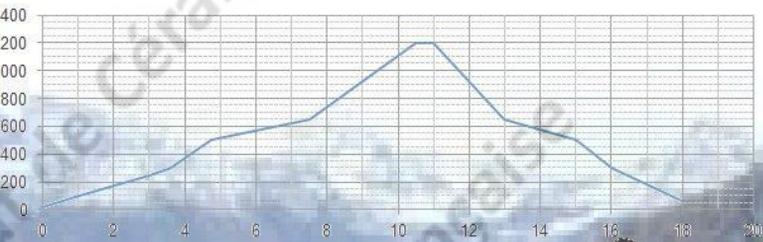


TECHNOLOGIE CÉRAMIQUE





Ce document est réalisé dans le cadre de la convention de coopération conclue entre le ministère de l'éducation nationale et la CICF.
2015



SOMMAIRE

GÉNÉRALITÉ	7
Présentation des céramiques	8
Caractéristiques des céramiques	9
Des matériaux étranges	9
Fusionnels et réfractaires	9
Usuels et inusables	10
Isolants et protecteurs	11
Inoxydables et réparateurs	12
Utilisation des céramiques	13
Des usages illimités	13
Voyageuses et infatigables	14
Domestiques et durables	15
Au service des arts du feu	16
Processus général de production	17
Plasticité et procédés	18
Poudre et pressage	19
Plâtre et prise	20
Séchage et cuisson	21
Protection et couleur	22
Historique	23
Les différentes pâtes céramiques	26
Pâtes poreuses	26
Pâtes vitrifiées	27
MODELAGE	29
Le plâtre	30
Historique du plâtre	30
Géologie du plâtre	31
Extraction du plâtre	32
Cuisson du gypse	34
Qualités du plâtre	37
Adjuvants	38
Principe de la prise	39
Facteurs de variation des qualités du plâtre	40
Préparation du travail	43
Calculs surfaces et volumes	43
Calcul de retrait et contre-déformation	45
Outils du Modeleur	48
Fabrication d'une tête de tour / rondeau et quille	51
Modèle	54
Fabrication d'un modèle au tour	54
Fabrication d'un modèle par trousseage	57
Fabrication d'un modèle par traînage	59
Bec et anse	62
Les différentes brides	65
Réalisation d'un modèle de cuvette	67
Moule	71
Ram process	71
Fabrication d'un moule	74
Fabrication d'une tête roller	81
Matriçage	85
Fabrication d'une matrice en plâtre	85
Matrice en béton de résine	90
Matrice nid d'abeille et choucroute	96
Résine dure et souple	101
Astuces	106
Précast	106
Inserts	107
Avantages de l'entre deux plâtres	109

FAÇONNAGE	111
Les matériaux	112
Genèse des matières premières	112
Rôle des matières premières	114
Plasticité	115
Les kaolins et les argiles	116
Matières dégraissantes	117
Matières dégraissantes fondantes	118
Matières premières composant les émaux	119
Composés des glaçures	120
Coloration des émaux et des glaçures	121
Préparation des matières premières	122
Dosage	122
Concassage	123
Broyage	124
Tamissage	125
Agitation et délitage	126
Pompage	127
Atomisation	129
Raffermissment	130
Malaxage et extrusion	131
Façonnage par calibrage	135
Calibrage traditionnel	135
Calibrage roller	136
Façonnage par pressage	143
Pressage en pâte plastique	143
Fabrication d'un moule ram process	146
Façonnage en pâtes sèches	150
Pressage isostatique	151
Usinage de masse compacte sèche	153
Façonnage en pâtes liquides	154
Coulage traditionnel	154
Rhéologie	165
Défauts de coulage	170
Façonnage par coulage sous pression	174
Séchage finition	181
Courbe de bigot	181
Les différents modes de séchage / mécanisme du séchage	182
Facteurs influant le déplacement de l'eau	183
Les séchoirs	183
Contrôle du séchage	185
Finition	187
ÉMAUX ET ÉMAILAGE	189
Rappel Chimie	190
Généralité	195
Classification	196
Les émaux plombeux	196
Les émaux boracique	197
Les émaux sans bore ni plomb	198
Matières premières des émaux	199
Les formateurs de réseaux	199
Les modificateurs de réseaux	201
Qualités d'un émail	203
Fusibilité	203
Viscosité	205
Transparence, devitrification	207
Bullage	208
Coloration parasite, éclat de l'émail	212
Résistance aux acides	213
Toxicité	214

Dilatation	215
Le trésaillage et l'écaillage	216
Post trésaillage	217
Mesure au tensiomètre, analyse dilatométrique	218
Anneaux de dilatation	219
Déformation plaquette et test du poinçon	220
Calcul coefficient de dilatation	222
La couche intermédiaire	225
L'élasticité des émaux	226
Tension superficielle	227
Coloration	229
Mesure de la couleur	230
Oxydes cobalt, cuivre	231
Oxydes chrome, fer	232
Oxyde nickel, uranium et manganèse	233
Colorants composés jaunes	234
Colorants composés verts	236
Colorants composés bleus	237
Colorants composés roses	238
Colorants composés rouges	239
Colorants composés bruns et gris	240
Colorants composés noirs	241
Opacifiants	242
Mécanisme de l'opacification	243
Principaux opacifiants	245
Broyage	247
Vitesse de broyage	248
Adjuvants	251
Pulvérisation	255
Pistolet manuel	256
Technique d'émaillage	261
Pistolet automatique	264
Cabine d'émaillage	268
Turbine d'émaillage	269
Émaillage par trempage	270
Trempage manuel	270
Trempage assisté et robotisé	271
Aspersion	274
trempage de grosses pièces	277
CUISSON	279
Objectifs de la cuisson	280
Le frittage et réaction à la cuisson	282
Fours tunnel	285
Fours intermittents	287
Combustion et contrôles	290
Établissement d'une courbe de cuisson	291
Analyse thermodifférentielle	292
Analyse thermogravimétrique et analyse dilatométrique	293
Courbes de cuisson	294
Contrôles de cuisson, pyromètres	297
Pyromètres optiques	300
Contrôle de pression	301
Contrôle de l'atmosphère	302
Enfournement	303
DÉCORATION	307
Décoration	308
Les engobes, décors sous couverte	309
Décors sur émail cuit, les différentes techniques manuelles	310
Sérigraphie et décalcomanies	312
Tampographie	313
Techniques industrielles	314

DÉFAUTS	315
Cœur noir	316
Fentes	317
Défauts de colorations	320
Déformations	324
Défauts d'extrusion, feuilletage	324
Défauts de coulage	326
Manque de prise, veine de thixotropie	326
Défauts de rhéologie, ligne de coulage	327
Tache de coulage	328
Bulles de coulage	329
Corne de coulage	330
Dilatation	331
Écaillage	331
Tressillage	332
Casse de tension	333
Émaillage	334
Points, bulles et cloques	334
Retirement	335
Défauts par les cycles de cuisson	338
Éclatement, surcuisson	336
Goutte d'émail	338
Bulles et trous	339
Sels minéraux	340
Attaques chimiques	341
CONTRÔLES LABORATOIRE	343
Densité / Masse volumique	344
Rhéologie	346
Gallempkamp	346
Viscosimètre à écoulement	350
Débit / viscosité au pistolet	351
Jauge bayer	352
Barbotine, vitesse de prise	353
Plasticité	356
Pénétrromètre	356
Mesure d'angle de déformation	358
Comportement au séchage	359
Mesure d'humidité	359
Mesure de retrait	362
Comportement à la cuisson	363
Fusibilité test d'étalement	363
Fusibilité test d'écoulement	365
Retrait de cuisson, perte au feu	366
Flexion a chaud	367
État de cuisson (montre fusible), résistance pyroscopique	368
Anneau de chronothermie	370
Déformation à la cuisson	371
Compatibilité dilatométrique	372
Anneau de dilatation	373
Plâtre, coulabilité et prise	375
Sels minéraux	376
Porosité	379
Technique du vide	379
Technique de l'ébullition	380
Masse volumique réelle	381
Résistance mécanique	384
Granulométrie	385
Par tamisage et jauge Hegman	385
Test tamis Bayer	386
Propreté des refus	388

GÉNÉRALITÉS

Solides, isolantes, résistantes à la chaleur : les céramiques sont des matériaux incroyablement utiles, indispensables dans de nombreux domaines, secteurs de pointe ou activités traditionnelles

L'industrie céramique est un secteur très hétérogène et ceci à plusieurs titres.

LA DIVERSITÉ DES PRODUITS



La première particularité concerne la diversité des produits, des usages et des utilisateurs de céramiques. Ainsi dans ce même secteur se côtoient des céramistes dont les clients sont des entreprises, tandis que d'autres s'adressent directement au grand public. Ainsi, les fabricants produisant des matières premières céramiques, des produits réfractaires, des céramiques techniques, s'adressent à une clientèle constituée d'entreprises produisant des biens industriels (sidérurgie, verrerie, électronique...). L'autre catégorie d'entreprises réalise des biens de consommation à l'image des produits ornementaux, de la vaisselle à destination du grand public.

Cette diversité implique que les entreprises de la céramique peuvent évoluer de manière contrastée en fonction du type de marché auquel elles s'adressent.

PRODUITS IDENTIQUES, PROCESS DIFFÉRENTS

La deuxième particularité est la coexistence d'entreprises mettant en œuvre des processus de fabrication totalement différents (extraction, filtrage, coulage, extrusion, tournage, pressage, séchage, cuisson...) pour élaborer leurs produits. Cette caractéristique implique l'existence de métiers différents les uns des autres exigeant cependant tous une maîtrise du comportement des matériaux céramiques.

STRATEGIES DIFFÉRENTES

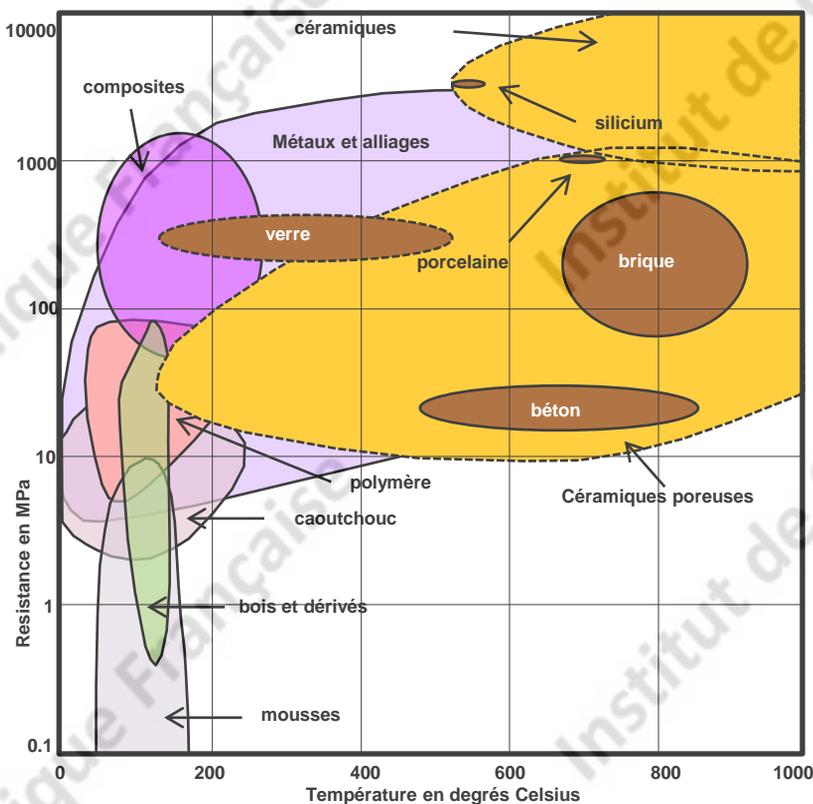
La troisième particularité du secteur Céramique repose sur la cohabitation d'entreprises mettant en œuvre des stratégies totalement différentes pour fabriquer un même produit. À ce titre, certaines d'entre elles développent leur compétitivité en s'appuyant sur une automatisation du processus de fabrication alors que d'autres mettent en avant un savoir-faire artisanal ainsi que leur créativité. Ce constat renvoie pour une même branche à des situations très différentes, voire contrastées, en termes d'organisation du travail (cellule semi-autonome ou autonome, atelier, pratiques artisanales...) de niveaux de technologie (automatique, manuel, semi-automatique, mécanique...) et de tailles d'entreprises (groupes internationaux, PME, TPE...).

DES MATÉRIAUX ÉTRANGES

FUSIONNELS ET RÉFRACTAIRES

La réfractarité de la céramique est indispensable à tous les domaines nécessitant l'utilisation de très hautes températures comme la verrerie ou la fonderie.

Un **matériau réfractaire** doit pouvoir conserver ses qualités et caractéristiques mécaniques à haute température, selon l'usage (hauts fourneaux, incinérateur...) il devra en plus avoir des caractéristiques de résistance à l'affaissement sous charge ou de résistance à la corrosion.



Émetteur infrarouges à gaz



Carapace et noyaux réfractaires pour fonderie

Comparaison des matériaux céramiques, résistance mécanique = f (température de service).

La réfractarité des céramiques est fréquente, elle dépendra cependant du dosage des différentes matières premières entrant dans sa composition, car si la plupart des composants céramiques sont réfractaires certains sont eux, extrêmement fusibles (cas des émaux céramiques).

La composition et les techniques de mise en œuvre permettront donc d'obtenir des produits extrêmement résistants à la chaleur, mais avec d'autres propriétés comme la résistance aux chocs thermiques, ou l'isolation.

La céramique est devenue au cours des années, un élément majeur de l'industrie. On la trouve dans la sidérurgie, dans les fours de cimenterie, de verrerie ou comme bouclier thermique de la navette spatiale.

USUELS ET INUSABLES

La dureté de la céramique est indispensable à l'obtention des revêtements et matériaux devant résister à l'abrasion.

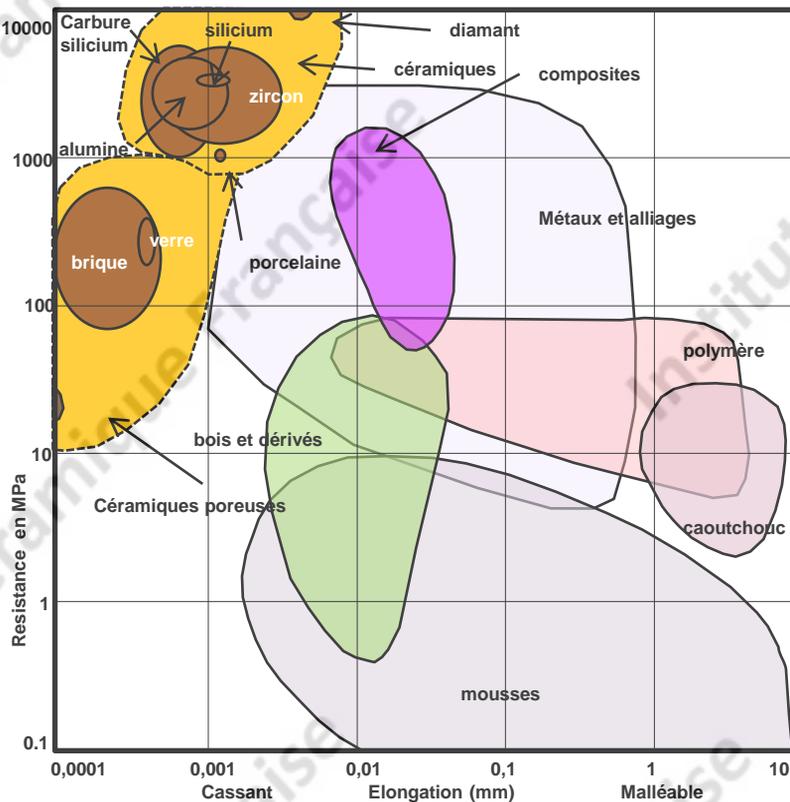
Extrêmement dures et résistantes, les céramiques restent cependant d'une densité inférieure aux métaux. Lorsque le poids est un facteur déterminant (motorisation, spatial), elles offrent une alternative pour les usages intensifs et extrêmes.

Ces qualités alliées à leur réfractarité font des céramiques, le matériau idéal lors de sollicitations mécaniques dégageant de la chaleur (freins / outils de coupe).



Disque d'usinage pour métaux avec pastilles en céramique

Couteau en Zircône



Piston à revêtement céramique

Comparaison des céramiques - matériaux, résistance mécanique = f (allongement à rupture).

La céramique a ainsi fait son entrée dans de nombreux domaines de la motorisation, notamment pour les moteurs automobiles : rotors, chambres de combustion, têtes de cylindres, soupapes, etc.

ISOLANTS ET PROTECTEURS

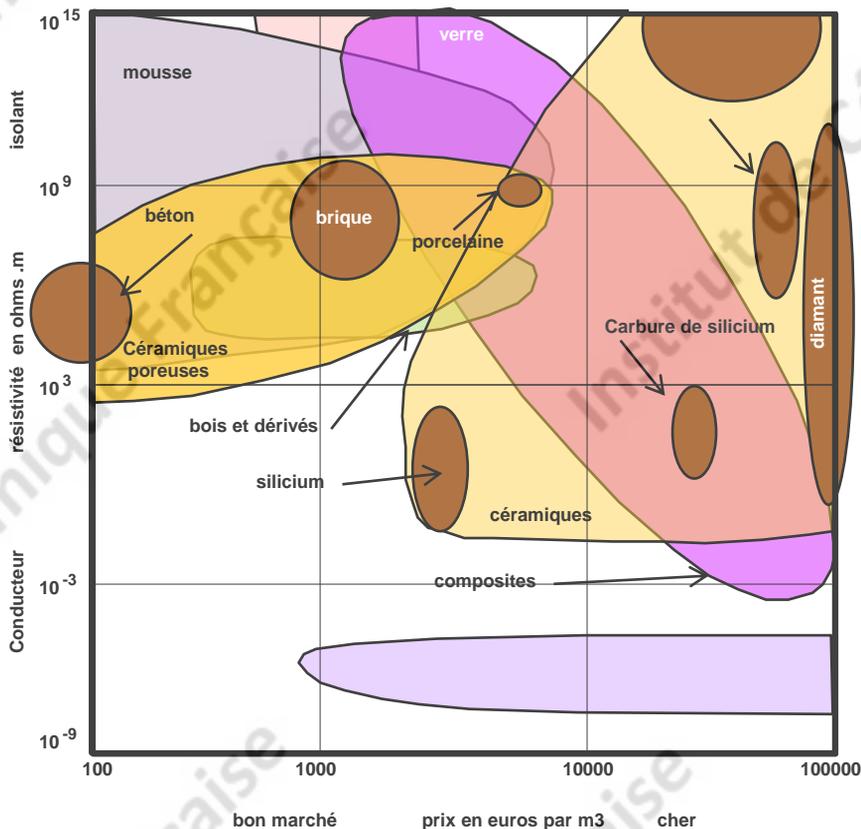
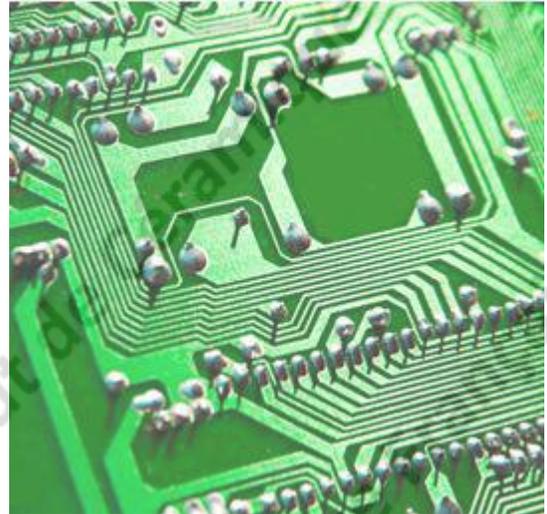
La céramique est utilisée pour ses propriétés de résistance et d'isolant à l'électricité depuis plus d'un siècle.



Embouts de lampe halogène en céramique

Les céramiques tiennent une grande place dans le domaine de l'électricité et de l'électronique. La constante progression de ces produits a permis de réelles avancées dans le domaine de la miniaturisation des circuits électroniques.

La **piézoélectricité** est la propriété que possèdent certains corps (notamment le quartz) de se polariser électriquement sous l'action d'une force mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse). Les céramiques sont utilisées dans les deux cas : on crée une charge électrique et donc des étincelles par une action mécanique, par exemple dans un allume-gaz



Comparaison des céramiques - matériaux, résistivité électrique

Isolateur en porcelaine

Les condensateurs sont des composants capables de stocker les charges électriques.

Les céramiques permettent de réaliser de nombreux types de condensateurs, mono et multicouches, que l'on reporte éventuellement directement sur les circuits (sous forme de chips), par des techniques de montage en surface. On évite ainsi les contraintes d'assemblage d'éléments séparés, parfois plus fragiles.

INOXYDABLES ET RÉPARATEURS Première phase : les céramiques inertes

Certaines porcelaines voient entrer dans leur composition plus de 30 % de phosphate de calcium sous la forme de poudre d'os de bovins, c'est donc tout naturellement, mais avec des décennies de recherches que la céramique a fait son entrée dans le domaine du biomédical, sous forme de prothèses osseuses et maintenant de céramiques biocompatibles.



Prothèses dentaires

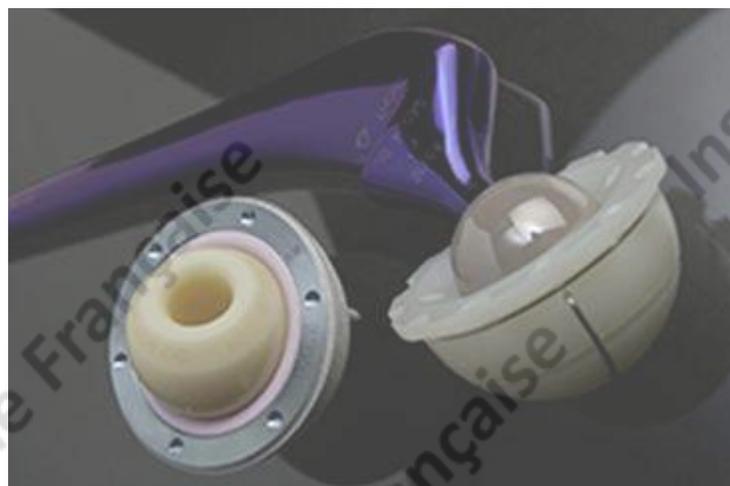
Les prothèses dentaires ont longtemps consisté en un support métallique recouvert d'une céramique proche de la porcelaine. Puis on a utilisé des verres de silice (SiO_2) et d'alumine, dont l'aspect brillant, la couleur proche de l'ivoire et la neutralité chimique font des matériaux proches de la dent naturelle. De plus en plus, la zircone a la préférence des praticiens, avec des traitements de surface permettant d'améliorer l'aspect de la prothèse.

Deuxième phase : les céramiques bioactives

Les propriétés de résistance à l'usure de l'alumine qui est un des composants majeur de l'argile permet la réalisation des premières prothèses de hanche. Aujourd'hui, les nouveaux matériaux comme la zircone (plus connue en bijouterie sous le nom d'oxyde de zirconium) permettent la miniaturisation des prothèses tout en augmentant leur résistance.



Les prothèses de première génération sont parfaitement tolérées par l'organisme, mais restent des corps étrangers. Aujourd'hui, on utilise des céramiques dont la composition chimique est encore mieux adaptée : le phosphate de calcium appelé hydroxyapatite, utilisé en raison de sa composition chimique quasi identique à celle de l'os.



DES USAGES ILLIMITÉS



Ailettes de réacteur fabriquées à l'aide de noyaux céramiques

Avec la céramique, les progrès de l'aéronautique ont pu dépasser toutes les espérances. Il n'en fallait pas moins pour que les remarquables qualités de ces matériaux à résister aux sollicitations mécaniques et thermiques les fassent s'imposer dans les voyages spatiaux.



Revêtement céramique résistant aux chocs thermiques de grande amplitude

Si les céramiques présentent les meilleures qualités de résistance à la température et à l'abrasion, elles n'en restent pas moins fragiles mécaniquement. En effet, leur résistance à la flexion est relativement limitée, afin de pallier cette déficience elles sont maintenant renforcées avec des fibres qui leur permettent de rivaliser avec les métaux en terme de résistance.

À l'entrée dans l'atmosphère, les vitesses de déplacement des navettes (plusieurs milliers de kilomètres par heure) provoquent un échauffement lié au frottement de l'air. À cette occasion le nez de la navette verra sa température augmenter de plus de 1000 degrés en quelques minutes, seules des céramiques à base de matériaux comme la silice vitreuse pourront résister à de tels chocs thermiques.



Quelques applications :

- Volets de tuyères.
- Anneaux accroche flamme.
- Cône de sortie.
- Éléments de turbine (aubes).
- Chambre de combustion.
- Structures spatiales telles que nez, bord d'attaque, bouclier thermique.

Une difficulté supplémentaire intervient lors de la réalisation de missiles, puisque le dispositif de guidage est logé dans la tête du projectile. Il faut donc que la coiffe laisse passer les ondes électromagnétiques, tout en étant capable de supporter l'échauffement occasionné par des vitesses parfois supérieures à Mach 3. Des contraintes pour lesquelles les céramiques sont des matériaux de choix. Dans le cas de missiles guidés par radar, on utilise donc des coiffes en alumine ou en silice.



VOYAGEUSES ET INFATIGABLES



Disque de freins et plaquettes

La céramique est entrée dans le monde de l'automobile depuis plus d'un siècle. Aujourd'hui bien qu'elles soient toujours d'actualité, les bougies d'allumage ne sont plus le seul élément céramique composant un moteur. Certains pistons se voient dotés d'un revêtement céramique anti-usure, les ailettes de turbine de turbo compresseur ne posent plus de problèmes liés à l'échauffement par la température depuis qu'elles sont en céramique, les disques de frein, dont les revêtements céramiques permettent la conservation des capacités de freinage même dans des conditions extrêmes.



Revêtement sur arbre à came

La réalisation de roulements sans graissage qui ne se déforment pas sous l'action des sollicitations mécaniques et de l'échauffement est désormais chose facile si la céramique s'en mêle.

Pièce de turbo compresseur



Bougie d'allumage ou de préchauffage



Allume cigare



Céramique pour roulement

DOMESTIQUES ET DURABLES

Les céramiques sont présentes dans la construction comme dans l'habitat depuis toujours, et les techniques traditionnelles, évoluant depuis des millénaires, permettent d'obtenir à moindre coût des matériaux d'une grande qualité.

Ce secteur comprend quatre grandes familles de produits : les produits sanitaires, les carreaux de sol et de mur, la vaisselle, et les matériaux de construction.

Matériaux de revêtement : outre ses qualités décoratives, le carreau céramique est robuste, incombustible, inaltérable, imputrescible. L'obtention de produits de haute qualité nécessite une recherche qui porte sur les matières premières, les procédés de fabrication très automatisés et la technologie.



Matériaux de construction : tuiles et briques, des produits de terre cuite poreux et naturellement colorés. Ils sont commercialisés, soit bruts, émaillés ou vernissés.



Céramique sanitaire : elle se présente comme le matériau de l'hygiène avec une production d'appareils en vitreous ou en grès aussi bien pour la maison que pour les hôpitaux, hôtels, collectivités...

Le remplacement des joints en caoutchouc par des plaquettes en céramique a largement amélioré le confort d'utilisation et l'étanchéité. Ces mécanismes inusables ont un fonctionnement beaucoup plus silencieux.



Arts de la table : les progrès techniques dans ce domaine ont permis aux produits céramiques (vaisselle) de s'adapter aux conditions d'usage actuelles (lave-vaisselle, four à micro-ondes).

AU SERVICE DES ARTS DU FEU

Les matériaux réfractaires peuvent prendre diverses formes, des plus simples briques de haute densité, aux matériaux fibreux pouvant isoler des parois jusqu'à 1400 degrés. On peut aussi les trouver avec des morphologies complexes par exemple en fonderie où ils constituent la majeure partie des moules des pièces de forme.



Creuset pour fonte en fusion

Les applications

Haut fourneau, convertisseur, poche de coulée.

Réfractaires anticorrosion pour les liquides ou les métaux en fusion.

Moules de fonderie.

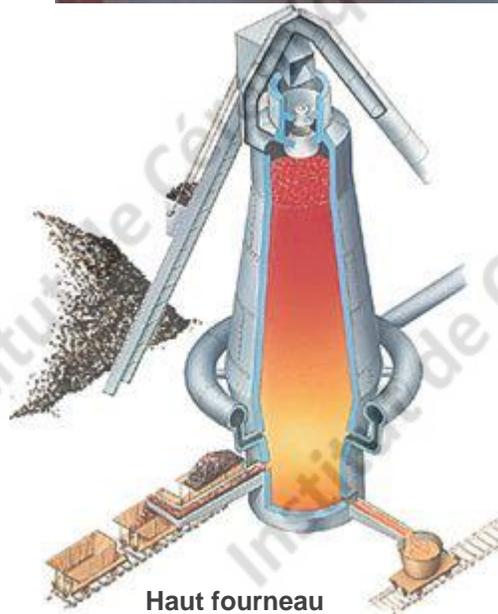
Isolant thermique.

Four de fusion pour verre.



Creuset pour verre en fusion

La fonte et le traitement des métaux peuvent nécessiter de monter à des températures de 2000 degrés Celsius. De fait, la céramique a toujours été présente dans le domaine de la sidérurgie, de la fonderie ou dans la confection du verre. Sans cette capacité des céramiques à résister aux plus hautes températures et à la corrosion des métaux en fusion, peu d'alliages métalliques hautement performants existeraient.



Haut fourneau

Coulée d'acier en poche



Four de traitement thermique



PROCESSUS GÉNÉRAL DE PRODUCTION

Définition d'une céramique : Un article ayant un corps vitrifié ou non, de structure cristalline ou partiellement cristalline, ou de verre, dont le corps est constitué de substances principalement inorganiques et non métalliques. Le matériau est constitué par une masse en fusion, qui se solidifie en se refroidissant, ou qui est constitué et porté à maturité, en même temps ou ultérieurement, par l'action de la chaleur.



Plus communément, les matériaux céramiques sont à l'origine des compositions de la vaisselle de faïence ou porcelaine, des carreaux en grès, des tuiles et briques, des sanitaires, des fusibles électriques ou des prothèses dentaires.



Les matériaux céramiques sont des minéraux notamment obtenus par dégradation et érosion des roches magmatiques. Les matériaux essentiels entrant dans la composition des céramiques sont l'argile, le kaolin, les feldspathoïdes et la silice, mais de nombreux matériaux de hautes puretés et présentant des caractéristiques particulières permettent aujourd'hui aux céramiques d'être présentes tant dans le domaine domestique que dans les hautes technologies.



Les matériaux céramiques peuvent pratiquement prendre toutes les formes, cela grâce à une propriété des argiles et du kaolin : la plasticité. Mélangée à d'autres matériaux comme les chamottes (terres cuites broyées) et la silice ; cela constituera une pâte homogène susceptible d'être mise en forme à la main ou selon tout type de technologie de moulage. Les pâtes céramiques peuvent aussi être mises en forme par injection ou pressage dans des moules métalliques.



Mais ce qui va donner ses caractéristiques finales à un produit céramique ce sera l'étape de transformation par la cuisson. Soumis à la chaleur, les différents composants vont fondre et se mixer entre eux pour former de nouveaux matériaux permettant ainsi de développer de nouvelles performances.

PLASTICITÉ ET PROCÉDÉS



La mise en œuvre des céramiques peut prendre bien des formes. Dans le cas des céramiques dites « traditionnelles » (la vaisselle, le sanitaire, les tuiles et briques etc.) le procédé commence par le mélange intime des différents composants.

Les matières premières de base comme l'argile ou le kaolin seront broyées au préalable afin d'obtenir un mélange le plus homogène possible. La poudre ainsi obtenue pourra être mise en forme par pressage ou additionnée d'eau pour obtenir une pâte dite « plastique », comme celle qu'utilisent les potiers et si l'on augmente encore la quantité d'eau on obtiendra une pâte liquide appelée « barbotine ».

L'extrusion est un moyen de donner une forme précise à une masse d'argile en la forçant à passer à travers une filière à l'aide d'une vis sans fin. Ce système permet depuis fort longtemps d'obtenir avec une seule et unique machine plusieurs sortes de briques (creuses ou pleines) de carreaux ou de tuiles. A la sortie de la filière, les briques sont coupées à la mesure. Si cette technique est très productive et utilisée dans tous types d'entreprises de l'artisan au briquetier en passant par les fabricants d'isolateur en porcelaine, elle induit des contraintes mécaniques au produit telles qu'elles peuvent provoquer la déformation à la phase cuisson.



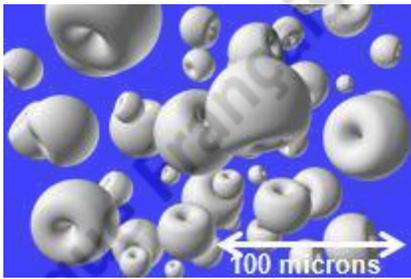
Le travail de la pâte plastique a beaucoup évolué depuis les gestes ancestraux du potier. C'est d'ailleurs l'évolution de ce geste qui est à l'origine du calibrage roller essentiellement réservé à la fabrication d'article de révolution pour la vaisselle.

C'est le différentiel de vitesse de rotation entre la tête métallique et le moule en plâtre qui reproduit le laminage de l'argile entre les doigts du potier afin de lui conférer la forme souhaitée tout en prenant soin d'aligner les particules d'argile pour éviter les effets de mémoire de la pâte.



L'estampage, même s'il existe toujours, a évolué vers des techniques de pressage en moules plâtre ou dans des moules en métal. Ce procédé s'apparente à l'emboutissage des tôles et n'est techniquement réalisable que si l'on possède une grande maîtrise de la déformation après pressage de la pâte.

POUDRE ET PRESSAGE



Comme nous le verrons plus tard, le séchage est une des phases les plus critiques de la transformation d'un produit céramique. Aussi, de tout temps, les céramistes se sont appliqués à diminuer la quantité d'eau pourtant si nécessaire à leur façonnage et ce n'est que sous d'énormes pressions que la cohésion des particules a pu être maintenue. Cela a donné naissance à des technologies de mise en forme de poudres très sophistiquées. Elles sont couramment utilisées pour le pressage des réfractaires, des carreaux de sol en grès-cérame, des assiettes en porcelaine.

Ce n'est qu'au prix d'innombrables recherches sur la texture, la granularité des matières premières et sur l'addition d'adjuvants particuliers que les qualités requises du produit final ont pu être obtenues.

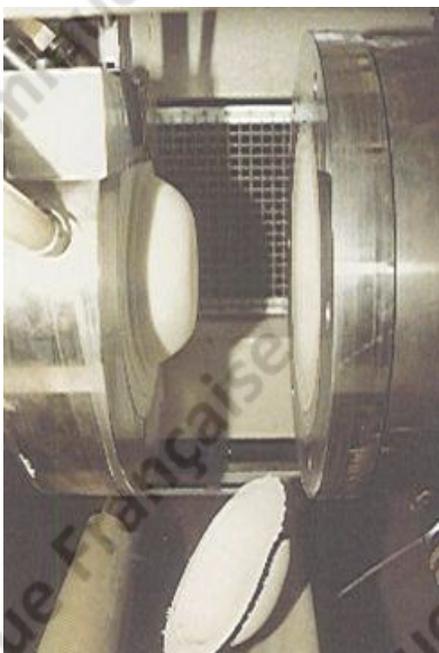


C'est en ayant perfectionné ces matières premières et ces technologies que l'on peut obtenir aujourd'hui des céramiques de hautes performances pour l'aéronautique ou le domaine médical.



La majeure partie des carreaux est aujourd'hui réalisée en pressage à sec, la surface obtenue pour un seul carreau peut dépasser 1m², et c'est l'homogénéité des matières premières soumise à de hautes pressions qui lui permettra de conserver sa résistance et sa planéité.

Dans le pressage de brique, à choc, toute la difficulté consiste à presser la poudre réfractaire tout en obligeant l'air inclus à sortir. Cette prouesse est réalisable en pressant par une multitude de chocs réguliers et en dosant avec soin les différentes classes granulométriques du produit.



Le pressage isostatique permet de réaliser des pièces de forme complexe ; ici, les moules métalliques traditionnellement utilisés pour la confection de parallélépipèdes peuvent être remplacés par des moules en élastomère remplis d'huile sous pression. La poudre est injectée par voie pneumatique dans le moule. L'homogénéité du remplissage et la densité du produit final dépendent essentiellement de la capacité de la poudre à s'écouler.

C'est par l'atomisation de grains sphériques de barbotine que le mélange peut être rendu si «fluide».

PLÂTRE ET PRISE

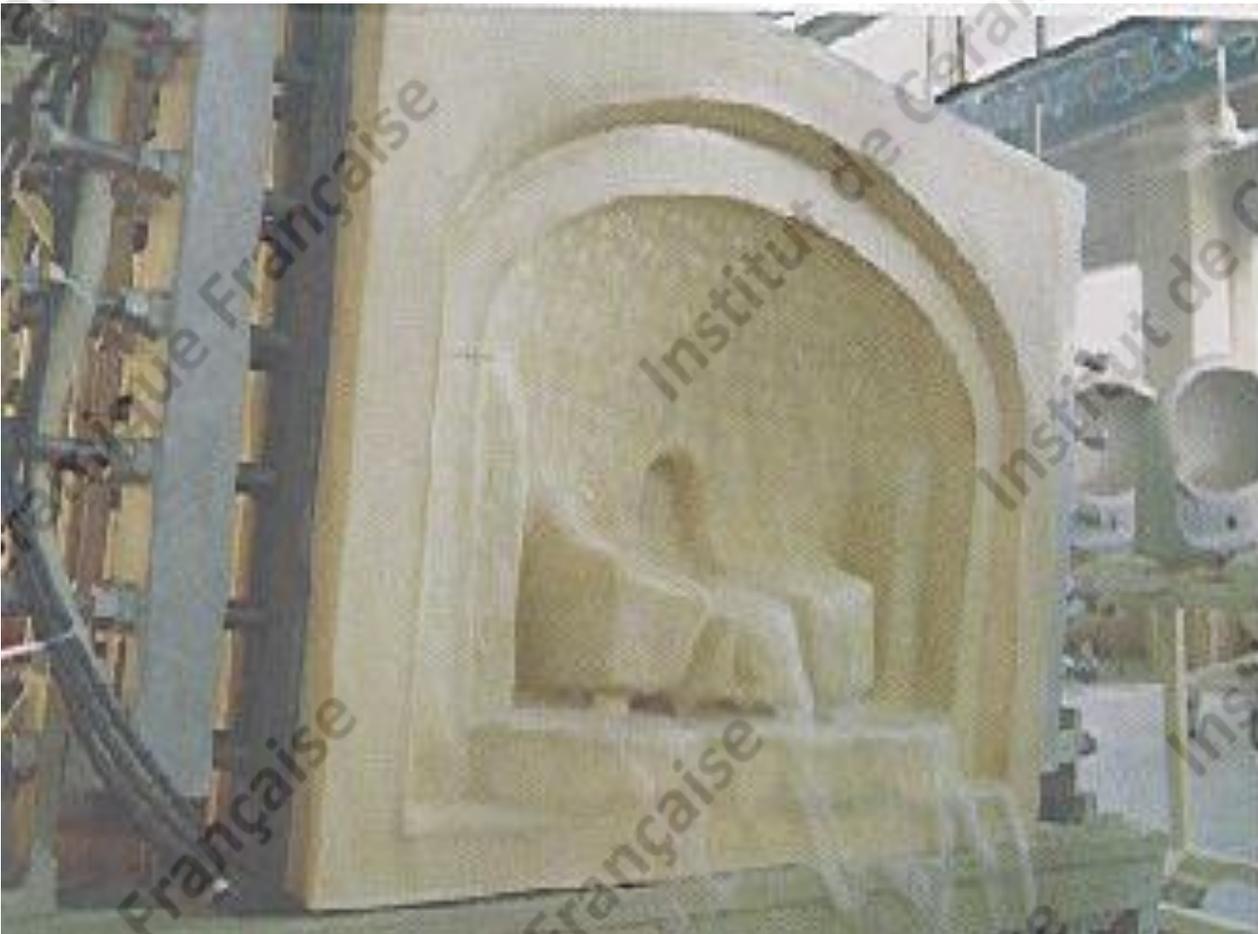


Toutes les céramiques que nous venons de citer ont plutôt des formes simples proches des parallélépipèdes ou ayant des formes de révolution. Lorsque l'on veut obtenir des pièces de formes complexes, dans le statuaire par exemple, le procédé utilisé est le coulage. Dans un premier temps, on construit un modèle en **plâtre** sur lequel on viendra fabriquer un moule lui aussi en plâtre et ayant autant de pièces et de sous-pièces que la complexité de la morphologie de la pièce le nécessitera. Après extraction du modèle, le moule subira une phase de finition et une phase de séchage. Pour obtenir une pièce céramique, le moule sera rempli d'un mélange d'argile et d'eau (barbotine).



Sous l'effet de la capillarité du moule, l'eau sera pompée ; ce qui aura pour effet de constituer une épaisseur sur la surface du moule, **c'est le phénomène de la prise**. Après plusieurs minutes et jusqu'à plusieurs heures pour les grosses pièces, on aura constitué une épaisseur conséquente et propre à résister à la déformation après sa phase de démoulage.

Malheureusement, le plâtre est un matériau tendre et après une centaine de pièces réalisées, il compte trop de traces d'usure. Aussi, avec les années, a-t-on réussi à mettre au point des produits composites microporeux. Ceux-ci cependant, ne peuvent reproduire la succion naturelle du plâtre et nécessitent l'injection sous très haute pression de la barbotine. Cette technologie présente donc surtout des avantages pour les grandes séries susceptibles d'amortir le coût de la machine à couler sous pression.



En coulage traditionnel ou sous pression, la maîtrise des propriétés rhéologiques de la barbotine est indispensable. Des facteurs variant fréquemment comme la température, le vieillissement et l'agitation peuvent induire des différences d'épaisseur et de fermeté dans les pièces.

SÉCHAGE ET CUISSON

Après les phases de façonnage viendra une des phases présentant le plus de risques pour le produit : le séchage. En effet, pour assurer la plasticité nécessaire à sa mise en forme, le céramiste a dû adjoindre une grande quantité d'eau aux matières premières. Celle-ci doit impérativement être éliminée avant la phase de cuisson, car sous l'effet d'un échauffement trop rapide, elle se transformerait en vapeur et ferait exploser les pièces.



La phase de séchage est réalisée à basse température dans des chambres parfois régulées en humidité et peut selon la morphologie du produit, les matières premières utilisées (plus ou moins perméables à l'eau), le mode façonnage... durer plusieurs heures voire plusieurs jours.

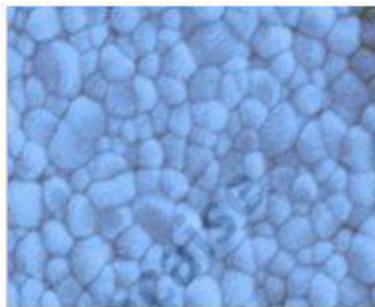
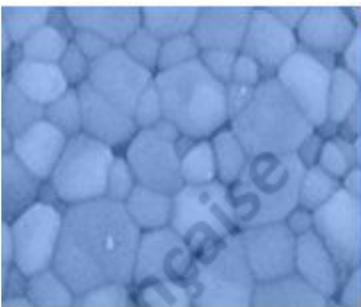
Une pièces aux différents stades : de gauche à droite : sortie moule/ sèche/ cuite.

Si cette phase est aussi délicate, c'est que le départ de l'eau provoque un retrait de la pièce. Si ce retrait n'est pas réalisé de façon homogène, on risque une déformation de celle-ci ou plus fréquemment sa casse pure et simple. Une microfissure pourra même continuer à s'ouvrir pendant la phase de cuisson et détruire totalement la pièce, éventuellement les pièces voisines et dans certains cas, les équipements thermiques.

Enfin viendra la phase de la cuisson, la plus ultime et nécessaire à la transformation du produit. C'est cette phase qui lui conférera ses qualités définitives. Au-delà de 450°C, la transformation n'est plus réversible, mais il faudra atteindre 1000°C pour obtenir un produit abouti. Les pâtes vitrifiées seront cuites plus haut. Généralement plus de 1200°C pour les grés et vitreous et jusqu'à 1400°C pour la porcelaine. Les réfractaires peuvent parfois être cuits au-delà de 2000°C. Pendant la cuisson, certains composants vont entrer en fusion, soit partielle qui permettra un « simple » collage des grains entre eux, soit totale dans le cas des pâtes vitrifiées ou des émaux. La fusion mélangera intimement les composants de base, donnant naissance à de nouveaux produits, plus solides, plus inoxydables...

Pendant cette fusion, les produits sont extrêmement sensibles à la déformation et toutes les contraintes qu'ils auront subies au cours de leur élaboration, seront susceptibles de réapparaître comme autant de défauts de coloration, déformation, aspect rugueux, etc. ; en cela, la cuisson est une phase révélatrice sans concession de toutes les imperfections et défauts de procédé, aucun produit déficient avant la cuisson ne saurait être correct à la sortie.

Lorsque la phase de cuisson est terminée, le produit n'est pas pour autant abouti ; c'est pendant la phase de refroidissement qu'il va acquérir sa dureté, son aspect de surface définitif voire parfois sa couleur. Le céramiste devra donc porter une attention toute particulière aux cycles de cuisson qu'il va créer. Afin de laisser, aux réactions physico-chimiques, le temps de se réaliser en créant des paliers ou des ralentissements de vitesse de chauffe, il devra tenir compte de la densité de la charge à cuire, du type de combustible utilisé.



Le frittage : diffusion des grains pendant l'élévation de température, de différentes microstructures.

PROTECTION ET COULEUR



Certains produits céramiques subiront un post traitement à leur cuisson ; il s'agira pour la plupart de recevoir un revêtement céramique qui leur conférera plus de résistance à l'usure. Par exemple ou plus communément, l'application d'une couche d'émail coloré, l'ensemble produit plus revêtement subira une seconde cuisson pour lier toujours par fusion l'ensemble des composants.



Ces revêtements sont, dans le cas des céramiques traditionnelles, posés en vaporisant sur la pièce de l'émail broyé mélangé à de l'eau. Dans le cas de produits plus précieux comme l'or ou le platine, ceux-ci seront posés au pinceau ou par des techniques de transfert semblables à l'imprimerie. Les céramiques techniques ou biomédicales pourront subir des dépôts de matière en fusion (torche plasma) voire en phase gazeuse.

