaluation du projet en fonction des offres fermes ne devraient pas se traduire par plus qu'un remaniement mineur. Néanmoins, selon toute probabilité, on doit pouvoir faire de notables économies dans les dépenses en capital, à condition d'exploiter toutes les aptitudes qui existent déjà dans le pays, ce qui peut obliger le consultant à établir des directives détaillées.

#### Echelle des activités

Les dimensions du marché et, par conséquent, l'échelle des activités à examiner a plus d'un aspect que celui dont nous avons mentionné l'importance, c'est-à-dire l'incidence du volume de production qui est nécessaire pour absorber les coûts fixes. S'il y a besoin de plusieurs séries de production, on peut établir un plan de fabrication visant à rendre la charge au four assez constante; un four conçu pour la capacité désirée fournira une fusion économique. Mais, s'il ne faut qu'une seule machine afin de mettre en forme la production nécessaire pour faire face à l'intégralité de la demande, l'efficacité de la fusion sera très faible quand on fabriquera des articles légers, et toute panne arrêtera complètement la production. Dans ce cas encore, on a besoin de disposer de la plupart des biens d'équipement quelle que soit l'échelle des activités, et si celles-ci se font à une échelle réduite, le prix de revient sera exagérément élevé. De même, le personnel et la main-d'oeuvre nécessaires reviennent relativement plus cher pour des activités à petite échelle. Il importe aussi de tenir compte d'une autre considération, à savoir l'importance des commandes individuelles; une série exécutée sur des machines automatiques doit durer assez longtemps pour absorber le temps consacré au réglage des machines.

Il semble donc que si l'on cherche à réduire dans une verrerie classique l'échelle des activités, la limite ne doit absolument pas être inférieure à l'installation d'un four et de deux machines. Pour la fabrication tant de récipients en verre que de verre à vitres, cette liste correspond à une production annuelle d'environ 10 000 t, soit 30 t/j. Avec un chiffre plutôt optimiste de consommation annuelle par habitant de 10 kg de récipients en verre et 2 kg de verre à vitres (voir chapitre I), ces usines auront besoin pour les soutenir d'une population d'un million à cinq millions d'habitants.

Si le marché est beaucoup plus important, on pourra faire facilement une évaluation préliminaire en adoptant les méthodes habituellement employées par l'économiste. Celui-ci peut se fonder sur une technologie classique et, ainsi, ne tenir que peu compte des détails technologiques. Dans le cas, toutefois, où l'évaluation fait apparaître seulement une fiabilité marginale, la base de calcul doit être examinée par un spécialiste, parce qu'il n'est pas certain que la technologie employée par les pays industrialisés soit celle qui convienne le mieux à des pays en développement. Après tout, l'industrie du verre a commencé par de petites entreprises, et même encore aujourd'hui certaines petites fabriques de bouteilles fonctionnent dans de bonnes conditions malgré la concurrence des grandes entreprises parce qu'elles font très attention aux prix de revient et qu'elles choisissent l'article à fabriquer.

Il y a peu de marge dans le cas de la fabrication du verre à vitres mais, pour les récipients en verre, il y a une possibilité de sortir du classique et peut-être de concevoir une exploitation viable quand, à première vue, cela paraît impossible. L'évaluation de la viabilité devient alors une opération complexe : elle consiste à rechercher la meilleure technologie en fonction de la gamme de la demande du marché.

#### Gamme, tendance et pénétration du marché

On trouve rarement dans les statistiques douanières des renseignements sur la taille, la forme et la couleur des récipients ou sur le nombre des commandes individuelles. Un renseignement de ce genre qui concerne la gamme du marché a beaucoup d'importance quand il s'agit d'une production automatique; non seulement les commandes inférieures au minimum économique doivent être refusées, mais le volume total de chaque couleur doit être suffisant pour justifier, par exemple, une perte d'une semaine de production lors du changement de couleur du verre qui se trouve dans le four.

Fort heureusement, les importations de bouteilles sont consignées en grande partie à relativement peu d'entreprises d'embouteillage, et cette partie de la gamme est facile à établir. Il arrive d'ordinaire qu'un pays qui, jusqu'à présent, a été dépourvu d'un fournisseur local importe une plus grande variété de formes et de tailles qu'il est nécessaire, parce qu'il y a la possibilité d'étendre son choix au monde entier. Il faut donc déterminer les perspectives qu'offre un certain degré de normalisation, et évaluer la tendance probable de la demande future.

Il est beaucoup plus difficile de chiffrer la demande dans le cas des petites bouteilles et des bocaux d'usages divers ainsi que des gobelets et des articles de table que la verrerie envisagée pourrait fabriquer. Les ventes se font généralement par des agents des fabricants, et la gamme et le volume dépendent des qualités de vendeur de ces derniers. La meilleure politique à adopter, en dernière analyse, au sujet de cette partie du marché consiste probablement à tenter de s'y insérer en choisissant son terrain plutôt que de reproduire une collection article par article, à prévoir des articles compatibles avec le matériel installé et à y faire son propre chemin en étant concurrentiel sur le prix. C'est, en tout cas, ce qu'il faut avoir présent à l'esprit au cours de l'étude de marché.

Pour ce qui est de cette dernière, la meilleure façon consiste à interroger directement les gens plutôt que leur adresser des questionnaires par la poste. Il est en effet possible par un interrogatoire direct d'évaluer immédiatement le poids qui peut être attaché à une opinion ou à une prévision, tandis que sans contact direct on risque de se tromper. La réussite de l'enquête dépendra beaucoup de l'enthousiasme, ou du manque d'enthousiasme, manifesté pour la verrerie envisagée. Les enthousiastes verront la possibilité de faire des économies sur leur prix de revient en étant livrés dans de meilleures conditions, en pouvant réduire leur stock, etc.; ils seront donc exagérément optimistes dans leurs prévisions. Les pessimistes craindront qu'une verrerie locale fasse monter les prix par suite de la perception de droits de douans.

Comme la réussite de l'entreprise peut dépendre de l'échelle de l'entreprise il importe d'établir des prévisions précises. Malheureusement, celles-ci risquent d'être très incertaines et, dans ces conditions, il convient d'en évaluer l'incertitude. Les opinions exprimées dans l'enquête de marché fournissent une estimation. L'étude des tendances des importations antérieures, si inégales soient-elles, en donne une autre. On en trouvera encore d'autres en examinant les tendances du produit intérieur brut ou celles du revenu par habitant. Dans les pays en développement, le taux de croissance de la consommation de verre s'établit souvent autour de 10 %. Ce point a son importance car il faut deux ans pour réaliser le projet et trois de plus pour qu'il arrive à maturité. Sur la base de cette estimation du taux de croissance, convient-il de prévoir une verrerie capable d'alimenter 160 % du marché pénétrable actuellement, avec le risque d'immobiliser des capitaux improductifs ? Ou bien doit-on concevoir une entreprise sur des bases plus modestes, en fixant une limite à la production quelle que soit la croissance de la demande ? Il s'agit là de questions complexes, et il faut connaître la prévision de volume maximale et minimale pour pouvoir y répondre.

Dans le cas du verre à vitres, la gamme ne concerne pas seulement les épaisseurs utiles, mais aussi les qualités nécessaires pour satisfaire la demande du marché. Pour la fabrication des miroirs et des verres de sécurité laminés, par exemple, le verre doit être exempt de défauts optiques tels que bulles, rides, ondulations, etc. La perfection étant difficile à atteindre, c'est surtout par sélection qu'on procède pour obtenir les qualités supérieures, et s'il y a trop d'écart entre les qualités demandées et les qualités produites, il y aura surproduction pour les qualités inférieures, et sous-production pour les qualités inférieures.

Il importe de connaître les dimensions des rectangles les plus demandés pour pouvoir découper le plus économiquement possible la feuille de verre sortie de la machine. Plus cette feuille est large, plus il sera facile d'optimiser la découpe. Certaines grandes usines se servent d'ordinateurs pour analyser les commandes et régler automatiquement l'opération de manière à tirer le meilleur parti possible de feuilles de grandes dimensions. Les petites usines disposent rarement de tels moyens, et il est important que la largeur des feuilles (après sectionnement des bords) soit un multiple des largeurs ou longueurs communément demandées. Dans la pratique, la proportion des déchets résultant de la découpe est de l'ordre de 30 %.

### Optimisation de la technologie

Une verrerie installée dans un pays en développement ne bénéficie au départ que de peu d'avantages, et doit les utiliser au maximum pour soutenir la concurrence avec les usines des pays industrialisés, où l'on dispose de vastes débouchés, de personnels très compétents, et d'une longue expérience de la fabrication. Le coût des bouteilles importées, sortie d'usine, est souvent inférieur de 20 % au prix c.a.f. en raison des frais de manutention dans les ports, des bris, etc. mais les mêmes facteurs grèvent le coût du matériel importé. On considère souvent comme un gros avantage le fait de pouvoir s'approvisionner sur place en sable pour la fabrication, puisque le sable entre pour 70 % dans le poids total des matières premières utilisées. Mais il ne représente que 10 % de leur valeur, et s'il faut le purifier avant usage, son coût final peut ne guère différer de celui du sable importé.