Pour mettre au point les revêtements et les émaux, voire les couleurs minérales de décoration, le céramiste devra mettre en œuvre des mélanges de plusieurs dizaines de matières premières afin d'obtenir la coloration, l'aspect de surface, la brillance, ou l'inaltérabilité du produit fini. Il devra tenir compte de l'action du support, des cycles de cuisson, de l'usage final du produit, parfois de l'incompatibilité des composants ou de leur interaction . (La cuisson d'une pièce verte au chrome teintera toutes les pièces blanches à l'oxyde d'étain qui seront proches.)



La connaissance des matériaux est donc la clé de voûte des compétences du céramiste. Rares sont les métiers aujourd'hui où le praticien doit maîtriser l'intégralité de la transformation d'un produit, de son état le plus naturel (carrière), jusqu'à parfois le garantir à vie pour l'utilisateur.



HISTORIQUE

Aucune date précise de l'apparition de la céramique ne peut être donnée, mais on la situe généralement vers le milieu du mésolithique entre 10000 et 5000 avant J. C.

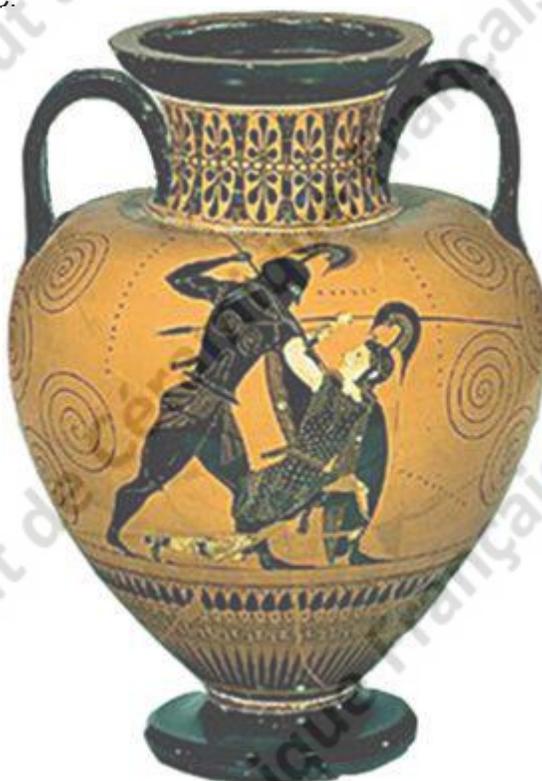
Les poteries :

Les découvertes archéologiques ont montré la présence de poteries dans toutes les civilisations, de l'Amérique précolombienne à l'Orient, ce qui s'explique facilement, car l'argile qui les constitue se rencontre à peu près partout dans le monde.

Les Grecs, qui savaient purifier l'argile en séparant les impuretés telles que le sable par lavage à l'eau, ont pu fabriquer des poteries à pâte fine dont la qualité de surface est admirable. Ces poteries semblent avoir été cuites non plus dans une excavation faite dans le sol, mais dans des fours à parois construites tels qu'il est possible d'en reconstituer dans une poterie mycénienne des XIV^e – XII^e siècles av. J.-C.

Le feu qui, en plus de la cuisson des poteries, a permis la fusion de matières minérales à base de carbonate de soude, de potasse, de plomb... a amené l'invention des glaçures servant à émailler les produits. Cela a permis d'embellir et d'imperméabiliser les poteries.

Avec le cuivre, provenant de la malachite du Sinaï, les Égyptiens les ont colorées en vert et en turquoise, deux millénaires avant notre ère.



Les faïences

La date de l'invention des faïences, céramiques à tesson poreux recouvertes d'une glaçure, est inconnue. Dans l'ordre chronologique, Brongniart indique la Chine, la Perse et l'Arménie, l'Espagne par les Arabes (XII^e siècle), puis l'Italie, la France (Bernard Palissy au XVI^e siècle), l'Allemagne et l'Angleterre.



Les grés

Vers 200 av. J.-C. sont apparues des céramiques imperméables, non émaillées, appelées grés, dont l'obtention a été rendue possible par la découverte d'argiles plus ou moins vitrifiables (grésantes) et par l'amélioration de la cuisson.

Les porcelaines

C'est à la même époque que les Chinois ont fabriqué les protoporcelaines. Puis, l'emploi du kaolin dans la composition leur a permis d'obtenir la porcelaine blanche et translucide, peut-être déjà, sous les Souei (VI^e – VII^e siècles), mais de façon certaine sous les Tang (618 à 907 de notre ère).

C'est par les écrits arabes que l'Europe entend parler de la porcelaine après 715. Marco Polo en rapporte en 1298 à son retour de Chine, les importations en Europe augmentent après la découverte, en 1498, de la route maritime des Indes Orientales par Vasco de Gama.

La beauté de la matière et la forte demande incitent les Européens à fabriquer leur propre porcelaine. Parmi les nombreuses tentatives, on peut citer celles de Francesco 1^{er} de Médicis, vers 1570 et celles de Louis Poterat, faïencier renommé de Rouen, dans le dernier quart du XVII^e siècle ; les porcelaines obtenues ne contiennent pas de kaolin, mais du verre ; ce sont des « pâtes tendres » de faible dureté.

En 1695 s'ouvre la première manufacture de porcelaine tendre, celle de Saint-Cloud, origine du développement de l'industrie de la porcelaine en Ile de France.

Cependant, partout en Europe, princes et alchimistes cherchent à percer le secret de la composition de la porcelaine chinoise et, en 1709, Frédéric Böttger, alchimiste qui n'a pas su fabriquer de l'or pour le prince de Saxe, mais lui a présenté la première porcelaine dure européenne. Dans sa composition entre le fameux kaolin qui est tout simplement la matière blanche dont son barbier a l'habitude de lui saupoudrer la perruque et dont les énormes gisements sont toujours en exploitation. Le prince crée alors la manufacture de Meissen qui parvient à garder le secret et le monopole de la fabrication de cette porcelaine pendant plus de cinquante ans



Pendant ce temps, pour lutter contre cette production, quelque vingt-cinq manufactures de porcelaine tendre se créent en Europe, dont la manufacture de Vincennes, puis de Sèvres, à la demande de Mme de Pompadour en 1756.

Cette vague prend une plus grande ampleur lorsqu'est découvert, en 1768, le kaolin de Saint-Yrieix, près de Limoges, permettant la fabrication de la pâte dure.

Au XIX^e siècle, commence l'industrialisation de cette production : Limoges compte cinq fabriques de sept fours en 1808 et trente-cinq fabriques de cent vingt fours en 1900.

Puis, au XX^e siècle, la porcelaine trouve des débouchés dans l'électricité, l'art dentaire, les salles de bains et les laboratoires.



Plats à œuf retrouvés sur l'épave du TITANIC coulé en 1912



Les céramiques réfractaires et techniques

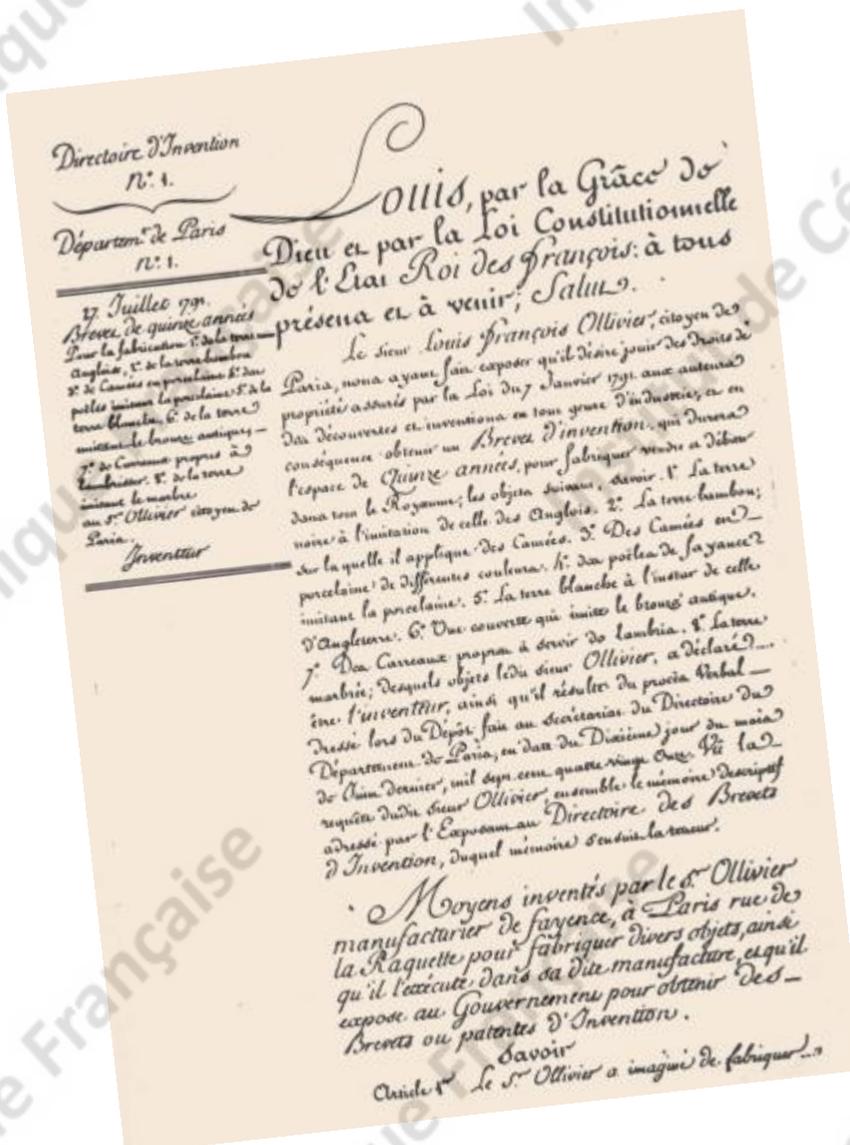
Les premiers produits réfractaires, c'est-à-dire résistants au feu, indispensables à la cuisson à haute température, ont probablement été obtenus par les Phéniciens ou les Chinois, à partir de sable quartzeux cuit à l'air libre. Ces produits étaient suffisants pour le revêtement intérieur des anciens fours de fusion du verre et des métaux. Mais ce n'est qu'au début du XIX^e siècle que leur technologie s'est séparée de celle des briques de construction pour se perfectionner sans cesse et atteindre des caractéristiques de mieux en mieux adaptées à leurs applications.

La seconde moitié du XX^e siècle a vu l'apparition de « nouvelles céramiques » à usage industriel.

L'emploi de matières premières naturelles ou synthétiques de très haute pureté, associées à des procédés de mise en forme et de cuisson ou frittage d'une grande technicité, a donné naissance à des matériaux céramiques pour applications dans des domaines de haute technologie : l'électronique, l'aéronautique, le spatial, le médical, la biotechnologie, l'automobile.

Il s'agit de familles de produits encore en pleine évolution, aussi bien dans leurs caractéristiques que dans leurs débouchés. Mais d'ores et déjà, ils ont apporté des solutions là où tous les autres matériaux avaient dû s'incliner. Le XXI^e siècle verra certainement leur développement s'accroître.

Aux XIX^e et XX^e siècles, l'industrialisation de cet « art du feu » qu'est la céramique s'est accompagnée de la diversification et de la sophistication progressive de ses produits. Leurs caractéristiques et leurs applications sont maintenant d'une telle variété que l'industrie céramique est aujourd'hui constituée de secteurs aux profils très contrastés.



Signalons à titre anecdotique que le premier brevet français, délivré le 17 juillet 1791 au sieur François Olivier, concernait la fabrication de plusieurs types de céramiques, telles que des camées en porcelaine, des carreaux de poêles et des carreaux à lambrisser, de la « terre » imitant le bronze antique, de la « terre » imitant le marbre.

LES DIFFÉRENTES PÂTES CÉRAMIQUES

CLASSIFICATION DES PÂTES CÉRAMIQUES

PÂTES POREUSES

Les terres cuites

Les terres cuites non réfractaires

De coloration rouge-orangé, elles n'ont pas de revêtement (émail) et ont une pâte grossière fabriquée avec des argiles ferrugineuses. Elles ne supportent pas de très hautes températures.

Les réfractaires

De coloration jaunâtre, sans revêtement, elles ont une pâte grossière fabriquée avec des argiles contenant très peu de fer et de chaux. Elles peuvent supporter de très hautes températures de cuisson.



Les faïences

Caractéristiques :

Opacité complète du tesson : par opposition à la translucidité des porcelaines.

Cassure terne et terreuse : elles se distinguent des porcelaines et des grès, dont la cassure est toujours plus ou moins vitreuse et brillante.

Réfractarité du tesson :

Par opposition aux porcelaines et grès, la pâte contenant moins de fondant limite la déformation et ne permet pas d'atteindre la fusibilité.

Grande perméabilité du tesson : porosité des faïences de 10 à 25 %, contre une porosité des porcelaines d'environ 0,5 %. Conséquences de la porosité : les petits trous, les éclats dus aux chocs, les fissures de fabrication ou de cuisson, le tressillage ou l'écaillage sont autant de voies de pénétration vers le biscuit, d'où des risques de taches sous l'émail. Ces défauts seront d'autant plus prononcés que le tesson sera poreux. Il existe également un risque de gélivité.

Difficultés dans la réalisation d'un accord satisfaisant entre tesson et émail : le tesson resté poreux présente des propriétés physiques éloignées de celles du verre, notamment en ce qui concerne le coefficient de dilatation.

Température de grand feu est inférieure à celles des porcelaines et des grès : la cuisson biscuit est arrêtée quand la résistance mécanique est suffisante pour son utilisation future. Pas de recherche de vitrification.

Température de cuisson émail est inférieure ou égale à celle de la cuisson biscuit.

Faible déformation à la cuisson grand feu : la faible teneur en fondants n'occasionne pas de ramollissement sous l'action de la chaleur.

Solidité et résistance mécanique inférieures à celles des produits vitrifiés : le tesson des faïences est moins homogène que celui des produits vitrifiés. Les différents constituants sont moins bien cimentés et moins étroitement liés que dans les porcelaines et les grès.

Les faïences communes

Pâte grossière de coloration rougeâtre à base d'argiles ferrugineuses. Email tendre et transparent, cuisson entre 800 et 1000 °C.

Les faïences fines

Pâte fine blanche à base d'argiles réfractaires (kaolin). On utilise comme fondant le feldspath. Leur émail est très fusible et coloré et elles sont décorées. Leur température de cuisson est de 1000 à 1250 °C.

PÂTES VITRIFIÉES

Les grès

Caractéristiques :

Produits vitrifiés, opaques, imperméables, très durs et de grande résistance. Selon leur usage ils peuvent être recouverts par des vernis. Cuisson à des températures comprises entre 1100 et 1300°C. Monocuisson.

Les grès naturels

Formés à base d'argiles à grès, vitrifiant naturellement par la seule action de la cuisson.

Les grès composés

Composition à partir d'argiles peu vitrifiables naturellement, auxquelles sont incorporés des produits fusibles tels que des feldspaths, des sables feldspathiques, fusibles, des pegmatites ou des syénites néphéliniques.

Les vitreous

Origines

Pâte fine très compacte dont la vitrification est telle que la porosité est très faible. Dans ce produit, la teneur en fondants feldspathiques a été forcée aux dépens du quartz, de l'argile et du kaolin. On obtient un produit plus résistant mécaniquement et moins sensible au tressailage que la faïence fine.

Actuellement, la vitrification de plus en plus poussée conduit à un produit dont la texture imperméable correspond à celle d'un grès blanc.

Fabrication :

La pâte est préparée comme celle d'une faïence. Cuisson biscuit entre 1200 et 1300°C ; on trouve à l'heure actuelle de plus en plus de monocuissons, l'émaillage est alors plus difficile à réaliser, mais on y gagne une cuisson.

Les porcelaines

Caractéristiques :

Pâte vitrifiée, translucide sous faible épaisseur.

Les porcelaines tendres

Vernis peu dur, ne résistant pas totalement aux rayures de l'acier, la température de cuisson est de 1280°C. L'émail est cuit à plus basse température que le biscuit, comme pour les faïences.

Porcelaines tendres anglaises : fusibilité apportée par une matière première naturelle comme le feldspath ou le Cornish stone.

Porcelaines tendres phosphatiques : fusibilité apportée par des os de bovins calcinés, broyés et pulvérisés.

Les porcelaines dures

Les constituants essentiels sont :

Le feldspath (15 à 40 %) apporte la fusibilité. Permet la vitrification et a un rôle de dégraissant au façonnage.

Le kaolin (40 à 65 %) apporte la cohésion au façonnage, mais également une certaine réfractarité. Il diminue la translucidité.

La silice (10 à 30 %) aide à la vitrification (par vitrification avec les autres éléments) et favorise la translucidité.

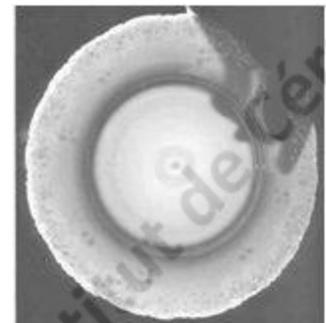
Fabrication des porcelaines dures :

Cuisson du dégourdi de 800 à 1050°C.

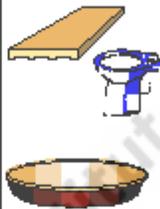
Émail : couverture transparente très dure après cuisson.

Cuisson : oxydante jusqu'au début de la vitrification, réductrice jusqu'à ce que la couverture soit sensiblement figée, refroidissement en aérant à partir de 1410°C.

Décoration : essentiellement sur émail cuit.



LES DIFFERENTES PATES CERAMIQUES

POREUSES	Opacité du tesson Cassure terreuse Grande porosité Difficulté d'accord avec l'émail T° de cuisson émail inférieure à T° biscuit Faible déformation	TERRE CUITE		900 à 1050 °C	8 à 20%	jaunâtre rouge brun
		FAIENCE		1050 à 1200 °C	5 à 12%	rouge rosé beige ecru
VITRIFIEES	Faible porosité Déformation à la cuisson Cassure brillante et coupante	GRES VITREOUS		1100 à 1350 °C	0 à 3%	écru beige brun
		PORCELAINE VITRO PORCELAINE		1200 à 1400 °C	0%	écru blanc
REFRACTAIRES	Résistance aux températures Résistance aux attaques acides et basiques Résistance aux chocs thermiques	REFRACTAIRE		1400 à 2000 °C	divers	divers
SPECIALES	Résistance à l'électricité Inoxydable Résistance aux températures et chocs thermiques Résistance chimique	CERAMIQUE SPECIALE		1400 à 3000 °C	divers	divers

MODELAGE

HISTORIQUE PLÂTRE

Depuis le néolithique, l'homme sait fabriquer le plâtre à partir du gypse. C'est en Anatolie (Turquie d'Asie) que l'on découvre des fresques décoratives, peintes sur des enduits de plâtre et de chaux, datant de 9000 ans avant J. C. Les pyramides vieilles de 5000 ans sont intérieurement recouvertes de stuc, fait de couches successives de chaux, de plâtre et de poussière de marbre.

C'est ce matériau, représentant l'aspect lisse du marbre après polissage, qui sera employé vers la douzième dynastie (-2000 à -1785) pour orner les sarcophages momiformes, on retrouvera ce matériau quelques siècles plus tard en Grèce pour préparer les murs à recevoir les fresques.

En France et particulièrement dans le bassin parisien, le plâtre est utilisé dès l'époque gallo-romaine et devient courant au moyen âge (enduits intérieurs, objets divers moulés).

Les plus anciens éléments moulés retrouvés en France sont des sarcophages mérovingiens datant de la fin du VI^e siècle, imitant ceux de pierre taillée des Romains.

Outre l'utilisation du plâtre dans le stuc, on le trouvera bientôt sous la forme de staff. En 1850, le staff est redécouvert en France, il se compose d'une mince couche de plâtre (la plupart du temps coulée dans un moule) qui sera armée avec de filasse, du chanvre tissé ou non et de nos jours avec de la fibre de verre. C'est lors de l'exposition coloniale de 1931 que la reproduction d'une partie du temple d'Angkor en staff donnera à ce matériau ses dimensions internationales.



UTILISATIONS



LE BÂTIMENT



MÉDICO DENTAIRE



LE STAFF



LA CÉRAMIQUE

Les céramistes qui moulaient, dès l'époque gallo-romaine des terres cuites sigillées, dans des moules eux-mêmes en biscuit, adopteront rapidement ce nouveau matériau, tant ses qualités sont nombreuses, facilité et rapidité de mise en œuvre, prix de revient, reproductibilité des reliefs, mise en œuvre, auxquelles viendra bientôt se rajouter une possibilité d'absorption d'eau qui fera de lui le matériau idéal de confection de moules pour la fabrication d'objets céramiques.

Les diverses qualités du plâtre et notamment sa facilité de mise en œuvre lui ont permis de se développer tant dans l'industrie que dans l'artisanat, les métiers utilisant le plus cette matière sont indiqués ci-contre :

GÉOLOGIE

La matière première utilisée pour la fabrication du plâtre est le sulfate de calcium qui se trouve dans la nature sous deux formes minérales bien définies :

- le gypse $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- l'anhydrite Ca SO_4

Il existe plusieurs variétés de gypse :

La variété cristalline claire du gypse est connue sous le nom de sélénite.

La variété granulaire massive semblable au marbre est connue sous le nom d'albâtre.



La «gypsite» est une variété de gypse constitué d'une abondance de petits cristaux de sulfate de calcium disséminés dans des terres argileuses ou sableuses.

La basanite qui n'a pas d'importance économique puisqu'on la trouve uniquement dans les blocs éjectés du Vésuve.

PROPRIÉTÉS PRINCIPALES DU GYPSE

Le gypse pur comprend 79,1 % de sulfate de calcium et 20,9 % d'eau, le gypse commercial atteint rarement cette composition théorique, il contient fréquemment des impuretés diverses telles que le calcaire, l'argile, la silice, etc.

Quand il est suffisamment pur, le gypse est incolore ou blanc, mais les impuretés changent celle-ci en gris, brun-rouge ou rose. Quand il est bien cristallisé, il est transparent ou translucide, il a une dureté de 1,5 à 2 dans l'échelle de Mohs et peut être rayé avec l'ongle. Le poids spécifique du minéral pur est de 2,3 à 2,4.

Mis à part sa relative instabilité vis-à-vis de l'eau, c'est une substance inerte, résistante aux agents chimiques, et ayant des propriétés marquées de résistance au feu.

Porté à des températures comprises entre 128°C et 163°C, il perd environ 75 % de son eau de cristallisation, et le produit résultant, est constitué principalement de hémihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$. Par l'addition d'une quantité convenable d'eau, ce mélange se réhydrate et devient dur.

ORIGINE ET MODE DE FORMATION DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE

Il existe 3 modes de formation principaux du gypse et de l'anhydrite :

- Précipitation des solutions salines
- Précipitation par action chimique de l'acide sulfurique et des sulfates sur les minéraux calciques
- Par désagrégation et ré-accumulation mécanique

PRÉCIPITATION DES SOLUTIONS SALINES (théorie lagunaire)

Le gypse et l'anhydrite sont parmi les premiers minéraux qui précipitent des solutions salines quand elles s'évaporent progressivement dans des conditions naturelles, ils peuvent se déposer en grande quantité lorsque l'eau de mer ou des lagunes s'évaporent et pour cette raison ils sont souvent associés à des dépôts salins.

Au début de l'évaporation de l'eau de mer, le premier sel qui se sépare est le carbonate de calcium, puis si l'évaporation se poursuit apparaîtra le sulfate de calcium.

Beaucoup de dépôts de gypse sont nés de l'hydratation de l'anhydrite ; certains, cependant, furent, dès l'origine déposés sous forme de gypse.

ACTION CHIMIQUE SUR LES PIERRES CALCAIRES

Le second mode de formation du gypse relève de la genèse de l'acide sulfurique et des sulfates dans les roches initiales soit par décomposition de minéraux sulfurés tels que les pyrites ou par introduction directe de composés sulfurés accompagnant l'activité volcanique. Ils peuvent alors agir sur les sels de chaux en solutions ou sur la pierre à chaux pour donner du sulfate de calcium.

DÉSAGRÉGATION ET ACCUMULATION MÉCANIQUE

D'après le troisième mode de formation, le sulfate de calcium sableux, formé par la désintégration des dépôts existants de gypse ou d'anhydrite peut être transporté et concentré par le vent sous forme de dunes par exemple.

LE GYPSE D'ORIGINE CHIMIQUE

L'élaboration de certains produits chimiques tels que l'acide phosphorique et l'acide fluorhydrique entraînent la formation comme sous produits de quantités importantes de sulfates de calcium dihydrate. Ces gypses d'une constitution cristalline particulière ne sont pas utilisés dans l'industrie de l'élaboration du plâtre, de plus ils contiennent un pourcentage élevé d'impuretés.

TEXTURE CRISTALLINE SELON L'ÉPOQUE DE FORMATION

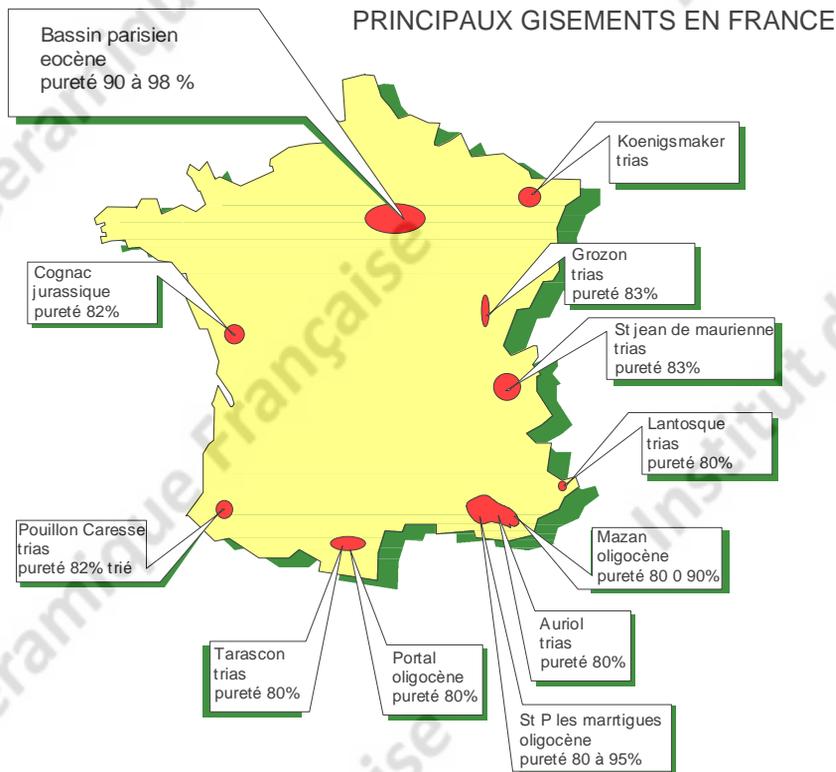
Il s'est formé du gypse dès la fin de l'époque primaire (carbonifère).

D'importants gisements se sont produits à la base du secondaire (Muschelkak Keuper).

Le gypse du bassin parisien date du tertiaire (Bartonien supérieur).

D'une façon générale, plus le gypse est ancien, plus il est compact (un gypse du keuper aura une densité de $2,2 \text{ kg/dm}^3$ alors qu'un gypse du tertiaire n'affichera que $1,5 \text{ kg/dm}^3$).

La compacité est proportionnelle à la densité, elle conditionnera la broyabilité, donc la granulométrie des produits entrant dans le four, elle agira directement sur la cinétique de la déshydratation.

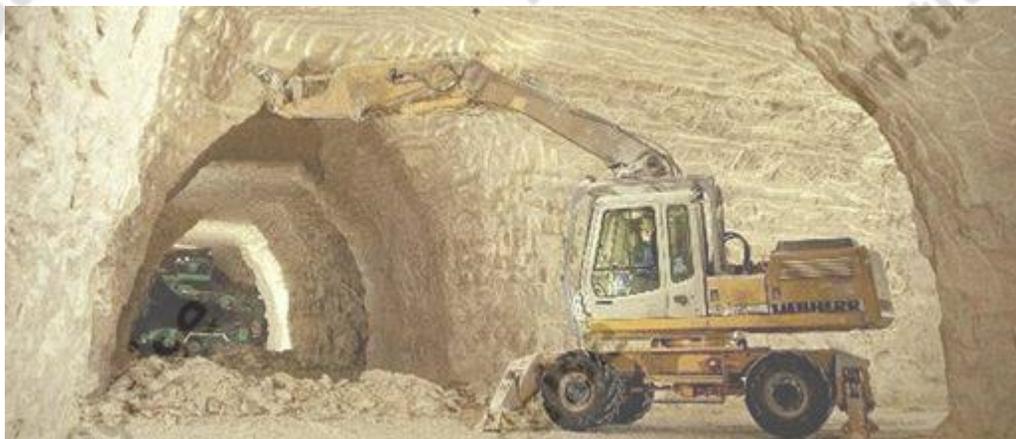


EXTRACTION

EXPLOITATION DES GISEMENTS

Le gypse n'affleure que rarement à la surface du sol, il est toujours recouvert de stériles (argiles, sables, marnes, etc.)

On peut donc concevoir deux types d'exploitation ; une exploitation souterraine par le système de puits et galeries ou une exploitation à ciel ouvert après enlèvement du stérile.



EXPLOITATION EN GALERIE

Elle a l'inconvénient majeur de faire perdre une grosse partie du gisement (environ 50%), de ne pas permettre l'utilisation d'engin puissant pour l'extraction et le transport, et d'interdire l'utilisation du sol pour la construction.

Elle a, cependant, l'avantage de distribuer en fabrication un gypse d'humidité faible sensiblement constant et jamais souillé par d'éventuelles coulées de stérile, entraîné par les eaux de ruissellement.

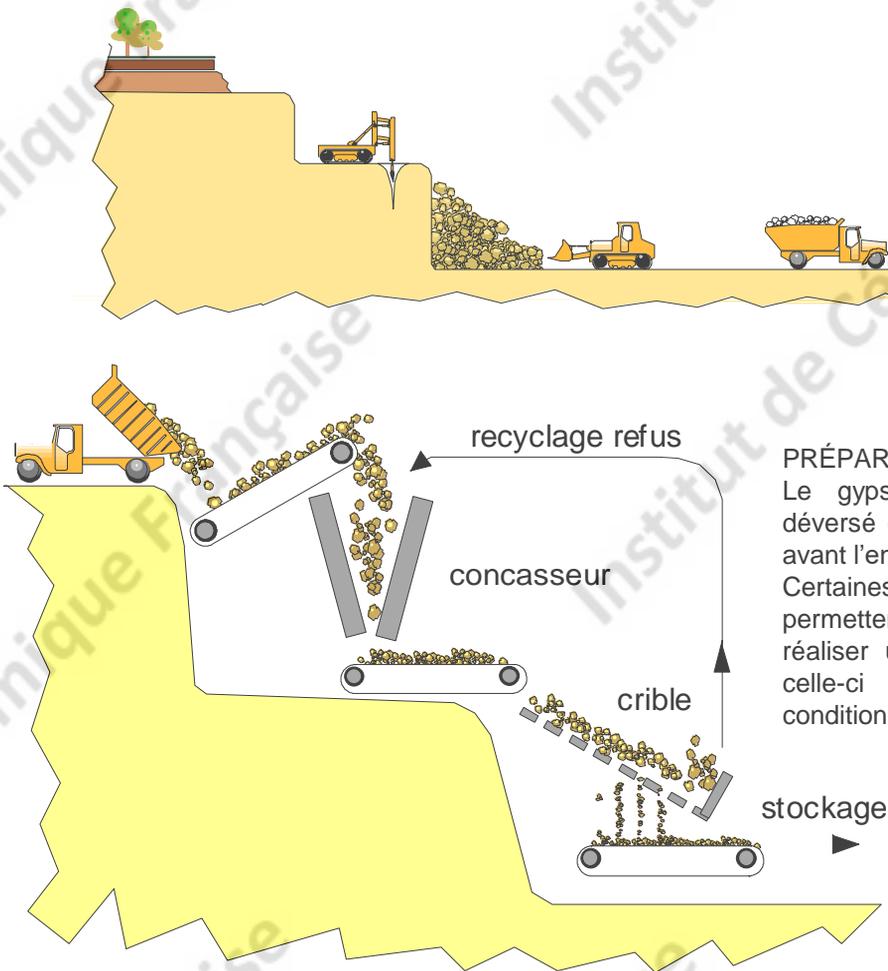
EXPLOITATION À CIEL OUVERT

Elle permet l'exploitation complète du gisement. Supprimant le relief, elle supprime du même coup le problème de l'utilisation du sol de couverture.

Elle est compatible avec l'utilisation des moyens modernes et puissants d'abattage, d'extraction et de transport.

Cependant, on livre avec ce genre d'exploitation un gypse d'humidité variable, risquant parfois d'être souillé par les argiles entraînées par les eaux de ruissellement.

La plupart du temps, la motivation du choix du type d'exploitation est liée au rapport de l'épaisseur de la couche de stériles, à l'épaisseur et à la capacité du gisement de gypse.



CUISSON DU GYPSE

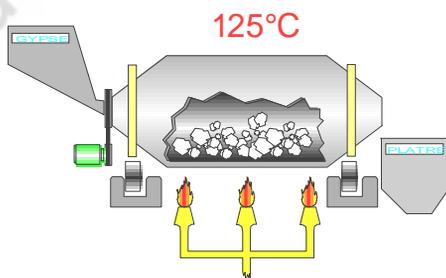
LA CUISSON DU GYPSE

Convertir le gypse en plâtre de moulage c'est, par chauffage modéré, faire disparaître une partie de l'eau de cristallisation de la roche naturelle ; on obtient ainsi un produit qui réhydraté ne demande qu'à fixer l'eau qu'on lui a retirée pour redonner le double hydrate dont il est issu.

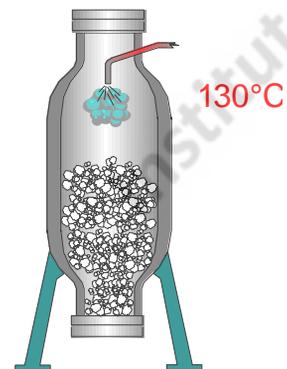
Mais cette opération, apparemment simple, est extrêmement délicate, le tableau ci-dessous montre les différents corps que l'on rencontre dans le système $\text{CaSO}_4\text{H}_2\text{O}$, ainsi que les différents modes de formation de ces corps.

Phase	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ forme α	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ forme β	CaSO_4 III	CaSO_4 II
Désignation	sulfate de chaux dihydraté gypse	sulfate de chaux demihydraté plâtre α	sulfate de chaux demihydraté plâtre β	sulfate de chaux anhydres anhydrite soluble anhydrite III	
teneur en eau %	20,92	6,2	6,2	0	0
Masse volumique	2,31	2,76	2,62 à 2,64	2,58	2,93 à 2,97
volume moléculaire	74,5	52,4	55,2	52,8	46,4 - 45,8
Système cristallin	monoclinique	rhomboédrique		hexagonal	rhomboédrique
Indices de réfraction	n 1 521 n 1 523 n 1 530	1559 1559 1584		1501 1501 1546	1570 1576 1614
Stabilité	stable	métastable		métastable	stable
Préparation		voie humide	voie sèche		
Chaleur d'hydratation (25°) Kelley 1941		- 4100 cal.molg ⁻¹	- 4600 cal.molg ⁻¹		
Chaleur spécifique molaire cal. molg ⁻¹ . deg-		16,95 + 0,039T	11,48 + 0,061 T		
Solubilité dans H ₂ O à 3°C g/ 100 ml sol.		0,825	1,006		
Cristallisation		compacte	spongieuse		
Surface spécifique		faible	élevée		
Gâchage à saturation		fort	faible		

CUISSON DIRECTE



CUISSON EN AUTOCLAVE



BROYAGE



COULAGE



CALIBRAGE



PRESSAGE

LA CUISSON DU GYPSE

La décomposition du gypse peut conduire à deux formes d'hémihydrates selon qu'elle s'opère à la pression atmosphérique en l'absence d'eau liquide, ou au contraire en milieu aqueux, vapeur saturante ou solution. Les deux formes sont désignées respectivement par les lettres Bêta et Alpha ; elles diffèrent essentiellement par la dimension et la perfection des cristaux (du plâtre alpha) qui appartiennent tous deux au système rhomboédrique. Il résulte de cette différence de texture des différences très importantes dans les propriétés thermodynamiques, dans les poids spécifiques, dans les saturations, etc.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE CUISSON PAR VOIE SÈCHE, PROCÉDÉS AVEC PRÉBROYAGE AVANT LA CUISSON

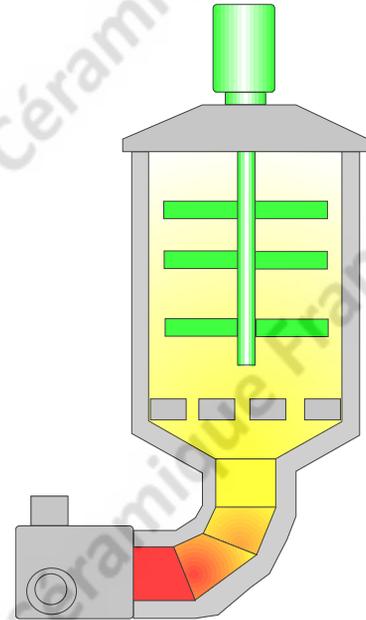
Le gypse suivra un cycle avant cuisson de séchage et de broyage permettant à la granulométrie de passer de 10 – 40 mm à moins de 200 microns.

Procédé à la cuve ouverte (pan) discontinu :

Il s'agit de grandes cuves plates chauffées par le fond. Les fonds sont faits de plaques de fontes de 5cm d'épaisseur avec une protection de briques réfractaires de 10 cm pour le séparer du foyer. Pour surmonter l'inégale distribution de la chaleur, la masse du gypse est agitée par de lourdes chaînes traînant sur le fond des cuves.

Procédé à la marmite discontinu :

Une marmite se compose d'une capacité cylindrique verticale ouverte à la partie supérieure dont le diamètre varie entre 2 et 4m et la hauteur entre 2 et 4m. Ce réservoir est introduit dans une autre enceinte balayée par un fluide chaud. Au centre de la marmite, un arbre vertical muni de pales assure un brassage continu pendant la cuisson

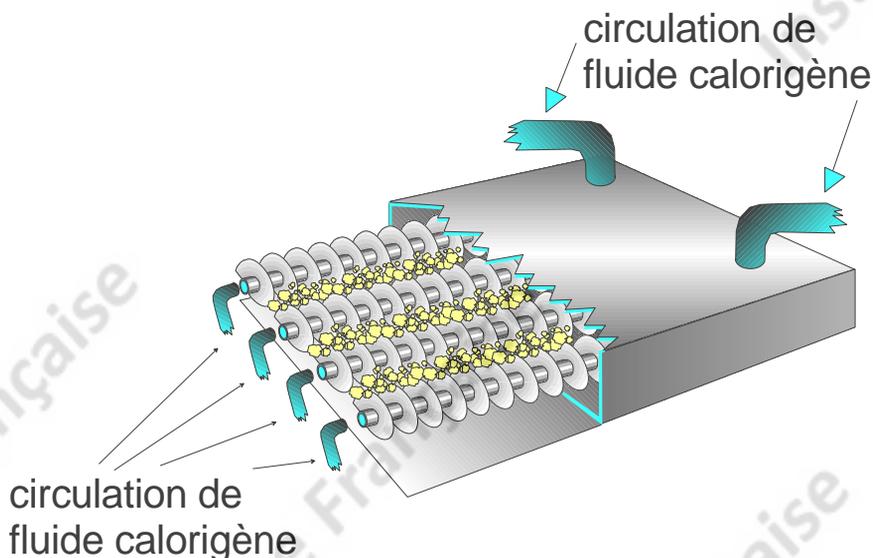


Procédé des vis holoïtes :

Un élément se compose d'un volume relativement plat à double enveloppe, à l'intérieur duquel sont disposées des vis tournantes à spirales creuses, la circulation d'un liquide calorigène dans cette double enveloppe et dans les spires assurera la transmission de la température au gypse qui sera transporté par lesdites vis à travers l'enceinte, les appareils existants se composent de plusieurs étages de lits de vis qui sont chacun réglable en température, permettant ainsi une parfaite régularité du plâtre à la sortie du four.

Procédé en lit fluidisé:

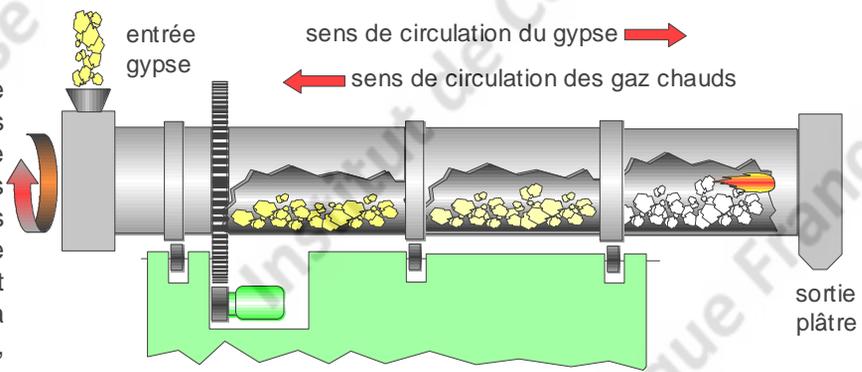
Il est basé sur le principe des foyers à grille. Le gypse finement broyé est transporté par une grille sans fin sous laquelle est distribué de l'air réglé en température et humidité.



Procédé du four rotatif :

On trouve deux types de fonctionnements possibles : les gaz chauds circulent dans le même sens que le gypse, ou les gaz chauds circulent en sens inverse du gypse. On trouve également des fours où les gaz et le gypse ne circulent pas dans la même enceinte, mais chacun, dans une enveloppe séparée la plupart du temps, composée de tubes.

L'enceinte de cuisson se compose d'un tube tournant autour de son axe et légèrement incliné sur l'horizontale (environ 5%). Le gypse est introduit en continu à une extrémité, à l'opposé se trouve un brûleur. Le cylindre incliné en tournant permettra au gypse de progresser en direction du brûleur au fur et à mesure de sa progression, la température du gypse s'élèvera pour atteindre près de la sortie sa température de cuisson finale.



LA CUISSON EN PRÉSENCE D'EAU OBTENTION DU HÉMIHYDRATE ALPHA

Plusieurs procédés industriels existent pour l'obtention du semihydrate alpha en phase aqueuse à la pression atmosphérique, mais n'ont pas encore reçu la consécration industrielle, aussi nous ne présenterons donc que les différentes variantes de la cuisson à l'autoclave.

Obtention de semihydrate alpha à partir de gypse en morceaux

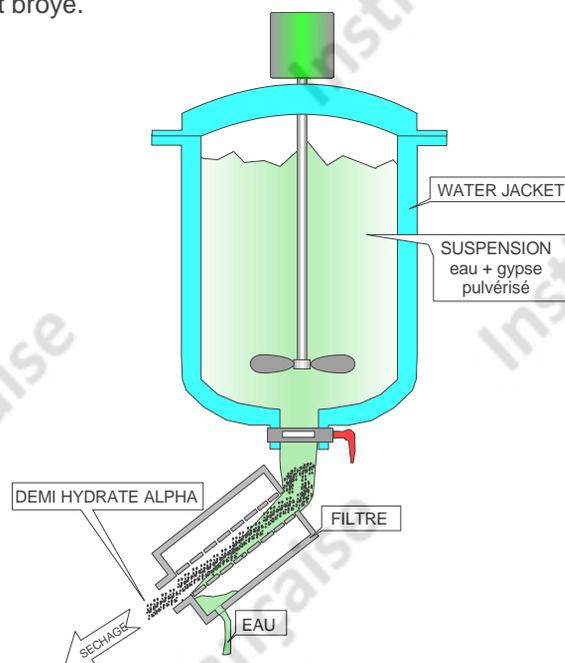
Le gypse empilé sur des wagonnets est introduit à l'intérieur d'un autoclave horizontal.

On met l'autoclave en pression à l'aide de la vapeur provenant d'une chaudière. L'intensité de la pression, la durée d'application de cette pression sont fonction de la dimension des morceaux. À la fin de la cuisson, la vapeur est évacuée, l'autoclave s'ouvre, le plâtre obtenu est concassé, séché et livré.

On peut également descendre un panier rempli de gypse dans un autoclave vertical.

Obtention de semihydrate alpha à partir de gypse finement broyé.

Un autoclave chauffé par water jacket comporte un dispositif d'agitation en son axe vertical, on remplit d'eau jusqu'au 2/3 environ, on met l'agitateur en marche. On introduit le gypse finement broyé (max. 100 microns) le rapport du poids d'eau et du poids de gypse est environ de 1, l'obtention de la pression se fera par élévation de la température, après cuisson la suspension est soutirée par le fond de l'appareil et filtrée, pour séparer l'eau du hémihydrate, le produit est ensuite séché et broyé pour obtenir sa granulométrie définitive. L'avantage de ce procédé est de permettre l'incorporation de façon homogène d'adjuvant au sein de la masse du produit à cuire.



TRAITEMENT APRÈS CUISSON

Après cuisson, on procède à la réduction, à la finesse définitive. En effet, les plâtres à mouler ont un diamètre maximum qui ne dépasse pas les 100 microns.

Pour les plâtres sortant des appareils de cuisson avec un diamètre de 6 à 20 mm, on procède à un stockage préalable au broyage. Ce stockage est parfois appelé post cuisson. On peut supposer en effet qu'il permet une homogénéisation des températures entre le cœur et la surface des grains, donc une homogénéisation de la teneur en eau de cristallisation résiduelle.

Les différentes qualités de plâtres à mouler sont obtenues par le mélange de semi-hydrates alpha et bêta. Pour l'ensemble des plâtres à mouler utilisés, la proportion de semihydrate alpha est de l'ordre de 25 à 30%. Mais elle varie suivant les utilisations entre 0 et 100%. La teneur en semihydrate alpha est conditionnée par la porosité et la dureté que l'on désire obtenir.

QUALITÉS DU PLÂTRE

LA RÉGULARITÉ : les plâtres à mouler font partie de la catégorie des plâtres industriels pour lesquels la notion de qualité est objective et faite d'indices de variation aussi faibles que possible.

Les critères indicateurs des utilisateurs seront les suivants :

LA COULABILITÉ : c'est l'aptitude d'un plâtre à épouser la forme d'un moule et le temps pendant lequel la pâte gardera cette aptitude.

LA VITESSE DE DURCISSEMENT : qui détermine le temps séparant la limite de coulabilité de la possibilité d'extraire le moule de la matrice.

LA STABILITÉ DIMENSIONNELLE : qui permettra de réduire au minimum les contraintes auxquelles sont soumis les moules mères (gonflement).

LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE : limitant le nombre d'accidents survenant aux moules au cours des manipulations d'une part et conditionnant la résistance à l'usure d'autre part.

LA CAPACITÉ D'ABSORPTION D'EAU ET LA VITESSE DE DIFFUSION DE L'EAU : conditionnant la vitesse de prise et de ressuyage.

Outre les caractéristiques propres aux matériaux, le plâtre livré par le fournisseur où l'on trouvera :

Les qualités du gypse, sa pureté.

Les proportions de semihydrate alpha et bêta.

La cuisson et son homogénéité.

La dimension des grains et leur répartition granulométrique.

Éventuellement l'adjonction d'adjuvants.

Les utilisateurs auront également à maîtriser un certain nombre de facteurs afin de pouvoir fabriquer des moules de qualité. Pour cela, ils devront tenir compte de :

De la qualité du plâtre employé.

De la nature et de la température de l'eau.

Du rapport plâtre / eau.

De l'organe d'agitation.

De la vitesse d'agitation.

De la durée d'agitation.

Temps de repos avant agitation.

Du taux de vide.

Du séchage après la prise.

ADJUVANTS

RETARDATEUR ET ACCÉLÉRATEUR

La vitesse de prise est un élément déterminant pour la qualité des plâtres, mais aussi pour l'efficacité de la mise en œuvre des moules, en effet les phases de remplissage et démoulage sont déclenchées en fonction du temps de prise considéré comme régulier.

Les facteurs pouvant influencer la prise sont :

La finesse du plâtre.

Le taux de gâchage.

La température de la gâchée (la vitesse de prise augmentera jusqu'à 40°C pour s'annuler vers 70°C).

L'énergie et la durée de gâchage, qui en augmentant, diminueront le temps de prise.

La présence, dans l'eau de gâchage, de plâtre déjà pris, favorisera la prise.

Outre ces divers facteurs et afin de conserver une vitesse de prise aussi stable que possible, on peut utiliser divers produits en faible quantité qui pour la plupart accéléreront ou diminueront la vitesse de prise en fonction de leur concentration. Ils peuvent agir en modifiant la solubilité du plâtre dans l'eau (les produits diminuant la solubilité sont des retardateurs et ceux l'augmentant sont des accélérateurs).

Ils peuvent agir en favorisant la naissance de germes cristallins.

Ils peuvent modifier le développement, la forme, le groupement des cristaux.

LES ACCÉLÉRATEURS

Les sulfates sont tous des accélérateurs sauf le ferrique.

- Sulfate d'aluminium / Sulfate de magnésium / Sulfate de potassium / Sulfate de sodium (accélérateur en faibles doses et retardateurs au-delà).

- Les nitrates.

- Les bromures.

- Les iodures.

- Les chlorures alcalins et d'ammonium (le chlorure de sodium est accélérateur jusqu'à 5% et retardateur au-delà).

-Les acides sulfuriques, chlorhydriques ,nitriques.

LES RETARDATEURS : On peut les classer selon trois catégories :

1°) les substances organiques d'un poids moléculaire élevé, agissant comme colloïdes protecteurs comme la colle, gélatine, la gomme arabique, la caséine... Ces substances donnent en outre des plâtres très durs après séchage, mais aux dépens de leur porosité.

2°) Les substances diminuant la solubilité du plâtre dans l'eau comme :

- Alcool glycérine

- Sucre

- Acétone éther

- Acide citrique / Acide borique / Acide lactique / Acide acétique / Acide phosphorique et ses sels

3°) Les substances modifiant la structure cristalline du plâtre

- L'acétate de calcium

- Le carbonate de calcium

EFFETS PARTICULIERS DES MODIFICATEURS DE PRISE

Les sels de sodium et de magnésium peuvent créer des efflorescences.

Les acides et sels acides peuvent créer des dégagements gazeux, des bulles ...

La plupart diminuent les caractéristiques mécaniques des plâtres pris, cependant on note que :

2% de borax abaissent fortement la cohésion des plâtres, mais l'augmentent légèrement si l'on reste à des pourcentages inférieurs à 0,75%

Le citrate de potassium 0,01 à 0,05% augmenterait la résistance tout en retardant la prise.

Urée ou un dérivé à 2% augmente la résistance 15 à 20% et multiplie le temps de prise par deux.

Il existe de nos jours de nombreux produits dérivés de ceux-ci et ils permettent de modifier les temps de prise tout en conservant les autres caractéristiques du plâtre, ceux-ci sont pour la plupart proposés sur le marché par les fournisseurs de plâtre.

PRINCIPE DE LA PRISE

Le phénomène de la prise du plâtre est en effet une cristallisation du semihydrate en dihydrate ou pour simplifier le gypse ayant perdu son eau de cristallisation au cours de la cuisson retrouvera par ajout d'eau sa forme stable cristallisée.

L'opération nommée prise peut être décomposée en deux phases principales :

1°) La dissolution du semihydrate dans l'eau : et à l'instant même réaction entre le sulfate en solution et l'eau (réaction exothermique) .

2°) Cristallisation du semihydrate en dihydrate ; cette cristallisation est très rapide, car le dihydrate se dissout 4 fois moins que le semihydrate saturant ainsi rapidement la solution.

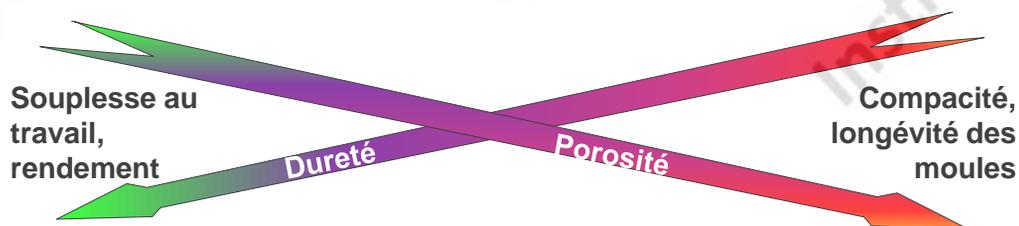
Les cristaux produits, en forme d'aiguilles s'enchevêtrèrent, et par leur croissance dans toutes les directions formeront une texture poreuse. La cohésion que donne cette imbrication sera d'autant plus forte que les cristaux seront fins et allongés.

Ce que l'on appellera le début de la prise couteau correspondant au début de rigidité de la masse traduit la formation de 5 à 10% de double hydrate. Le début de prise sera traduit par l'essai de la prise couteau et sera déterminé lorsque le passage d'une lame de 2cm de haut et 2mm d'épaisseur provoque une coupure dans la masse de plâtre frais qui ne se referme qu'incomplètement.

La prise sera accompagnée d'une augmentation de la température de la masse ainsi que d'un phénomène d'expansion de volume. La température s'élèvera en fin de prise entre 35 et 40°C.

Et l'augmentation définitive du volume se situera entre 0,2 et 0,4% après séchage, cependant on constate une légère contraction du plâtre juste après le début de prise, ce qui permet, si la solidité du plâtre l'autorise, le démoulage des chapes, alors que le gonflement maximum en fin de prise permettra le démoulage des noyaux.

β	100%	75% 25%	50% 50%	25% 75%	100%	α
	Coulage Modelage	Coulage multiple ou abrasif	Calibrage Modelage	Pressage Matrices	Usages spéciaux	
	1,3 à 1,4	1,2	1,4 à 1,6	2,5 à 2,9 1,7 à 1,8	2,5 à 3,3	



Temps de prise	Limite d'écoulement	Temps de coulabilité	Temps de mise en œuvre	Introduction Repos Gâchage
				Début de coulée Fin de coulabilité
				Début de prise
				Fin de prise

FACTEURS DE VARIATION DES QUALITÉS DU PLÂTRE

ÉTUDE DE LA VARIATION DU RAPPORT PLÂTRE EAU :

L'augmentation du rapport plâtre sur eau de 0,8 à 2 entraîne une diminution très forte des caractéristiques de mise en œuvre (temps de prise moins 40%). La porosité totale diminue également très fortement (moins 38%). Par contre, les résistances mécaniques augmentent dans de très fortes proportions (compressions plus 960% , flexion plus 400% ainsi que le coefficient d'absorption de plus de 35%).

ÉTUDE SUR LA VITESSE D'AGITATION :

Cette étude a été réalisée avec une hélice tournant à 600, 1200 et 1800 tours à la minute, en passant de 600 à 1800 tr/min :

Le temps de coulabilité diminue de 38%, le temps de prise de 9%.

La résistance à la compression augmente de 22% .

La résistance à la flexion augmente de 22%.

Le coefficient d'absorption augmente de 11%.

ÉTUDE SUR LE TEMPS D'AGITATION :

En passant de 2 à 8 minutes d'agitation et en restant dans les limites de la coulabilité, le temps de coulabilité diminue de 38% le temps de prise de 21% alors que la résistance à la compression augmente de 19% la résistance à la flexion augmente de 21% et le coefficient d'absorption augmente de 22,5%.

ÉTUDE SUR LE GÂCHAGE SOUS VIDE :

Outre le fait d'obtenir une pâte exempte de bulle (à condition d'obtenir un vide d'au moins 65%), on n'observe pas de variation notable des caractéristiques du plâtre durci par rapport à une préparation à la pression atmosphérique.

ÉTUDE SUR LE COMPORTEMENT AU SÉCHAGE APRÈS PRISE

On distingue habituellement trois phases de séchage : la première à vitesse constante, la deuxième à vitesse décroissante et la troisième encore décroissante. Il est généralement admis que pendant la période à vitesse constante l'eau s'écoule de l'intérieur vers l'extérieur et s'évapore à la surface du moule, le mouvement de l'eau est alors uniquement régi par le débit des capillaires et la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface.

Pour la deuxième période, on admet que le déplacement de l'eau se fait d'une part sous forme liquide et d'autre part sous forme de vapeur, les caractéristiques hygrométriques de l'air prendront alors toutes leurs importances pour cette période de séchage.

Pendant la troisième période à vitesse décroissante, la surface est sèche, l'évaporation se produit à l'intérieur du solide, l'eau arrive à l'état de vapeur à la surface du moule, les conditions de température et d'humidité de l'air fixeront la capacité de départ de l'humidité résiduelle. Lors du séchage après la prise, des études ont montré qu'à 50% d'humidité et 50°C :

50 à 70% de l'eau sont éliminés lors de la première phase (la durée de celle-ci est d'autant plus longue que le diamètre des pores est grand)

28 à 40% de l'eau sont éliminés pendant la deuxième phase.

L'eau restante 2 à 7% est éliminée pendant la troisième phase.

Le pourcentage d'humidité du plâtre se situe aux environs de 16%

Aucune corrélation n'apparaît entre la durée des deux dernières périodes et la répartition des pores.

ÉTUDE SUR LE COMPORTEMENT AU SÉCHAGE APRÈS PRISE (suite)

Dans le cadre d'une première humidification à une température de 50°C et 50% d'humidité relative, on observe que le départ de l'eau se décompose également en trois phases :

Plus de 50% d'eau sont éliminés pendant la première phase qui dure 2 à 3 heures.

Pendant la deuxième phase, dont la durée est également de deux à trois heures, 20 à 30% de l'eau sont éliminés.

Enfin l'eau restante, soit 10 à 17% sont éliminés pendant la troisième phase qui dure de 5 à 13 heures, celle-ci étant plus longue pour les plâtres à pores fins.

Si l'on procède à un deuxième séchage après humidification, et ce avec des conditions de température et d'humidité ayant évolué dans le cadre d'une fabrication en atelier c.-à-d. 30°C et 50% d'humidité, on s'aperçoit que la première phase est beaucoup plus courte et le pourcentage d'eau éliminé pendant celle-ci également, la durée de la deuxième phase par contre est plus longue et le pourcentage d'eau éliminé plus important, la troisième phase, également plus longue, assure le départ d'une quantité d'eau plus importante.

Ces données liées aux impératifs de production conduiront à des cycles de séchage accusant une température de 40°C pour une hygrométrie de 20% avec une vitesse de l'air aussi élevée que possible pour la première phase, puis diminution progressive de la température, dès la fin de la première phase pour aborder la troisième sans risque d'altération du dihydrate.

ÉTUDE SUR LE GONFLEMENT

Pratiquement, les plâtres classiques ont un gonflement variant de 0,12 à 0,25%, mais on trouve également dans les plâtres durs des valeurs pouvant atteindre 0,27 à 0,33% et il existe bien sûr des plâtres dits à faible gonflement 0,025%.

Au début de la prise, on constate une légère contraction qui est souvent mise à profit pour le démoulage des chapes si le plâtre est assez solide à ce moment. Ensuite et très rapidement, cette légère contraction est suivie par l'expansion qui débute lorsque le plâtre commence à durcir. Elle augmente surtout pendant la première heure, croît ensuite plus lentement pour atteindre son maximum qu'après plusieurs jours.

Après séchage total, il se produit une contraction qui a pour effet de diminuer de 50% l'expansion initiale.

FACTEURS INFLUENÇANT LE GONFLEMENT

- La proportion d'eau de gâchage : le gonflement diminue lorsque celle-ci augmente.
- La couverture du plâtre en prise par film d'eau augmente le gonflement en empêchant la pénétration de l'air.
- L'énergie du gâchage : si celle-ci augmente, le gonflement augmente
- La présence de certains sels : lorsque le plâtre est gâché avec un accélérateur puissant, le gonflement est fortement diminué et s'accomplit sur une période plus courte.
 - Sulfate de potassium
 - Sulfate d'aluminium
 - Sulfate de magnésium
 - Citrate de sodium
 - Borax
 - Mélange borax citrate qui sont des retardateurs de prises diminuent le gonflement

Au contraire, le chlorure de calcium contribue à accroître le gonflement, ainsi que la présence de plâtre pris dans l'eau ou les récipients de gâchage.

PUISSANCE ET COEFFICIENT D'ABSORPTION DES PLÂTRES

Lorsqu'une barbotine est mise au contact d'un moule en plâtre sec, celui-ci absorbe l'eau de la barbotine et l'on constate au fur et à mesure du temps qu'une croûte de pâte se constitue sur la paroi du moule.

La quantité d'eau absorbée est proportionnelle à :

La racine carrée du temps de contact entre la barbotine et le plâtre, et est fonction :

De la nature de la barbotine
De la nature du plâtre

$$Q = K_p \cdot K_b \cdot \sqrt{t}$$

Q est le poids d'eau absorbé

t le temps pendant lequel la barbotine est soumise à l'absorption du plâtre

K_b un coefficient constant fonction de la barbotine

K_p un coefficient constant fonction du plâtre

Lorsque les mesures sont effectuées avec la même barbotine

Sous des pressions identiques

Avec une température constante de la barbotine

On peut écrire : $Q = K \times \sqrt{t}$

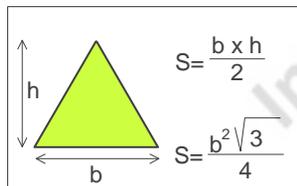
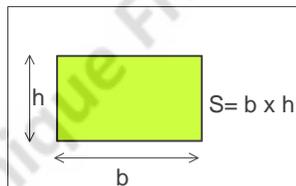
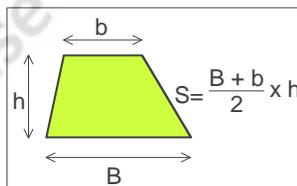
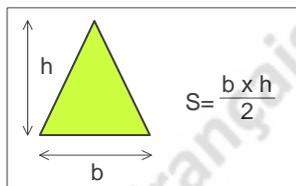
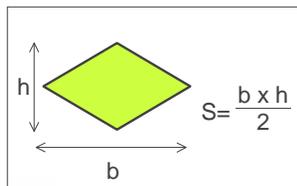
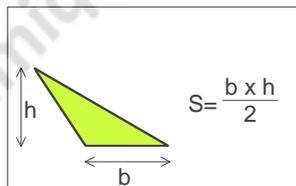
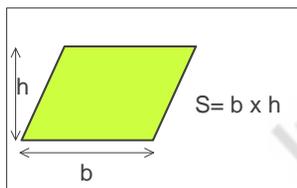
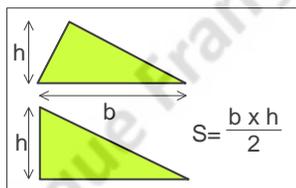
K est le coefficient d'absorption d'un plâtre, dans les conditions précisées ci-dessus.

Pour un certain plâtre (de rapport plâtre/eau = r), si l'on mesure Q en fonction de diverses valeurs du temps, t, \sqrt{t} est en abscisses et Q en ordonnées, une droite est obtenue et sa pente représente la valeur du coefficient, si on refait les mesures avec un rapport r' inférieur à r, donc avec un plâtre plus poreux on s'aperçoit sur les courbes que le coefficient d'absorption sera moins élevé.

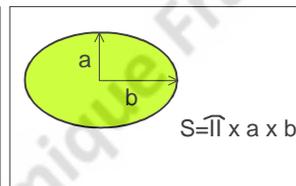
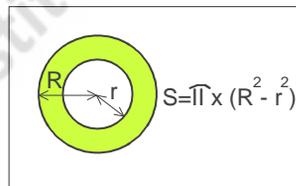
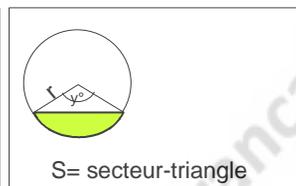
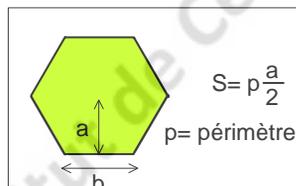
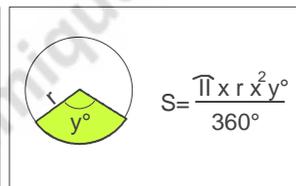
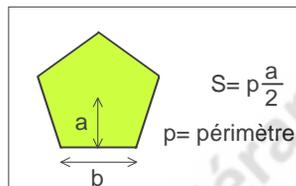
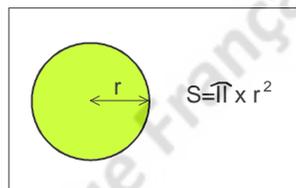
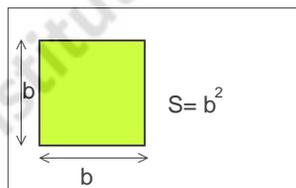
Le plâtre le plus poreux a généralement un coefficient d'absorption moindre.

SURFACES ET VOLUMES

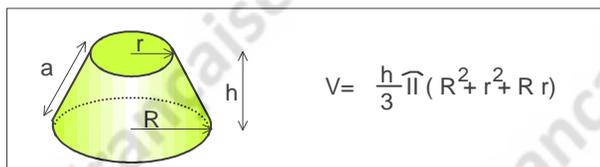
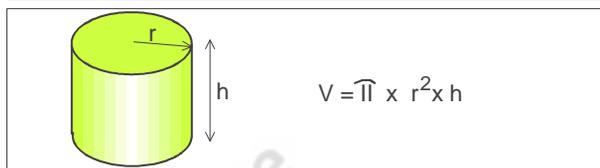
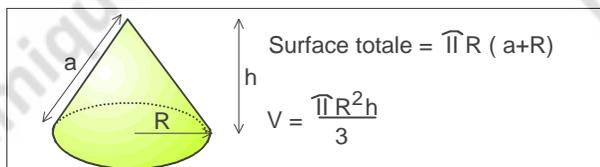
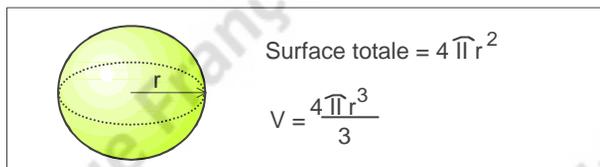
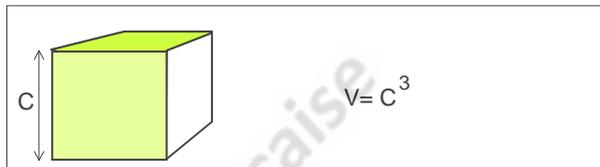
SURFACES



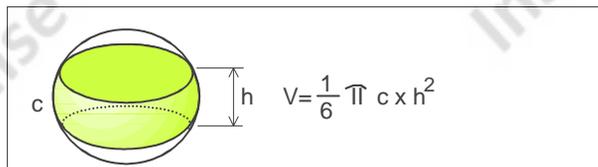
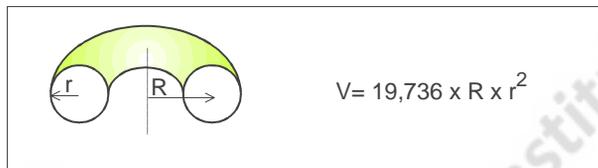
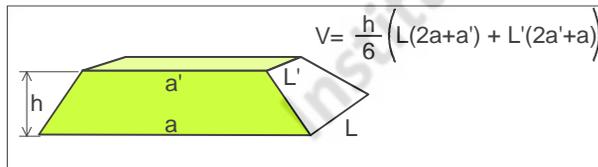
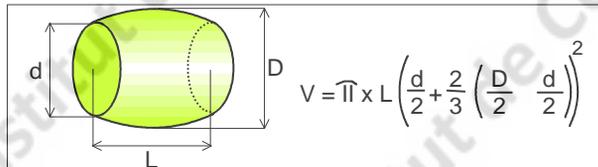
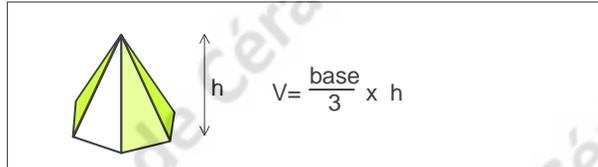
SURFACES



VOLUMES



VOLUMES

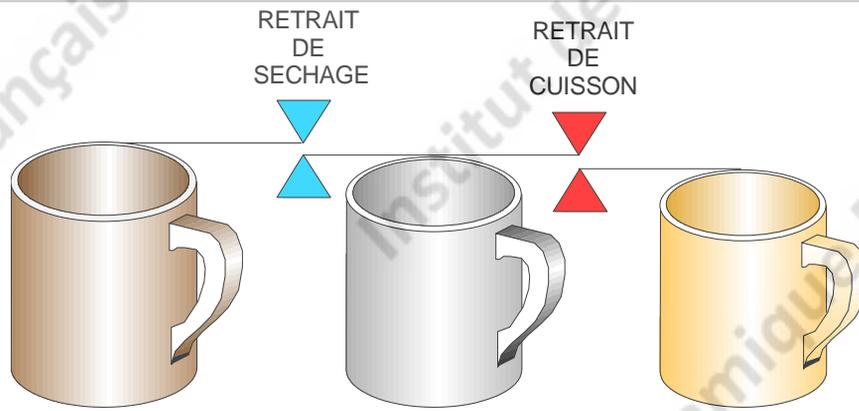


CALCUL ET PRÉPARATION DE LA QUANTITÉ DE PLÂTRE

Afin de calculer la quantité de plâtre à préparer pour le remplissage d'un coffrage :

- 1°) calculer le volume à remplir
- 2°) multiplier ce volume par $\frac{2}{3}$ ou 0.66666
- 3°) vous obtiendrez la quantité d'eau nécessaire
- 4°) multipliez cette quantité par 1.4 (taux de gâchage)
- 5°) vous obtiendrez la quantité de plâtre
- 6°) verser l'eau dans un récipient pouvant contenir 2 fois le volume prévu
- 7°) saupoudrer le plâtre à la surface de l'eau
- 8°) laisser le plâtre s'imprégner et se débuller
- 9°) agiter énergiquement entre 3 et 8 minutes selon les plâtres
- 10°) faire remonter les bulles en agitant la main à plat dans le fond du récipient
- 11°) retirer les bulles à l'aide d'une cuillère

CALCUL DE RETRAIT



Le retrait constaté pendant la phase de séchage n'est pas le seul à entrer en compte dans le calcul des dimensions finales de la pièce, en effet pendant la cuisson suite à la fusion des matériaux céramiques les vides existant entre les particules sont progressivement comblés, et la pièce se « ramasse » sur elle-même.

DIFFÉRENCE DE RETRAIT SELON L'ORIENTATION



RETRAIT LINÉAIRE



PIÈCE CRUE SORTIE MOULE, HAUTEUR 30, DIAMÈTRE 20

PIÈCE BISCUIT, HAUTEUR 29,1, DIAMÈTRE 19,4

PIÈCE VITRIFIÉE, HAUTEUR 26,4, DIAMÈTRE 17,6

Retrait 3% sur cru

Retrait 9.3% sur biscuit

$$\begin{aligned} 30 - 29.1 &= 0.9 \\ 0.9 / 30 &= 0.03 \\ 0.03 \times 100 &= 3\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 29.1 - 26.4 &= 2.7 \\ 2.7 / 29.1 &= 0.093 \\ 0.093 \times 100 &= 9.3\% \end{aligned}$$

**ET SURTOUT PAS
RETRAIT TOTAL 12% =
RETRAIT SUR CRU 3%
+ RETRAIT SUR
BISCUIT 9.3 %**

Retrait total 12%

$$\begin{aligned} 30 - 26.4 &= 3.6 \\ 3.6 / 30 &= 0.12 \\ 0.12 \times 100 &= 12\% \end{aligned}$$

RETRAIT VOLUMIQUE

Retrait linéaire 3%



PIÈCE CRUE
COTE 3 dm
VOLUME $3 \times 3 \times 3 =$

27 LITRES



PIÈCE BISCUIT
COTE 2.91 dm
VOLUME
 $2.91 \times 2.91 \times 2.91 =$

24.64 LITRES

Si l'on a 3% de retrait, les côtes de la pièce crue devront être multipliées par 0.97 pour obtenir les cotes cuites.

si l'on veut calculer le volume il faudra multiplier le volume cru par 0.97 au cube soit : $0.97 \times 0.97 \times 0.97 = 0.9127$

Ex : $27 \times 0.9127 = 24.64$

Retrait volumique 8.73%

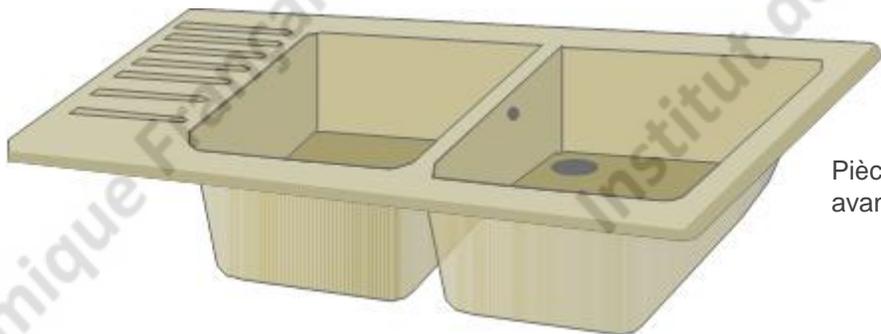
Exemple de calcul : vous venez de réaliser par coulage un pichet dont la contenance cuite est de un litre, sa hauteur cuite étant de 25 cm, calculer la hauteur du modèle d'un vase d'une contenance finie de 2 litres si le retrait total est de 12 % sur cru

L'augmentation de volume sera de 1 à 2 litres, les augmentations des cotes seront donc de racine cubique de 2 soit $= \sqrt[3]{2} = 1.26$

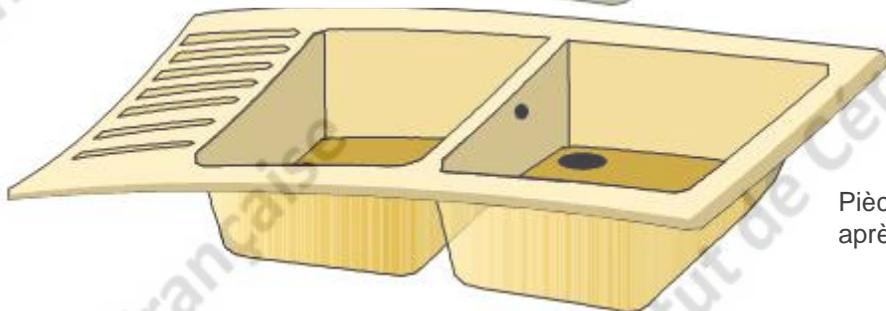
afin de compenser le retrait, les cotes calculées du vase cuit devront être augmentées en tenant compte des 12 % de retrait sur cru qui, calculé sur la base des cotes cuites deviendra :

cotes cuites du vase d'un litre $\times 1.26 \times 100 / (100-12) = \text{cotes} \times 1.43$.

CONTRE DÉFORMATION

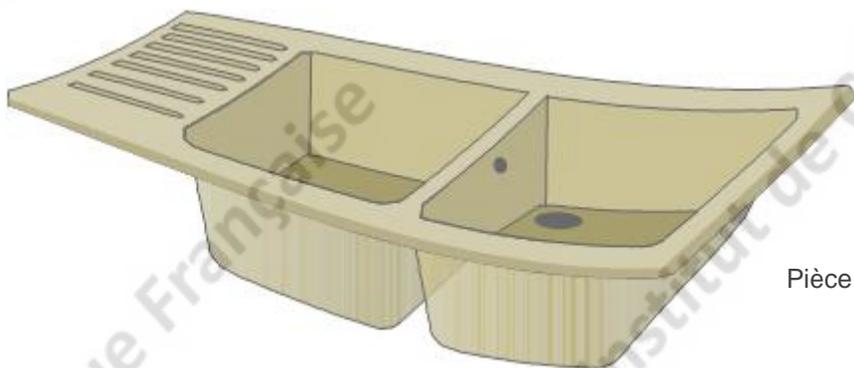


Pièce non contre déformée avant cuisson.

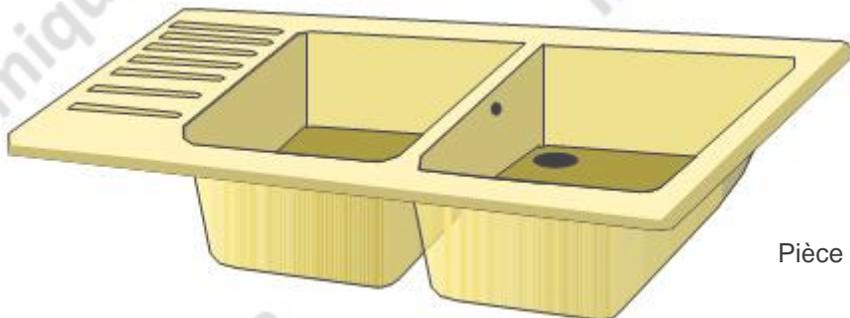


Pièce non contre déformée après cuisson.

Les pièces en pâtes vitrifiées se déforment beaucoup à la cuisson, la méthode pour éviter les déformations consiste à les cuire dans des supports réfractaires (berceaux, pilier, cales), ou d'anticiper la déformation liée à la fusion en donnant au modèle une courbure inverse de celle qui sera provoquée pendant la montée en température.



Pièce contre déformée avant cuisson.



Pièce contre déformée après cuisson.

OUTILLAGE DU MODELEUR

OUTILS DIVERS



Pince à grillage



Marteau



Maillet caoutchouc



Pinceau



Touret à meuler



Bol silicone



Serre joint



Colle à bois



Mélangeur



Planches de coffrage

OUTILS DE COUPE



Tournassins



Cisaille



Couteaux à peintre



Couteau

OUTILS DE FINITION



Scie égoïne



Ciseau à bois



Papier de verre



Estèque



Papier abrasif

RÂPES ET GRATTOIRS



Râpe à bois



SURFORM STANLEY



Éperon

Rifloir

Gradine

Gratte fond

Gouge

Ébauchoirs



Carde de nettoyage

OUTILS DE MESURES



Compas d'épaisseur

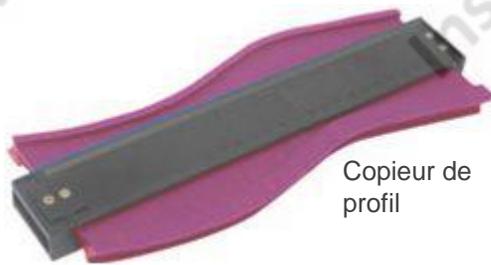


Compas

Sauterelle



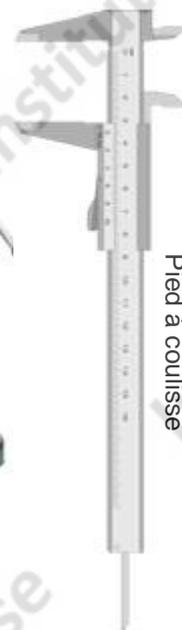
Équerre de mécanicien à talon



Copieur de profil



Trusquin



Pied à coulisse



Réglet



Chronomètre

ACCESSOIRES



soupape démoulage



gaine poreuse



Insert de fixation



natch serrant 17



natch serrant 12



natch serrant 7



tenon centreur



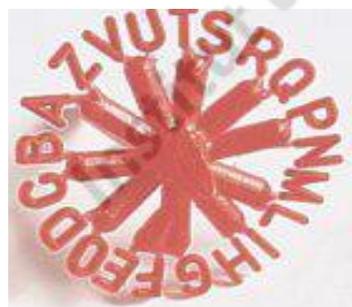
tenon centreur



tenon centreur



Insert de préperçage en silicone



lettres prédécoupées



aimant de fixation pour sous-pièces

FABRICATION D'UNE TÊTE DE TOUR RONDEAU ET QUILLE

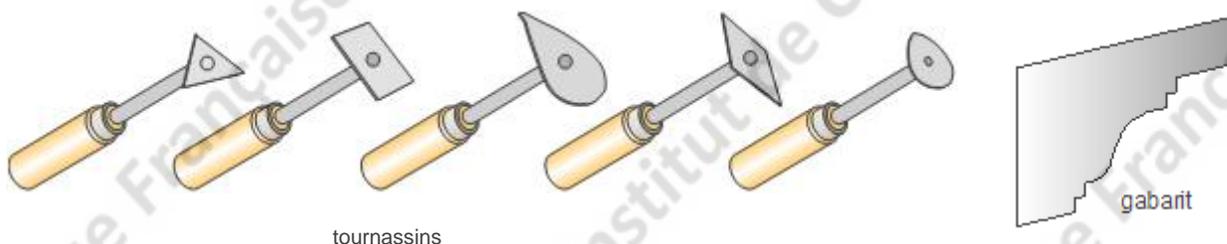
TOURNAGE DU PLÂTRE

Le tournage consiste à couler une masse de plâtre sur un tour vertical et d'usiner celle-ci pendant que le plâtre est encore frais, afin de faciliter le travail et de permettre des démarrages lents. Le tour devra être muni d'un variateur de vitesse.

Le travail au tour s'effectue debout à l'aide de tournassins et la plupart du temps en appui sur une tige de bois piquée dans le mur faisant face au tour.

Le dégrossissage de la forme se fait quand le plâtre est encore mou juste avant le début de la prise, le travail de celui-ci devra être stoppé lorsque le plâtre commencera à "pelucher" rendant impossible l'obtention d'une surface lisse et pourra reprendre après la fin de la prise.

Les outils les plus communément utilisés pour le travail au tour sont les tournassins (de différentes formes), les raclettes droites et courbes et le papier abrasif pour la finition, cependant on utilise également des gabarits en zinc ou en plâtre pour le dégrossissage ou le contrôle des formes complexes.



CONFECTION DE LA TÊTE DE TOUR

Les tours à plâtre vendus dans le commerce ne possèdent en bout d'axe qu'une girelle métallique semblable à celle des tours de potier. Afin de pouvoir installer facilement les outillages dont il aura besoin pour le travail au tour, le modeler devra tourner sur cette girelle une "tête de tour" en plâtre qu'il pourra ajuster à loisir au travail à effectuer, et ce sans disposer de matériel plus sophistiqué que celui cité précédemment. Le plâtre utilisé sera un plâtre dur gâché avec un fort rapport plâtre/ eau.

Sur la girelle, percer trois trous taraudés à 120°. Fixer trois pointes filetées ou trois boulons qui serviront d'accrochage à la masse de plâtre de la tête de tour.

Découper dans une plaque de bois ou de plâtre un disque d'un diamètre légèrement supérieur à celui de la tête de tour. Pratiquer un trou oblong débouchant, permettant le passage de l'axe de la girelle.

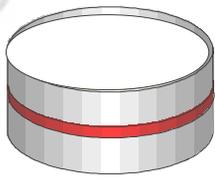
Placer ce disque à environ 20 mm sous la girelle de telle façon qu'il soit concentrique à celle-ci. Caler le disque avec des blocs afin qu'il soit parfaitement plan.

Boucher le trou oblong avec de la pâte ou une plaque de faible épaisseur.

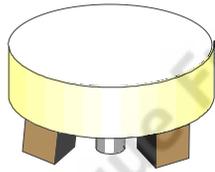
Assurer l'étanchéité autour de l'axe.

Monter un enterrage circulaire en zinc et couler un bloc de plâtre dépassant d'environ 100 mm le plateau de la girelle (attention, il faudra tenir compte des phases suivantes pour déterminer la hauteur optimale des trois pointes).

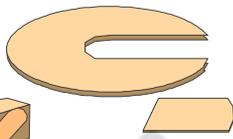
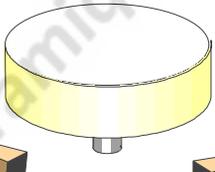




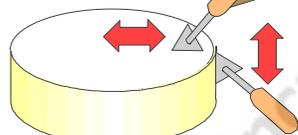
Compte tenu de la masse de plâtre à usiner le décoffrage de l'enterrage devra se faire aussitôt que la dureté du plâtre le permettra sans risque d'effondrement.



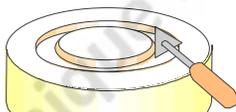
Décoffrer la plaque de zinc.



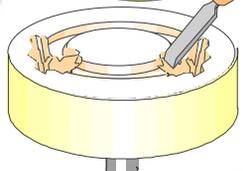
Démonter le calage et enlever les plaques de bois.



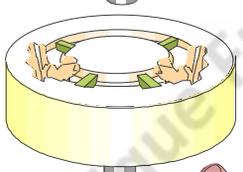
Usinage de la tête de tour : le plan horizontal doit être parfaitement dressé et la surface latérale également. ATTENTION, il faut usiner le dessous afin qu'aucun balourd ne vienne perturber la rotation.



Usiner un anneau en creux dont les parties latérales devront être légèrement en dépouille.



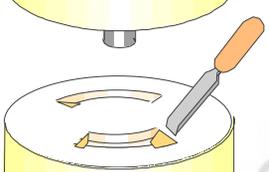
À l'aide d'un ciseau à bois, défoncer la tête de tour pour y pratiquer deux trous diamétralement opposés.



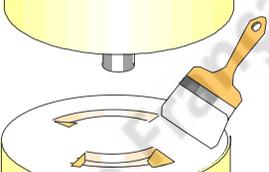
Monter un enterrage de pâte à l'extrémité des deux trous.



Couler un plâtre identique à celui de la tête de tour dans les deux trous (le taillage des trous devra être exécuté de telle façon que le plâtre coulé puisse s'accrocher dans des contre-dépouilles, on peut pour assurer l'accrochage planter des clous à tête dans le fond des trous). Araser la surface du plâtre coulé.

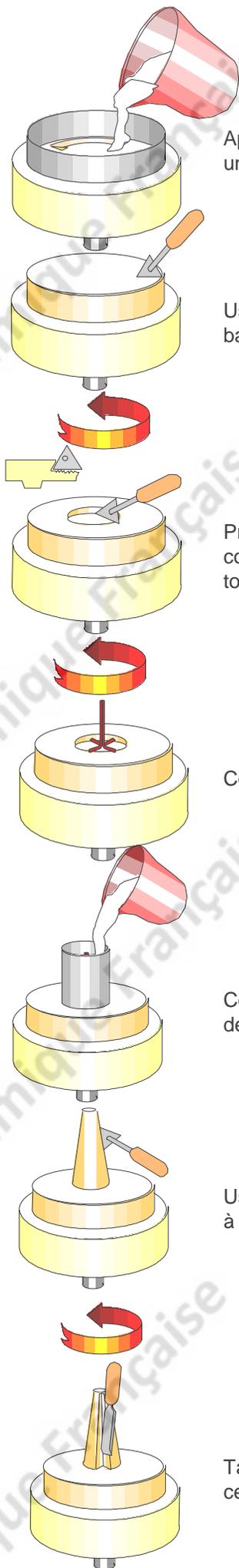


Décoffrer l'enterrage en terre et tailler l'extrémité des emboîtements : l'un vertical (il servira d'entraînement aux masses de plâtre coulées ultérieurement sur la tête de tour) et l'autre avec une pente de 60° qui permettra l'enlèvement rapide des rondaux par rotation dans le même sens que celui du moteur.



La taille de la tête de tour est désormais terminée, il faut maintenant l'imperméabiliser. Pour cela, le procédé le plus courant est l'imprégnation à l'aide de gomme-laque diluée à chaud (bain-marie) dans l'alcool à brûler, les premières couches devront être très diluées afin d'assurer une pénétration en profondeur, au fur et à mesure du passage des couches la gomme-laque sera de moins en moins diluée afin de former en finalité une surface lisse et brillante. Ce procédé aura en outre l'avantage de durcir le plâtre de la tête de tour sur plusieurs millimètres pour cette opération, le plâtre doit être sec

TOURNAGE D'UN RONDEAU AVEC QUILLE



Après avoir savonné la tête de tour, confectionner une cerce en zinc et couler une masse de plâtre correspondant aux dimensions du rondreau souhaité.

Usinage du rondreau (celui-ci devra être parfaitement dressé puisqu'il servira de base à toutes les pièces tournées).

Pratiquer un trou de 20mm de profondeur et du diamètre de la future quille à confectionner (celui-ci devra être en contre dépouille pour permettre la liaison totale de la quille et du rondreau).

Confectionner une armature métallique.

Confectionner une cerce en zinc aux dimensions de la quille, et couler la masse de plâtre.

Usinage de la quille (les dimensions seront fonction de la catégorie de modèles à fabriquer), la pente sera de 10° environ.

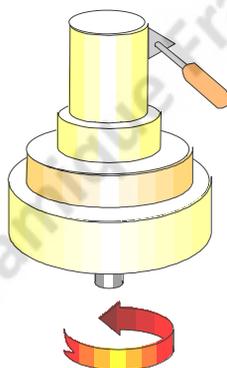
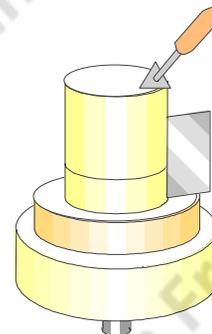
Taille d'une rainure selon l'axe vertical de la quille. Le rôle de cette rainure sera celui d'une clavette sur un arbre de moteur.

TOURNAGE D'UN MODÈLE AUX TOURNASSINS



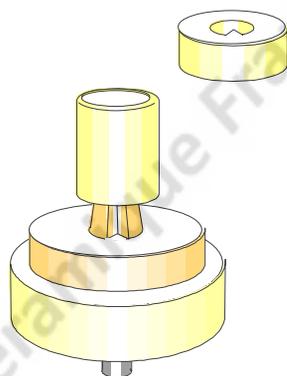
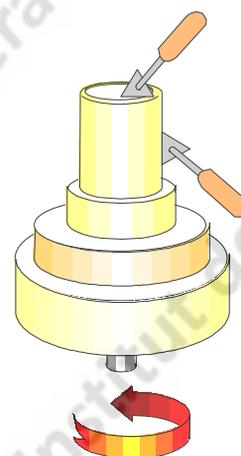
Installer le rondau amovible sur le rondau avec quille, savonner l'ensemble. Confectionner une cerce au plus près des dimensions du modèle (inutile d'avoir de trop grosses masses de plâtre à usiner) Couler le plâtre.

Aussitôt que la fermeté de la masse de plâtre le permet, commencer le travail aux tournassins la priorité est de rendre la masse de plâtre la plus ronde possible, le plus tôt possible. Dresser les surfaces verticales en s'aidant du rondau amovible.



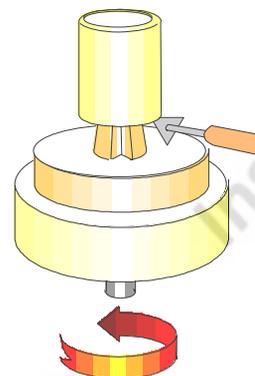
Usiner la masse de plâtre pour l'amener aux dimensions du modèle (attention, le plâtre passera par un stade de prise où l'usinage ne sera plus possible, en effet le plâtre s'arrachera, il faudra alors attendre quelques dizaines de minutes pour que son durcissement complet puisse permettre l'usinage).

Finition du modèle aux tournassins ,à la raclette puis au papier abrasif si nécessaire.



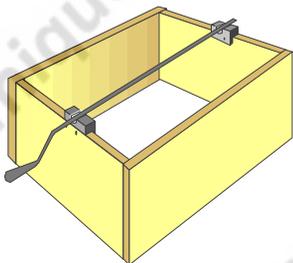
Si le dessous du modèle a besoin d'être rectifié (arrondi par exemple), on escamote le rondau amovible.

Remise en place du modèle et usinage des parties inaccessibles jusqu'à présent.



TOURNAGE D'UN MODÈLE HORIZONTAL

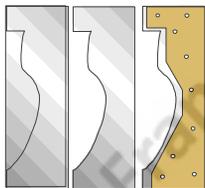
L'avantage de cette technique permet de réaliser des formes de révolution sans nécessité d'un matériel sophistiqué et coûteux. Elle permet en outre de confectionner des modèles très légers bien que de grandes dimensions (à condition de créer une âme creuse au préalable), mais, nécessite une dextérité et une connaissance du matériau au moins aussi importante que pour le travail au tour vertical.



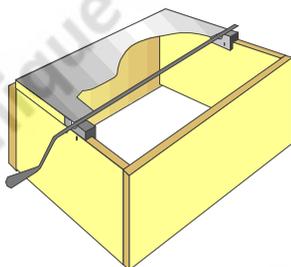
La tournette se compose d'un solide cadre en bois (traité contre l'humidité si possible) sur lequel sont fixés deux paliers, ces paliers serviront de support de rotation à un axe horizontal, cet axe est pourvu d'une manivelle qui permettra la mise en rotation.

L'axe doit être de section carrée allant en s'effilant au bout opposé à la manivelle.