Les coûts de main-d'oeuvre (si on l'utilise de façon rationnelle) sont en général moindres dans les pays en développement. Les possibilités d'optimisation dépendent pour beaucoup de la bonne utilisation de la main-d'oeuvre. Employer deux personnes pour faire le travail d'une seule est particulièrement contre-indiqué dans l'industrie du verre, où "trop de cuisiniers gâtent la sauce". Avant de chercher à comprimer les coûts de fonctionnement en employant plus de main-d'oeuvre et moins de capitaux que n'en exige une entreprise normale, on doit se demander si une formation pourra donner des résultats, et si la direction pourra faire valoir son point de vue en cas de réactions négatives. Etant donné que les investissements entraînent des charges qu'on peut évaluer, grosso modo, à 30 % des sommes investies (10 % pour l'amortissement, 10 % pour l'entretien, et autant pour les intérêts) il semble qu'on puisse dépenser jusqu'à 10 000 dollars en machines pour remplacer un ouvrier dont l'entretien, formation comprise, revient à 3 000 dollars par an. Bien entendu, on ne peut tenir ce raisonnement que pour des tâches répétitives, pour lesquelles une machine fonctionnant 24 heures sur 24 peut remplacer deux ou trois ouvriers. Mais si une machine n'est pas utilisée à plein, l'embauchage d'un ouvrier - qui peut être affecté à diverses tâches - est un investissement bien plus rentable.

Le problème du remplacement de la main-d'oeuvre par des machines se pose particulièrement dans les cas où l'échelle d'exploitation se situe à la limite du rentable. De façon générale, lorsqu'une industrie se lance, les syndicats acceptent l'idée, et si l'on s'entend à l'avance, il n'y aura pas de problèmes. Un homme employé au "cueillage" manuel peut-être transféré au collage des étiquettes lorsqu'on n'a pas besoin de sa présence au four.

Savoir maximiser l'utilisation de la main-d'oeuvre, c'est aussi pouvoir optimiser celle des capitaux, et par conséquent le rendement de toute l'usine. Prenons par exemple le cas où la demande est tout juste suffisante pour justifier l'emploi d'une machine à fabriquer des bouteilles, au lieu des deux considérées comme nécessaires pour assurer la viabilité d'une usine normale.

La composition de la demande est à peu près la même dans tous les pays : principalement des bouteilles pour les boissons gazeuses et la bière, ou pour vins et alcools. Leurs poids varient de 300 à 750 g, avec des extrêmes de 50 et 1 000 g. L'alimentation d'une machine à quatre sections exigerait la fusion de 3,6 à 28 tonnes de verre par jour selon le type de

bouteilles fabriquées, et un four capable de fournir ces 28 tonnes ne fonctionnerait qu'à 13 % de sa capacité pour la fabrication des bouteilles du plus petit modèle. Le rendement de la fusion et le taux d'utilisation du four seraient tous deux faibles. Supposons que l'on exclue les extrêmes (50 g et 1 000 g) de la fabrication automatique. On pourrait alors se contenter d'une capacité de fusion de 24 t/j pour les bouteilles de 750 g, et pour les bouteilles de 300 g, le four serait encore exploité à 60 % de sa capacité.

Supposons maintenant que le four soit équipé pour le "cueillage" manuel, et que les formats extrêmes soient fabriqués sur des machines semi-automatiques lorsque la capacité excédentaire de fusion le permet. Le taux d'utilisation peut être amené à presque 100 % à tout moment, et les économies réalisées compenseront probablement la productivité plus faible de la fabrication semi-automatique, pourvu que les équipes de cueillage manuel puissent être employées utilement lorsque leur présence au four n'est pas nécessaire.

D'autres variations, par rapport aux techniques habituelles, peuvent aider à rentabiliser une exploitation à petite échelle. Les fours exclusivement électriques sont très efficaces, mais les pays industrialisés les emploient peu à cause du coût de l'énergie électrique, et la production y est axée sur l'emploi de combustibles bon marché et de fours de grande capacité. En fait, comme nous l'avons montré au chapitre IV, on peut considérer que les fours électriques peuvent être plus rentables que les autres pour des capacités inférieures à 15-30 t/j, selon le coût des combustibles. Pour les petites verreries, le four électrique peut être plus économique tant à installer qu'à exploiter; il est en outre, d'emploi plus souple puisqu'il permet de passer rapidement d'une couleur à une autre, et de proportionner la consommation de courant à la quantité de verre à fondre. Sans doute, c'est une technique nouvelle avec laquelle il faut se familiariser, mais les ingénieurs électriciens sont faciles à recruter.

Le choix entre un four exclusivement électrique et un four au mazout ou au charbon est avant tout affaire de confiance dans la demande future. Un four électrique est plus petit, dure moins longtemps, exige peu de constructions spéciales, et peut être d'une dimension correspondant aux besoins immédiats. On peut aussi l'agrandir si nécessaire. Au contraire, la construction d'un four classique muni de régénérateurs est une grosse affaire, et pour l'agrandir on est pratiquement obligé de le reconstruire. On est donc forcé de se placer dans une optique à long terme et de sous-utiliser la capacité à court terme, en supportant la charge d'une immobilisation improductive en vue de la rentabilité finale.

On verra que pour rendre viable une exploitation de type marginal, le meilleur moyen est de réduire les charges d'immobilisation en utilisant au maximum les installations. Au début d'un projet de grande envergure, on a tendance à engager des dépenses pour des acquisitions qui ne sont pas indispensables par crainte de ne pouvoir en financer l'achat ultérieur s'il s'avérait nécessaire, ou parce que l'on suit aveuglément les conseils intéressés d'un fournisseur d'équipement. Il existe de nombreux exemples d'usines "de luxe" construites dans les pays en développement, qui ne pourront devenir viables que si les propriétaires ramènent leurs dépenses d'investissement à un niveau raisonnable, s'ils épongent leurs pertes accumulées, et s'ils reconnaissent que ce qui fait la valeur d'une usine, c'est ce qu'elle produit, et non pas ce qu'elle a coûté.

### Personnel d'une petite verrerie

Il est bon de se rappeler que la plupart des conseils des manuels de gestion et d'administration sont à l'usage des grandes usines (industrie mécanique en général) si complexes qu'il est difficile d'y obtenir une vue d'ensemble de la situation. Il serait illogique de se contenter d'utiliser les mêmes organigrammes, simplement en réduisant l'échelle. Dans une petite entreprise, le personnel peut de lui-même s'organiser en équipe, et l'on peut se passer des descriptions de postes détaillées, de la voie hiérarchique et de la division en départements qui sont de rigueur dans les grandes unités de production. Sa structure doit ressembler à celle d'une équipe de football, avec des aires de responsabilité clairement définies, mais avec des rôles qui peuvent à tout moment se chevaucher et s'imbriquer selon les nécessités du jeu. L'effectif est alors déterminé d'après le travail à faire, et non pour s'offrir une gamme complète de spécialistes; en effet, un spécialiste peut rapidement apprendre à déborder le cadre de sa spécialisation.

De même, les systèmes de contrôle administratif ou budgétaire et les systèmes d'établissement des coûts ont été prévus pour des organisations importantes et comportent souvent des aspects peu réalistes, qui ne sont acceptables que parce que l'ordre de grandeur impose un certain degré de simplification arbitraire. Appliqués tels quels à des unités de petite taille, ils ne servent guère qu'à brouiller les cartes. Leur seul intérêt est peut-être de servir à présenter un bilan mensuel à quelque instance supérieure responsable des décisions. Mais sauf pour ce qui est des grandes orientations, le conseil d'administration n'exerce pas d'action directe, et en ce cas ces systèmes ne servent plus à contrôler, mais à enregistrer les résultats obtenus; ils sont irritants et souvent nuisibles au moral et au travail d'équipe.

Dans une petite entreprise, la direction n'a aucune peine à avoir une vue d'ensemble, et tout système de contrôle doit être conçu pour renseigner ceux qui peuvent exercer un contrôle effectif, de façon qu'ils soient les premiers, et non les derniers, à recevoir les données relatives au fonctionnement. Plus l'indicateur de résultats est simple, mieux cela vaut. La plupart des coûts étant fixes et pouvant être rapportés aux prestations des divers services en fonction du temps, il n'est en général pas difficile de donner sur le fonctionnement des renseignements à la fois réalistes et utiles au responsable. Les mêmes chiffres peuvent ensuite être repris sous une autre forme pour être présentés à l'organe directeur.

Dans les pays en développement, il est relativement facile de trouver un personnel ayant la formation théorique voulue; ce qui manque plutôt, c'est l'expérience pratique, et les candidats qu'on recrute ont tendance, au lieu de s'adapter aux structures existantes, à vouloir les adapter aux schémas appris au cours de leurs études.