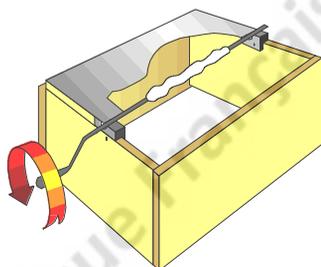
Le système de paliers doit être conçu de telle façon que l'on puisse extraire très rapidement le modèle en cours de fabrication de la tournette.



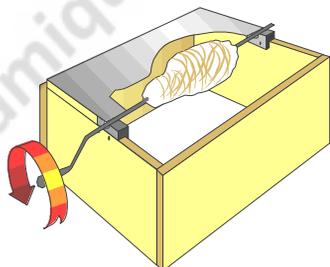
Comme pour le travail au tour vertical, on confectionne un gabarit en zinc renforcé de bois, ce gabarit aura pour forme intérieure le profil du modèle à créer et pour forme extérieure celle du cadre de la tournette.



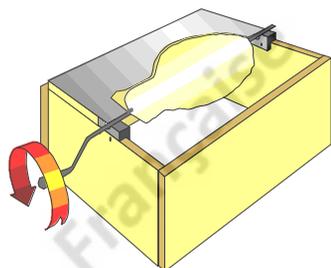
Fixation du gabarit (face côté zinc) sur la tournette.



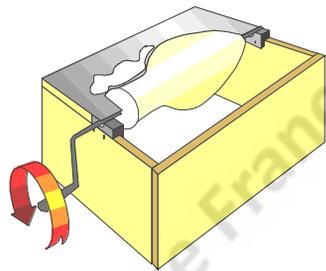
Enrobage de l'axe avec du plâtre.



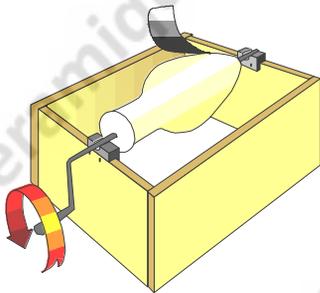
L'enrobage se poursuit en mettant en rotation la tournette de la main droite tout en renforçant la masse de plâtre de fibres de filasse.



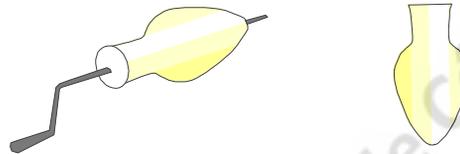
L'opération se poursuit jusqu'à ce que l'ébauche formée arrive à moins de 10 mm du gabarit. ATTENTION, le sens de rotation ne doit pas être inversé pendant la confection du modèle.



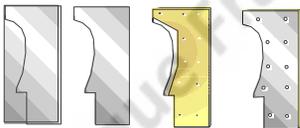
À ce moment, on commence à déverser du plâtre sans filasse sur l'ébauche tout en continuant à faire tourner l'axe, le plâtre en passant contre le gabarit viendra par couches successives prendre la forme du modèle. Le surplus de plâtre plus ou moins pris restant sur le gabarit doit être évacué au fur et à mesure au risque de marquer le modèle.



Le gabarit est retiré afin de permettre une finition classique. Après finition, l'axe est retiré de la pièce.



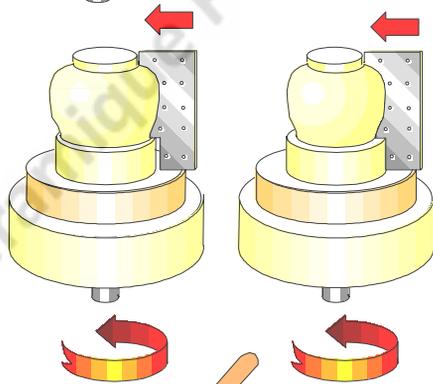
TOURNAGE D'UN MODÈLE VERTICAL AU GABARIT



Dessiner sur une tôle de zinc le profil de la pièce à confectionner. Découper cette tôle suivant le profil à la scie sauteuse. Finir à la lime. Confectionner un renfort en bois et le clouer au gabarit (afin d'assurer la rigidité de celui-ci).



Confectionner une cerce en zinc aux dimensions proches de celles du modèle. Décoffrer l'entourage aussitôt que possible (le plâtre doit être très mou pour permettre le travail au gabarit).



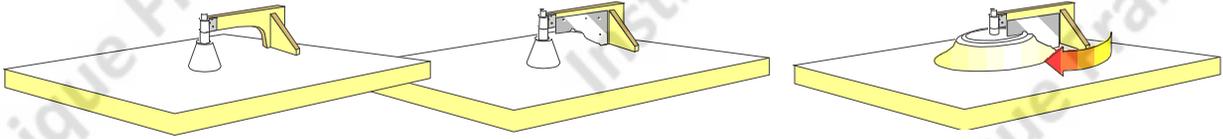
En s'appuyant horizontalement sur le rondou avec quille déplacer le gabarit dans le plâtre mou en direction de l'axe de la pièce, c'est le rondou amovible qui servira de butée pour l'obtention du diamètre final du modèle (il aura donc dû être conçu en fonction du modèle).



Finition du modèle aux tournassins, à la raclette, et si nécessaire au papier abrasif.

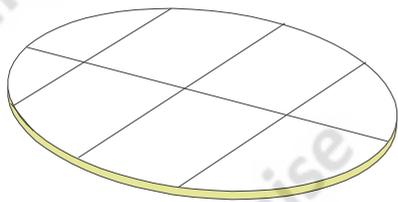
CONFECTION MODÈLE AVEC GABARIT TOURNANT

Cette technique est sensiblement identique à celle de la tournette horizontale, la différence réside dans le fait que ce n'est plus le modèle qui tourne à l'intérieur du gabarit, mais le gabarit qui tourne autour du modèle. Elle permettra de fabriquer des modèles de type platerie impossible à réaliser à la tournette horizontale. Cette technique est peu utilisée par les céramistes, mais plus par les staffeurs.

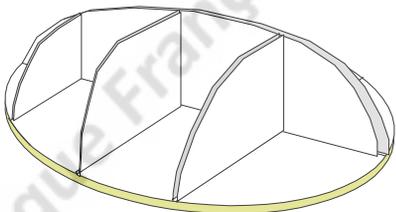


CONFECTION MODÈLE PAR TROUSSAGE

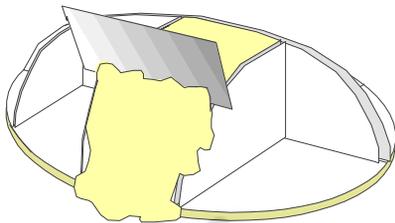
Certains procédés issus du traînage sont utilisés pour la confection de formes complexes. Ces techniques sont aujourd'hui surtout utilisées dans l'industrie de la céramique sanitaire. En exemple sera explicitée la confection d'une bosse de lavabo et de celle d'une cuvette.



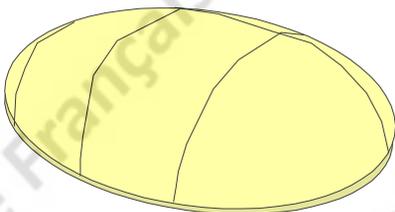
Confection d'une plaque de plâtre reprenant le profil de la base de la bosse.



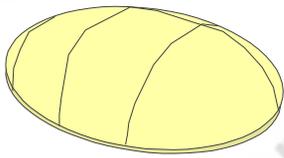
D'après les plans, on définit des coupes qui serviront à la confection de gabarits délimitant le volume extérieur de la pièce, plus ces gabarits sont nombreux, plus la suite et la précision du travail seront facilitées, les gabarits sont taillés dans du plâtre que l'on aura pris soin de colorer.



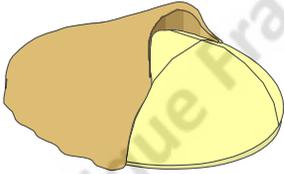
Les volumes entre les gabarits sont remplis de plâtre et au début de la prise le surplus est " traîné " à l'aide de raclettes (droites ou de forme) vers l'extérieur de la pièce, après plusieurs passes, on atteint le gabarit, qui par sa couleur se repère facilement.



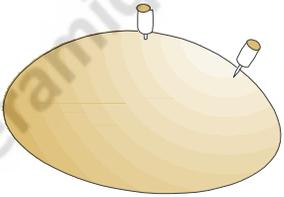
Il est conseillé de réaliser le modèle par étape le temps de travail du plâtre étant relativement court.



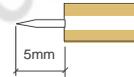
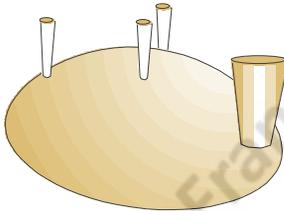
Après confection de la forme intérieure de la bosse d'un lavabo, il est souvent indispensable de réaliser une coque dont l'épaisseur représentera celle de la barbotine coulée entre deux plâtres.



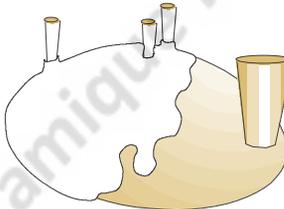
Mise en place par estampage d'une croûte de pâte ou de cire correspondant à l'épaisseur désirée (constante ou non). Cette mise en place se fait le plus souvent par juxtaposition de plusieurs plaques plus petites dont les joints seront lissés à la fin de la réalisation de la bosse.



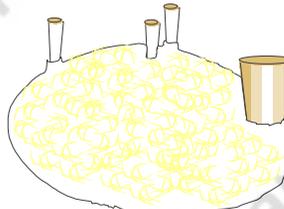
Après lissage, l'épaisseur de la croûte est contrôlée à l'aide d'un ou plusieurs pics d'épaisseur en plantant ceux-ci à divers endroits de la surface de la pièce.



Placer des "carottes" qui serviront de réserve pour la création d'évents et une plus importante qui servira de trou de coulée et de nourriture.



Recouvrir le tout d'une fine couche de plâtre liquide.

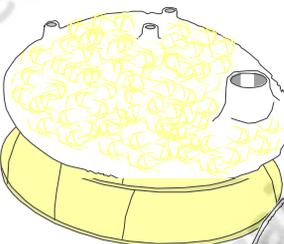


Recouvrir cette première couche d'une couche de renfort avec un mélange de plâtre et de fibre de filasse (choucroute).

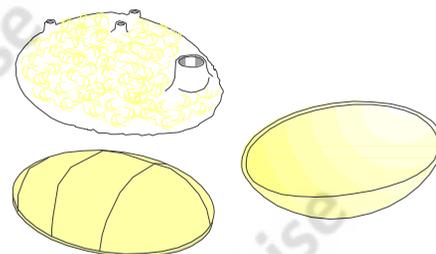


Enlever les carottes et démouler.

Enlever la croûte de pâte, savonner la bosse et l'intérieur de la coquille, puis remettre en place la coquille sur la bosse.



Couler du plâtre très liquide par la nourriture jusqu'à ce que celui-ci ressorte par les évents. ATTENTION, ceux-ci devront avoir été placés sur les points les plus hauts du modèle pour éviter d'emprisonner des bulles pendant la phase de coulage du plâtre.



Démoulage de la coquille, puis démoulage de la bosse.

CONFECTION MODÈLE PAR TRAÎNAGE

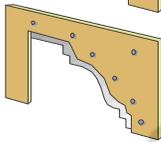
La méthode du traînage consiste à former par translation d'un gabarit une masse de plâtre sur un plan horizontal, cette technique est plus spécifiquement utilisée par les staffeurs, mais pour des pièces à profil régulier elle est parfois utilisée en céramique. Des dérivés de cette technique permettent de réaliser des pièces de profil particulier que seule la taille dans la masse aurait rendu possible. Pour effectuer les opérations de traînage, l'opérateur devra confectionner un gabarit en zinc qui sera renforcé de bois pour être finalement entouré de plâtre et de filasse.



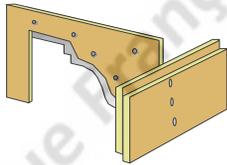
On formera ainsi un "sabot" dont une partie servira à former la pièce et l'autre de glissière pour le guidage du gabarit.



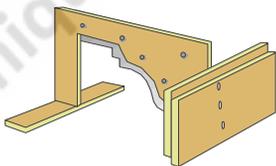
Confection du gabarit dans une tôle de zinc, à l'aide d'une scie sauteuse et finition à la lime.



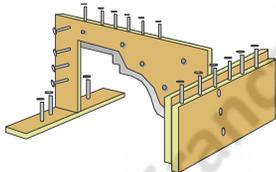
Confection du renfort en bois dont le profil intérieur reprend celui du gabarit avec quelques millimètres de plus.



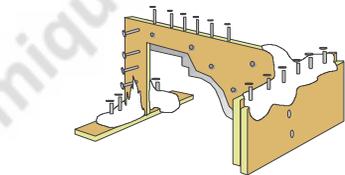
Assemblage du gabarit et du renfort à l'aide de clous.



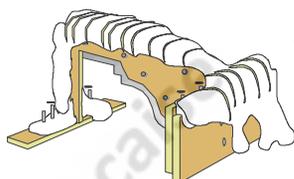
Fixation à la perpendiculaire du gabarit de deux planches de bois légèrement décalées en hauteur, la plus proche du gabarit servira de support sur le plan horizontal du marbre, la deuxième servira de guide sur la tranche du marbre.



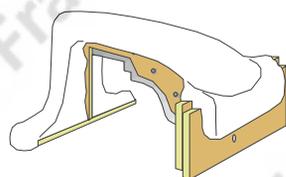
Fixation d'une planche de bois sous la partie arrière du gabarit, celle-ci servira de patin sur le plan horizontal du marbre et a pour but d'empêcher l'inclinaison vers l'arrière du gabarit pendant le traînage.



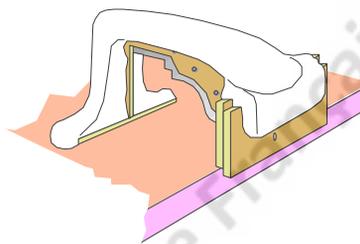
Pour faciliter l'accrochage du mélange, plâtre filasse qui servira à consolider le sabot, on plante plusieurs clous sur l'extérieur du sabot.



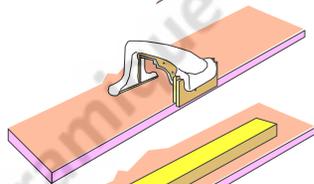
Renfort de la couche de plâtre par de la filasse, l'opération est répétée, jusqu'à l'obtention d'une épaisseur suffisamment importante pour assurer la rigidité et la solidité du sabot.



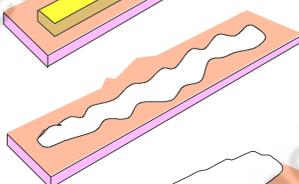
Pose d'une dernière couche de plâtre de finition afin de lisser le sabot et le rendre moins sensible à l'accrochage du plâtre pendant le travail de traînage. Pour cette dernière raison, le sabot sera entièrement savonné, et surtout sur les parties servant de glissières.



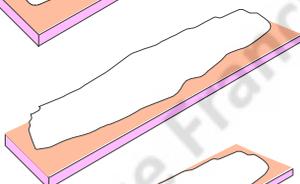
Le sabot est ensuite essayé sur le marbre afin de contrôler sa faculté à glisser et à conserver sa position pendant le travail.



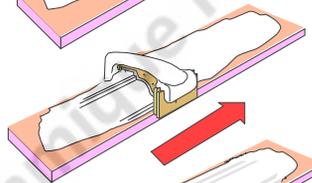
Mise en place du sabot sur le marbre. Graissage du marbre et du sabot.



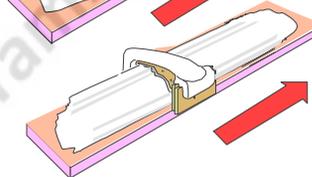
Confection de l'âme en plâtre par déversement de plâtre sur le marbre.



Mise en place de la masse de plâtre définitive.



Mise en place du sabot et début du traînage. Il est rare que l'on puisse obtenir la forme définitive avec un seul passage, aussi on sera obligé de rajouter du plâtre et de rééditer l'opération, jusqu'à l'obtention d'une surface lisse. ATTENTION, le gabarit doit toujours travailler dans le même sens.



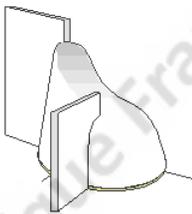
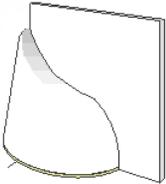
CONFECTION D'UNE BOSSE EN PLÂTRE



Tailler dans une plaque de plâtre de deux à trois centimètres d'épaisseur, le profil de la base du modèle de bosse à réaliser, marquer les différents axes correspondant aux changements de profils latéraux de la bosse.

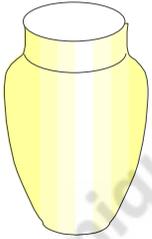


Confectionner une cerce en plâtre autour de cette plaque et la remplir de plâtre. (Pour ce genre de travail, le plâtre devra avoir une prise aussi lente que possible, l'emploi de retardateur peut être envisagé.)



Décoffrer la cerce et commencer à tailler à l'aide de gabarits les différents profils de la pièce. ATTENTION : il faut que le gabarit soit toujours en contact avec le marbre, la moindre inclinaison de celui-ci à la base engendrerait une diminution importante des cotes sur les hauteurs de la pièce, il devra en outre rester perpendiculaire au marbre pendant le travail (si la pièce est très imposante, il est conseillé de confectionner un sabot afin d'assurer la stabilité).

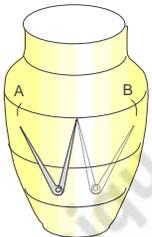
TRAÇAGE DE L'AXE D'UNE PIÈCE DE RÉVOLUTION AU COMPAS



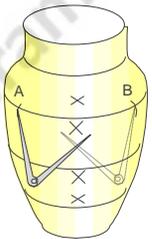
Positionner le modèle sur la tête de tour qui a servi à sa confection.



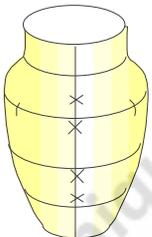
Tracer plusieurs cercles parallèles au crayon en faisant tourner le modèle sur le tour.



Pointer l'extrémité d'un compas sur le premier cercle et tracer deux points équidistants recoupant le premier cercle (A et B).

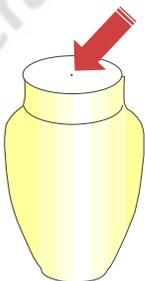


Écarter le rayon du compas.
Pointer l'extrémité sur le point A et tracer une portion de cercle.
Rééditer l'opération à partir du point B en veillant à conserver le même rayon sur le compas.
Le croisement des deux marques sera le premier point de l'axe.
Rééditer l'opération en écartant à chaque fois le rayon du compas pour déplacer verticalement la création des points de croisement.

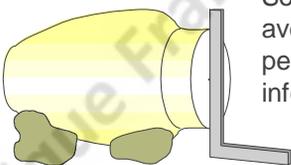


Relier les différents points de croisement avec un réglet souple et tracer l'axe vertical.

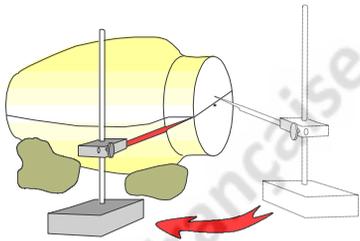
TRAÇAGE DE L'AXE D'UNE PIÈCE DE RÉVOLUTION AU TRUSQUIN



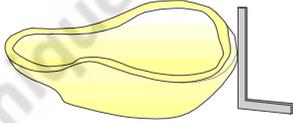
Sur le tour, déterminer le centre de la pièce (en laissant sur la surface plane supérieure courir un crayon et en le faisant se rapprocher de plus en plus du centre).



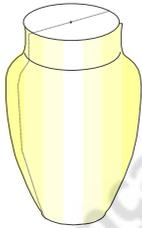
Sortir la pièce du tour et la poser horizontalement sur un marbre. Caler la pièce avec des morceaux de pâte de telle façon que la surface supérieure de celle-ci soit perpendiculaire au marbre. Pour plus de sécurité, rééditer l'opération pour la face inférieure.



Régler le trusquin pour que la pointe se trouve au niveau de l'axe de la pièce. Vérifier si le niveau de l'axe supérieur et celui de l'axe inférieur sont égaux. Faire le tour de la pièce avec le trusquin en veillant à ce que celui-ci soit toujours en contact avec celle-ci (le tracé peut être gravé ou simplement souligné au crayon).



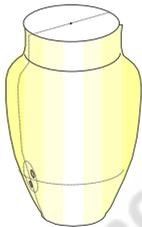
Pour des pièces ayant des formes particulières ou irrégulières on peut s'aider à la manière d'un trusquin d'une équerre (dont le dos aura été noirci au crayon de papier ou recouvert de papier carbone) en la faisant racler le périmètre de la pièce.



Tracer l'axe vertical de la pièce.



Tracer l'axe horizontal de la base du bec et repérer le profil de cette base sur le modèle.



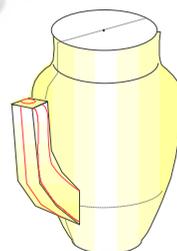
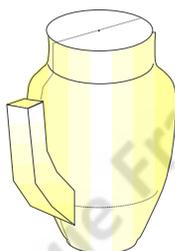
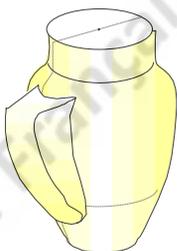
Pratiquer deux mortaises rondes à l'intérieur du profil de la base (celles-ci serviront de centrage pour le repositionnement du bec entre les phases de finition de celui-ci.) Savonner le modèle.



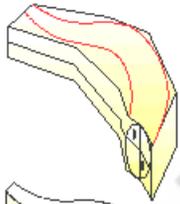
Monter un enterrage en pâte contre le modèle à des dimensions légèrement supérieures à celles du bec.



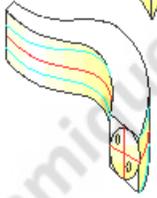
Couler du plâtre dans l'enterrage.



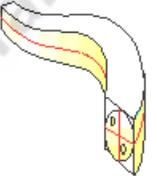
Décoffrer et tailler dans la masse de plâtre l'ébauche du bec.



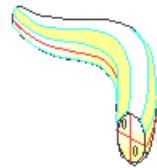
Tracer le profil droit et gauche (rouge) de part et d'autre de la pièce.



Tailler le plâtre pour obtenir un chant suivant le profil et perpendiculaire au marbre.



Tracer le profil avant et arrière du bec (bleu).



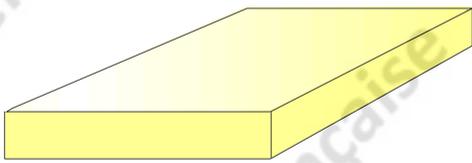
Tailler le plâtre suivant ces profils.



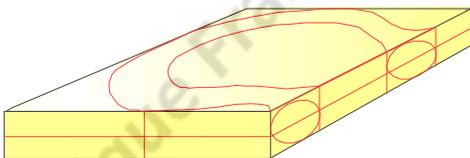
Chanfreiner les angles pour se rapprocher de la forme finale de la section.

Obtenir la forme définitive au rifloir et au papier abrasif.

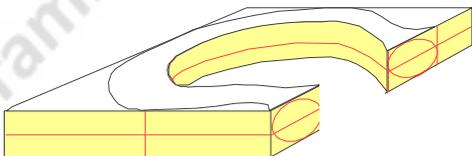
FABRICATION D'UNE ANSE



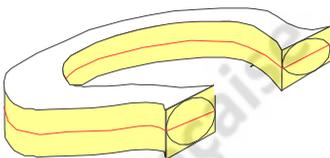
Tailler une plaque de plâtre de l'épaisseur de l'anse.



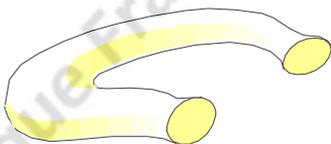
Tracer le profil et les sections de l'anse sur les faces de la plaque et sur les chants.



Découper l'intérieur de l'anse au couteau, finir à la raclette pour assurer la perpendicularité des chants. Tracer l'axe de l'anse sur le chant intérieur.

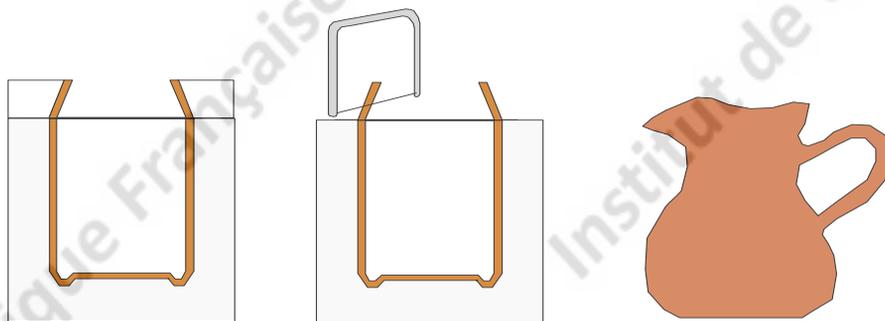


Découper l'extérieur de l'anse au couteau, finir à la raclette pour assurer la perpendicularité des chants. Tracer l'axe de l'anse sur le chant extérieur. Chanfreiner les angles pour se rapprocher de la forme finale de la section.

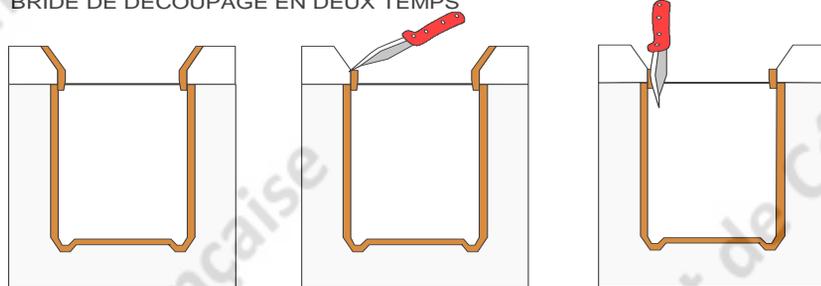


Obtenir la forme définitive au rifloir et au papier abrasif.

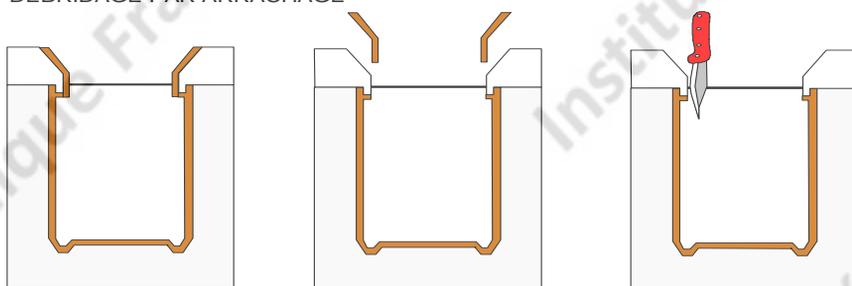
LES DIFFERENTES BRIDES



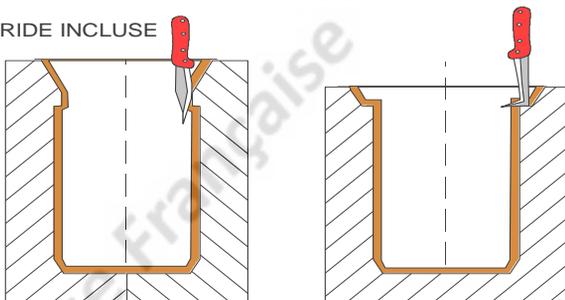
BRIDE DE DECOUPAGE EN DEUX TEMPS



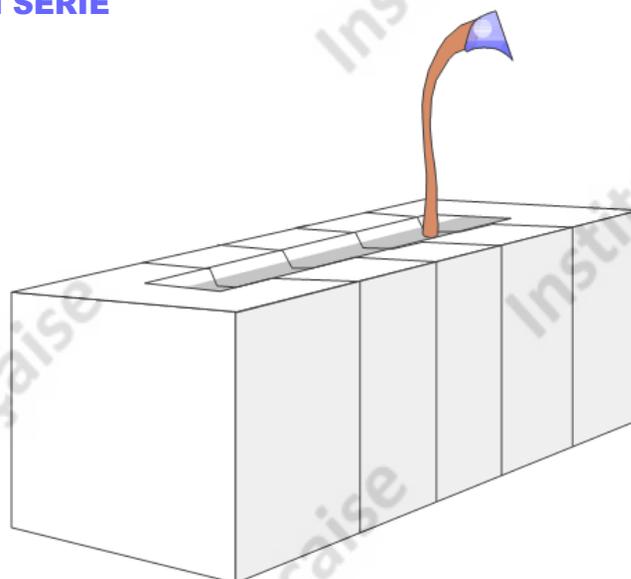
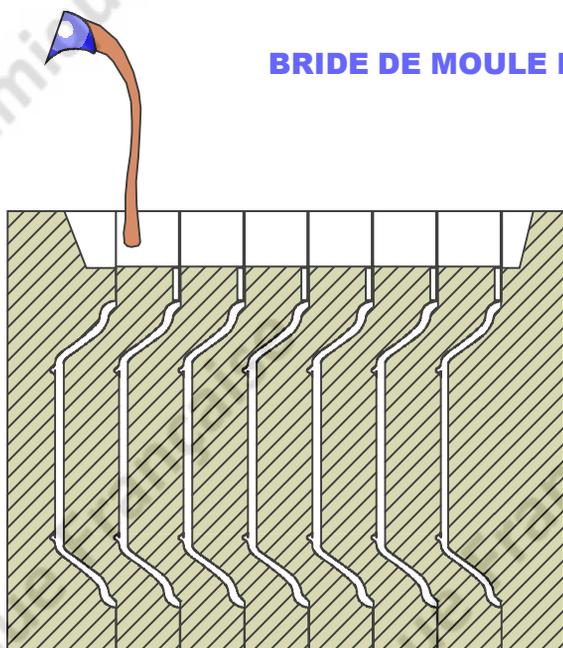
DEBRIDAGE PAR ARRACHAGE



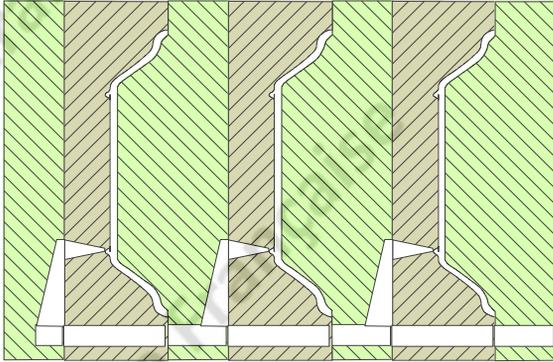
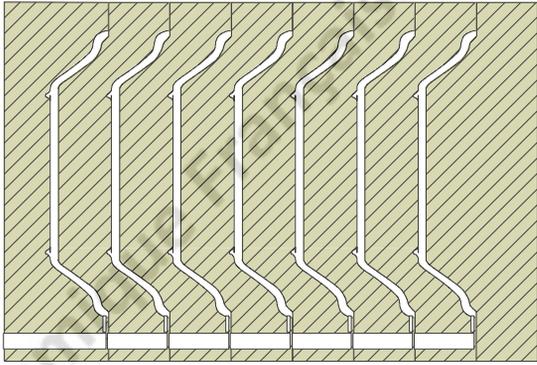
BRIDE INCLUSE



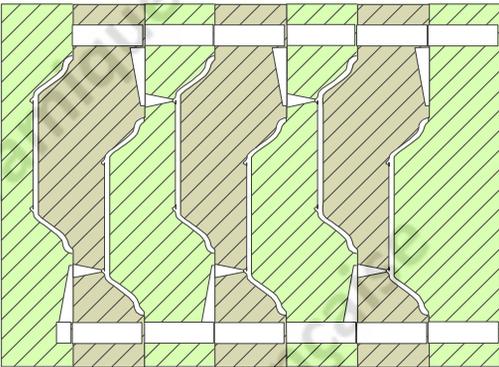
BRIDE DE MOULE EN SÉRIE



COULAGE EN BATTERIE DE PIECE ENTRE DEUX PLATRES



CAS SPECIFIQUE DE PIECES
DEVANT ETRE ALIMENTEES
PAR LE PIED, (il est alors impossible
d'utiliser des moules recto-verso)

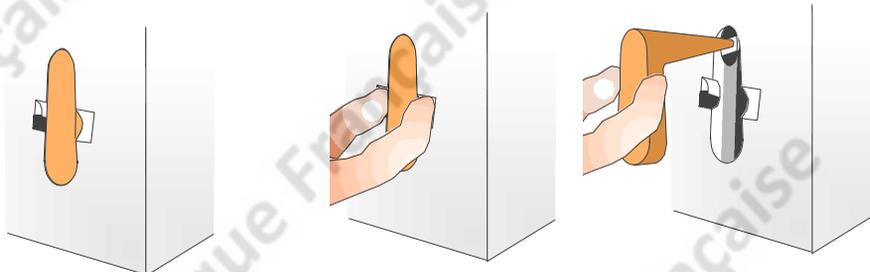
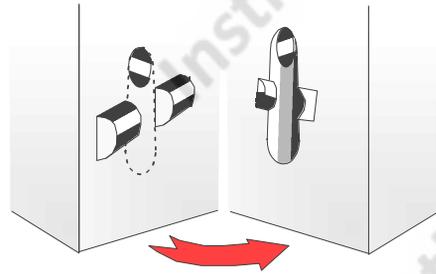
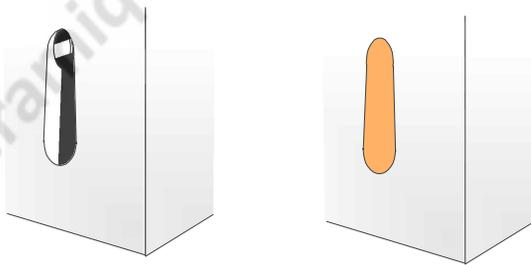


CAS SPECIFIQUE DE PIECES
DEVANT ETRE ALIMENTEES
PAR LE PIED (l'utilisation de moule
recto verso est rendue possible
par une utilisation symetrique des
moules et une double alimentation)

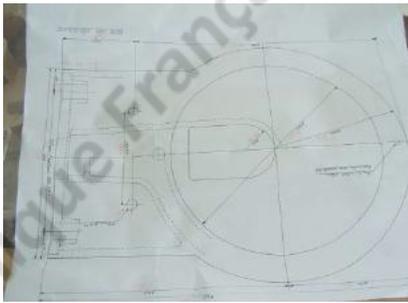
POUR L'ALIMENTATION ON PEUT UTILISER DES CANALISATIONS DIRECTEMENT FAITES DANS LE MOULE EN PLATRE (donc assez grosse pour compenser la diminution de diametre due à la prise ou avec des tuyaux plastiques noyés dans le plâtre qui devront être nettoyés à chaque coulée)

DETAIL DES NOURRICES DE COULEE :LA PREHENSION EST IMPOSSIBLE SAUF AU COUTEAU

APRES MISE EN PLACE DES PASSES DOIGTS



RÉALISATION D'UN MODÈLE DE CUVETTE



Plan de la pièce



Pièce intérieure de la bride



Début confection canal d'arrivée d'eau



Confection de la plaque arrière de la bride



Assemblage de la bride et du canal



Préparation siphon



Fabrication siphon



Montage plaque du bol



Remplissage de plâtre entre les plaques





Finition bosse du bol



Finition siphon



Constitution de l'épaisseur du bol



Fabrication du moule coquille



Après enlèvement de la croûte de terre, on recolle entre deux pour obtenir le bol en plâtre



Montage de la boîte arrière





Moulage de l'extérieur de la cuvette



Assemblage des différentes parties du faux moule



Coulage du modèle complet



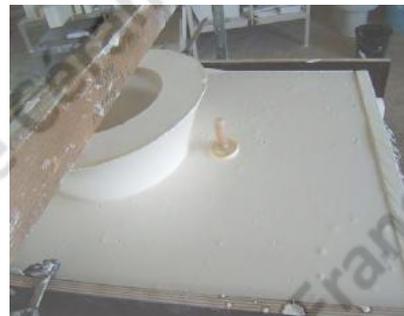
Constitution de la deuxième partie du moule de bride



Fabrication du moule de cuvette



Remontage du moule pour coulage du pied



Coulage du modèle de bride



MOULE

RAM PROCESS

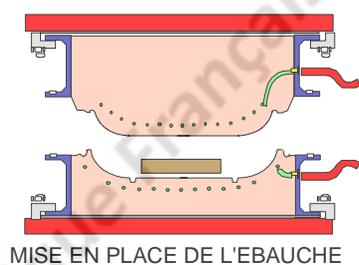
DÉFINITION : presser à une pression comprise entre 7 et 30 kg au cm² une pâte céramique semi-ferme entre deux plateaux d'une presse munie de moules en plâtre très dur, rendu poreux par injection d'air comprimé pendant la phase de prise du plâtre, comportant une gaine poreuse permettant par mise sous pression d'air le démoulage de la pièce à la fin de la pressée.



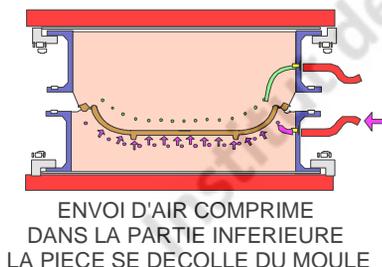
LES PÂTES UTILISABLES : a priori, toutes les pâtes ou terres céramiques peuvent convenir, les pâtes de faïences et terre de poterie, de grès chamotté sont les mieux adaptées au procédé, les pâtes vitrifiées, très sensibles à toutes déformations de façonnage se révélant à la cuisson demandent des précautions particulières notamment, une préparation parfois spéciale des ébauches .

LES PIÈCES CONCERNEES : en premier lieu toutes les pièces céramiques plates ou creuses asymétriques qui ne présentent pas de contre-dépouilles, mais aussi les petites séries de pièces de révolution.

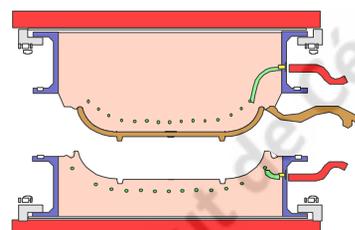
RENDEMENT : avec un moule, on peut réaliser de 1000 à 2500 pièces suivant l'état de finition et la précision de reliefs éventuels, la cadence d'une presse peut atteindre une minute par pressée.



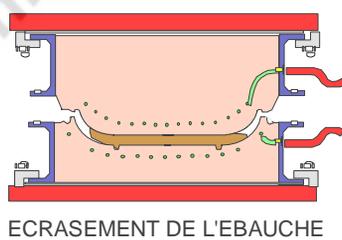
MISE EN PLACE DE L'EBAUCHE



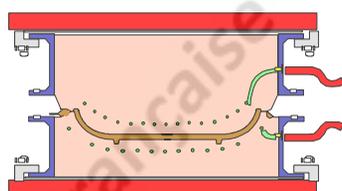
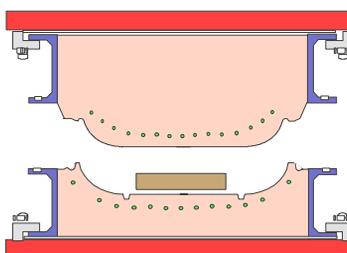
ENVOI D'AIR COMPRIME
DANS LA PARTIE INFÉRIEURE
LA PIÈCE SE DÉCOLLE DU MOULE



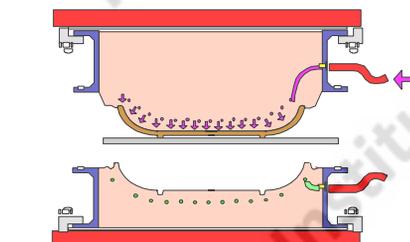
OUVERTURE DE LA PARTIE
SUPÉRIEURE, LA PIÈCE RESTE
COLLÉE SUR CELLE CI
LA BAVURE EST ENLEVÉE
MANUELLEMENT



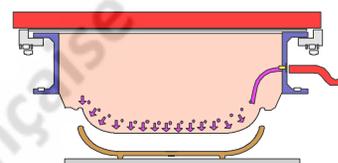
ECRASEMENT DE L'EBAUCHE



PRESSIION MAXIMUM
FORMATION DE LA PIÈCE



MISE EN PLACE D'UN SUPPORT
DE DEMOULAGE ET MISE SOUS
PRESSION DE LA PARTIE SUPÉRIEURE:
LA PIÈCES SE DÉCOLLE ET REPOSE
SUR LE SUPPORT



CONFECTION D'UN MOULE DE PRESSAGE RAM PROCESS

Préparation du plâtre : Exemple plâtre AS DUR

- Taux de gâchage : 2,9 kg de plâtre pour 1 litre d'eau
- Temps de gâchage : 6 minutes.
- Vitesse de l'outil : 1400 tours/minute.
- Température de l'eau : en fonction de la température du plâtre
- Température du plâtre: essayer de faire une moyenne plâtre eau de 20°C, rajouter de l'eau plus ou moins chaude suivant la température du plâtre.
- Température de fin de malaxage : prendre la température en fin de malaxage puis attendre que celle-ci augmente d'environ 10 à 12 °C pour procéder au traitement du moule.

On peut aussi contrôler en temps : 20 à 25 minutes à partir de la préparation du plâtre

Coulage du plâtre

- Pour éviter le défaut de bullage, répandre le plâtre dans l'eau lentement et laisser un temps d'humidification de 30 secondes à une minute.
- Mise en œuvre: gâchage de 2,8 à 3,2 kg par litre d'eau suivant le plâtre utilisé (voir fiches techniques fournisseurs). Malaxage de 5 à 10 minutes suivant le plâtre.
- Le remplissage doit se faire en un jet régulier et en le déplaçant pour éviter les traces de coulage ponctuelles, éviter de commencer le coulage sur la zone du modèle, privilégier les zones hors du périmètre de la pièce.

Création de la porosité.

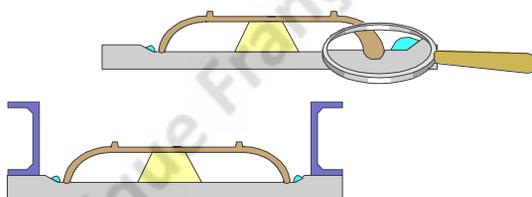
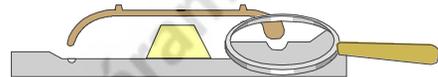
- Placer le thermomètre dans le plâtre du moule après avoir raclé la surface
- A 27°C débiter la pression d'air à 0,3 bar/min jusqu'à 1bar ensuite 0,5 bar par minute pour atteindre 4 à 5 bars. Le démoulage se fera entre 1 et 1,5 bar.

Les cycles de mise sous pression dépendent : De la conception du moule, du type de plâtre utilisé et de l'effet recherché pendant la phase de soufflage de l'air en production

Conservation du moule: Sécher le moule sous pression 4 ou 5 bars pendant 30 minutes à 1 heure.

Le modèle devra représenter les deux faces de la pièce choisie au même titre que le coulage entre deux plâtres, celui-ci est souvent en plâtre, mais peut être conçu en résine si la fabrication de matrices des moules n'est pas envisagée.

Retourner le modèle sur une plaque de base en plâtre dans laquelle pourront avoir été aménagées des gorges permettant de recevoir l'arrondi du dessus de la pièce (qui sera en fait formé par l'autre partie de moule). Dans le cas de modèle en plâtre, il faut inclure un support entre le modèle et la plaque de base qui éliminera le risque de voir le modèle se briser sous le poids du plâtre.

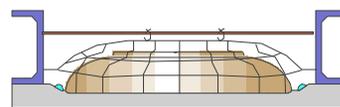


Conception des dégorgeoirs : ceux-ci serviront d'espace libre pour recueillir l'excédent de pâte à la périphérie de la pièce après le pressage, ceux-ci seront formés dans le moule par la mise en place d'un cadre ou bourrelet en plâtre, en terre ou en résine, son épaisseur varie entre 10 et 15 mm. Prévoir un espace de 10 mm entre le modèle et le dégorgeoir.

Savonner deux ou trois fois le modèle, la plaque de base et le dégorgeoir (lubricafine, trennemulsion). Positionner le châssis sur la plaque de base. Faire un joint de terre sur tout le périmètre pour éviter toutes fuites pendant la phase de coulage.



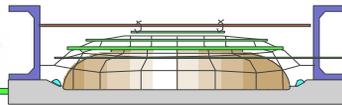
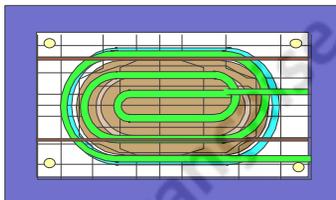
Formez le grillage manuellement en le découpant et le pliant puis en fixant les différentes parties avec du fil de fer, une autre méthode consiste à presser une feuille de grillage avec un vieux moule de presse du même modèle (à prévoir lors de la dernière pressée du moule précédent).



Le grillage formé est fixé sur le châssis par l'intermédiaire de barres métalliques traversant celui-ci à 20mm du modèle. La hauteur de fixation est réglée pour que le grillage se trouve à quelques millimètres du modèle. Les distances entre le grillage et le modèle ne sont pas toujours régulières et dépendent de l'effet de « démoulage » recherché.

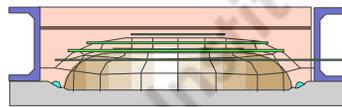


Mise en place de la gaine poreuse : formez une spirale avec la gaine partant du centre du modèle et s'élargissant en allant vers la périphérie, 20 mm devront séparer chaque tour de gaine, celle-ci sera fixée sur la forme en grillage à l'aide de fil de cuivre. On prendra soin de laisser une longueur suffisante pour que les deux extrémités de la gaine puissent être raccordées aux prises d'air sur le châssis. Distance entre la gaine et le modèle entre 15 et 30 mm suivant la difficulté de démoulage.

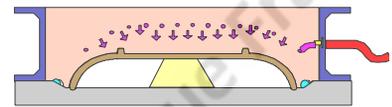


Pendant toutes ces opérations, le modèle peut être retiré afin de ne pas risquer d'être endommagé lors des manipulations de la gaine, il sera alors positionné juste avant la phase de coulage.

Il faudra également procéder à la mise en place de tétons de centrage dans les coins du moule, qui serviront ensuite au réglage du moule.



Coulage du plâtre.



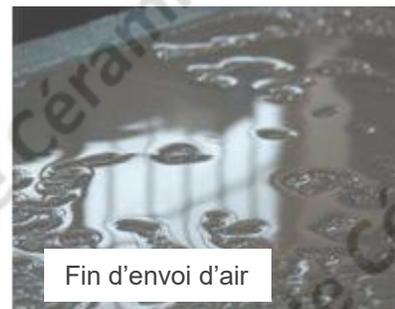
Envoi de l'air comprimé, création de la porosité.