Ce dont on a besoin, c'est de cadres qui fassent le contraire et qui sachent étudier les besoins de l'organisme qu'ils servent, et trouver le système qui lui convient le mieux, même si une partie de leur formation théorique doit demeurer inutilisée.

IX. RAPPORTS ENTRE LA DISTRIBUTION DES COUTS ET LES TENDANCES  
DANS L'INDUSTRIE DES RECIPIENTS EN VERRE

Nous avons vu au chapitre premier que le prix nominal des bouteilles était resté remarquablement stable depuis les temps de la fabrication manuelle, bien que la monnaie ait entre temps perdu une grande partie de sa valeur réelle. Malheureusement, cette stabilité ne durera pas, parce que la plupart des possibilités d'absorber les hausses des coûts de production ont déjà été exploitées. Le fait que l'industrie du verre était forte consommatrice de matières premières naturelles a été un facteur stabilisant, mais comme ce sont maintenant des produits d'origine industrielle principalement le carbonate de sodium - qui dominent dans les coûts de fabrication (environ 70 % du coût total) ces coûts ne peuvent évidemment échapper à la tendance inflationniste générale. Les procédés de formage sont maintenant presque intégralement automatisés, et le rendement de la fusion a été amélioré de façon décisive par l'utilisation de nouveaux réfractaires qui permettent d'obtenir une meilleure isolation thermique des fours, comme nous l'avons vu au chapitre V.

En examinant sous divers angles la structure des coûts d'une verrerie, on peut se faire une idée des tendances probables. Les coûts et leur répartition varient selon les pays et d'une usine à une autre; néanmoins, les pourcentages indiqués aux tableaux 15 et 16 semblent raisonnables pour une petite verrerie équipée d'un four alimentant deux machines automatiques, et fabriquant deux types d'articles. Pour 1976, les charges de capital pourraient être de l'ordre de quatre millions de dollars; le coût annuel de fonctionnement d'environ 200 dollars par tonne de verre produit (10 000 à 12 000 t/an); les effectifs employés d'environ 100 à 120 personnes, et l'énergie consommée (qu'il s'agisse d'électricité, de gaz ou de mazout) de l'ordre de 7 000 kW.

On trouvera au tableau 15, une ventilation des coûts d'investissement ainsi que celle des coûts d'énergie et de main-d'oeuvre; les données dont il s'agit sont en effet dans une certaine mesure complémentaires, et peuvent représenter deux moyens différents de faire le même travail. Lorsque les coûts de main-d'oeuvre croissent plus rapidement que les coûts d'équipement, on a naturellement tendance à remplacer des hommes par des machines mais ce n'est pas la seule raison qu'on peut avoir de le faire. Il y a quelques années, on employait encore la méthode archaïque de la pelle et de la brouette pour préparer les mélanges, parce que l'achat de mélangeurs mécaniques n'était pas suffisamment justifiée par l'économie de main-d'oeuvre qui en résulterait. Mais avec l'adoption de méthodes perfectionnées de contrôle de la qualité, on a constaté que la précision du pesage et l'uniformité du mixage obtenues par le procédé mécanique avaient pour conséquence une amélioration des produits qui justifiait les dépenses encourues. Dans les grandes verreries, cette opération est aujourd'hui entièrement automatisée, et c'est le surveillant du four qui la déclenche lui-même en appuyant sur un bouton.

Tableau 15

Ventilation des coûts d'investissement, de consommation d'énergie  
et de main-d'oeuvre dans une petite verrerie  
( en pourcentage)

Postes	Investissements	Consommation d'énergie	Main-d'oeuvre
Construction et aménagements	17,50		
Traitement du sable et du groisil	3,60	4,24	2
Atelier de mixage	6,71	0,85	4
Four	13,43	59,19	4
Dispositifs d'alimentation	9,11	6,61	-
Machines de formage	11,99	4,24	8
Recuisson	7,19	9,11	4
Inspection et emballage	0,48	-	18
Décoration	8,39	12,08	12
Entretien (y compris l'atelier)	2,88	0,57	15
Laboratoire	1,20	-	6
Courant électrique	4,80	-	5
Gaz, mazout, eau	6,71		
Compresseur et machine à vile	3,60	3,11	4
Transports et divers	2,40	-	8
Gestion et administration			10
Total	100	100	100

Il ressort de ce tableau que l'inspection et la décoration (étiquetage permanent des bouteilles réutilisables) exigent relativement beaucoup de main-d'oeuvre. Ces deux opérations peuvent être en grande partie automatisées, mais les machines requièrent tellement d'entretien que l'économie de main-d'oeuvre réalisée sur le premier poste risque de se traduire par un surcroît de dépenses à la rubrique suivante.

Pour donner un exemple de tendances assez récentes, rappelons qu'au Royaume-Uni, l'industrie verrière a dans l'ensemble réussi à maintenir les dépenses de main-d'oeuvre à environ 33 % des coûts globaux de fonctionnement au cours de la période 1968-1974, bien que les salaires aient augmenté de 130 %. Ce résultat a été obtenu grâce à un accroissement de la productivité (les effectifs n'ont été réduits que de 10 %) dû au développement de la mécanisation, et au doublement de la valeur marchande de la production.

Il est probable que l'emploi des ordinateurs gagnera du terrain pour la délicate opération qu'est la confection automatique des paraisons. La régularité de leur forme et de leur poids peu en effet améliorer le rendement ainsi que la qualité et l'homogénéité des produits. L'emploi d'un ordinateur permet aussi de réduire l'intervalle improductif du réglage lors du passage à une autre fabrication. Il est probable aussi que l'inspection automatique se fera à l'entrée du four de recuisson pour accélérer le renvoi des informations vers la machine et le dispositif d'alimentation.

Le tableau 16 donne la ventilation approximative des dépenses de fonctionnement. Pour déterminer les charges afférentes au paiement des intérêts, on suppose au départ un capital-actions de 40 %, le reste des investissements nécessaires étant emprunté au taux de 9 %. Il faut évidemment qu'il y ait une marge suffisante entre les prix de vente et les coûts de production, mais ce n'est pas seulement en vue de servir des dividendes aux actionnaires. L'emprunt doit être remboursé. Il faut un volant de trésorerie pour les stocks de matières premières, et pour les sommes dues aux fournisseurs. Il faut accumuler des fonds pour combler la différence entre le prix de remplacement du matériel et la provision pour amortissement, et pour faire face aux dépenses d'expansion et de modernisation.

Tableau 16  
Ventilation approximative des coûts de fonctionnement  
d'une petite verrerie  
(en pourcentage)

<u>Postes</u>	<u>Coûts fixes</u>	<u>Coûts variables</u>	<u>Total</u>
Matières premières <sup>a/</sup>	-	24,9	24,9
Autres matériaux	-	3,4	3,4
Combustibles	14,4	4,5	18,9
Electricité	2,0	-	2,0
Main-d'oeuvre	12,0	2,0	14,6
Entretien (main-d'oeuvre non comprise)	2,2	-	2,2
Transports	1,3	-	1,3
Amortissements	19,3	-	19,3
Intérêts de l'emprunt	13,4	-	13,4
Total	65,2	34,8	100,0

a/ Pour un pays en développement supposé pauvre en matières premières.

Plus la proportion de coûts variables est forte, plus il est facile de contrôler et de réduire les coûts lorsque la demande est faible; il faut donc préférer les procédés et équipements qui permettent de s'adapter à la situation. Dans l'exemple ci-dessus, un tiers seulement des coûts sont variables. Cependant, un comptable compétent appliquant un système de comptabilité approprié pourrait sans doute découvrir bien des postes de dépense fixes sur lesquels il est possible d'opérer des compressions. Les distinctions faites dans le tableau sont donc quelque peu arbitraires. Il n'en demeure pas moins que les dépenses annuelles sont en grande partie prédéterminées par la conception initiale de l'usine, et c'est là un principe à ne pas oublier au moment où on en établit les plans. Malheureusement, dans les pays en développement, le client n'est pas assez bien informé pour résister aux pressions des représentants des fournisseurs et risque d'être amené à accepter un équipement trop complexe, excellent en lui-même, mais indéfendable pour l'échelle d'opération envisagée.

On peut avoir avantage à transférer un poste de dépenses fixes pour le placer sous la rubrique des coûts variables en faisant appel aux services de spécialistes de l'extérieur. Une tendance s'est manifestée en ce sens, puisqu'on s'adresse aujourd'hui couramment à des firmes spécialisées pour la reconstruction des fours : on évite ainsi de conserver un personnel permanent pour cette tâche essentielle, mais qu'on n'est obligé d'entreprendre qu'à intervalles assez espacés.