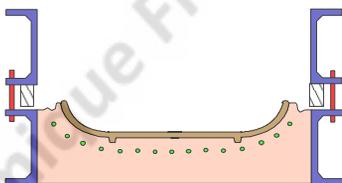
Coulage du plâtre



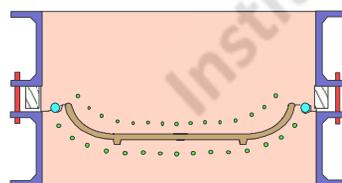
Début d'envoi d'air



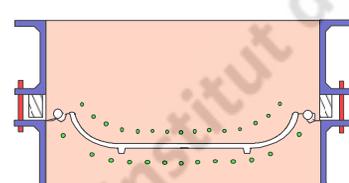
Fin d'envoi d'air



Positionnement du deuxième châssis.



Réédition des phases précédentes pour la deuxième partie.



Démoulage et extraction du modèle.

Réalisation d'un moule à l'aide d'une matrice : Placer le modèle de la même façon que pour faire un moule de presse puis couler un moule avec du plâtre dur (première et deuxième partie) . Démouler, nettoyer et finir ces deux parties, savonner plusieurs fois et couler sur les deux parties de moule pour obtenir la matrice du modèle. Cette opération qui prend plusieurs heures est cependant très rentable puisqu'elle diminuera de 50% le temps de fabrication des moules des séries par la suite, en effet la majeure partie du temps de réalisation d'un moule se compose de la préparation du modèle et du dégorgeoir.

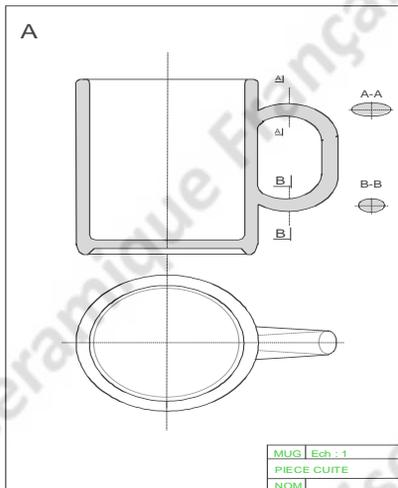
MONTAGE DES MOULES .Précautions à prendre:

Les cales : De 3 à 4 cm carrés, d'épaisseur 1mm , elles servent à écarter les deux parties du moule pour éviter qu'elles n'entrent en contact lors du montage.

Le lit de plâtre : il sert à compenser les déformations du châssis, il est coulé avec du plâtre de pressage entre le moule et le plateau de la presse (pour les deux parties).

Réglage des jeux: espaces à respecter entre les deux parties suivant la précision des contacteurs d'arrêt, laisser un espace de 0,8 à 1mm.

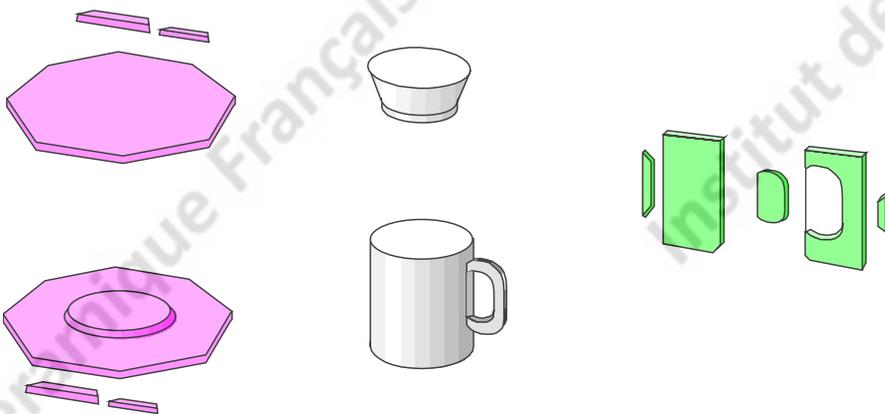
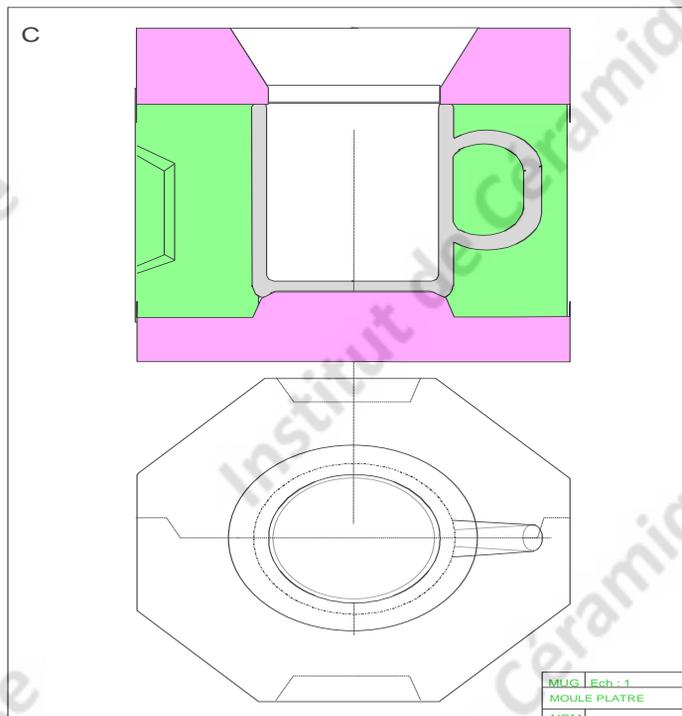
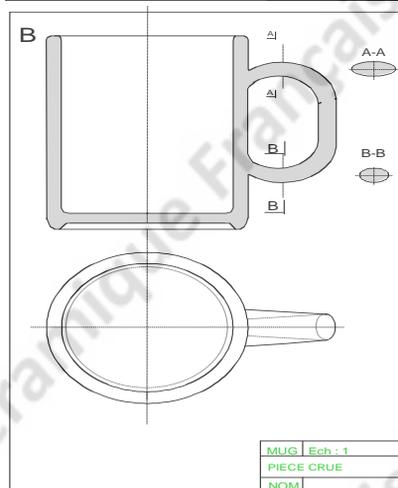
FABRICATION D'UN MOULE



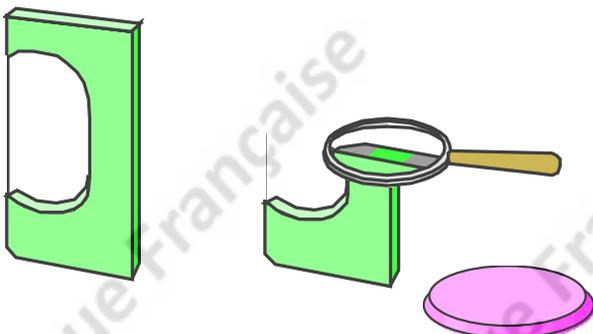
CONFE

A partir
créer le
et ensu

À partir du plan de la pièce cuite (A), créer le plan de la pièce crue (B) et ensuite le plan du moule (C).

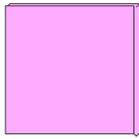


Déterminer les plans des sous-ensembles de plaques, gabarits, nourrices et modèles nécessaires à l'établissement du moule.



Tailler les plaques de côté pour plus de facilité dans la taille le chant intérieur sera usiné en biais (environ 60°) pour diminuer l'épaisseur de la plaque et faciliter la taille à cet endroit. Rainurer l'arrière des plaques pour assurer l'accrochage du plâtre dans les phases ultérieures.

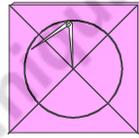
Tourner le renfort du pied et le coller sur la plaque de base.



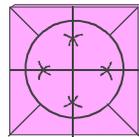
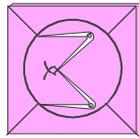
Tailler une plaque de base carrée pouvant contenir l'octogone. Cette plaque doit être parfaitement plane et d'épaisseur régulière, l'équerrage doit être parfait, et les chants devront être parfaitement perpendiculaires aux deux faces.



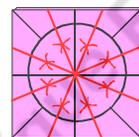
Déterminer le centre du carré en traçant les diagonales.



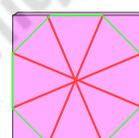
Dessiner un cercle (diamètre, environ la moitié de la longueur du côté du carré.)



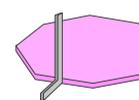
Déterminer la bissectrice des angles formés par les diagonales.



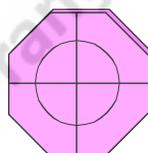
Déterminer les bissectrices des angles ainsi formés (rouge).



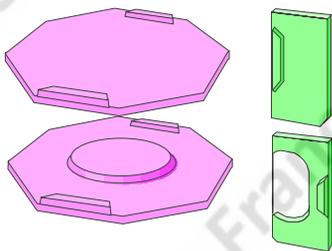
Relier les pointes des bissectrices rouges.
L'octogone est tracé.



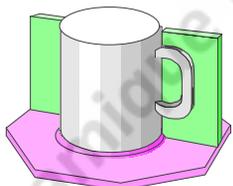
Tailler les plaques suivant le tracé (vert) de l'octogone. Les chants doivent être perpendiculaires aux faces de la plaque.



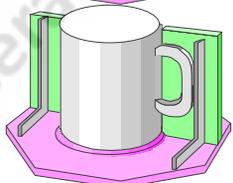
Répéter l'opération pour la plaque du dessus et tracer la correspondance des diamètres de la nourrice et du pied du modèle. Les deux plaques devront être rigoureusement identiques, pour cela il peut être envisagé de les tailler alors que celles-ci sont superposées.



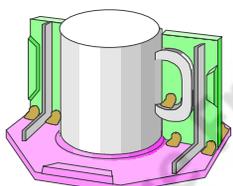
Tailler et coller les tenons sur les plaques de base et de côté.



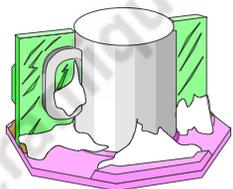
Savonnez l'ensemble des plaques et modèle sauf l'arrière des plaques de côté qui est rainuré. Positionner le modèle concentriquement au renfort sur la plaque de base. Positionner les plaques de côté.



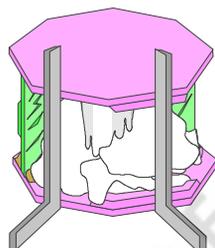
Assurer l'équerrage des plaques de côté et maintenir l'équerrage en laissant les équerres en position.



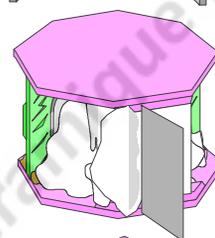
Caler les plaques avec de la pâte.



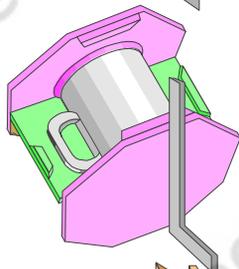
Retourner le montage et assurer le maintien définitif avec du plâtre.



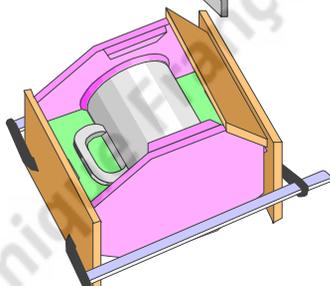
Continuer à rajouter du plâtre. Positionner la plaque octogonale supérieure de façon à ce qu'elle soit parfaitement alignée avec celle de base.



Compléter l'espace entre les deux plaques de base et araser la face arrière à l'aide d'une raclette.



Après la prise, retourner l'ensemble plaques plus le creux perdu et assurer l'équerrage de telle façon que les plaques de côté soient parallèles au marbre.

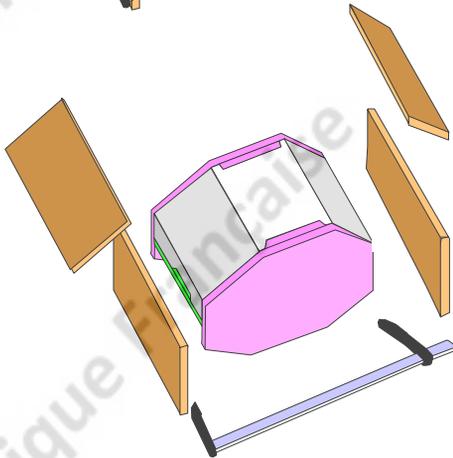


Savonner l'ensemble et réaliser l'enterrage en coffrant le creux perdu avec des planches de bois ou des plaques de plâtre. Les plaques de l'enterrage doivent être savonnées également.

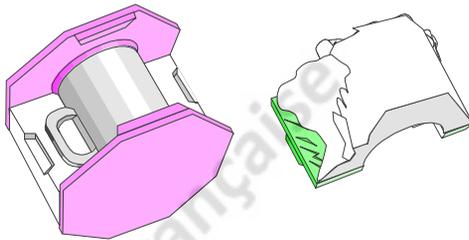
Assurer l'étanchéité de l'ensemble avec de petits boudins de pâte.



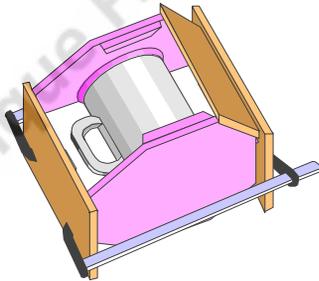
Couler le plâtre à l'intérieur de l'enterrage. ATTENTION, le soin apporté au montage de l'enterrage sera garant de son maintien pendant la phase de coulage du plâtre.



Après la prise, décoffrer la première partie de moule.



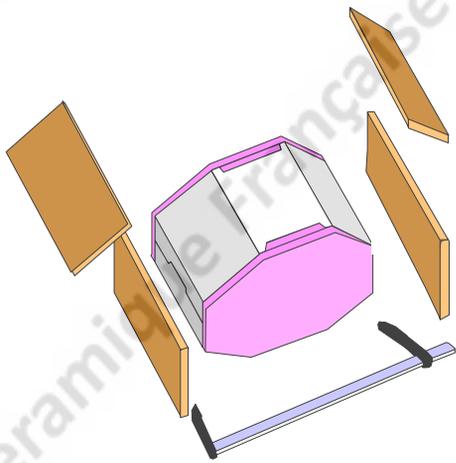
Retourner l'ensemble, enlever les plaques de base, démouler le creux perdu et repositionner les plaques de base. Savonner l'ensemble.



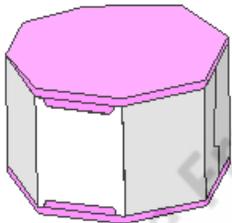
Recomposer l'enterrage autour de la première partie de moule.



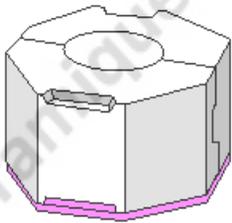
Couler la deuxième partie de moule.



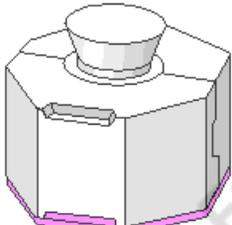
Décoffrer l'ensemble après prise complète.



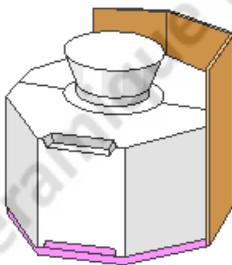
Retourner l'ensemble et le positionner verticalement sur le marbre (côté bride en haut).



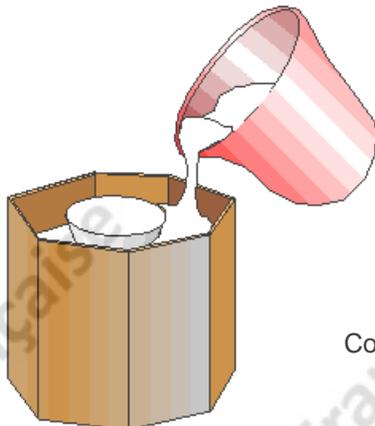
Démouler la plaque de base supérieure.
Corriger les imperfections. Savonner l'ensemble du moule.



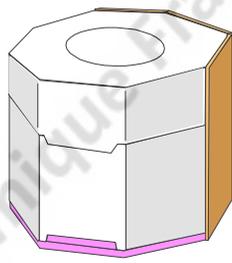
Positionner la nourrice.
Savonner l'ensemble.



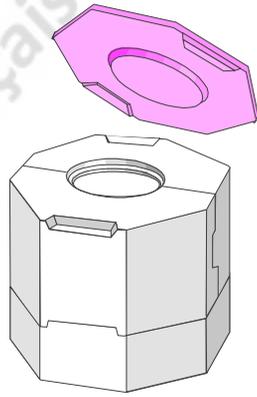
Réaliser un enterrage octogonal. Assurer l'étanchéité avec de petits boudins de pâte.



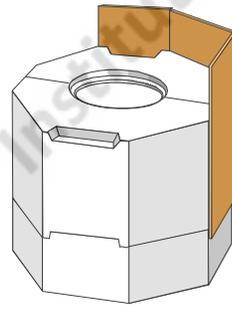
Couler la bride.



Décoffrer.



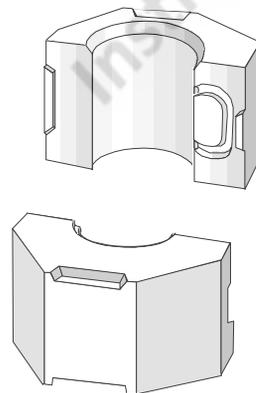
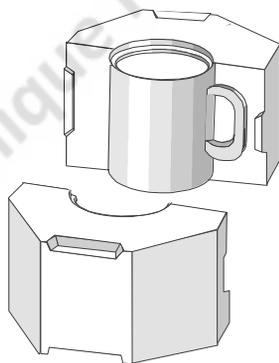
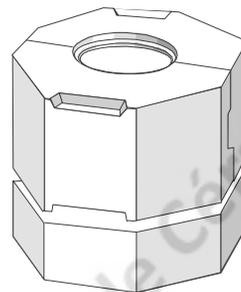
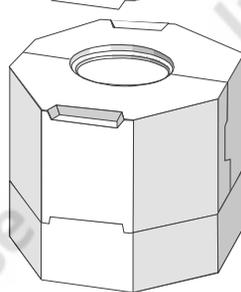
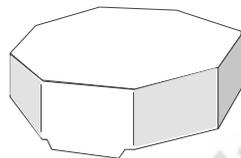
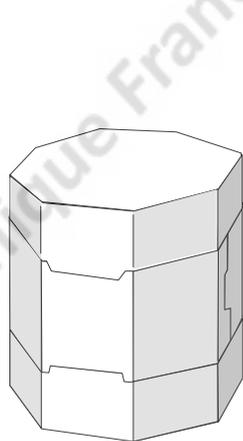
Retourner l'ensemble et retirer la plaque de base.



Réaliser un enterrage octogonal. Savonner l'ensemble.

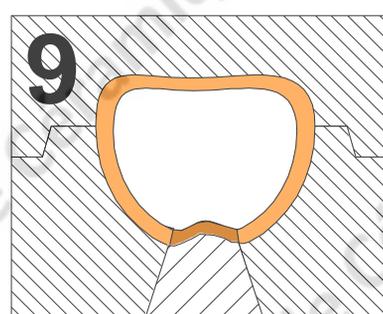
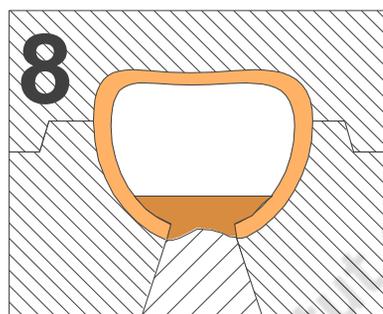
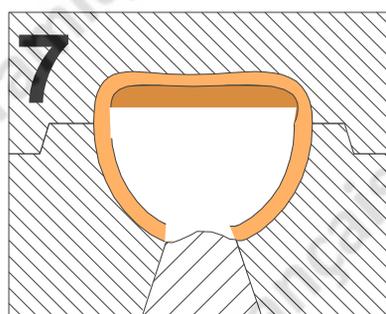
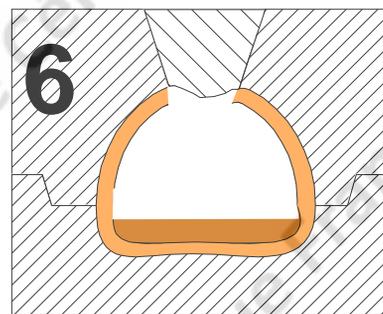
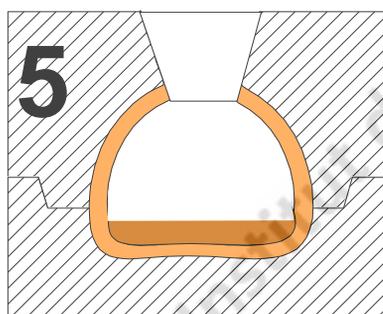
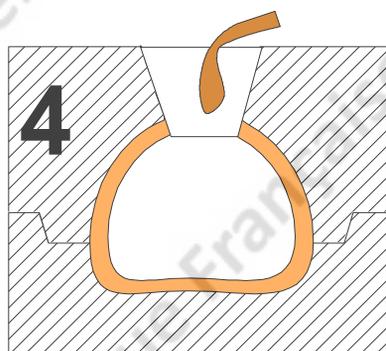
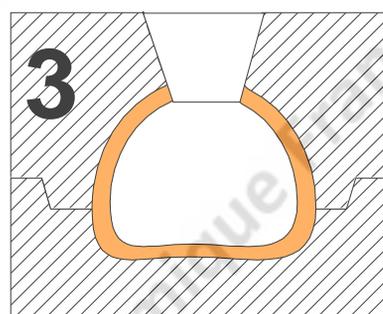
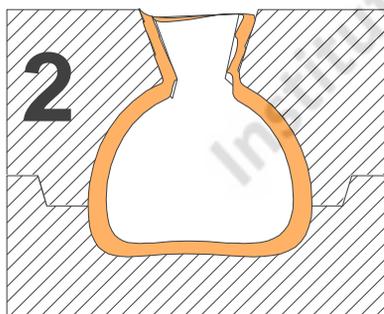
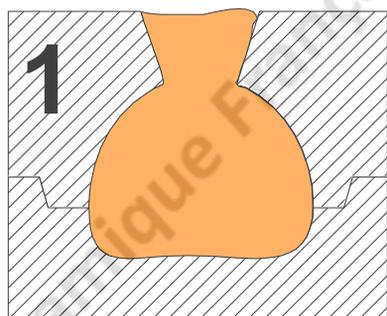


Couler le pied du moule.

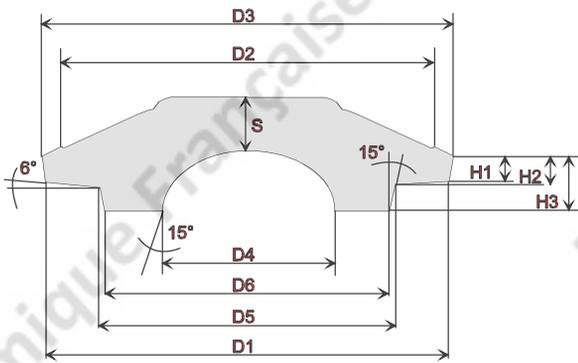


Décoffrer et démouler le modèle, rectifier les imperfections du premier moule, si celui-ci est destiné à la fabrication ultérieure d'une matrice, ne pas lui faire de chanfreins, si l'on veut l'essayer en production pour confirmer la forme, passer l'intérieur du moule avec une solution de vinaigre à 10 % dans de l'eau pour supprimer les éventuelles traces de savon. Le moule est ensuite refermé et séché fermé afin d'éviter les déformations des différentes parties, ce qui se traduirait par des fuites aux plans de joint lors du coulage. (On peut talquer les surfaces de contact pour éviter qu'elles ne collent pendant le séchage.)

MOULE DE PIÈCE COULÉE FERMÉE



FABRICATION D'UNE TÊTE ROLLER



MOULE DE CALIBRAGE ROLLER

diamètre modèle	D1	D2	D3	D4	D5	D6	H1	H2	H3	S
130	141	130	151.72	63	105	97.96	20	21.89	35	18
150	161	150	171.72	83	125	117.98	20	21.89	35	18
175	186	175	194.04	93	145	138.12	15	17.15	30	20
200	210	200	218.04	121	165	158.23	15	17.36	30	20
210	220	210	228.04	121	165	158.52	15	17.89	30	20
225	233	225	243.72	138	180	170.78	20	22.78	40	22
250	258	250	268.72	150	200	190.92	20	23.05	40	25
275	283	275	293.72	175	220	211.06	20	23.31	40	27
300	308	300	318.72	175	220	211.76	20	24.62	40	30

DIMENSION STANDARD

MÈRE DE MOULE D'ASSIETTE RONDE



Moule d'assiette ronde.



Noyau de mère de moule d'assiette ronde.



Calibrage du fond de noyau.

MÈRE DE MOULE D'ASSIETTE OVALE



Calibrage du modèle d'assiette correspondant au diamètre maximum de la forme ovale.

La pente doit être équivalente et dans la continuité de celle du porte-couteau.



Démouler le modèle de l'assiette.



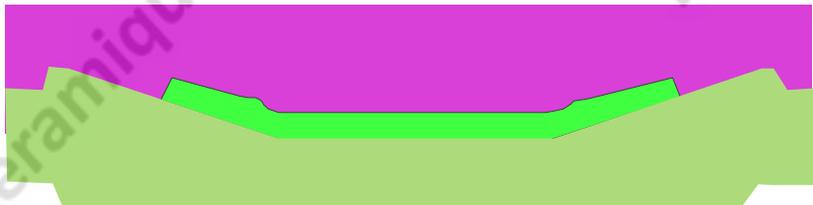
Tracer l'ovale (ou autre forme) sur le modèle de l'assiette.



Découper l'ovale sur le modèle de l'assiette.



Repositionner l'assiette découpée sur son berceau.



Couler une partie perdue.



Retourner, démouler, graisser et couler le noyau de matrice.



Les têtes roller sont généralement réalisées en acier ou aluminium voire en polypropylène pour celles qui peuvent travailler sans chauffage, cependant leur réalisation est souvent coûteuse et parfois assujettie à des modifications, afin d'éviter ces désagréments et/ou de s'assurer de la forme d'une tête roller dans le cadre d'un prototypage, celle-ci peut être réalisée en plâtre dur. Le plâtre choisi doit être un plâtre de pressage.

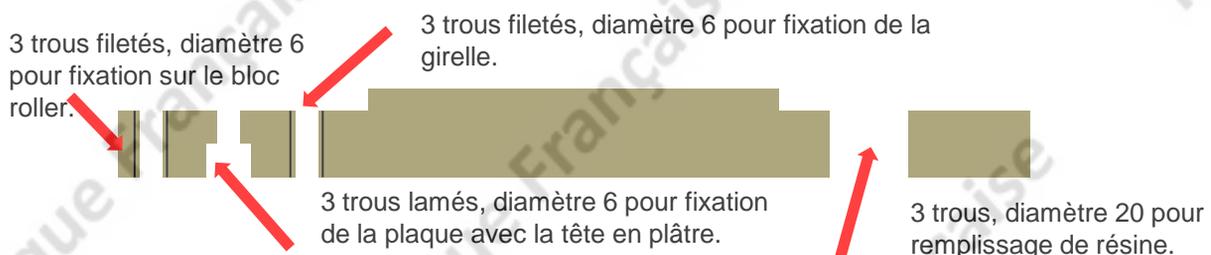


Confection d'une plaque d'acier pouvant se fixer sur le bloc de la tête roller.

Réaliser 3 trous diamètre 6 sur un diamètre d'environ 200 mm avec lamage pouvant recevoir une vis BTR de diamètre 6, les lamages devront se trouver sur la partie supérieure de la plaque intermédiaire.

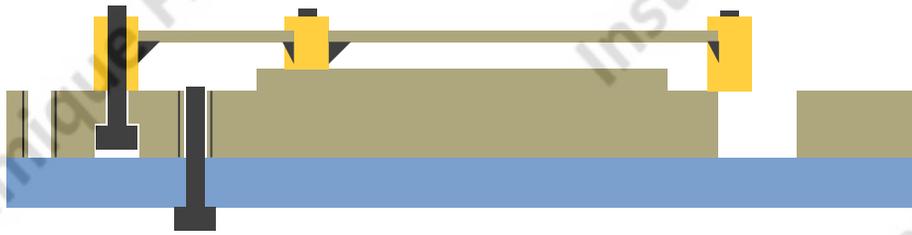
Pratiquer sur le même diamètre trois trous de diamètre 20 mm qui permettront de couler la tête en résine, si besoin.

Pratiquer trois trous filetés sur le diamètre de 200 mm qui permettront de fixer la plaque d'une façon parfaitement concentrique sur la girelle du tour.





Positionnement des vis BTR et des inserts de fixation avec le bloc de plâtre.



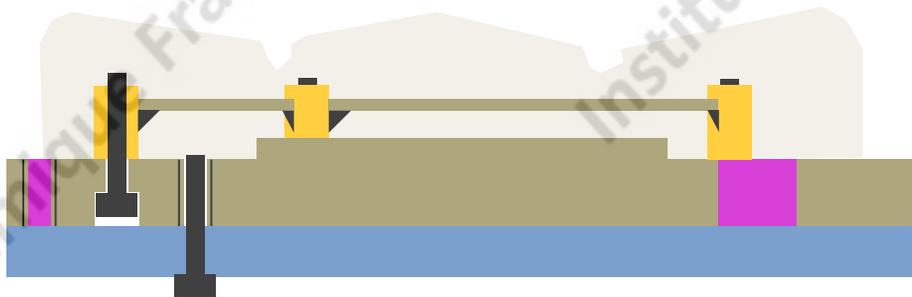
Fixation sur la girelle, soudure des armatures.



Bouchage des trous à la plastiline



Coulage du bloc de plâtre.

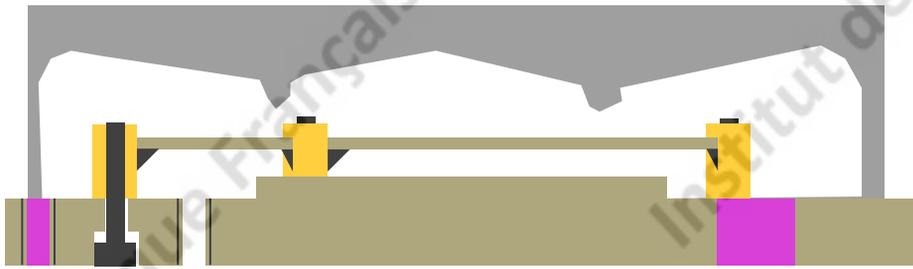


Tournage du bloc de plâtre, selon le plan de la tête roller.

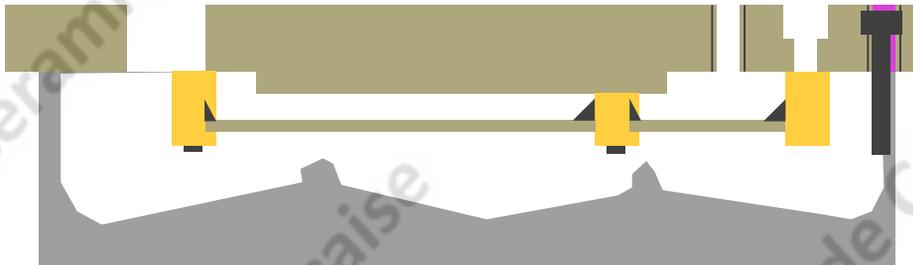


Coulage d'une coque en plâtre.

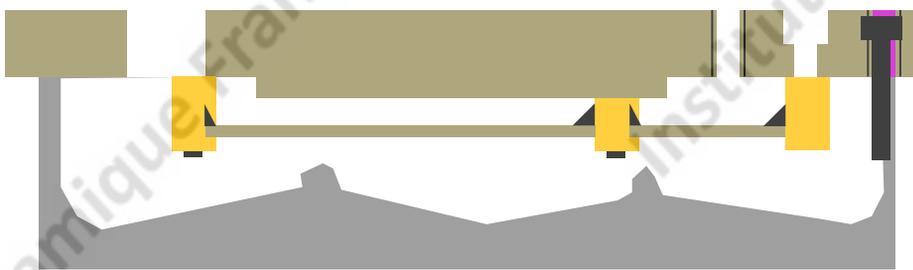
Démouler la coque, la tête est terminée, dans le cas où la tête en plâtre doit être testée, il convient de la durcir en la passant à la gomme-laque en plusieurs couches, dont les premières doivent être très diluées pour pénétrer en profondeur le plâtre.



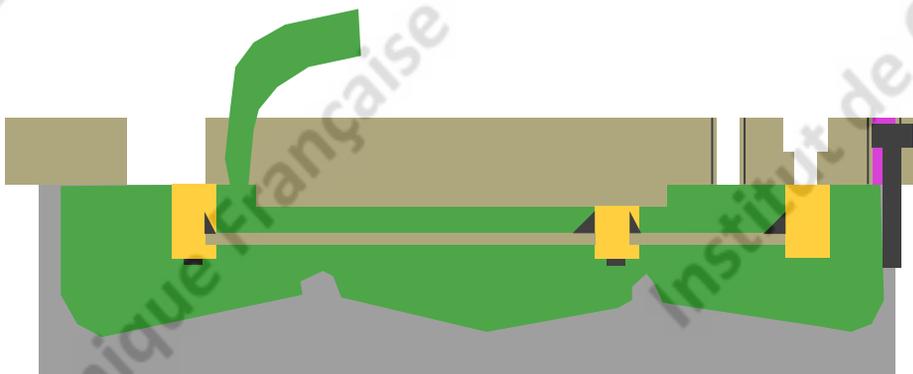
Démouler, enlever la tête en plâtre.



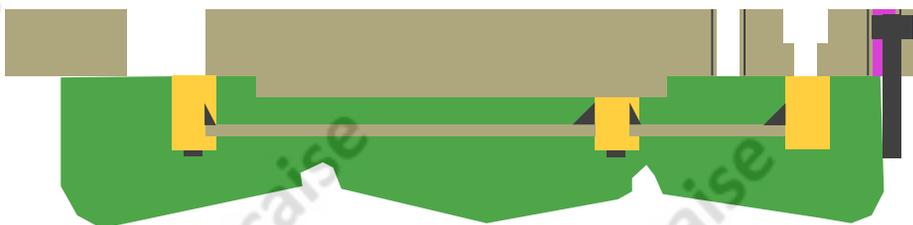
Retourner le montage, enlever la plastiline des trous de 20 mm.



Retourner le montage, enlever la plastiline des trous de 20 mm.



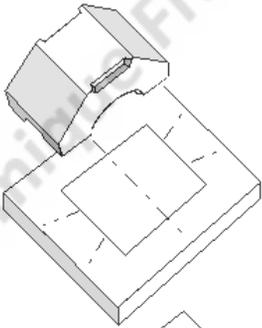
Coulage de la résine.



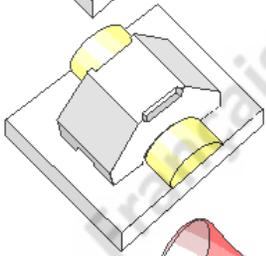
Tête en résine terminée.

MATRICAGE

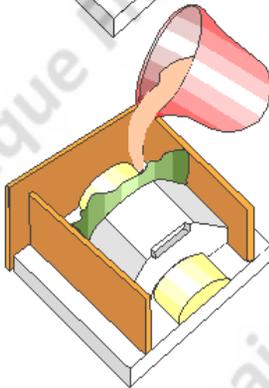
MATRICE EN PLÂTRE



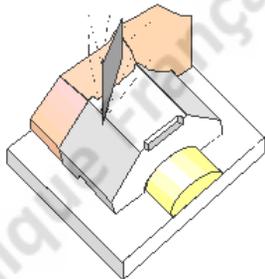
Confectionner une plaque de plâtre d'épaisseur 20 mm aux dimensions extérieures 5 à 6 cm supérieures à celles du moule.
Tracer le profil du moule plaque.
Tracer le profil des tenons de la matrice (ceux-ci sont dessinés dans le prolongement de ceux du moule et jusqu'au bord de la plaque).



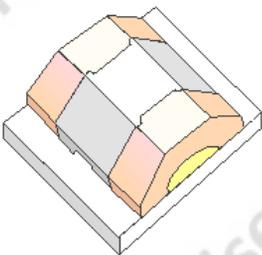
Confectionner et positionner deux demi-cylindres assurant le prolongement de la pièce.



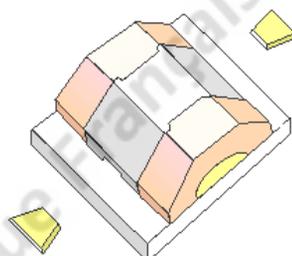
Coffrer et couler la partie arrière.



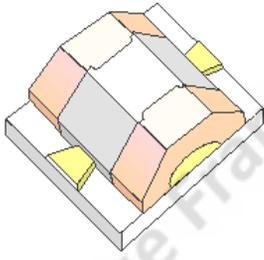
Démouler le plus tôt possible et araser à la raclette en appuyant sur les parois du moule.



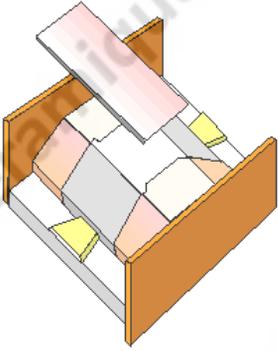
Rééditer l'opération pour la partie avant.



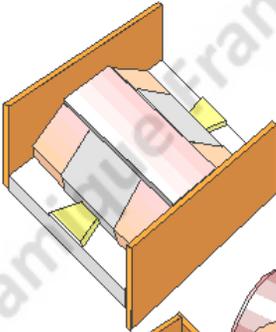
Tailler et positionner les tenons de la matrice dans le prolongement des mortaises du moule.



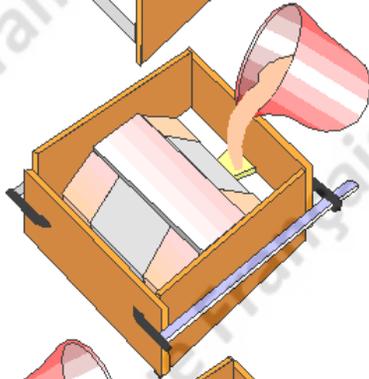
Coffrer les tenons et savonner.



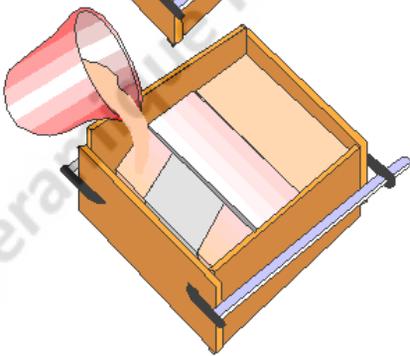
Coffrer et positionner la plaque de renfort.



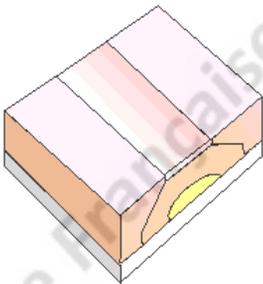
Coller la plaque et coffrer.

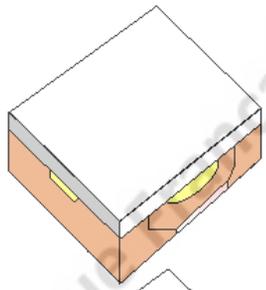


Couler les deux parties latérales.

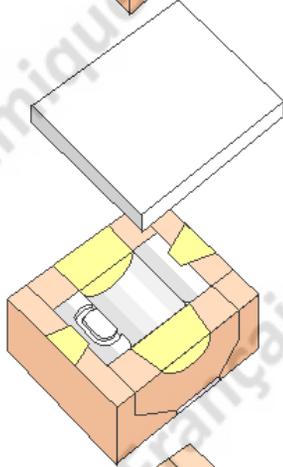


Décoffrer.

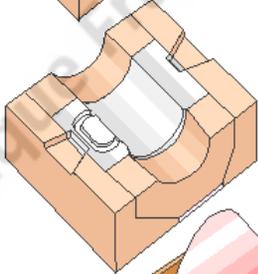




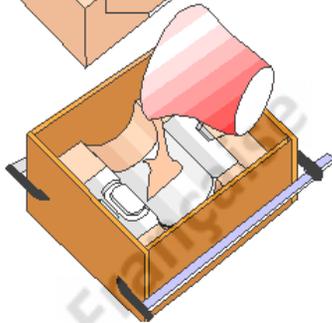
Retourner le tout.



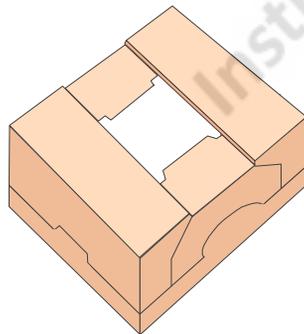
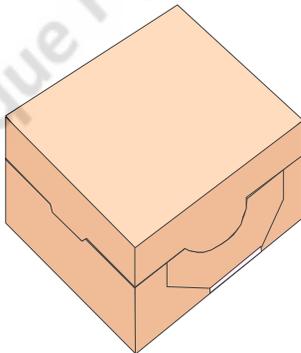
Démouler.



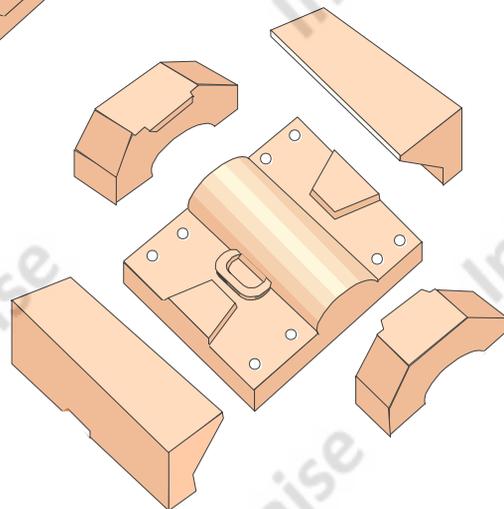
Après enlèvement des tenons et demi-cylindres, savonner.



Coffrer et couler le noyau.



Retourner l'ensemble.

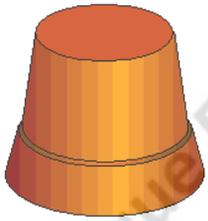


Démouler les différentes parties et extraire la partie de moules.

Corriger les imperfections de la matrice.
Refermer et serrer les différentes pièces entre elles.
Faire sécher la matrice.

Après séchage, la matrice devra être imperméabilisée en surface par une solution de gomme-laque et d'alcool.

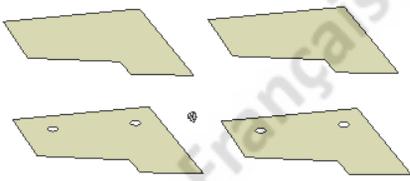
Le principe décrit ci-dessous peut s'appliquer à des moules simples (1 à 2 plans de joint.) Il faut tenir compte dans le cas des moules de calibrage de la perte de 1 mm sur le diamètre.



Tracer l'axe sur le noyau de la matrice

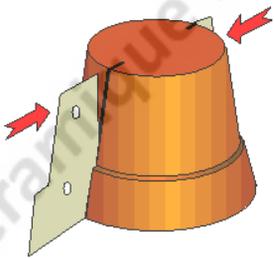


Pratiquer une « saignée » de deux à trois centimètres de profond et d'une largeur de 1 mm.

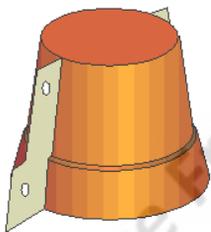


Découper une tôle galvanisée ou inox (épaisseur 1 mm), selon le profil extérieur du moule.

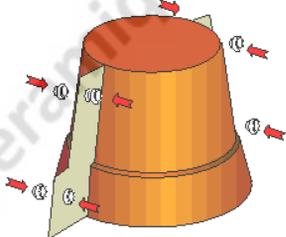
Percer des trous au diamètre et à l'emplacement des tenons en plastique.



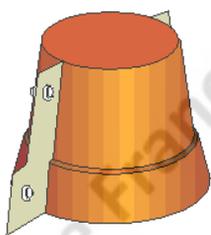
Insérer les deux tôles dans les fentes verticales du noyau.

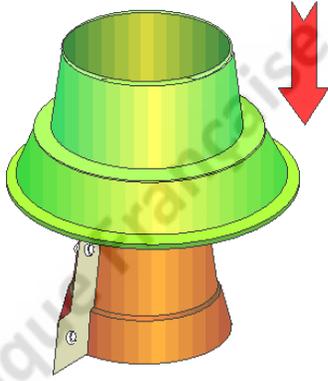


Sceller ou coller les tôles au noyau.



Mettre en place les tenons plastiques de chaque côté des tôles.





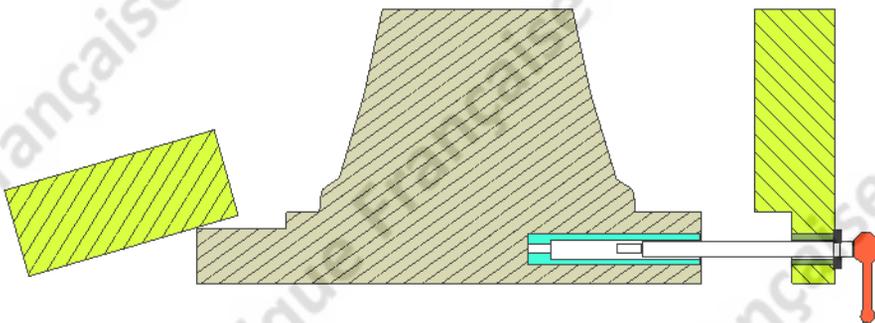
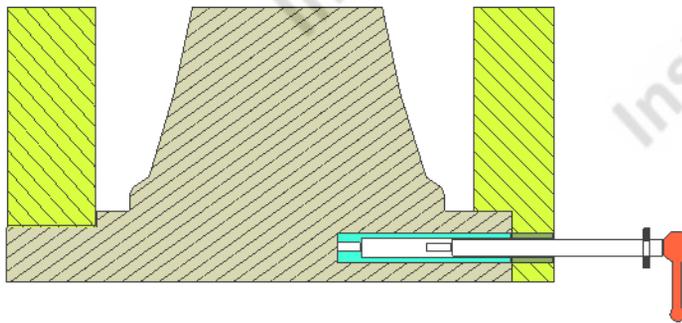
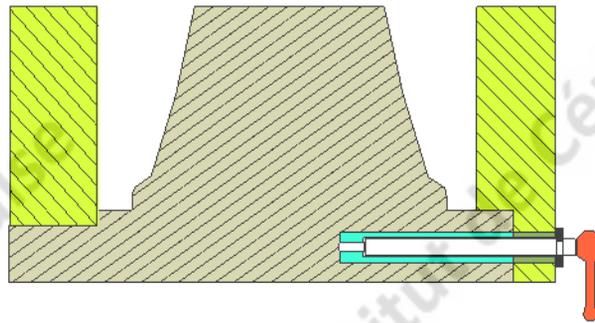
Mettre en place la ou les différentes chapes.