Les fours exclusivement électriques, et les fours à chauffage mixte, (mazout plus appoint d'énergie électrique) ont cet avantage qu'il est plus facile avec ce système de régler la consommation d'énergie selon la quantité de verre à produire : autre exemple de l'importance du choix des techniques. Avec un four électrique, la consommation d'énergie est réduite presque de moitié (ce qui rend les conditions de travail beaucoup moins pénibles) mais le courant électrique étant cinq fois plus coûteux que le mazout, il faut évaluer les autres avantages de ce procédé de fusion. Il est difficile d'évaluer exactement les avantages du contrôle de la pollution atmosphérique, mais on s'y intéresse de plus en plus, et dans certains pays elle pourrait devenir obligatoire, en particulier pour l'émission des gaz de fluorure et de plomb. La possibilité de reconstruire rapidement ces fours, de dimensions beaucoup plus réduites que les fours à flamme, et de passer rapidement d'une couleur à une autre peut entraîner une augmentation de 10 % par an du nombre de journées productives; les coûts fixes, pour l'ensemble de l'usine, sont donc ramenés à 90 %, ce qui représente un avantage économique appréciable. Les coûts de construction sont moindres, et le facteur de charge (rapport entre la consommation moyenne effective et le maximum théorique) qui sert en général de base pour l'établissement du tarif, est beaucoup plus favorable. Toute l'énergie consommée revient donc moins cher. Les tarifs pratiqués dans de nombreux pays pour l'énergie électrique sont déterminés par les choix des pouvoirs publics, qui favorisent parfois la consommation industrielle, et parfois la consommation domestique. Même dans les pays où la production hydro-électrique est inexistante, ce ne sont pas uniquement les prix du mazout qui déterminent les tarifs appliqués par le réseau public, si bien que l'augmentation des prix du pétrole tend à réduire la différence entre le coût de l'électricité et le coût du mazout pour la fabrication du verre. Si le courant fourni par le réseau paraît trop coûteux, on peut envisager la production privée, qui revient à environ trois cents/kWh (contre 0,63 cent/kWh pour le mazout). Ce prix peut être inférieur à celui du réseau public, car le coût de distribution, qui pèse très lourd dans son budget, est éliminé.

Notons une tendance à adopter de nouvelles méthodes d'emballage pour réduire les dépenses figurant sous la rubrique "Autres matériaux" ainsi que les frais de manutention à l'usine et chez les clients. Emballer un produit aussi fragile que le verre de manière à ce qu'il parvienne en bon état à l'utilisateur final représente un poste de dépenses négligeables. L'ancien système consistant à emballer les articles en verre dans des fûts en les enveloppant de paille et à réutiliser ces emballages exigeait beaucoup de main-d'oeuvre tant chez le producteur que chez l'acheteur; il n'était pas particulièrement propre, et était soumis à des règlements sanitaires. Le coût plus élevé des emballages en carton peut souvent être répercuté sur le client si celui-ci retire quelque avantage de ce système. Les cartons peuvent en effet servir à divers usages : simplifier par exemple le problème du stockage chez le grossiste; faciliter au détaillant une présentation attrayante en vitrine, et simplifier l'emballage final à l'intention des acheteurs. Pour les bouteilles et les verres plats, il s'agit principalement d'empêcher la casse au cours des manutentions puisque ces produits seront à nouveau traités ou conditionnés pour la remise à l'utilisateur final. Parfois, les utilisateurs de bouteilles fournissent leurs propres cartons ou caisses et s'en resservent pour livrer les bouteilles pleines.

Il semble que l'indication "Verrerie - Attention ! fragile !" ne serve qu'à persuader le personnel de manutention que l'emballage est conçu pour résister aux mauvais traitements, et qu'il n'est pas nécessaire de le traiter avec un soin particulier. Mais s'il est évident que des précautions spéciales doivent être prises, le manutentionnaire les prendra. C'est pourquoi les gros objets fragiles sont en général à l'abri des accidents lorsqu'on les emballe dans des caisses à claires-voies, qui laissent voir le contenu. De même, les palettes portant jusqu'à 500 bouteilles, protégées simplement par la feuille de plastique rétrécie à la chaleur qui les enveloppe, sont traitées avec les ménagements si manifestement nécessaires. Pour les livraisons qui n'exigent qu'un seul transport par camion, c'est la méthode qu'on préfère et elle se répand de plus en plus.

On peut procéder de façon analogue pour le transport des verres plats par voie ferrée ou par bateau. Leur protection n'exige que relativement peu de matériaux d'emballage; il est néanmoins possible de les économiser si l'on se contente de protéger le verre contre les agressions qu'il risque effectivement de subir, au lieu de l'enfermer dans des caisses "construites comme des cuirassées". De nouveaux produits, comme les feuilles de plastique à coussin d'air, les panneaux d'agglomérés, etc. offrent de grandes possibilités et peuvent faciliter les choses dans un pays où l'on manque de bois pour confectonner les caisses.