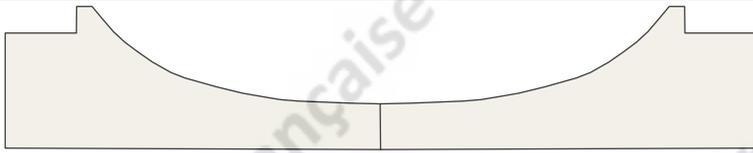
Couler les deux parties de moules en même temps.

FLAN DE MATRICE A TIROIR

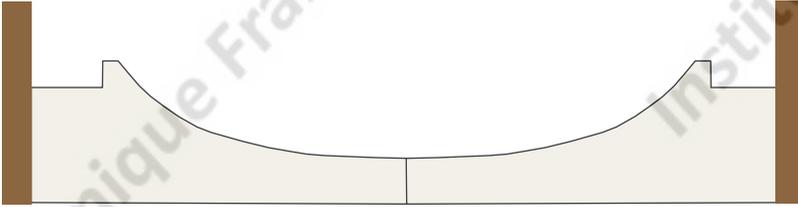
Dégagement des chapes lourdes.



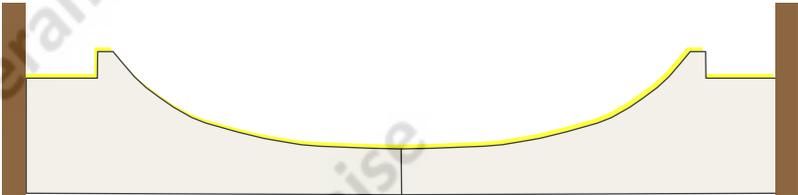
MATRICE EN BÉTON DE RÉSINE



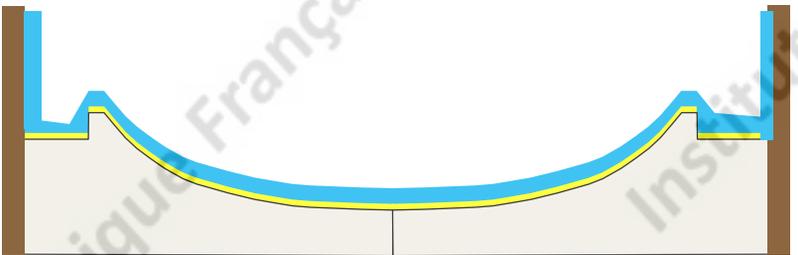
PIÈCE À MATRICER



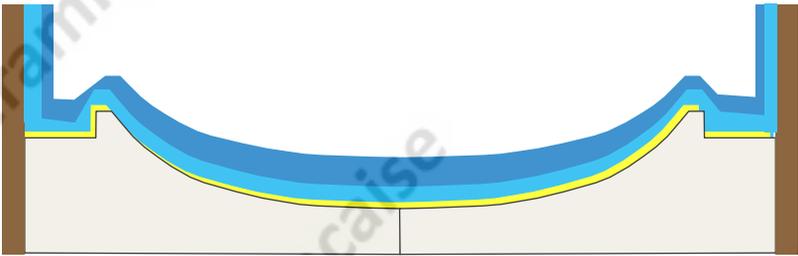
COFFRAGE



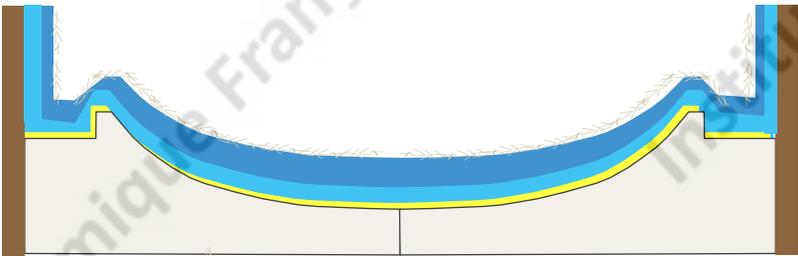
PASSAGE DÉMOULANT



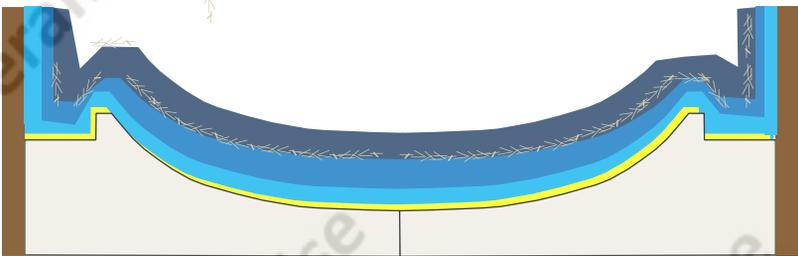
GELCOAT



DEUXIÈME COUCHE DE GELCOAT



COUCHE DE FIBRE DE VERRE HACHÉE



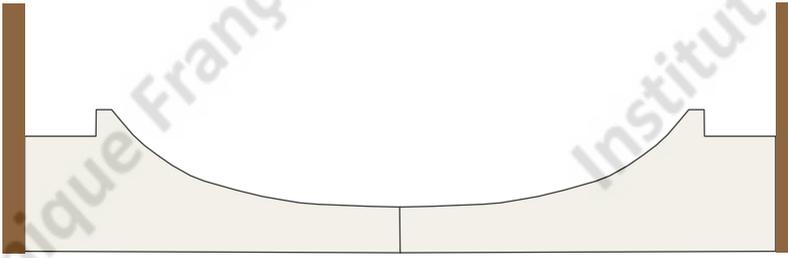
COUCHE DE LIAISON AVEC TALC



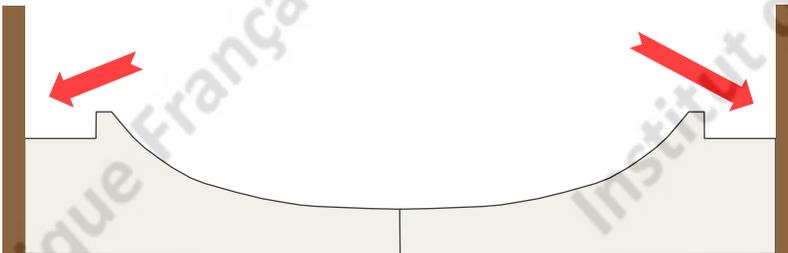
BÉTON DE RÉSINE

PRÉPARATION DU COFFRAGE

1) Réalisation du coffrage de la partie couvercle et bosse du moule sec de vasque avec des planches de bois.



2) Faire les joints au plâtre le long des planches et réparer les défauts éventuels du moule.



3) Passer avec un pinceau une cire de démoulage sur l'ensemble du coffrage. Laisser sécher, puis lustrer l'ensemble avec un chiffon doux. Répéter deux fois cette même opération.





Dosage du gelcoat.



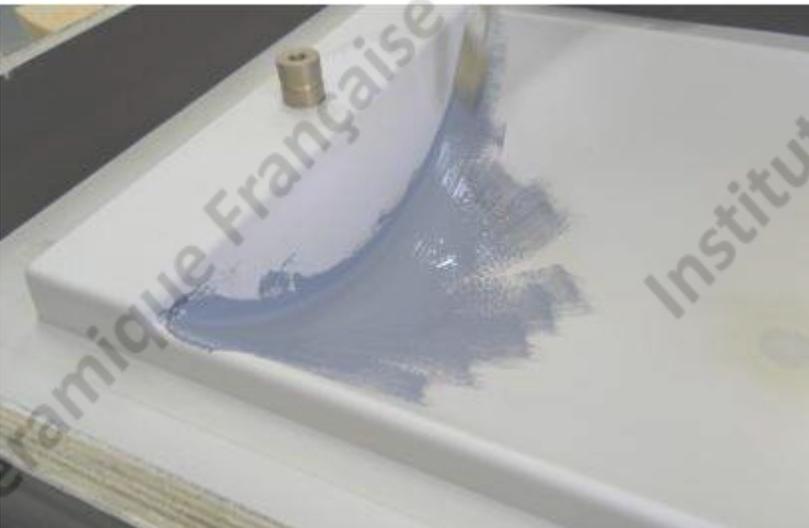
Dosage du durcisseur.



Ajout de 2% de colorant.



Après le dosage, le mélange doit être mélangé plusieurs minutes jusqu'à obtenir une pâte homogène.



POSE DE LA PREMIÈRE COUCHE DE GELCOAT



Application de la première couche de gelcoat à l'aide d'un pinceau (commencer par les angles).

Première couche de gelcoat terminée.



POSE DE LA DEUXIÈME COUCHE DE GELCOAT + FIBRES



Lorsque la résine de la première couche est « amoureuse » (peut être marquée au doigt sans que celle-ci colle), la deuxième couche de gelcoat peut être passée. Une fois celle-ci entièrement appliquée, il faut saupoudrer les fibres coupées de 6 mm sur l'ensemble de la pièce, elle servira pour une meilleure adhérence des produits que l'on viendra rajouter ensuite.

FABRICATION D'UNE COUCHE DE LIAISON



Peser la quantité de résine de stratification nécessaire sur la balance au gramme près.

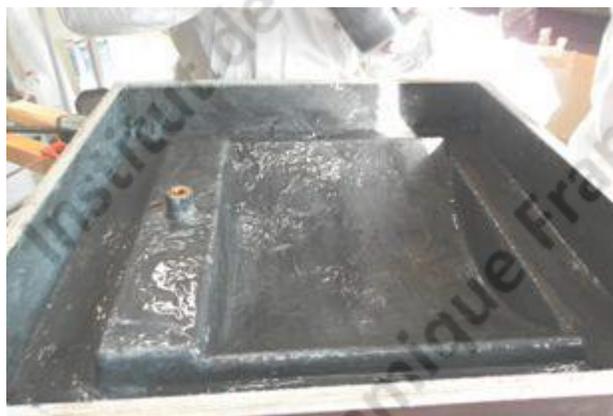
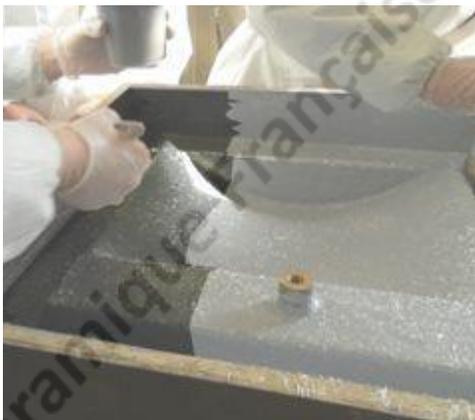


Ajouter ensuite le durcisseur.

Mélanger la résine+durcisseur avec un mélangeur et ajouter du talc pour épaissir la préparation et lui éviter de couler.



POSE DE LA COUCHE DE LIAISON



PRÉPARATION DES INGRÉDIENTS DU BÉTON



Dosage de la résine selon les mêmes proportions que pour la couche de liaison. Préparation de la résine de stratification, résine plus durcisseur sans talc. Mélanger avec un agitateur.

Positionner un film plastique dans le volume à déterminer, puis remplir avec le sable sec, la quantité de sable sera ainsi déterminée.

MÉLANGE ET APPLICATION DU BÉTON



Verser la résine directement sur le sable, le film plastique permettra d'assurer le mélange sans craindre de polluer le modèle, cependant le mélange peut être préparé en dehors du coffrage, comme dans une bétonnière pour les grosses quantités.

Le mélange sera assuré à la main jusqu'à ce que l'intégralité du sable soit entièrement imprégnée de résine.



Le film est ensuite enlevé et le béton de résine réparti sur la couche de liaison, encore amoureuse.



Damage du béton.



Égalisation de la surface.



Allègement et dégagement de la soupape en laiton qui avait été préalablement repérée et bouchée.



Collage de deux tasseaux qui serviront de pieds et faciliteront les manipulations.



Laisser durcir le tout 24 heures.

DÉMOULAGE ET FINITION



Après 24 heures minimum, enlever les plaques de bois puis la partie de moule.

Effectuer un ponçage très rigoureux à l'aide de papier de verre abrasif à l'eau.

Une fois les éventuels défauts rectifiés, le fond de matrice est terminé.



MATRICE NID D'ABEILLE ET CHOUCROUTE

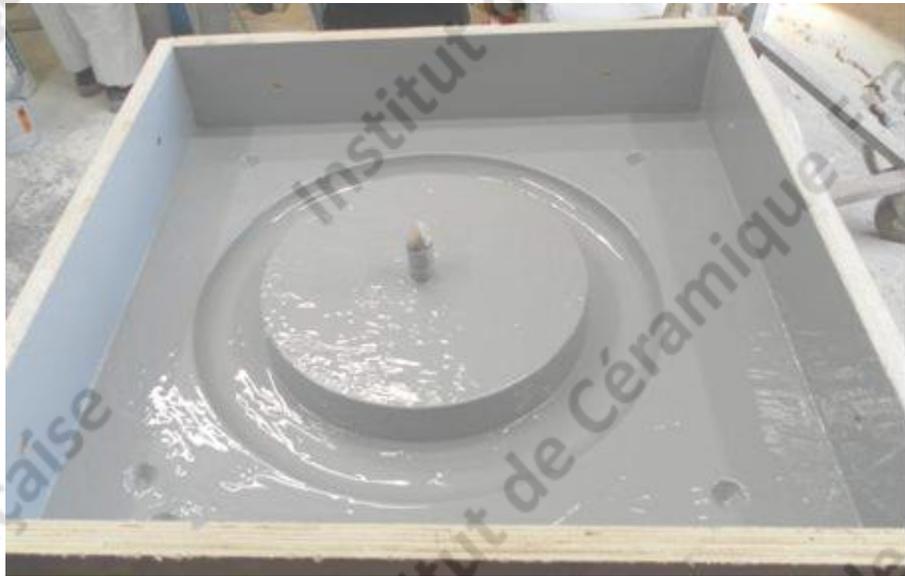
PRÉPARATION COFFRAGE ET PASSAGE DÉMOULANT



Passer avec un pinceau une cire de démoulage sur l'ensemble du coffrage. Laisser sécher puis lustrer avec un chiffon doux. Répéter deux fois cette même opération.

PASSAGE DE LA PREMIÈRE COUCHE DE GELCOAT

La préparation du gelcoat est identique à celle du précédent chapitre.



Attendre que la première couche soit amoureuse.

PASSAGE DE LA DEUXIÈME COUCHE DE GELCOAT



FABRICATION D'UNE COUCHE DE LIAISON



Peser la quantité de résine de stratification nécessaire sur la balance au gramme près.



Ajouter ensuite le durcisseur.



Mélanger la résine+durcisseur avec un mélangeur et ajouter du talc pour épaissir la préparation et lui éviter de couler .

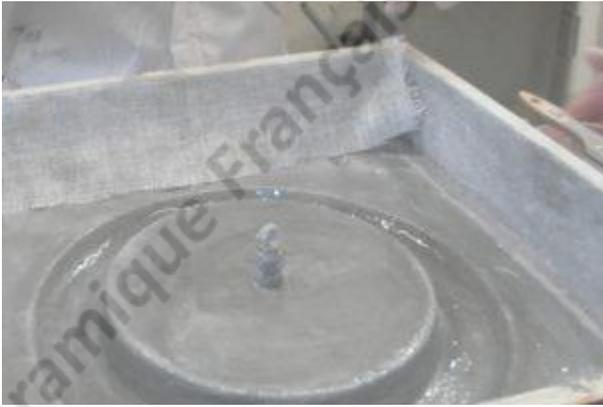
PASSAGE DE LA COUCHE DE LIAISON



DÉCOUPAGE DE LA FIBRE



POSE DE LA FIBRE DE VERRE



Positionner le tissu de verre et bien mouiller celui-ci avec la résine de stratification.



Il ne doit subsister aucune bulle d'air entre les différentes couches de résine et de fibre de verre.

CONSTRUCTION DU NID D'ABEILLE



STRATIFIÉ TERMINÉ
ATTENDRE 24 H AVANT LA
PROCHAINE ÉTAPE.

Découpage des plaques.



Positionnement plaques.



Insert de fixation côtés.



Calage plaques.

PRÉPARATION À LA POSE DE LA CHOUCROUTE



Remouiller avec de la résine de stratification avec un pinceau le tissu appliqué la veille.



PRÉPARATION DE LA CHOUCROUTE



Le mélange sera constitué de : résine , Filite® et fibres de verre hachées. Bien mélanger avec les mains, jusqu'à obtention d'une pâte bien homogène pour son application.



POSE DE LA CHOUCROUTE



La choucroute est posée et tassée à la main en débutant par les angles.

Constitution de l'épaisseur.

Mise en place des plaques et blocage avec de la choucroute.

Positionnement et collage des pieds.



DÉMOULAGE APRES 48H

Décoffrage.



Matrice terminée.



Démoulage.



Finition.

MATRICE PRÊTE À LA FABRICATION DES MOULES



RÉSINE DURE ET SOUPLE

RÉALISER UNE MATRICE D'UN MOULE DE CARREAUX EN RÉSINE SOUPLE AVEC CHÂSSIS EN RÉSINE DURE.



Moule en plâtre

Résine souple

Résine dure

PRÉPARATION DU COFFRAGE

Fixation des plaques de coffrage.

Moule en plâtre



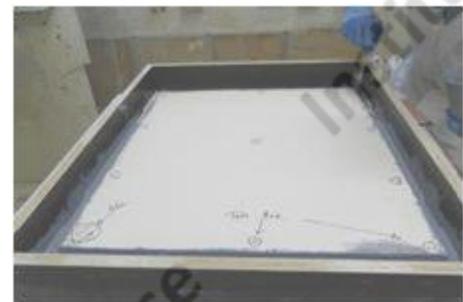
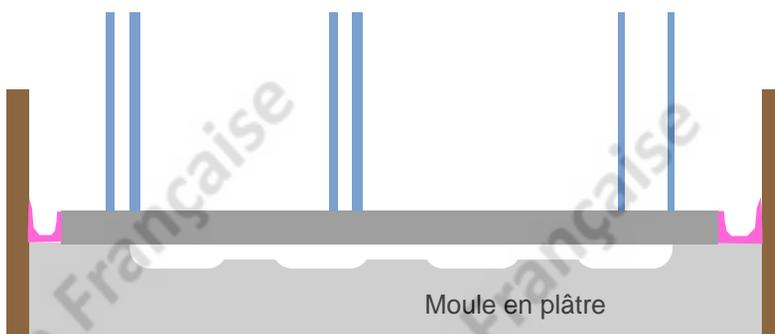
Pose de la plaque d'épaisseur et marquage des événements et trous de remplissage de l'élastomère.

Moule en plâtre



PRÉPARATION COFFRAGE ET ÉVENTS

Après avoir ciré l'ensemble, passage de la première couche de gelcoat pour fixer la plaque.

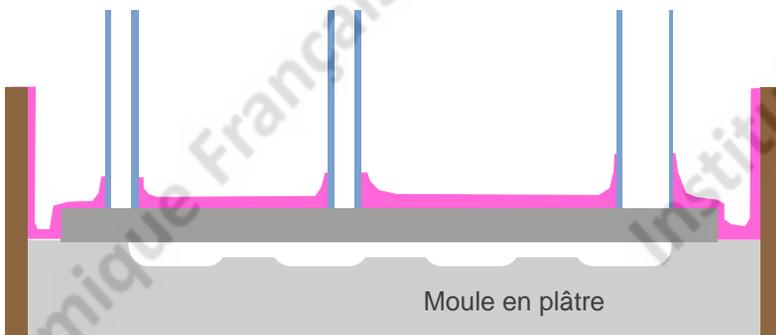


Pose des événements et du trou de remplissage, les tubes qui permettront le remplissage de l'élastomère et la sortie de l'air sont des gaines électriques rigides de diamètre 20 à 40, elles sont posées à ras de la plaque et fixées par l'intérieur en y injectant du plâtre.

Pose de la deuxième couche de gelcoat, de la fibre et de la couche de liaison, les tubes sont scellés avec les différentes couches de résine, on devra prendre soin de les maintenir pendant la pose de la résine dure.



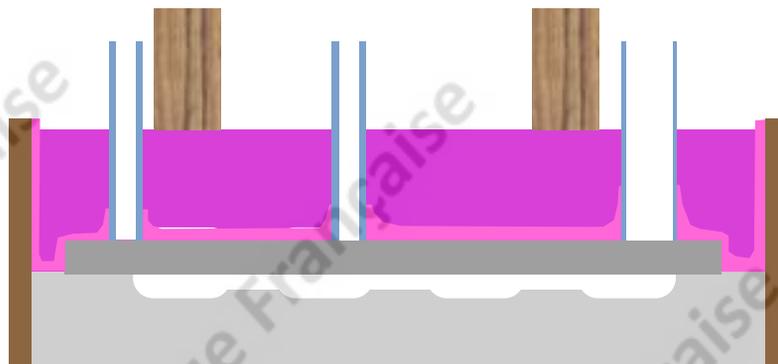
La matrice est prête à recevoir le béton de résine comme préparé lors des chapitres précédents.



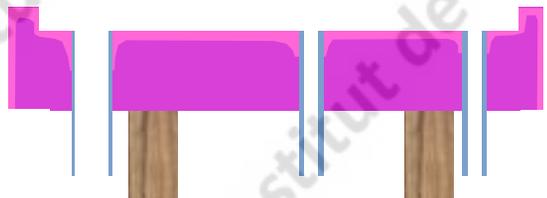
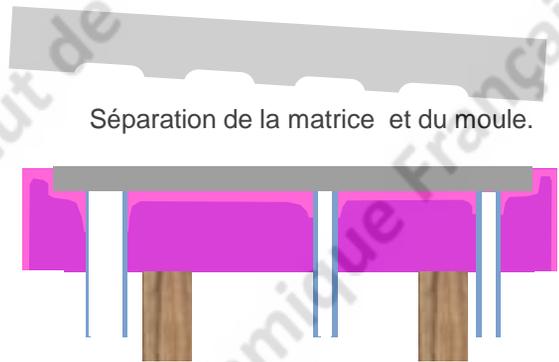
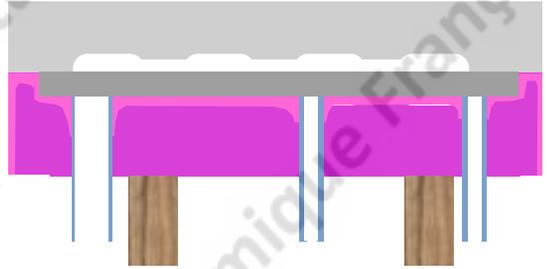
BÉTON DE RÉSINE



Comme dans les chapitres précédents, le béton de résine est réalisé à base de résine et de sable de sablage (il doit absolument être sec), après avoir été damée la masse de sable reçoit deux tasseaux de bois qui permettront sa manipulation future.



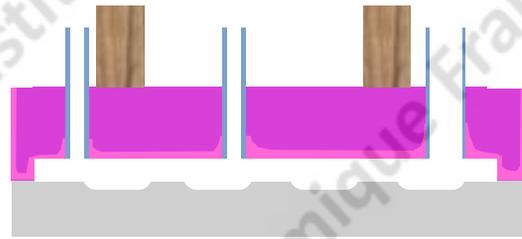
DÉMOULAGE



Nettoyage et débouchage des orifices.



Remettre le fond de matrice sur la partie de moule précédemment enlevée. Mettre un entonnoir pour le coulage de la résine souple.



Bloquer les différentes parties avec des serres-joints.

PRÉPARATION COULAGE ÉLASTOMÈRE



Faire un joint de plâtre autour du joint du moule et matrice pour éviter une fuite éventuelle.



Mélanger les deux composants à 50/50. Le mouvement imprimé doit avoir la forme d'un 8.

PRÉPARATION COULAGE ÉLASTOMÈRE



Couler la résine et boucher les événements lorsque celle-ci sort.



Vérifier si le niveau reste stable.

FINITION



Décoffrage du moule.

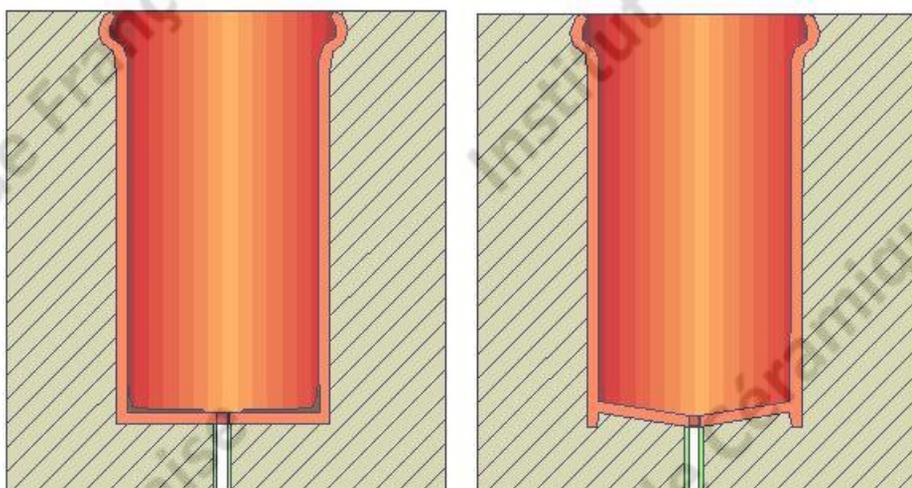


Finition de la résine dure et de l'élastomère.

Matrice prête à l'emploi.

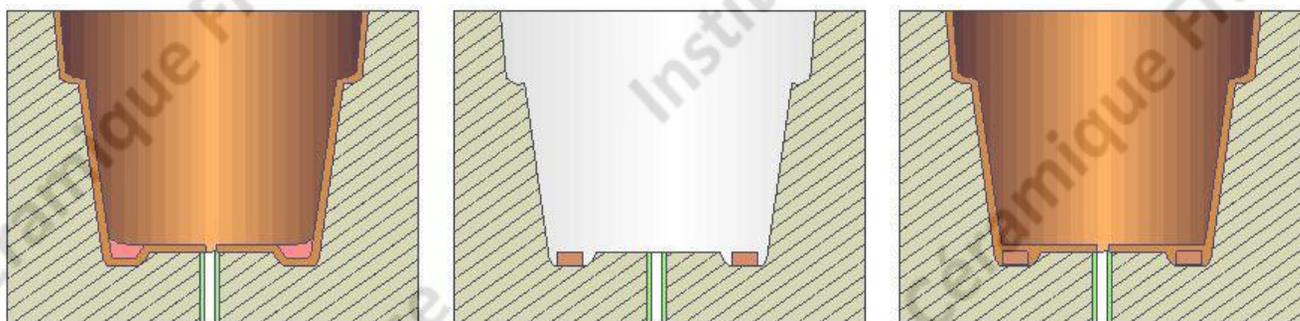


PIED AVEC ÉVACUATION BARBOTINE



RECTIFICATION DE LA FORME DU PIED POUR ÉVITER LA STAGNATION DE BARBOTINE

"PRECAST"

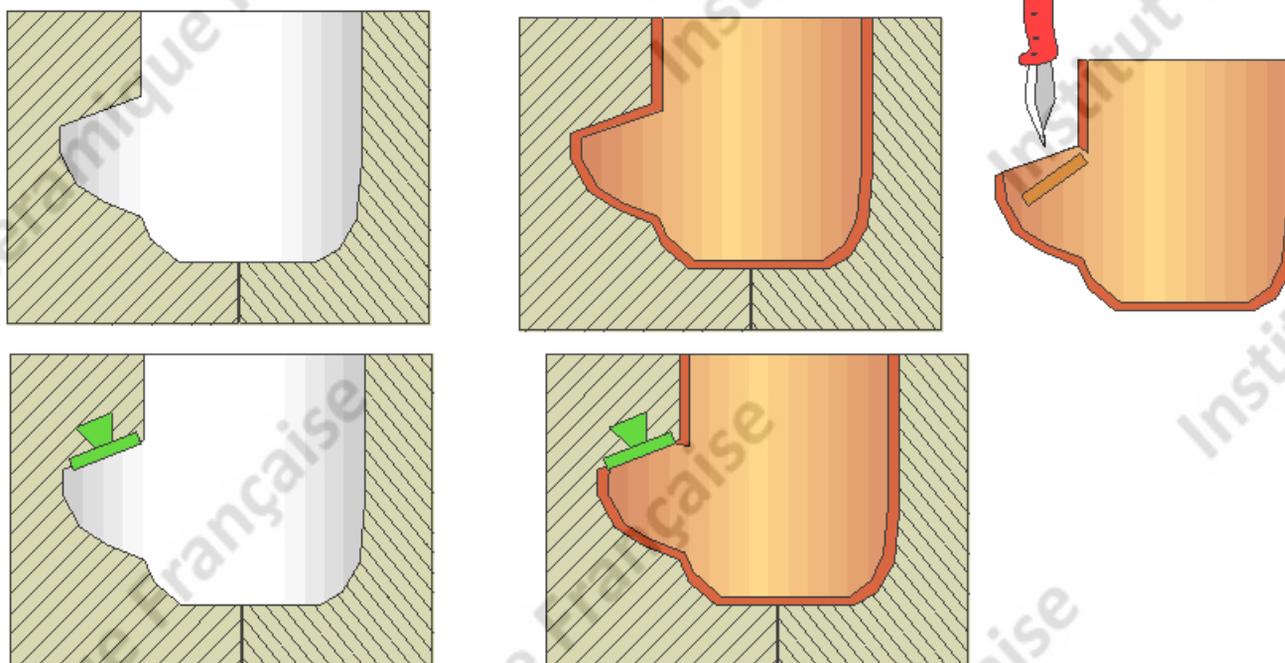


RISQUE DE STAGNATION DE BARBOTINE.

INSTALLATION DE PRECAST DANS LE MOULE VIDE (les precast sont des morceaux de pâtes ayant la consistance d'une pièce sortie moule et représente le volume de barbotine à évacuer.)

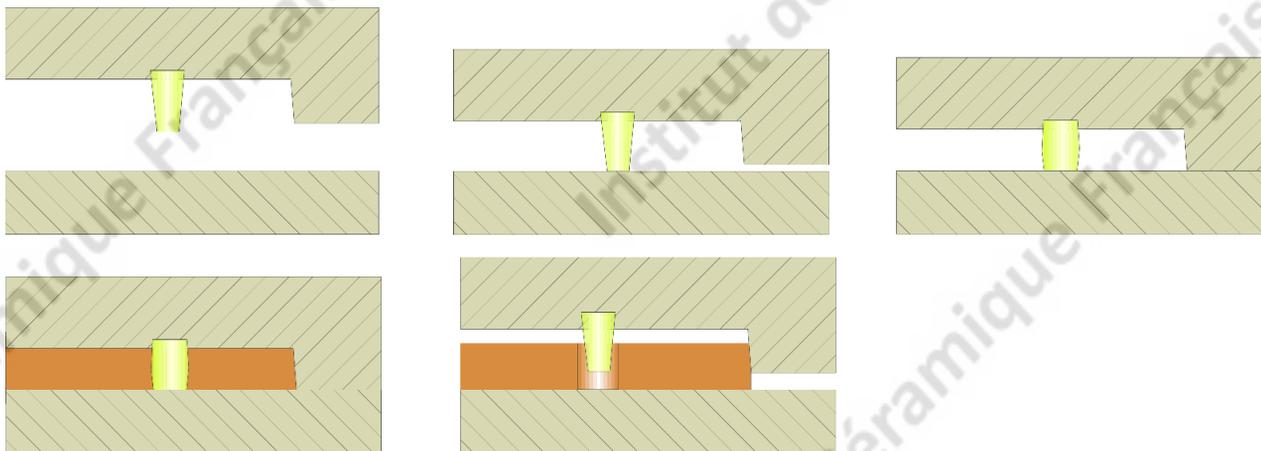
APRÈS REVIDAGE, ILS FONT PARTIE INTÉGRANTE DE LA PIÈCE ET ONT LA MÊME HUMIDITÉ.

INSERT POUR ÉVITER LE DÉCOUPAGE



EN FIXANT DANS LE MOULE UN INSERT PLASTIQUE AUX ENDROITS OÙ LA BARBOTINE NE DOIT PAS CRÉER D'ÉPAISSEUR, ON PEUT ÉVITER CERTAINS DÉCOUPAGES DIFFICILES.

INSERT SOUPLE À ÉCRASEMENT

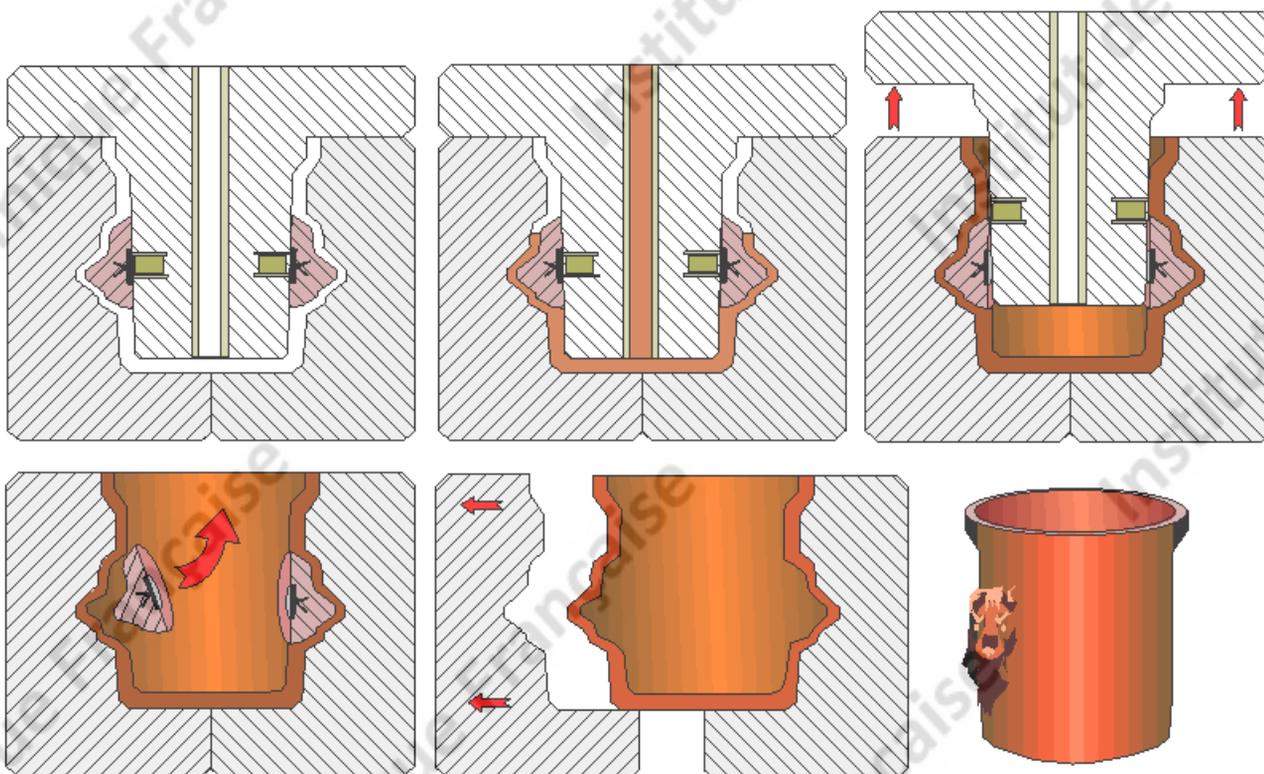


AFIN D'ÉVITER CES ALÉAS ET OBTENIR DES PERÇAGES PARFAITS NE NÉCESSITANT AUCUNE REPRISE, ON PEUT INSÉRER DANS LE MOULE UN TRONC DE CÔNE EN ÉLASTOMÈRE, DONT LA HAUTEUR SERA SUPÉRIEURE À L'ÉPAISSEUR DE LA PIÈCE À PERÇER.

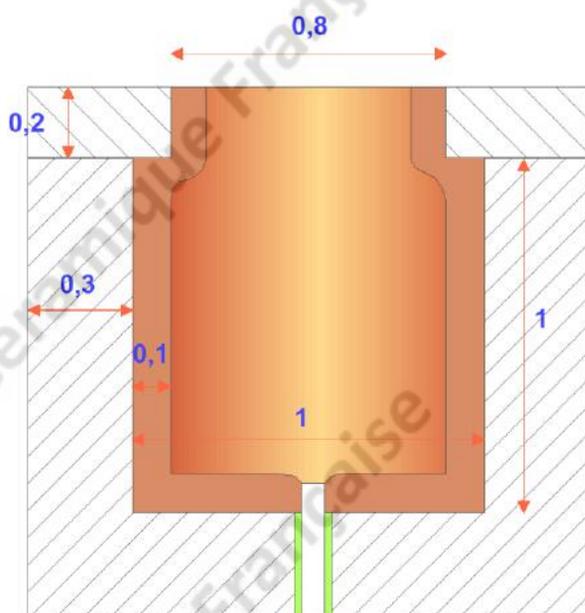
LORS DE LA FERMETURE DU MOULE, L'INSERT SERA COMPRESSE ET SON DIAMÈTRE AUGMENTERA, IL SERA DE PLUS PARFAITEMENT PLAQUÉ CONTRE LA DEUXIÈME PARTIE DE MOULE, IL ÉVITERA LA PRISE DE LA BARBOTINE À L'ENDROIT DU PERÇAGE. À L'OUVERTURE DU MOULE L'INSERT SE DÉTENDRA ET LA DIMINUTION DE DIAMÈTRE FACILITERA SON EXTRACTION, IL LAISSERA UN TROU LISSE ET PROPRE.

MOULE À AIMANT

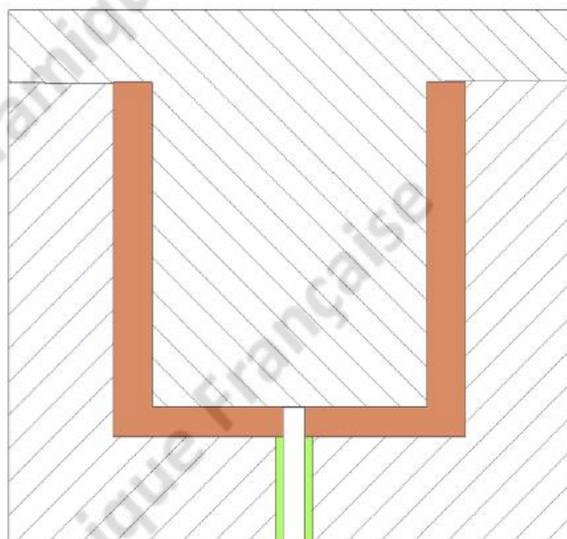
POUR DES MOULES COMPLEXES, ON PEUT ENVISAGER LE MAINTIEN DE CERTAINES SOUS PIÈCES PAR DES AIMANTS PERMANENTS (la force d'attraction de ceux-ci devra être choisie en fonction de la résistance de la pièce au démoulage.)



AVANTAGES ENTRE DEUX PLÂTRES



MOULE REVIDÉ



MOULE ENTRE DEUX PLÂTRES

MOULE AVEC REVIDAGE

Volume externe de la pièce : $1 \times 1 \times 1 = 1$ litre
 Volume interne de la pièce : $0,8 \times 0,8 \times 0,9 = 0,576$ litre
 Volume réel de la pièce : $1 - 0,576 = 0,424$ litre
 Volume externe de la nourrice : $0,8 \times 0,8 \times 0,2 = 0,128$ litre
 Volume interne de la nourrice : $0,6 \times 0,6 \times 0,2 = 0,076$ litre
 Volume des rognures : $0,128 - 0,076 = 0,056$ litre

Volume externe du moule : $1,6 \times 1,6 \times 1,3 = 3,328$ litres
 Volume interne du moule : $1 \times 1 \times 1 = 1$ litre
 Volume réel du moule : $3,328 - 1 = 2,328$ litres
 Volume externe de la bride : $1,6 \times 1,6 \times 0,2 = 0,512$ litre
 Volume interne de la bride : $0,8 \times 0,8 \times 0,2 = 0,128$ litre
 Volume réel de la bride : $0,512 - 0,128 = 0,384$ litre
 Volume total du plâtre : $2,328 - 0,384 = 2,712$ litres

MOULE ENTRE DEUX PLÂTRES

Volume externe de la pièce : $1 \times 1 \times 1 = 1$ litre
 Volume interne de la pièce : $0,8 \times 0,8 \times 0,9 = 0,576$ litre
 Volume réel de la pièce : $1 - 0,576 = 0,424$ litre

Volume externe du moule : $1,6 \times 1,6 \times 1,3 = 3,328$ litres
 Volume interne du moule : $1 \times 1 \times 1 = 1$ litre
 Volume réel du moule : $3,328 - 1 = 2,328$ litres
 Volume externe du noyau : $1,6 \times 1,6 \times 0,2 = 0,512$ litre
 + $0,8 \times 0,8 \times 0,9 = 0,576$ litre
 total = $1,088$ litre
 Volume total du plâtre : $2,328 + 1,088 = 3,416$ litres

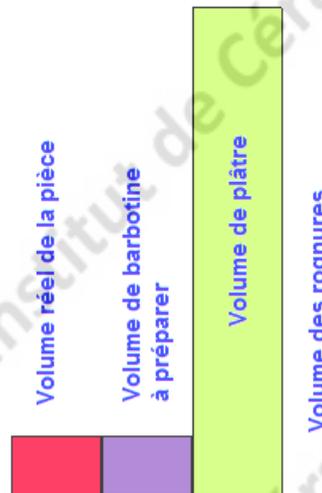
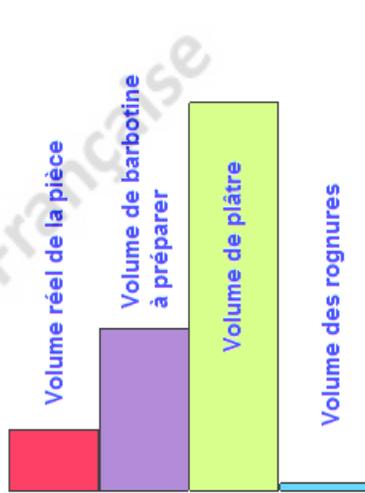
AVANTAGES ENTRE DEUX PLÂTRES

MOULE REVIDÉ

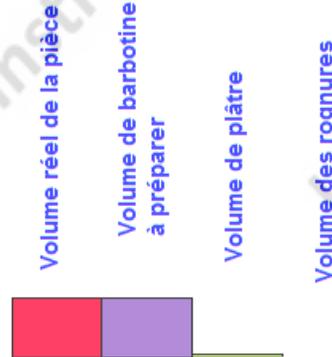
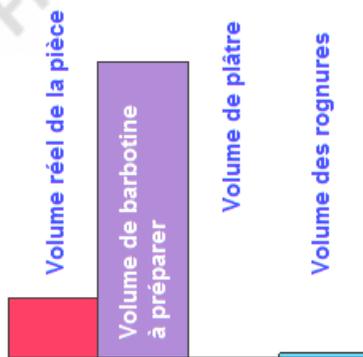
Volume de la pièce à couler : 0,424 litre
 Volume de la pâte à préparer : 1,128 litre
 Volume des rognures : 0,056 litre
 Volume de plâtre : 2,712 litres

MOULE ENTRE DEUX PLÂTRES

Volume de la pièce à couler : 0,424 litre
 Volume de la pâte à préparer : 0,424 litre
 Volume des rognures : 0 litre
 Volume de plâtre : 3,416 litres



Si l'on applique ce principe à la fabrication d'une pièce dont les dimensions seraient : 30 cm x 30 cm x 30 cm et d'une épaisseur de 15 mm. En se ramenant à l'utilisation d'un moule à 100 pièces par moule (usure normale), le diagramme serait le suivant :



Outre les considérations de volume de barbotine, qui passe de 1 dans le cas des moules entre deux plâtres à 4 dans le cas des moules en revidé (ce qui impose des dimensions de déliteurs et de cuve de stockage 4 fois plus importantes.) Les autres avantages du coulage entre deux plâtres résident principalement dans : une vitesse de prise plus rapide, des pièces plus homogènes plus solides, avec un aspect intérieur propre et avec beaucoup moins de finition.

FAÇONNAGE

GENÈSE DES MATIÈRES PREMIÈRES



Les matières premières céramiques trouvent leurs origines dans la dégradation des roches magmatiques. La lave refroidit rapidement en surface, mais sous l'effet d'empilages successifs des couches celles situées en profondeur vont refroidir très lentement. Les différents minéraux en fusion, constituant la lave, pourront alors former des cristaux qui grossiront au fur et à mesure du refroidissement, en finalité, on obtiendra une roche dite « magmatique » : **le granit**.



REFROIDISSEMENT
LENT
CRISTALLISATION



GRANIT

Cette roche sera principalement composée de QUARTZ, de FELDSPATH et de MICA.



Sous l'effet du temps, de l'érosion et des conditions climatiques (altération chimique par le CO₂, destruction mécanique par le froid et les mouvements géologiques, pluie, vent), cette roche s'altérera jusqu'à permettre la séparation des différents éléments.



MICA



FELDSPATH



QUARTZ

De ces trois principales roches, ce sont surtout le quartz et le feldspath qui seront utilisés dans le domaine de la céramique, mais s'ils constituent à eux deux plus de 70% des formulations chimiques des céramiques, ils sont physiquement difficiles à mettre en œuvre, puisqu'on les trouve au mieux sous forme de sable.

C'est dans la continuité de la dégradation du feldspath que l'on trouvera la solution : sous l'effet de l'érosion et des conditions météorologiques le feldspath perdra une partie de ses sels minéraux, et se chargera en eau pour aboutir cette fois à une matière nouvelle et possédant des propriétés plastiques : le KAOLIN.

FELDSPATH



Sous l'effet de la pluie, tout ou partie du kaolin sera transporté par les eaux de ruissellement, loin de la roche lui ayant donné naissance, pendant ce transport, celui-ci pourra au gré des terrains qu'il traversera se charger en :

Oxyde de fer,
carbonate et autres minéraux,
matières organiques,
eau.