Notons aussi la tendance à alléger les bouteilles. La résistance mécanique d'un article en verre dépend de celle de sa section la plus mince; si la solidité est seule en cause; les sections plus épaisses ne sont qu'un gaspillage de matière. On peut donc parfaitement réduire le poids d'un article en recherchant une meilleure répartition de l'épaisseur.

Ajoutons que plus une bouteille est épaisse, moins l'opération du formage est rapide. Il y a donc économie non seulement de matière première, mais aussi pour toutes les charges fixes dont l'incidence est fonction du temps. L'inconvénient est que les bouteilles minces endommagées à l'usage ne peuvent être réutilisées, c'est-à-dire qu'elles deviennent des emballages "sans retour".

Mais le développement phénoménal des supermarchés, où la reprise des bouteilles vides est de toutes manières assez peu pratique, a provoqué une demande de récipients "non repris" conçus de manière à réduire au minimum le gaspillage.

On peut conférer aux bouteilles minces une résistance accrue en les revêtant d'une couche invisible d'oxyde d'étain ou d'une pellicule organique (ou des deux) afin de les protéger contre les éraflures. Neuves, elles sont d'une robustesse remarquable. L'oxyde d'étain, appliqué au moment où les bouteilles entrent dans la galerie de recuisson, semble augmenter la résistance intrinsèque du verre; le film organique, appliqué alors que les bouteilles se refroidissent dans la section terminale de la galerie de recuisson, se comporte à la manière d'un lubrifiant et atténue les frottements entre les bouteilles, ce qui réduit les risques de détérioration.

L'emploi de bouteilles "non reprises", au lieu de bouteilles qu'on réutilisait 30 ou 40 fois avant de les jeter, a naturellement créé des problèmes d'évacuation des déchets. On a essayé de recycler le verre en le réintroduisant sous forme de groisil dans les mélanges préparés pour la fusion. Mais il y a un problème de coût. Il ressort du tableau 16 que la valeur potentielle du groisil, pour le remplacement des matières premières, est d'environ 25 % du coût de fabrication; on pourrait donc dire qu'une bouteille cassée vaut encore 20 % de son prix d'achat. Mais cela ne serait exact que si le groisil pouvait être renvoyé au four d'origine sans avoir souffert de contamination, et déjà réduits en menus fragments pouvant "couler" aisément. Un tel recyclage est évidemment possible et pratiqué à l'usine même. Dans ce cas, le groisil est en général propre, et le broyage et la manutention sont les seuls frais supplémentaires. A chaque nouvelle fusion, il faut compter avec un certain degré de contamination ferreuse et une certaine déperdition d'éléments volatils; il y a donc dégradation progressive de la qualité; mais elle est faible si la proportion de groisil n'est pas excessive.

Dans les installations de mise en bouteilles, le verre brisé peut en général être stocké à peu de frais par provenance et par couleur, mais les coûts de transport, de décollage des étiquettes et de séparation des capsules métalliques ne peuvent être évités. Le groisil de provenance extérieur, dit "étranger", ne peut être employé qu'avec précautions parce que sa composition peut être assez différente pour créer des difficultés au cours de la fusion et du formage.

Les frais qu'entraîne la collecte à domicile des récipients en verre sont prohibitifs, mais dans certaines communes, des volontaires se chargent de ce travail à titre bénévole. On peut le comparer à celui qu'assurent les services postaux; aux tarifs actuels, il serait moins coûteux d'employer des bouteilles neuves. La seule solution pratique serait semble-t-il d'en charger les services normaux de ramassage des ordures ménagères, qui auraient intérêt à rendre l'opération profitable. D'après les données du tableau 3, une ville de 100 000 habitants devrait ramasser, laver et trier 10 tonnes environ de verre brisé, de couleurs diverses, à partir de 1 000 tonnes d'ordures, Et la séparation des couleurs est un problème fondamental. Le groisil multicolore peut être employé dans la fabrication de blocs isolants et gaines pour tuyaux en verre mousse (ou "multicellulaire"); il peut aussi servir à consolider les dépôts d'ordures et à les protéger contre l'érosion par le vent ou l'eau. Ces débris de verre peuvent sembler laids au début, mais ils finissent par se dégrader et donner un "sable" qui ne diffère guère de celui avec lequel on l'avait fabriqué.

-----



**C-210**



**80.06.24**