Il sera également naturellement broyé pendant son voyage.

Ce mélange de matières premières pourra se déposer dans les lagunes ou plaines pour former ce que seront plus tard des gisements d'argiles.

Les argiles, même si elles possèdent une grande partie des qualités (notamment, plastiques des kaolins), verront leurs comportements et leurs caractéristiques évoluer grâce à l'oxyde de fer qui pourra leur donner une coloration rouge. Les matières minérales leur conféreront plus de fusibilité. L'eau et les matières organiques augmenteront leur plasticité, et le broyage qui en diminuant la taille de ces particules permettra d'augmenter sa cohésion en cru.



OXYDE FER
(coloration)



MINÉRAUX
(fusibilité)



MATIÈRES ORGANIQUES
(plasticité)



EAU
(plasticité)



BROYAGE
(cohésion)

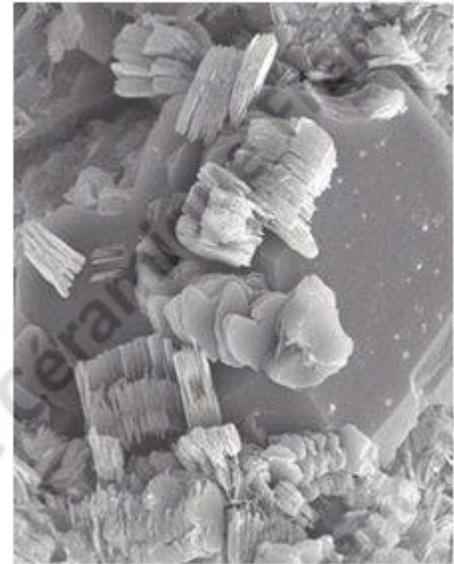
ARGILE



RÔLE DES MATIÈRES PREMIÈRES

			FAÇONNAGE	SÉCHAGE	CUISSON
MATIÈRES PLASTIQUES	ARGILE	<p>L'argile est un dérivé du kaolin qui contient</p> <p>matières organiques (+ de plasticité)</p> <p>oxydes métalliques (+ de coloration)</p> <p>matières minérales (+ de fusibilité)</p>	<p>PLASTICITÉ</p> <p>COHÉSION</p>	<p>COHÉSION</p> <p>RETRAIT AU SÉCHAGE</p>	<p>SOLIDITÉ</p>
	KAOLIN		<p>VITESSE DE PRISE AU COULAGE</p>		<p>BLANCHEUR</p>
MATIÈRES DÉGRAISSANTES	RÉFRACTAIRES	<p>SILICE</p> <ul style="list-style-type: none"> - quartz - cristobalite - tridymite - silice vitreuse <p>CHAMOTTE</p> <ul style="list-style-type: none"> - argile cuite broyée 	<p>DIMINUE LA PLASTICITÉ</p> <p>ASSURE LA RIGIDITÉ DES PIÈCES APRES FAÇONNAGE</p>	<p>DIMINUE LE RETRAIT</p> <p>DIMINUE LA DÉFORMATION</p> <p>FACILITE LE SÉCHAGE</p> <p>AUGMENTE LA POROSITÉ</p>	<p>RÉSISTE À LA TEMPÉRATURE</p> <p>FORME LE SQUELETTE DE LA PÂTE</p>
	FONDANTS	<p>FELDSPATH</p> <ul style="list-style-type: none"> - potassique - sodique - sodico-potassique - calcique <p>SYENITE</p> <p>CARBONATE de chaux de magnésium</p>			<p>VITRIFICATION SANS ATTEINDRE LE POINT DE FUSION</p> <p>SOLIDITÉ DURETÉ</p>

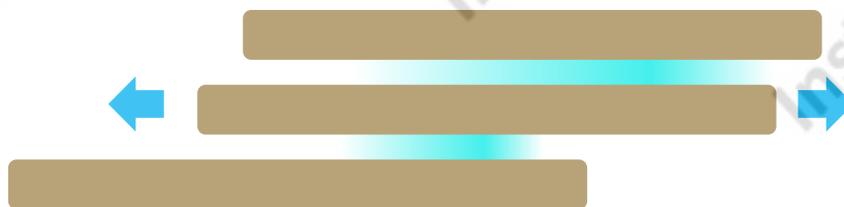
PLASTICITÉ : si aujourd'hui, beaucoup de matières d'œuvre céramiques sont mises en forme par voie liquide, sèche ou même plasma. La mise en forme d'une pièce céramique résulte très souvent de la capacité de cette matière à se déformer sous l'effet d'un effort manuel ou mécanique et de conserver la forme qui lui a été donnée.



Les argiles sont constituées de petites particules plates d'une extrême minceur, le plus souvent orientées à peu près parallèlement entre elles. Entre deux lamelles formant un petit angle, l'eau se réfugie dans la partie aiguë du dièdre, exerçant une traction considérable sur les « volets » qui se plaquent les uns aux autres.

Les particules forment des empilages semblables à ceux obtenus avec les lames de verre collées les unes aux autres par une mince pellicule d'eau : on peut les faire glisser facilement, mais il faut un effort considérable pour les arracher les unes des autres.

En résumé, la plasticité est déterminée par le contact intime de l'eau et de l'argile, leur force de cohésion mutuelle, et la tension du liquide qui permet le glissement tout en s'opposant à l'arrachement. Tous ces phénomènes ont reçu le nom de « phénomènes capillaires ». Nous verrons par la suite que ces phénomènes liés à la tension superficielle des liquides sont à l'origine de nombreuses réactions des matières premières céramiques pendant les diverses phases de transformation du procédé. Elle gère notamment le phénomène de la prise et intervient dans la plupart des défauts de coulage. La tension superficielle a également une forte influence sur le séchage, sur la brillance des émaux ou sur les défauts de retirements de ceux-ci.



L'eau permet aux particules d'argiles de glisser les unes sur les autres et donc à la pâte de se déformer.



L'eau empêche les particules de se séparer les unes des autres et donc permet de conserver la forme donnée.

Les kaolins



Les kaolins sont des matières premières céramiques à base de kaolinite. L'emploi du terme kaolin s'étend à des argiles sédimentaires blanches provenant de l'altération par hydrolyse des roches feldspathiques déposées à l'emplacement de la roche mère ou, entraînées par l'eau et redéposées dans une région proche. On parle d'argiles kaoliniques.

D'une manière générale, les gisements de kaolin se trouvent dans les zones avoisinant les massifs cristallins ; c'est notamment le cas des pays d'Europe.

Avec un taux d'impuretés très faible, les kaolins ont une résistance pyroscopique correspondant aux montres fusibles 34-35 (1750-1770°C). Leur plasticité est variable et dépend essentiellement de la forme et de la finesse des particules de kaolinite. En général, les kaolins les plus plastiques sont souvent les plus résistants en cru et sont formés de particules inférieures au micron.

Les kaolins constituent l'un des composants de base des pâtes vitrifiables, et particulièrement des porcelaines. En apportant la blancheur, ils développent de la porosité fermée à la vitrification. Ils peuvent également entrer dans des compositions réfractaires et, s'ils sont peu plastiques, l'ajout de certaines argiles telles que les « ball clays » améliore l'aptitude au façonnage, ceci aux dépens de la réfractarité afférente au kaolin utilisé seul.

Ils sont aussi utilisés dans les engobes, les couvertes, les émaux et dans l'élaboration des frites où ils apportent la silice et l'alumine.

On peut enfin noter l'emploi du kaolin en tant qu'ajout au moulin pour contribuer à la stabilisation des barbotines d'émail et à leur adhérence sur les tessons.

Les argiles



Les argiles se trouvent loin de leur lieu de formation. Transportées par les eaux de ruissellement, les particules les plus fines sont venues s'accumuler dans les lacs, entraînant des impuretés et des matières organiques plus ou moins finement broyées par l'érosion. Pour cela, les argiles sont nettement plus plastiques que les kaolins, mais ont une température de fusion plus basse, suivant la nature et le pourcentage d'impuretés.

Les argiles sont généralement constituées de structures dont les dimensions et la forme conditionnent la plasticité en présence d'eau. En particulier, une teneur élevée en fines particules (de l'ordre du micron) est caractéristique des argiles très plastiques. Ces données caractérisent également l'aptitude au séchage (retrait et durée) ainsi que la cohésion en cru. En effet, plus grande est la proportion de fines particules, plus sont importants les temps de séchage, le retrait et la tendance à la déformation ; c'est pourquoi il est courant d'introduire des matières grossières et dégraissantes pour supprimer ces inconvénients. À la cuisson, les minéraux des argiles perdent leur eau, puis, à partir de 975 °C, la silice et l'alumine peuvent former de la mullite.

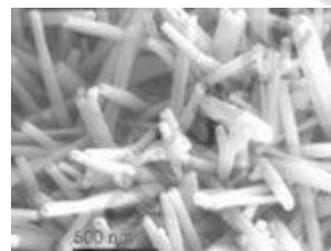
Autres matières argileuses:

LES HALLOYSITES ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$)

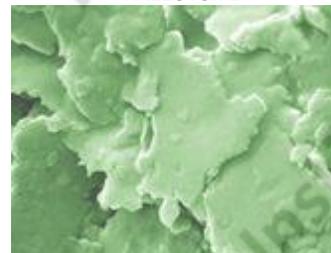
LES MONTMORILLONITES ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot (H_2O)_n$)

LES BENTONITES : elles peuvent absorber plus de huit fois leur volume d'eau.

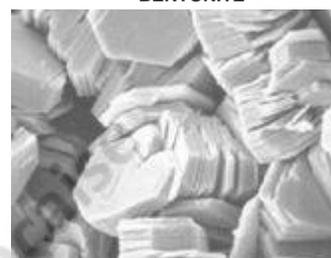
LES MARNES : elles contiennent environ 50 % de calcaire (carbonate de chaux).



HALLOYSITE



BENTONITE



KAOLINITE

MATIÈRES DÉGRAISSANTES

LEURS RÔLES:

Façonnage

Elles diminuent la plasticité des argiles trop grasses.

Séchage

Elles créent un réseau de capillaires qui facilitent le cheminement de l'eau à travers la pâte, ainsi elles augmentent la porosité et elles diminuent le retrait.

Cuisson

Elles fournissent un squelette à la pâte ou apportent de la fusibilité et de la solidité.



Les dégraissants simples

Les chamottes

Ce sont des argiles calcinées et broyées ayant généralement peu de dilatation.

Les tessons broyés (débris de biscuits broyés).

Les dégraissants réfractaires siliceux

La silice :

Pure, elle est blanche, dure, insoluble dans l'eau et inaltérable par les acides, excepté l'acide fluorhydrique. Elle fusionne en verre incolore à plus de 1800°C. On trouve différentes variétés de silice sous la forme de galets ou de sable.



Quartz

Il est souvent sous forme de sable, ou dans des roches en filons.

Il se présente soit sous la forme de grands cristaux incolores, colorés ou fumés, soit sous la forme de cristaux microscopiques d'aspect translucide (calcédoine)

Dilatation importante à 573°C.

Tridymite

Elle se trouve dans certaines roches volcaniques. C'est le produit de la transformation du quartz à partir de 870°C. Dilatation importante à 130°C.

Cristobalite

Elle se trouve dans certaines roches volcaniques. C'est le produit de la transformation du quartz à 1500°C.

Elle peut être obtenue par calcination de galets de mer (silex) à 1500°C refroidis brutalement

Dilatation importante d'environ 1% à 240°C.

Diatomite

De structure amorphe, elle se trouve dans la terre d'infusoire, sous forme de sables légers constitués de squelettes de diatomées (algues unicellulaires entourées d'une carapace en silice). Elle est principalement utilisée en calorifugation (dilatation faible).

Silice vitreuse ou verre de silice

Toutes les variétés de silice vitreuse ont le coefficient de dilatation le plus faible de tous les matériaux ce qui lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques.

Les dégraissants combustibles

On utilise des matières telles que débris de paille, sciure de bois et poussière de charbon pour obtenir des produits poreux. Ils ont peu d'influence sur la température de fusion.

Les dégraissants fondants

RÔLE:

Façonnage : ils diminuent la plasticité des argiles trop grasses.

Séchage : ils créent un réseau de capillaires qui facilitent le cheminement de l'eau à travers la pâte, ainsi elles augmentent la porosité et elles diminuent le retrait.

Cuisson : ils allongent le palier de vitrification, sans pour autant abaisser le point de fusion et diminuent la porosité.

Les feldspaths

L'orthose : feldspath potassique.

L'albite : feldspath sodique.

L'anorthite : feldspath calcique.

Dans la nature, on trouve des feldspaths mixtes, sodico-potassiques ou sodico-calciques. L'industrie recherche des feldspaths alcalins, car ils ont un palier de vitrification très large entre 1200° et 1400.

Les pegmatites

Elles contiennent des feldspaths et de la silice et sont utilisées en porcelaine.

Le Cornish stone

Ce sont des roches contenant des feldspaths, de la silice et du kaolin. Elles sont plus friables que les pegmatites.

Les sables fondants

Ils contiennent du feldspath et du mica, fondant à plus ou moins haute température.

Les carbonates naturels

Produits très réfractaires seuls, ce sont des fondants très énergiques à haute température une fois liés à la silice et à l'alumine des argiles. Inconvénient : dégazage important dû à la décarbonatation.



MATIÈRES PREMIÈRES COMPOSANT LES ÉMAUX

Composants des glaçures Une glaçure est toujours composée de trois oxydes pris dans cet ordre :

Oxydes basiques : RO et R₂O

Ils tiennent le rôle de fondants.

Les alcalins R₂O: L'oxyde de sodium (Na₂O), l'oxyde de potassium (K₂O), l'oxyde de lithium (Li₂O) et les alcalino-terreux RO : l'oxyde de baryum (BaO), l'oxyde de magnésium (MgO), l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de zinc (ZnO) et l'oxyde de plomb (PbO) sont des oxydes basiques.

Oxydes amphotères : R₂O₃

Ils peuvent agir comme un acide ou comme une base selon l'environnement dans lequel ils sont.

Exemples d'oxydes amphotères : Fe₂O₃, Cr₂O₃

Citons l'alumine Al₂O₃ qui joue un rôle de stabilisateur en augmentant la résistance aux attaques chimiques et à la rayure des glaçures. Elle augmente également la viscosité de l'émail fondu. L'oxyde de zinc (ZnO) peut avoir un rôle amphotère.

Oxydes acides : RO₂ TiO₂, ZrO₂ et SiO₂ ce dernier tenant le rôle de formateurs de verre. B₂O₃ est également un oxyde acide, bien qu'il soit sous une forme de sesquioxyde.

Tous ces mélanges contiennent de la silice et sont fondus à haute température. Le type de glaçure dépend de cette température :



LES MATÉRIAUX BRUTS UTILISÉS DANS LA FABRICATION DES GLAÇURES.

Silice SiO₂
Quartz, cristobalite, silice vitreuse



Kaolin apportant de la Kaolinite 2SiO₂ Al₂O₃ 2H₂O utilisé, comme source d'alumine et de silice, il évite également la sédimentation des bains (attention max 12% en cru)



Feldspaths :
Fondants importants des glaçures
L'orthose 6SiO₂ Al₂O₃ K₂O, l'albite 6SiO₂ Al₂O₃ Na₂O et l'anorthite 2SiO₂ Al₂O₃ CaO



Carbonate de calcium, calcaire, craie, Blanc d'Espagne CaCO₃



Carbonate de magnésium, magnésie MgCO₃



Dolomie CaCO₃ MgCO₃



Talc 4SiO₂ 3MgO H₂O



Colémanite 2CaO 3B₂O₃ 5H₂O



Borax Na₂O 2B₂O₃ 10H₂O

COMPOSÉS DES GLAÇURES

Silice SiO_2

Oxyde fondamental des glaçures, elle est présente entre 60 % et 75 % dans la glaçure, elle a un faible coefficient de dilatation, ce qui assure l'adhérence au tesson. Trop de silice entraînerait une dévitrification.

Alumine Al_2O_3

Seule, elle est réfractaire jusqu'à 2040°C. En trop grosse quantité, elle empêche, par sa réfractarité, la glaçure de fondre et la rend plus visqueuse. Elle limite la recristallisation lors du refroidissement et augmente la résistance aux attaques chimiques ainsi que la résistance à la rayure.

Oxyde de sodium Na_2O

Fondant puissant utilisé à haute et basse température. Sa présence rend les couleurs plus vives et plus brillantes, mais il a un coefficient de dilatation élevé et peut donc entraîner un tressailage.

Oxyde de potassium (K_2O)

Fondant puissant, il a la même action que l'oxyde de sodium avec un coefficient de dilatation encore plus élevé.

Oxyde de plomb (PbO)

Fondant ayant un point de fusion très bas, il doit être cuit en atmosphère oxydante, car il n'a qu'un atome d'oxygène et peut être facilement réduit et provoquer des cloques. On ne l'utilise pas au-dessus de 1200°C, car il se volatilise et vitrifie les réfractaires du four. De plus, il est toxique et doit être stabilisé par frittage avec SiO_2 accompagné par exemple d' Al_2O_3 et CaO .

Oxyde de calcium (CaO)

Seul, il est réfractaire jusqu'à 2572°C. C'est un fondant énergique à haute température, mais il faut lui adjoindre d'autres fondants pour les basses températures.

Oxyde de magnésium (MgO)

Fondant à haute température, il est très réfractaire seul.

Oxyde de Zinc

Fondant à moyenne et haute température.

Oxyde de strontium (SrO)

Il a la même fonction que l'oxyde CaO , mais est plus fusible et plus cher.

Oxyde de lithium (Li_2O)

Augmente la fusibilité au même titre que Na_2O et K_2O , mais plus cher. Moins de dilatation que Na_2O et K_2O donc augmente moins le tressailage.

Oxyde d'antimoine (Sb_2O_3)

Quelquefois utilisé comme opacifiant, il est surtout combiné avec le PbO pour obtenir le jaune de Naples.

Oxyde borique (B_2O_3)

Fondant puissant amené par la colémanite, et les frites boriques. Possède un point de fusion bas et forme des borates qui diminuent le coefficient de dilatation.

LES OPACIFIANTS

L'oxyde d'étain (SnO_2) : 5% de la composition totale de l'émail.

Attention à la présence de pièces dans la même cuisson contenant de l'oxyde de chrome. L'association chrome-étain par migration dans le four peut former des « pink » : risques de voiles roses sur les pièces.

L'oxyde de zirconium : de 7 à 12 % de la composition totale de l'émail, il ne se dissout pas dans la glaçure en fusion, mais reste sous la forme de fines particules en suspension. Il est moins cher que l'oxyde d'étain, mais rend parfois les glaçures rugueuses et estompe certaines couleurs.

COLORATION DES ÉMAUX ET DES GLAÇURES

Les compositions vitrifiables, qui sont transparentes pour rendre utilisables les objets céramiques, sont des compositions de base.

Pour colorer une composition vitrifiable, il faut ajouter à la base certains oxydes métalliques tels que le fer, le manganèse, le cobalt, le chrome et le nickel dans des proportions de 1 à 10 %. Suivant la composition et le niveau de température de cuisson, les colorations sont différentes. L'intensité de couleur varie avec le pourcentage de colorant.

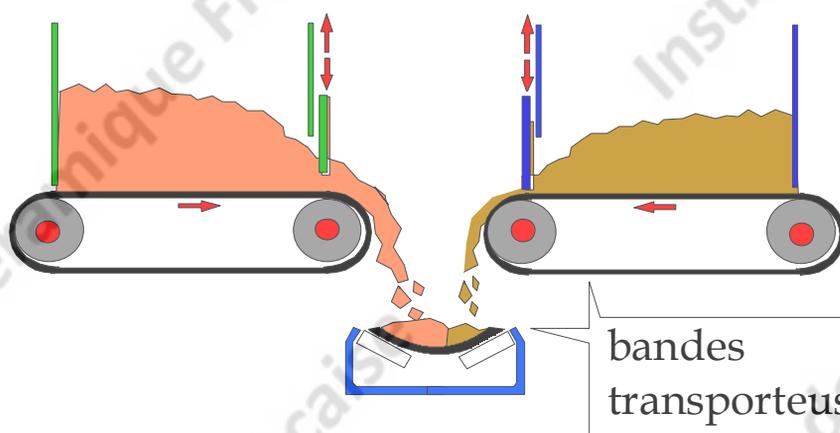
L'atmosphère de cuisson peut influencer le développement de certains oxydes.

Oxyde de fer	noir ferreux	Fe₃O₄	brun / ocre/ rouge
	rouge ferrique	Fe₂O₃	
Oxyde de cobalt		Co₂O₃	bleu pouvoir de coloration élevé
carbonate de cobalt		CoCO₃	bleu utilisé pour la finesse granulométrique
Oxyde de chrome		Cr₂O₃	vert si peu de plomb et pas de zinc
			rouge / orange
			jaune brillant si +soude +zinc
			rose/ brun rouge si oxyde d'étain
			bleu vert cobalt
Oxyde de manganèse		MnO₂	pourpre
Oxyde de vanadium		V₂O₅	jaune vif avec 9% et pâle avec 5 %
Oxyde de nickel		NiO	vert
		Ni₂O₃	noir
Rutile		TiO₂	gris brun
Ilmenite		FeO TiO₂	brun
Chromate de fer		FeCrO₄	idem fer + chrome
Oxyde de cuivre		CuO	vert foncé
			rouge
			bleu turquoise
Cadmium / Sélénium		CdSe	rouge



MATÉRIELS ET TECHNIQUES DE PRÉPARATION « DOSAGE »

Doseurs distributeurs linéaires à une case



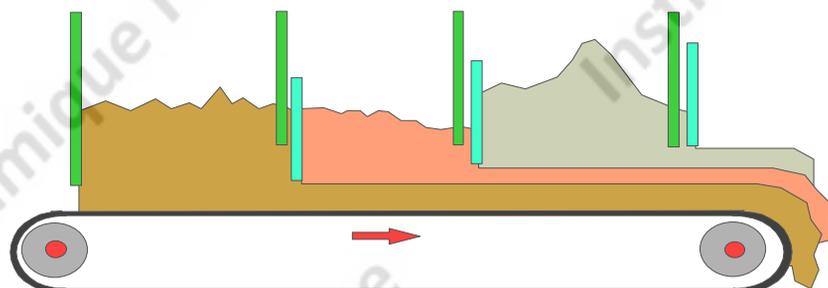
Pour qu'une pâte conserve ses propriétés, il faut que ses éléments se retrouvent toujours en même proportion (poids sec). Il existe trois méthodes de dosage :

Le dosage à sec et en volume

Pour que cette méthode ait une précision acceptable, il faut que les matières conservent toujours la même granulométrie et la même humidité.

Les appareils utilisés sont en fait des récipients qui sont arasés (seau, caisse, wagonnet ou godet de chargeur), mais des appareils plus complexes sont utilisés pour le dosage continu. Ils permettent de faire s'écouler des matières suivant un débit constant ou réglable (doseur linéaire, doseur distributeur).

Doseurs distributeurs linéaires multi-cases



Le dosage en volume liquide

Cette méthode consiste à mesurer des volumes de barbotine dont on connaît le pourcentage de matière sèche pour un volume donné. Ce procédé permet d'éviter des calculs d'humidité et facilite la manutention et le mélange. Il est nécessaire d'opérer avec des barbotines de densité constante.

Le dosage mixte

On peut charger les broyeurs et les délayeurs avec des quantités pesées de matières, et ensuite effectuer un dosage en volume de barbotine des éléments traités.



Le dosage à sec en poids

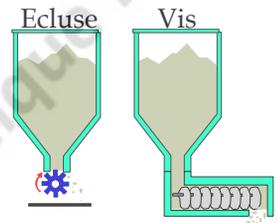
Cette méthode est la plus répandue dans la fabrication des produits fins.

Ce procédé est très précis, mais il faut opérer sur des matières parfaitement sèches ou tenir compte de leur humidité.

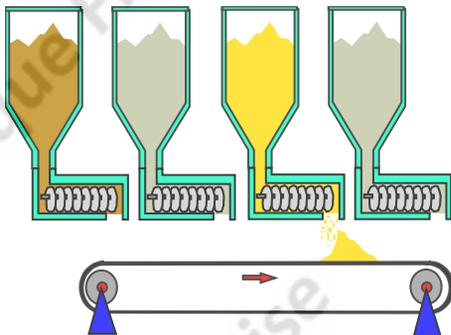
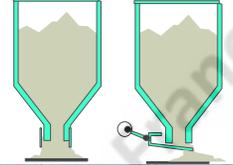
Actuellement, la plupart des systèmes de mesure fonctionnent sur la base de jauge de contrainte ou les éléments de transport (tapis) ou de mélange (déliteur) servent directement de trémies peseuses.



Dosage en sec en volume

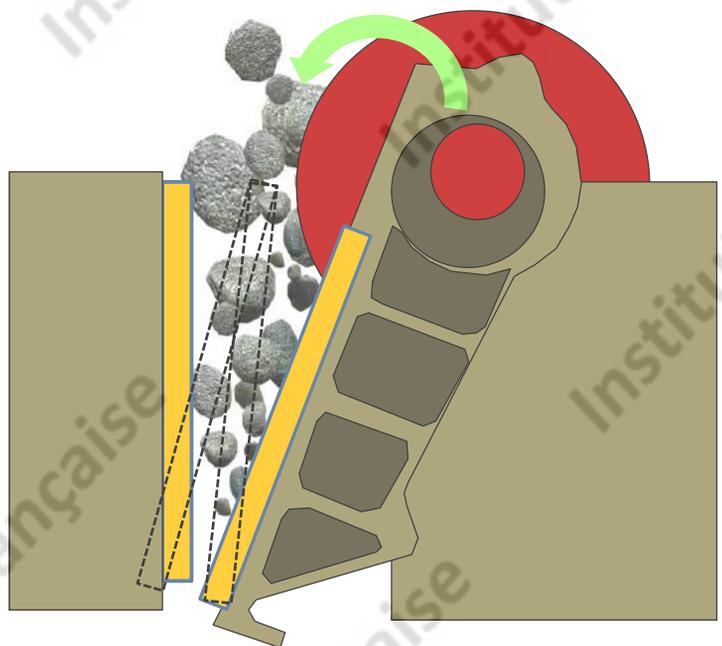
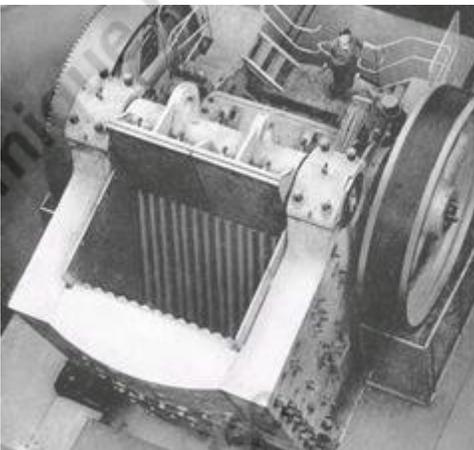


Manchon Vibrant



Système de supervision permettant de commander et de contrôler les différents organes d'une unité de préparation de matières d'œuvre.

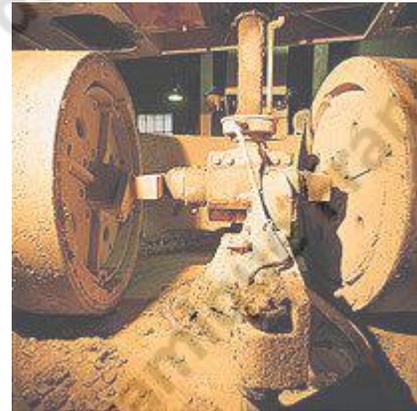
CONCASSAGE. Concasseur à mâchoire : opération préliminaire au broyage. Le concassage sert à dégrossir et diviser les matières premières dures.



PRÉPARATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

BROYAGE LAMINAGE

Pour les matières premières plastiques, comme les argiles brutes pourvues de pollutions minérales, des solutions techniques de broyage par laminage sont mises en œuvre, soit entre deux rouleaux d'acier, soit entre deux meules tapissées d'acier roulant sur une sole perforée régulant le passage et la granulométrie finale de la matière.



BROYAGE À MARTEAUX

La matière première (dure) est conduite vers un rotor (photo) muni de marteaux tournant à très grande vitesse. La matière première sera dans un premier temps cassée par les marteaux, puis projetée par ceux-ci sur la paroi interne du broyeur. Les grains assez fins finiront par passer sous les marteaux et sortiront à travers une grille calibrée, les autres pas encore assez broyés seront repris par les marteaux du fait de la force centrifuge.

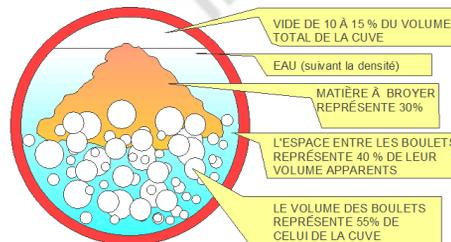
Broyeur à billes

Afin que les matières premières céramiques réagissent de façon homogène et rapide tout au long du processus de fabrication, celles-ci doivent avoir une granulométrie très fine et régulière. Plusieurs systèmes de fragmentation existent, le plus courant dans les industries céramiques étant le broyeur dit « alsing » ou broyeur à billes.

La matière première est introduite avec une charge de broyage (représentée par des billes en alumine de différents diamètres) dans un cylindre tournant sur son axe horizontal. Le frottement provoqué par le mouvement de la masse de billes sur la matière première assure sa fragmentation, celle-ci pouvant varier en fonction de la vitesse et du temps de broyage.



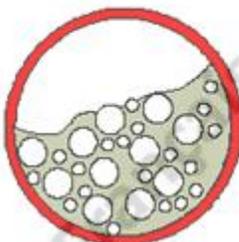
N°1



N°2



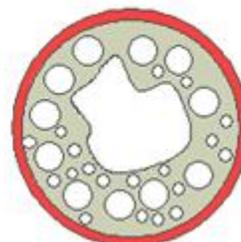
N°3



Vitesse trop lente: les billes restent dans le fond du broyeur et ne participent pas au broyage.



Vitesse normale, les billes montent jusqu'à 75% de la hauteur du broyeur et sous l'effet de la gravité retombent en roulant les unes sur les autres, broyant des particules d'émail à chaque contact entre billes.



Vitesse trop importante, l'ensemble de la masse des billes et de l'émail est plaqué contre la paroi par la force centrifuge, donc aucun mouvement des billes entre elles.

ÉPURATION ET TAMISAGE

Tamisage

On entend par tamisage, le classement par taille des particules d'une même matière. Ce classement peut avoir pour but de définir la granulométrie de la matière en vue d'une utilisation spécifique ou bien de servir de filtre aux matières et matériaux impropres à la fabrication.

On trouve différentes sortes de tamisage ou classement granulométrique comme la lévigation pour séparer les matières argileuses des impuretés qu'elles contiennent. Mais la plupart des matières tamisées le sont à l'aide de toiles métalliques tissées, le plus souvent inoxydables.



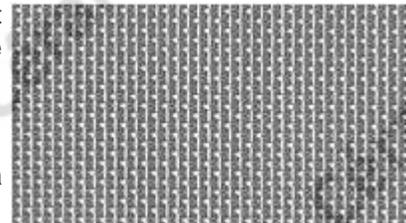
Ces toiles inoxydables seront tendues sur des châssis métalliques en matière également inoxydable. Les châssis vibrent à l'aide de moteurs rotatifs à balourd. Le déphasage de positionnement des deux cames du balourd permettra de faire varier l'amplitude des vibrations. L'efficacité du tamisage dépend de ce paramètre et de la fréquence de vibration.

Le réglage de l'horizontalité réglera le débit de passage, le choix de la maille se fera entre 300 microns pour la pâte et 160 microns pour l'émail.

Qu'ils soient de section rectangulaire ou cylindrique, plusieurs cadres équipés de toiles différentes peuvent être empilés les uns sur les autres. D'une part pour limiter l'usure des tamis les plus fins et d'autre part pour créer des « coupures » granulométriques comprises entre deux fourchettes.



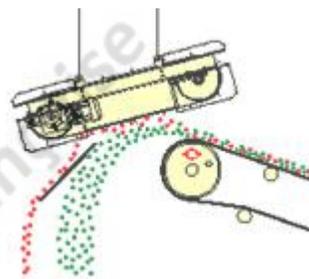
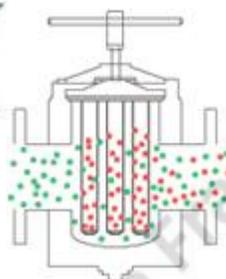
Une tension optimale des toiles est déterminante. Celles-ci ne devront pas comprendre de plis, l'utilisation d'une toile mal tendue rend le tamisage plus long et l'usure plus rapide.



Afin de minimiser l'impact de l'arrivée du jet sur l'usure de la toile, chaque tamis sera muni d'un répartiteur pour diffuser le jet sur toute sa surface.



Les matières premières céramiques étant d'origine naturelle, on y trouve souvent des traces d'oxydes métalliques, voire de métaux. Ces matières étant particulièrement colorantes pendant la cuisson, il convient de les éliminer dès la préparation des mélanges (si la blancheur du produit fini est indispensable). La plupart des impuretés métalliques que l'on trouve dans les matières premières sont sensibles à l'attraction magnétique (particulièrement le fer qui représente la majorité des impuretés métalliques). Ainsi il est possible de les éliminer à l'aide d'un aimant (dit permanent) ou d'un électro-aimant. Ce système permet également de pallier l'introduction de particules ferreuses provenant du matériel d'extraction et de préparation.

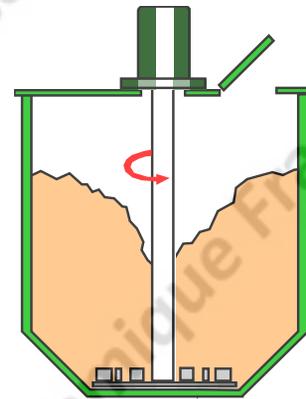
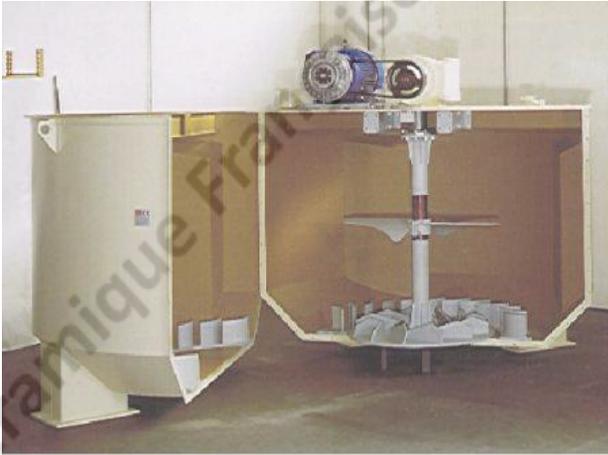


AGITATION ET DÉLITAGE

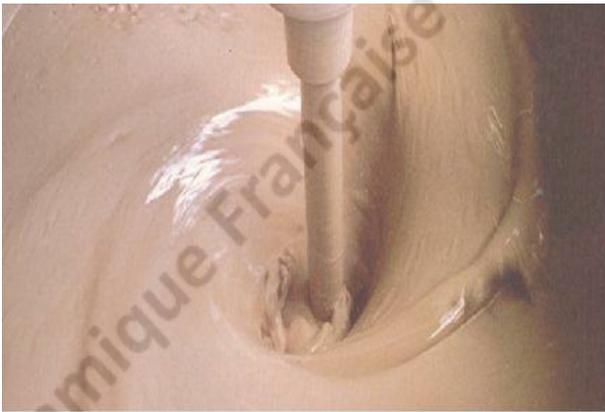
Délayers et agitateurs sont utilisés dans l'industrie céramique pour désagréger les argiles dans l'eau, pour mélanger les barbotines ou les émaux et pour éviter la sédimentation des composants les plus lourds en suspension. Ils sont employés aussi dans l'industrie papetière et chimique pour mélanger, dissoudre et disperser les différents composants ou additifs.

Ils fonctionnent avec une hélice à trois pales ou une turbine, fixée à l'extrémité inférieure de l'arbre moteur qui tient en agitation le fluide ; le mouvement de circulation est aidé par l'inclinaison du fond de la cuve.

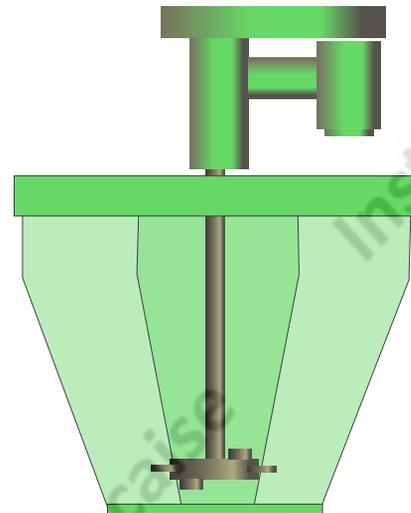
Les arbres sont, selon l'emploi, en acier ou en acier inox. Les hélices et turbines sont en fonte, en acier, en acier résistant à l'usure et à l'oxydation et présentent une diversité de forme propre à chaque utilisation.



TURBO DÉLITEUR



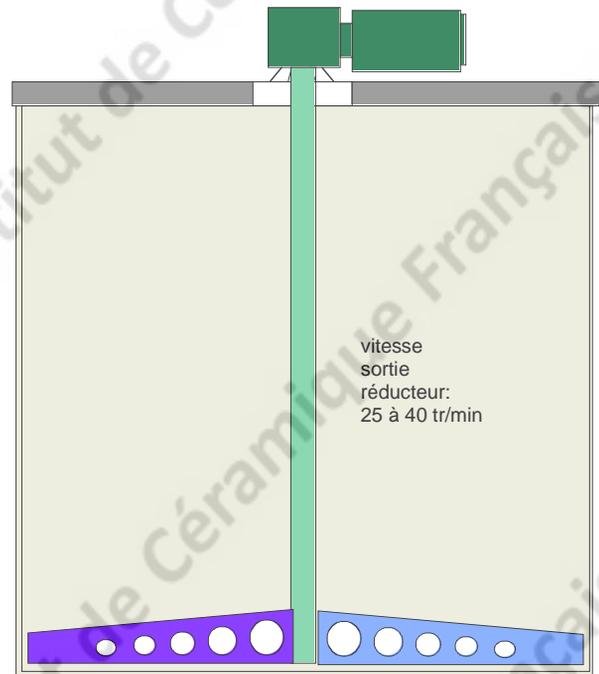
Maelstrom : à éviter en installant une "contre-pâle" à mi-hauteur de l'arbre, gros risque d'emprisonnement de bulles d'air.



DÉLITEUR

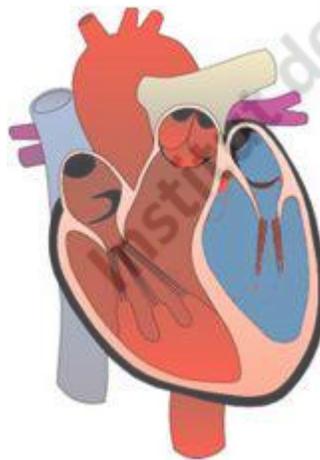
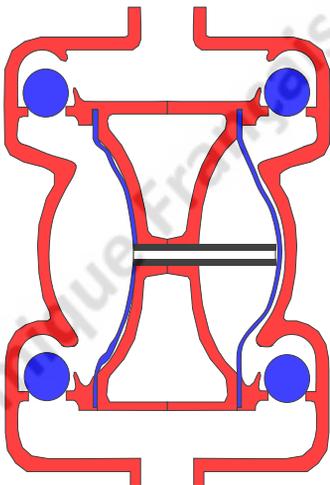
AGITATION LENTE

Après tamisage, la barbotine sera stockée dans des cuves d'agitation qui empêcheront la sédimentation, ces cuves sont munies de pales percées qui créent un mouvement cylindrique horizontal (vitesse de rotation 25 à 40 tr/min maxi), le niveau de la barbotine ne doit jamais descendre au niveau des pales sinon il y a un risque de bulles. Si le niveau est trop bas, l'énergie fournie au peu de barbotine qui reste sera trop importante, et abaissera beaucoup la viscosité.



POMPAGE DE LA BARBOTINE : POMPE À MEMBRANE

Suivant l'utilisation, le choix de la pompe pourra être différent pour le transport de la barbotine. Dans les entreprises de petite et moyenne taille, la technologie la plus souvent utilisée est celle de la pompe à membrane. Elle fonctionne comme un cœur pourvu de deux alvéoles dont l'une se replie par aspiration pendant que l'autre se vide sous l'effet d'une pression d'air. Les deux alvéoles se font face et sont muées par le même piston, elles fonctionnent alternativement en aspiration et refoulement, celles-ci permettent d'isoler les parties mécaniques de l'usure provoquée par la barbotine. La membrane peut être muée soit par un piston mécanique soit par de l'air comprimé. Cette technologie est assez facile d'entretien, elle se décline pour la plupart des débits utilisés en céramique, mais elle présente l'inconvénient d'avoir un flux cadencé d'à-coups.



Fonctionnement identique à celui du cœur.

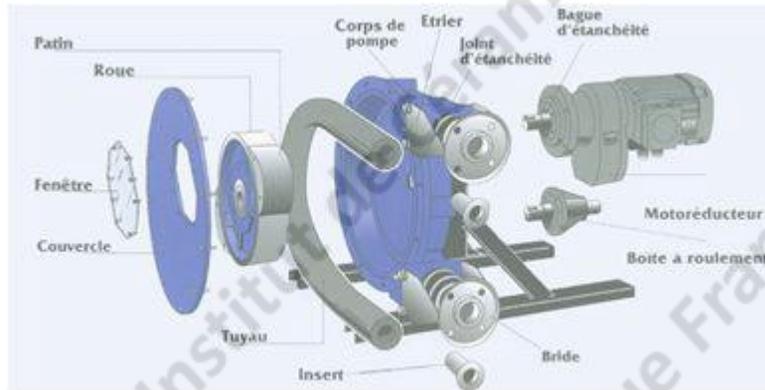


POMPE PÉRISTALTIQUE

Les pompes péristaltiques sont une alternative aux pompes à membranes. Le principe d'aspiration et de refoulement se fait à travers l'écrasement et le laminage d'un corps souple au même titre que le principe utilisé pour extraire le dentifrice du tube en enroulant le tube sur lui-même. Le remplissage étant provoqué par le vide généré dans le tube par l'évacuation de la barbotine. Au même titre que les pompes à membranes elles présentent le même inconvénient en ce qui concerne la régularité du débit. Le corps d'usure isole la barbotine de la partie mécanique, les pièces d'usure sont le tube souple et les galets, elles présentent l'avantage de ne pas utiliser d'air comprimé.



Principe identique à l'écrasement d'un tube de dentifrice.



POMPE MOINEAU

Les pompes Moineau fonctionnent sous le principe de la vis et de l'écrou. On verra que ce principe sera repris plus tard dans l'extrusion. En effet sous l'effet de la rotation d'un corps apparenté à la vis (dite queue de cochon), la matière se déplacera comme l'écrou. Ces pompes présentent l'avantage d'une grande régularité de débit, mais également de ne pas monter en pression lors de l'augmentation de débit. Cependant, la partie métallique (vis) est en contact avec la matière céramique et l'entretien est parfois coûteux.



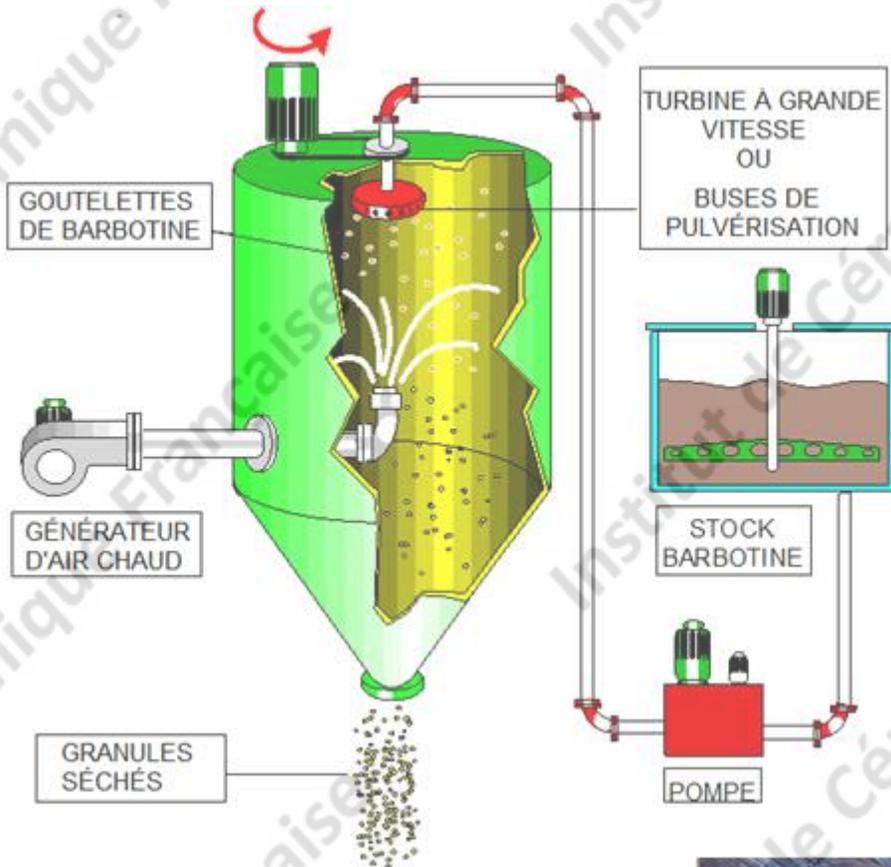
Déplacement identique à celui d'un écrou pivotant autour d'une vis.



ATOMISATION

Principe de fonctionnement

La barbotine est pulvérisée finement par une tête centrifuge tournant à très grande vitesse (10000 tours/min.) Au sommet d'une chambre cylindrique, elle peut être également pulvérisée à l'aide d'un circuit de buses placées à l'intérieur du silo de l'atomiseur, les gouttelettes tombent en traversant un courant d'air chaud (400°C). La poudre granulée obtenue (d'humidité réglable), composée de granules de grande régularité propice à un bon remplissage des moules, est recueillie au bas de la chambre.



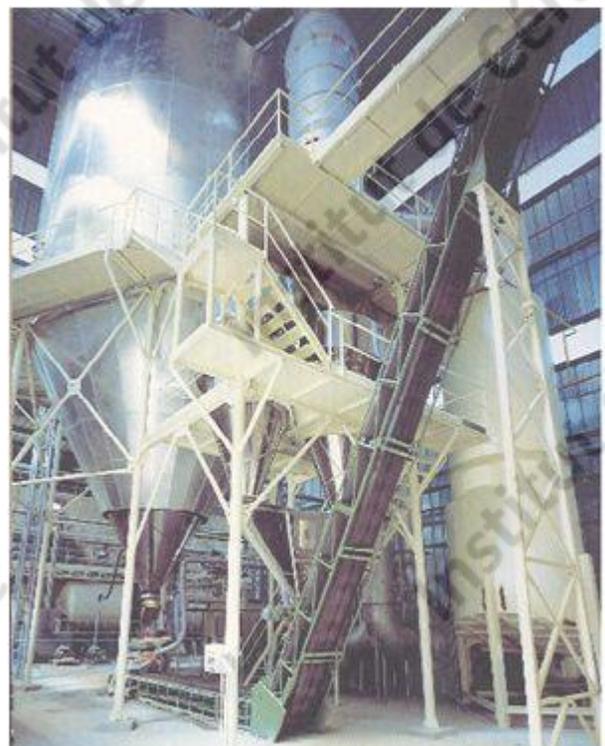
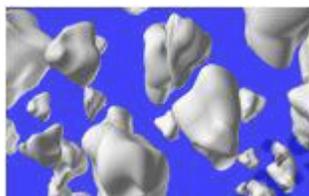
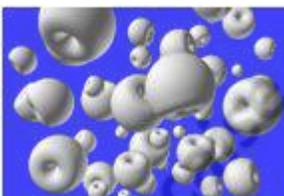
INSTALLATION POUR LE SÉCHAGE PAR ATOMISATION.

Le produit pulvérisé n'atteint pas une température supérieure à 80°C. La température du produit a une grande importance, car les liants qui sont parfois rajoutés aux produits et qui empêchent le grain de la poudre de se désintégrer ne doivent pas être attaqués par des températures trop élevées.

La concentration du produit lors du séchage par pulvérisation est en général de 60 % environ. Pour certains produits céramiques, la concentration peut être augmentée jusqu'à 65 - 70 %, par souci d'économie.

Le chauffage de l'air de séchage se fait généralement à l'aide d'un brûleur à fioul ou à gaz direct, de sorte qu'on obtient également ici un rendement avantageux.

Les poudres atomisées facilitent considérablement le pressage des masses céramiques. Ce procédé permet également d'obtenir une plus grande longévité des outils de pressage.



Comparaison de la forme des grains d'une poudre obtenue par atomisation de barbotine à gauche et par déshydratation et broyage à sec à droite. Attention, les poudres atomisées contiennent une grande quantité d'air, elles demandent parfois pour le pressage à sec et/ou la transformation en barbotine des temps et des phases de dégazage supplémentaires par rapport aux poudres broyées.

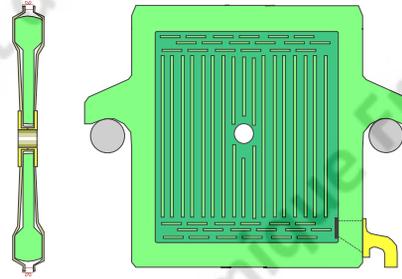
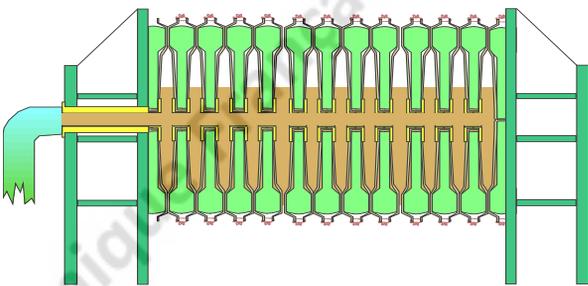
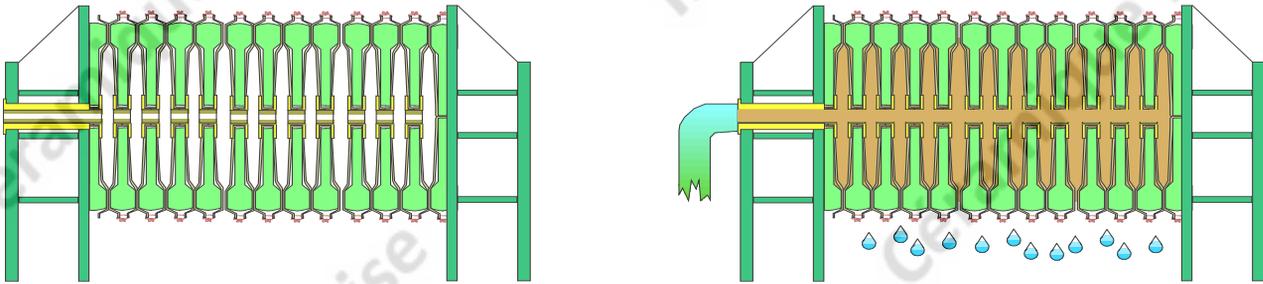
RAFFERMISSEMENT

Il est souvent nécessaire d'utiliser la pâte à l'état plastique ou sec suivant les modes de fabrication. Pour cela, l'excès d'eau des barbotines doit être évacué.

Filtration

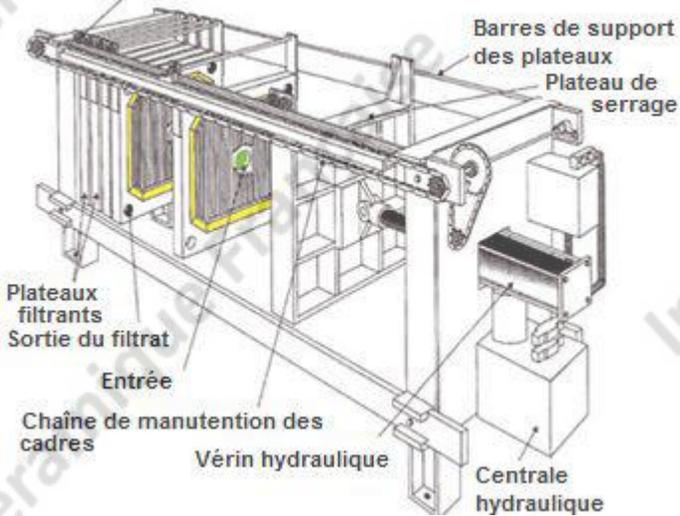
Les filtres-presses :

En injectant de la barbotine sous pression (6 à 12 kg/cm²) dans des cavités à surface cannelée garnies de toiles filtrantes, l'eau contenue dans la barbotine traverse les toiles sous l'effet de la pression et est évacuée.



Roulettes de manutention des cadres

Barres de support des plateaux
Plateau de serrage



MALAXAGE ET EXTRUSION

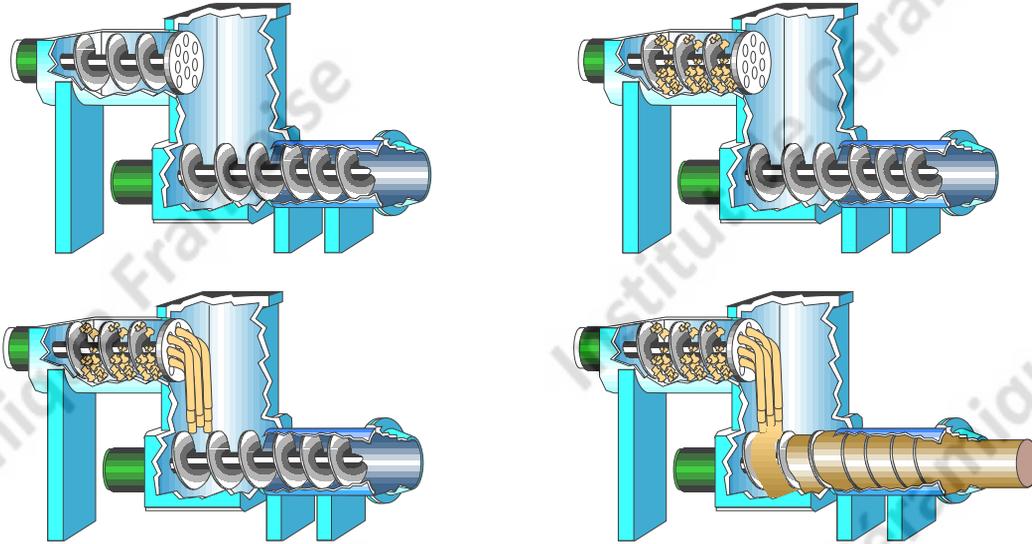
Afin de pouvoir utiliser la pâte plastique en fabrication, il est nécessaire de mettre en forme des ébauches dont la forme se rapprochera le plus possible de l'objet à confectionner. Celles-ci devront également être homogènes dans leurs propriétés : humidité, fermeté, couleur et texture (c'est-à-dire exempte d'air). Pour cela, la pâte plastique, qui provient le plus souvent d'un filtre-presse, devra être malaxée, désaérée et extrudée suivant la forme voulue.

Malaxage

Il a pour but de : achever le mélange des compositions. Écraser les particules argileuses et les faire adhérer aux dégraissants. Développer la plasticité. Chasser l'air incorporé dans la pâte.

Malaxeurs désaéreurs

Ils sont composés de deux malaxeurs séparés par une chambre à vide. Le premier malaxeur pétrit la pâte, la comprime à travers la grille de la chambre à vide. La masse se transforme en fins colombins, puis, sous l'action du vide, les bulles d'air prisonnières éclatent. Les fragments de colombins sont alors repris par le deuxième malaxeur qui les transforme en une masse homogène.



Le premier malaxeur est composé d'un ou de deux axes sur lesquels sont soudés des morceaux de vis sans fin. Le deuxième lui est similaire à une vis sans fin, puisqu'il doit extruder la pâte à l'extérieur (à noter que pour que cette opération soit possible, on doit fixer à l'intérieur du carter du deuxième malaxeur des broches qui empêcheront la pâte de s'enrouler autour de la vis et de ce fait de lui permettre de sortir).

Facteurs influençant l'extrusion

Humidité de fabrication : Celle-ci peut varier suivant les conditions de filtre-pressage (pression et durée). Il conviendra de la garder la plus constante possible afin d'éviter des hétérogénéités d'extrusion qui seraient synonymes de défaut de fabrication.

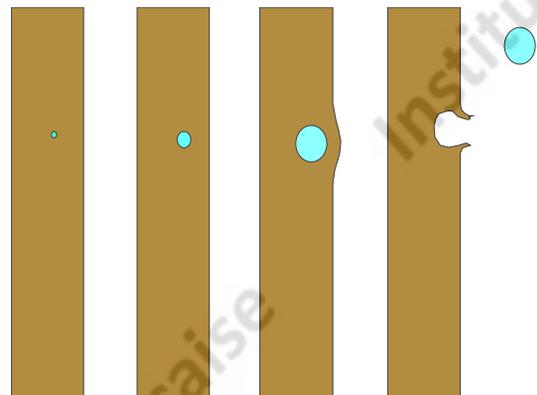
Action de la vapeur

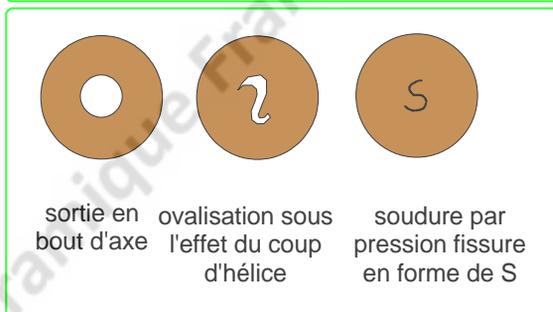
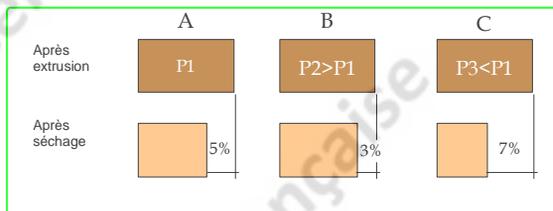
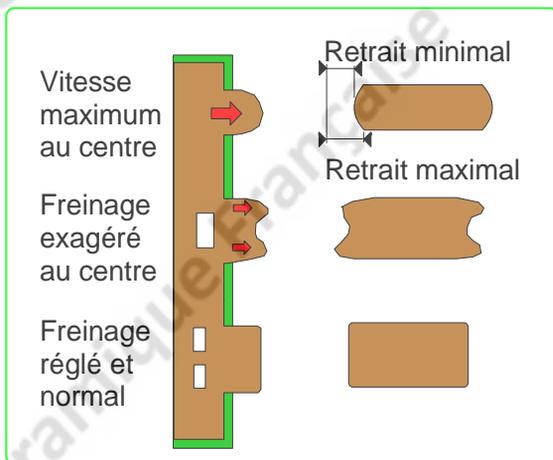
L'addition de vapeur d'eau à la pâte entraîne généralement deux conséquences heureuses par rapport à l'extrusion à froid : Amélioration de la plasticité et de l'homogénéité de l'humidité. Réduction du temps de séchage.

Action du vide

L'idée de désaérer l'argile est venue en réalité des efforts faits pour éliminer le défaut de feuilletage dans les mouleuses à hélices, et apparaît au début comme le remède universel. Il est clair que les inclusions d'air gênent la cohésion entre les particules d'argile et ne permettent pas aux forces de liaison de s'exercer avec le maximum d'intensité.

L'avantage du vide est aussi d'améliorer la plasticité, rendant parfois utilisables des argiles qui ne l'étaient pas. De façonner la pâte avec une humidité plus faible donc avec moins de déformation et moins d'eau à évacuer lors du séchage. D'augmenter la résistance mécanique en cru. Les inconvénients sont un séchage plus délicat, des réglages de filières plus difficiles et une diminution de la résistance au gel.

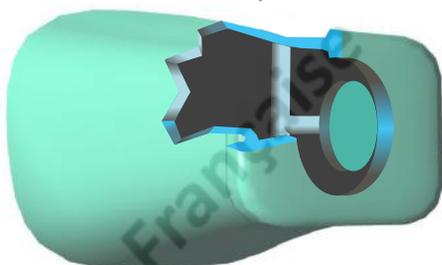




Après séchage, les échantillons ont subi des retraits différents : l'échantillon A a subi un retrait de 5 %, l'échantillon B un retrait de 3 % et l'échantillon C un retrait de 7 % .

Nous pouvons donc conclure que le retrait diminue d'autant plus que l'on comprime l'argile, ce qui reviendrait à dire qu'une partie du retrait a été effectuée mécaniquement par la pression.

Bouche de mouleuse : la forme de la bouche de la mouleuse est importante. Elle égalise les différences de pression ou de vitesse de la pâte entre le centre de l'ébauche et sa périphérie. Elle donne au pain de pâte une forme quelconque à partir d'une forme circulaire (forme du corps de la mouleuse). Elle évite les coups d'hélice et le vissage de la dernière pale, et elle supprime la fissure en forme de "S" créée par l'extrémité de l'arbre porte-hélice.



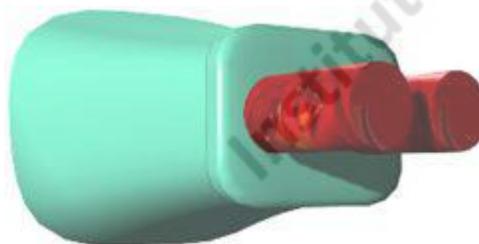
Il faut donc donner à la bouche une forme conique en partant d'une section circulaire pour arriver à la section désirée rectangulaire par exemple : en lui donnant une certaine longueur sans trop augmenter le frottement.

Facteurs particuliers à l'extrusion

Les structures hétérogènes créées par la vis et le corps de la mouleuse : pour bien comprendre le mouvement de la pâte dans une mouleuse (boudineuse ou extrudeuse), il est commode de faire la comparaison avec ce qui se passe lorsqu'on accouple normalement une vis et un écrou. Pour que l'écrou de pâte se propulse et ne tourne pas avec la vis, il faut que le frottement de l'argile sur le corps de la mouleuse soit supérieur à celui qui se produit entre la pâte et la vis ; ce phénomène est appelé « vissage ». C'est la raison pour laquelle l'intérieur du corps de la mouleuse est recouvert d'un revêtement rugueux ou d'un chemisage cannelé. Il est souvent nécessaire de prévoir des broches qui empêcheront la pâte de tourner avec la vis.

DÉFORMATION

Effet des contraintes de l'extrudeuse sur la morphologie des ébauches et ensuite des produits.



Influence du frottement

Lorsqu'un boudin de pâte sort d'une ouverture, il est naturellement freiné sur sa périphérie par le frottement. La vitesse est donc plus grande au centre que sur son périmètre où le retrait sera donc plus faible. Après séchage, la pièce sera bombée ou convexe. Si le boudin est plus freiné au centre que sur sa surface, après séchage la pièce sera creuse ou concave. Il faut donc obtenir une vitesse uniforme à la sortie de la filière, ce qui constitue le problème de l'équilibrage.

Influence de la vitesse

Il est évident qu'au cours de l'extrusion, la vitesse de sortie de la pâte est proportionnelle à sa pression. Plus la pression est forte, plus la sortie est rapide, donc, plus la vitesse est grande, plus le retrait diminue.

Le feuilletage

Dans une particule d'argile, lorsque la déformation due à la différence de pression (et donc à la différence de vitesse entre deux couches adjacentes) dépasse la limite d'aptitude de l'argile à la déformation, celle-ci subit un cisaillement. Il en résulte des glissements laminaires des particules d'argiles, provoquant le défaut dit de « feuilletage ».

D'une manière générale, pour diminuer le feuilletage, il faut que toutes les particules soient déplacées les unes par rapport aux autres avec le moins de cisaillement de manière à ce que les faces qui ont glissé, soient recollées sous l'action des forces de pression.

Le défaut de feuilletage peut être corrigé par :

L'amaigrissement de la pâte, qui donne moins de plasticité donc moins de risques de feuilletage, à condition d'amaigrir jusqu'à un certain point au-delà duquel apparaîtrait un accroissement considérable du frottement dans la tête de la mouleuse, ce qui provoquerait des arrachements sur les arêtes du produit.

La désaération, qui ne supprime pas le laminage, mais augmente l'aptitude de la pâte à être déplacée avant d'être cisailée.

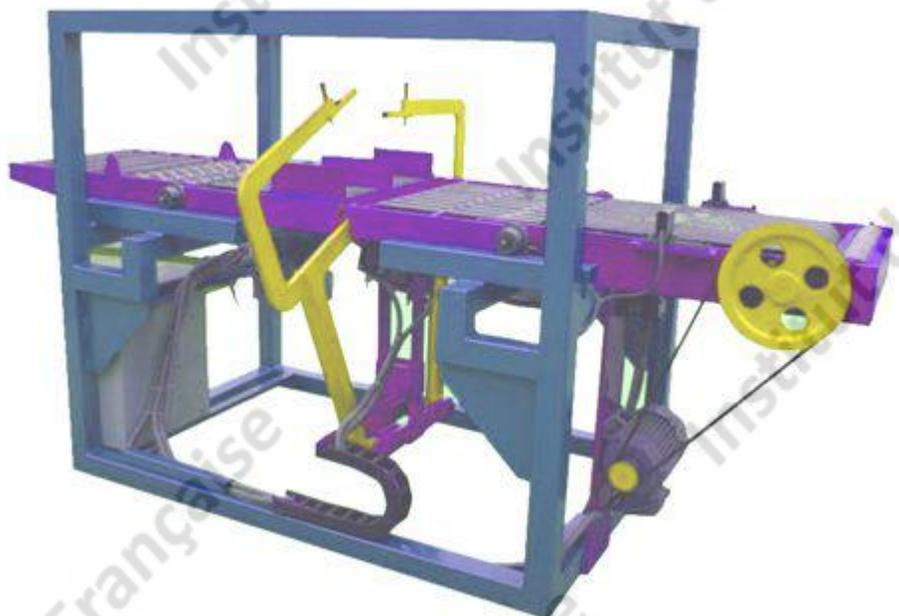
Le degré de remplissage, suivant lequel fonctionne la mouleuse pour diminuer ou augmenter la pression en tête de mouleuse.

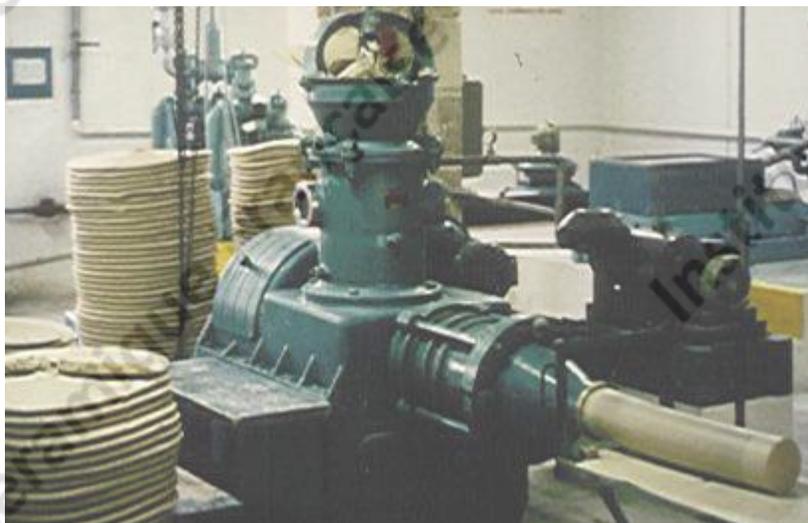
Le réglage du volume d'alimentation, en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice.

L'humidité, qui intervient sur la plasticité.

Les configurations de l'hélice, de sa pale, de la forme de la bouche et de l'état d'usure du matériel.

Les extrudeuses sont souvent pourvues de coupeur ou découpeur, mais également de système d'emporte-pièce destiné à réaliser directement des carreaux ou tuiles sans autre opération complémentaire de façonnage.



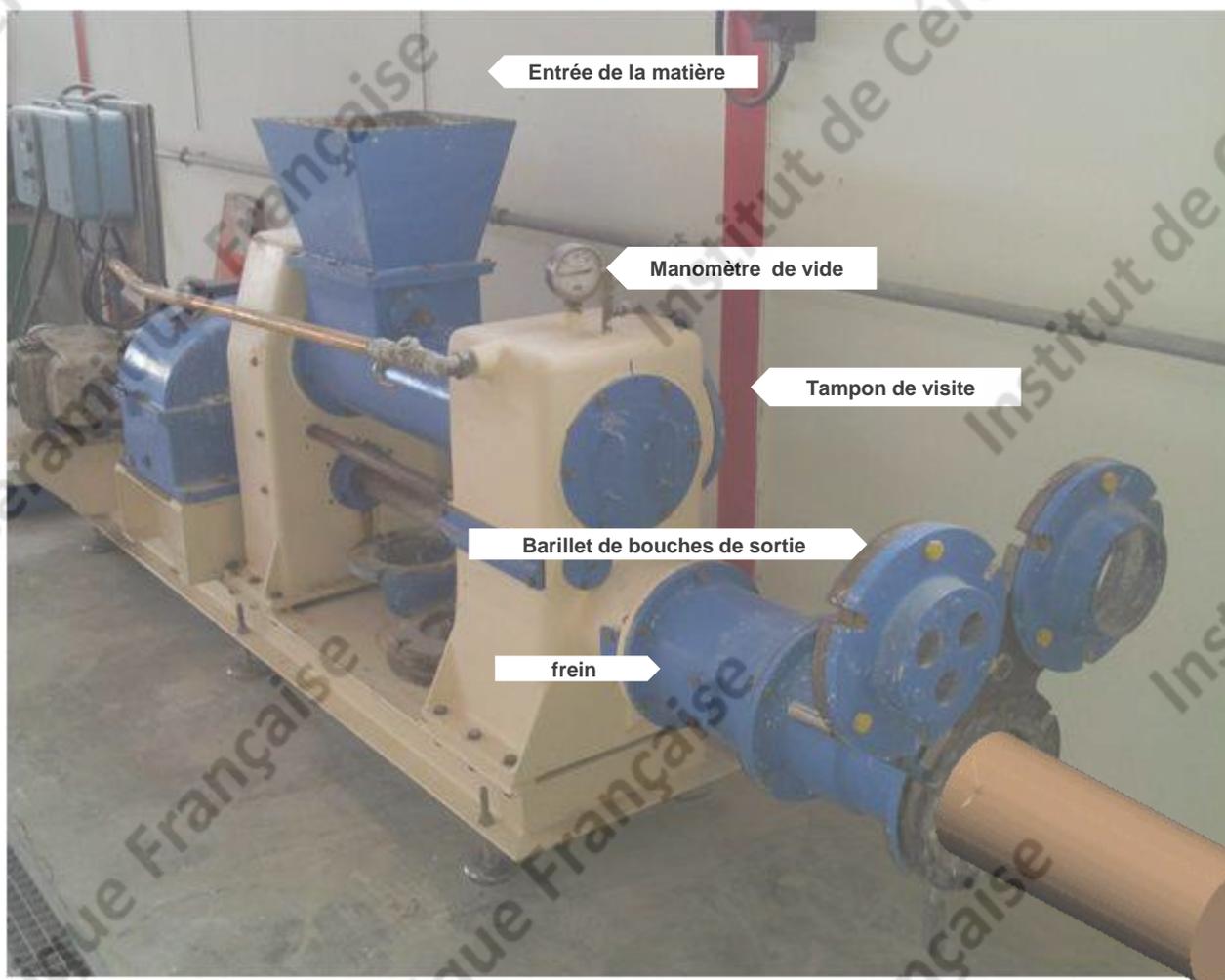
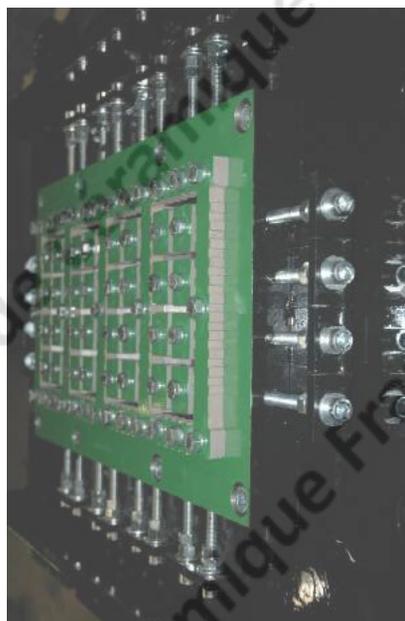


ALBATROS

Une des seules extrudeuses possédant une vis dans la cage à vide, permettant ainsi de malaxer et d'extruder de la pâte molle sans risque de la voir aspirée par la pompe à vide.



Bouches d'extrudeuse pour brique creuse.

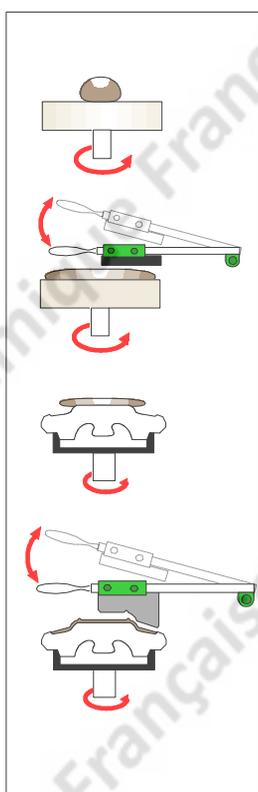


FAÇONNAGE PAR CALIBRAGE

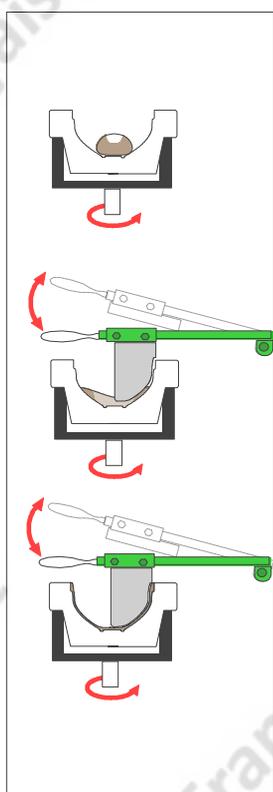
CALIBRAGE : Calibrage traditionnel (manuel)

Le calibrage est un procédé qui allie le principe du tournage-main (puisque les pièces sont formées sur une machine rotative) et le moulage (une partie de la pièce, soit l'intérieur soit l'extérieur, étant formée par un moule). La similitude qui rapproche ce procédé du tournage manuel s'arrête à la mise en rotation de la pièce à fabriquer, car la partie non formée par le moule le sera par un calibre dont la découpe représente le profil de la pièce.

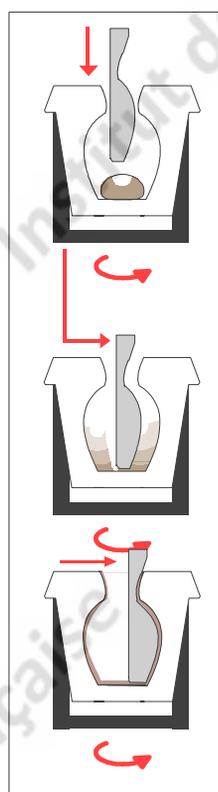
La plupart des machines à calibrer sont formées d'une motorisation permettant la translation, d'un godet permettant de recevoir le moule, et d'un bras porte-calibre pivotant ou mobile en translation verticale, permettant le positionnement et l'enlèvement du moule.



EN BOSSE



EN CREUX



AVEC
RENVOI

Les moules utilisés sont le plus souvent en plâtre dur, quant à la pâte utilisée elle doit être molle pour pouvoir prendre l'empreinte exacte du moule avec la seule force musculaire de l'opérateur. Pour cette même raison, on concevait souvent des ébauches qui se rapprochaient le plus possible de l'épaisseur de la pièce.

Pour ces différentes raisons, le procédé a vite atteint ses limites de productivité, cependant il est encore utilisé pour de petites séries, car le temps de mise en œuvre est rapide et le coût d'un calibrage est dérisoire face aux équipements d'une calibreuse roller.

Calibrage roller

Le principe de base est le même que pour le calibrage manuel, c'est-à-dire rotation d'un moule et formation du profil par un calibre. Pour ce procédé, le calibre a été remplacé par une pièce de révolution dont la génératrice représente le profil de la pièce. De plus, celle-ci est entraînée mécaniquement en rotation dans le même sens que le moule, mais à une vitesse différente, ce qui provoque un effet de laminage, voire de pressage, lorsqu'elle entre en contact avec la pâte. Les particules sont ainsi réorientées parallèlement au moule contrairement à leur état initial où elles étaient dans l'ébauche (orientées parallèlement au sens de sortie de l'extrudeuse).

Cette pièce que l'on appelle tête de roller a, par sa plus grande surface en contact avec la pâte, une forte tendance à adhérer à celle-ci. Cet inconvénient a été résolu en faisant chauffer la tête-roller. En effet, celle-ci étant métallique elle diffuse parfaitement la chaleur et la communique à la pâte. Sous l'effet de la température, une partie de son eau s'évapore et forme une pellicule de vapeur qui fait office d'anti-adhérent.



Ces appareils fortement mécanisés et automatisés permettent de travailler avec des pâtes beaucoup plus fermes et de ce fait moins humides. L'association avec un séchoir facilitant le séchage des pièces sur le moule autorise un fonctionnement avec une ronde de moule réduite.

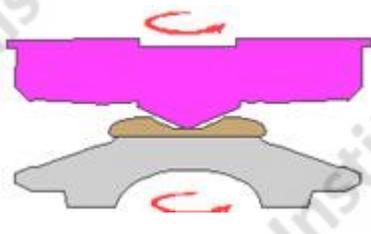
La technologie de cette méthode imposait d'avoir une tête de roller fabriquée dans un matériau conducteur de la chaleur et ayant également une grande inertie thermique permettant le maintien d'une température importante et constante.

Les têtes de roller sont le plus souvent usinées dans de l'acier (la méthode de chauffage étant électrique il était impératif que la matière soit conductrice).

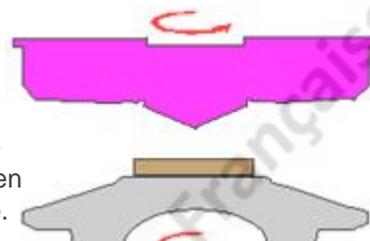
Le coût d'usinage des têtes roller, ainsi que leurs poids lors du montage et le temps de la mise en température devenaient contraignants. L'essai de tête de roller en aluminium qui supprimait plusieurs de ces inconvénients n'a pu, faute d'usure trop rapide (donc retouche du profil de la tête), être envisagé de façon globale sauf pour les entreprises disposant de moyens de rectification rapides.

Face à ces problèmes, les céramistes se sont orientés vers l'utilisation de matières plastiques (Téflon) qui avaient fait leur preuve en matière d'usure et de glissement. Ainsi on a vu se développer au cours de ces dernières années des plastiques permettant de confectionner des têtes roller sans que celles-ci nécessitent un chauffage. Le procédé répondait ainsi au critère de poids des installateurs et s'avérait plus économique en matière d'usinage. Seul le coût au kilogramme de la matière première par rapport à l'acier reste un frein à leur utilisation.

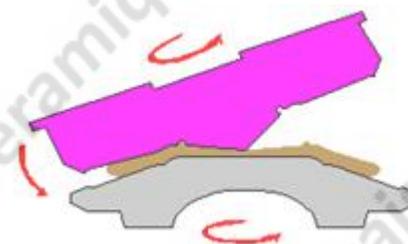
Descente verticale de la tête roller, écrasement de la pâte, jusqu'à l'épaisseur définitive au centre.



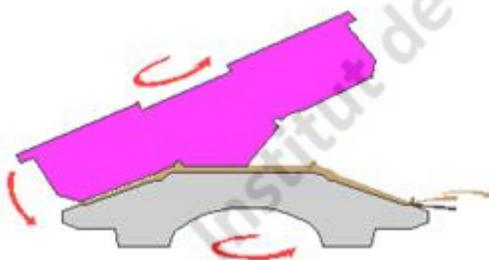
Rotation de la tête
Rotation du moule
Ébauche de pâte en place sur le moule.



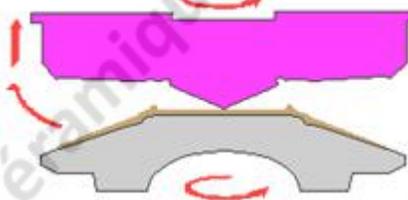
Inclinaison de la tête.
La pâte commence à être chassée vers l'extérieur et prend la forme du moule.



La pâte continue d'être lissée par la tête.
L'excédent est évacué à l'aide d'un couteau situé sur la périphérie du moule.



La tête reprend sa position horizontale et remonte.



RAPPORT DE VITESSE

Il existe une certaine corrélation entre le rapport du diamètre pied/assiette et le rapport de vitesse tête / godet. Si l'assiette a un grand pied, la différence devra être plus élevée. Si l'assiette a un petit pied et une grande aile, la différence devra être moindre. Le godet tourne toujours plus vite que la tête roller. Si le godet tourne trop lentement avec un moule d'assiette plate, on formera une « assiette creuse ». Pour détruire la structure donnée par la vis de l'extrudeuse, les réglages des vitesses du moule et de la tête de roller seront différents, en sachant que c'est toujours le moule qui doit avoir la vitesse la plus élevée. Il est possible d'utiliser, lors du précalibrage ou d'un écrasement, une différence de vitesse moindre, par ex. 380 tr/min pour la tête et 400 tr/min pour le moule et lors du calibrage passer la vitesse de la tête à 300 tr/min. Cela permet d'éviter l'effet de vague ou diminuer le voile ou « gauche » (à condition que la conception de la machine le permette).

VITESSE

Ex : Pour une assiette de diamètre 230 mm godet 400 à 420 tr/min tête 270 à 340 tr/min

INCLINAISON DE LA TÊTE

En passant de 18° à 15° d'inclinaison, il est constaté une amélioration sensible du défaut de gauche. En baissant cette inclinaison à 10°, le gain est moins sensible. Le défaut de coup de casquette est dû au basculement après écrasement. Il peut être réduit, si la tête roller est partiellement ou complètement inclinée au début de l'écrasement. ATTENTION, le système de descente de la tête étant souvent analogue à celui de la montée, on peut être confronté au même problème lorsque la tête de roller se décollera de la pièce.

TEMPS

Temps de calibrage = temps d'écrasement + temps de lissage, le temps de lissage minimum est de 3 secondes (son allongement diminue le gauche).

ÉCRASEMENT

Plus le taux d'écrasement entre l'ébauche et la croûte est important, moins le défaut de gauche est observé. Augmenter le taux de 25 à 40 % accroît le temps d'écrasement pour réorienter les particules.

MASSE DE L'ÉBAUCHE

Le taux de rognure en % passe par un taux minimum de gauche, il n'est pas utile de travailler avec un taux minimum ou maximum, mais de rechercher le % de rognures qui favorisera le moins le défaut de gauche tout en restant économiquement rentable (de 17 à 30%). Il arrive parfois que le pied se forme, se détruit et se reforme à la fin du calibrage. Il faut alors veiller à ce que celui-ci ne soit pas obtenu par roulage de la pâte à l'intérieur de l'empreinte de la tête.

Attention, il faut dessiner les modèles en tenant compte de la sortie de la tête pour éviter de laisser des traces ou d'arracher le pied. Plus l'aile est plate, plus le risque de gauche est important.

L'ébauche doit absolument être centrée pour éviter le gauche, le prédécoupage de l'ébauche ne peut pas compenser un excentrage important.

DIMENSION ÉBAUCHE doit être supérieure en diamètre à 1.05 à 1.06 X le diamètre du pied.

FERMETÉ DE L'ÉBAUCHE

Si la pâte est trop molle, elle risque de s'envoler. Le défaut de gauche diminue sensiblement lorsque la dureté passe de 70 à 80 au pénétromètre à bille. Il est à remarquer que les fentes sont moins nombreuses. Par contre, à l'extrusion, la pâte ne doit pas être trop forcée dans la filière afin de ne pas y engendrer des contraintes devenant défavorables à la planéité.

À titre d'exemple :

Fermetés 70 => H% 24.5 ; 75 => H% 23.6 et 80 => H% 23

Pour une fermeté =70, collage au moule et à la harpe ; avec une fermeté de 75, collage à la harpe seulement ; avec la fermeté 70, la tenue de l'aile est moins bonne à la cuisson.

STOCKAGE

Ne pas stocker les boudins de façon croisée. Éviter les chocs ou les déformations qui se retrouveront à la cuisson.

DÉFORMATION

L'obtention d'un fond d'assiette plat nécessite souvent une légère contre déformation du moule.

SENS D'EXTRUSION

Il est préférable pour le défaut de fentes et de gauche d'utiliser la galette ou l'ébauche de telle façon, que se soit la surface sortie première de l'extrudeuse qui vienne en contact avec la pointe roller. Même si cette méthode trouve ses détracteurs, il s'avère que statistiquement les résultats sont meilleurs.

MATIÈRE D'OEUVRE

Détermination de la plasticité : compte tenu de l'inexistence d'unité pour cette mesure, la plupart des méthodes sont empiriques et toujours relatives. Il conviendra donc de définir un mode opératoire afin que cette mesure puisse être faite dans des conditions similaires à chaque fois. De plus, les fiches de renseignements concernant cette fermeté devront porter également des indications sur l'humidité des ébauches, leur temps de stockage, la filière utilisée, la vitesse de sortie, le taux de matière recyclée ou le nombre de désaérations subies. On ne devra pas perdre de vue que les tensions, entre la périphérie du boudin et son centre, permettent de comparer des plasticités seulement si elles sont mesurées au même endroit sur chaque boudin. Il est d'ailleurs intéressant de suivre la différence de plasticité entre le centre et la périphérie en faisant varier les différents paramètres H%.

TEMPÉRATURE DE LA TÊTE

Ex. de 170 à 190°C : la pâte ne colle pas, mais le fond de l'article (suivant la qualité de la pâte) peut «friser». En descendant à 80°C, la pâte colle à la tête et du gauche apparaît.

La température du régulateur n'est qu'indicative et il convient de connaître, pour une température lue, la correspondance, par mesure de la température réelle de la tête (très utile si un modèle est fabriqué sur plusieurs rollers différentes). (Un réglage entre 110 et 140 °C affiché est courant)

Le chauffage doit être maximum sans toutefois provoquer des fentes et des ondes de chaleur sur les ailes ou les pieds.

MOULES PLÂTRES

Il convient de choisir un plâtre roller pour les assiettes et un plâtre dur pour les tasses au taux de gâchage de 1,6 à 1,85.

Moins le taux de gâchage est élevé plus le séchage est rapide.

Le nombre de passages peut varier dans ces conditions de 100 à 120 passages par moule.

Le nombre de passages diminue d'environ 20 % pour les moules d'assiettes festonnées.

Surveiller la durée de stockage du plâtre pendant laquelle les caractéristiques peuvent évoluer.

Le godet doit être propre pour éviter la casse.

Ne pas laisser les moules vides tourner dans le séchoir lors de la fabrication.

Ne pas dépasser 50°C dans le séchoir de moule (après 38 °C le plâtre séché commence à se déshydrater).

La préparation du plâtre doit s'effectuer si possible avec un agitateur dont les caractéristiques, de vitesse, du temps d'agitation, du temps de repos, peuvent être reproduites fidèlement.

Lorsque la vitesse augmente par exemple de 600 à 1800 tr/min :

- le temps de coulabilité diminue de 28%
- le temps de prise diminue de 9%
- la résistance à la compression augmente de 22%
- la résistance à la flexion augmente de 22%
- le coefficient d'absorption augmente de 10.5%

Ceci est également vrai pour une augmentation du temps de gâchage.

Fabriquer les moules avec des chapes métalliques et non plâtre permettant de démouler juste avant le gonflement (20 minutes).

Attention toutefois, car le plâtre continuera de gonfler et il faudra en tenir compte pour les emboîtements du calcul du gonflement ou de la rectification des moules. Possibilité de laisser le plâtre totalement dans la chape et démouler ensuite (système qui impose un nombre de matrices nettement supérieur ou tout du moins une organisation et une prévision des besoins).

Une utilisation trop prolongée des moules entraîne un "piquage" de leur surface qui viendra polluer la surface de l'assiette et risquera de provoquer des défauts seulement décelables à la cuisson émail.

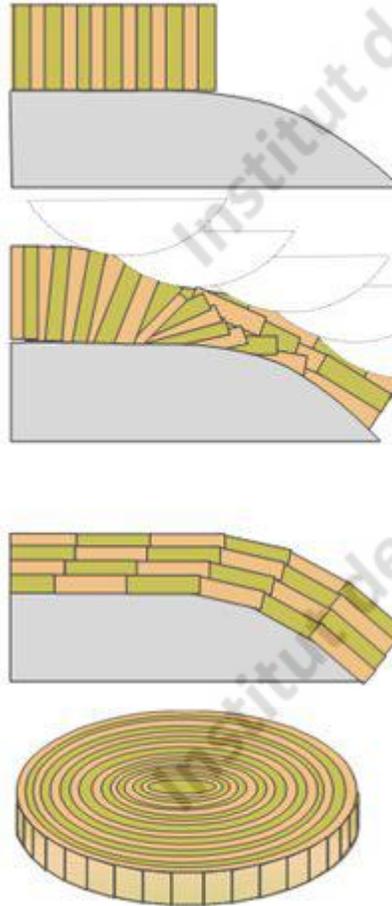
RECOMMANDATIONS DÉCOUPAGE

- Fil de harpe : diamètre 5/10^e de millimètre. Les fils doivent toujours être propres.
- La plaque de découpe de la harpe doit être bombée pour assurer une découpe la plus profonde dans le pain de pâte et ne pas provoquer d'arrachement.
- Éviter les arrêts en cours de coupe sur la harpe.



Orientation des particules

Les particules d'argile se présentent sous la forme de plaquettes très fines, celles-ci s'orienteront suivant l'effort que l'outil de travail leur fournira. Dans le cas d'une extrudeuse, celles-ci seront orientées parallèlement à l'axe de l'extrusion, le travail de la tête de roller consistera à réorienter cette masse de plaquettes parallèlement à la surface du moule. Les retraits étant différents suivant le sens d'orientation des plaquettes, il conviendra d'obtenir la plus grande homogénéité afin d'éviter les déformations. Ici intervient l'utilité du déphasage de vitesse entre la tête et le moule, qui permet un laminage des plaquettes et donc une nouvelle orientation. En effet, si la tête et le moule tournaient à la même vitesse, on peut considérer que la pâte ne serait pas travaillée.



L'ébauche est positionnée sur le moule, les plaquettes sont perpendiculaires à la surface de celui-ci.

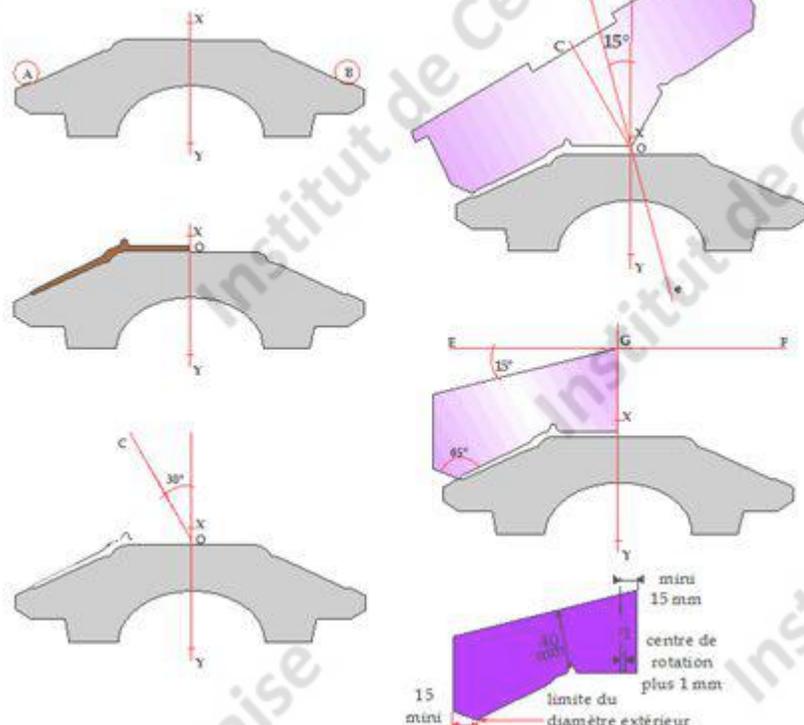
La tête de roller par sa rotation et son abaissement progressif vient laminier les plaquettes, permettant leur "réorientation".

Le travail de la tête de roller est terminé, toutes les plaquettes sont orientées de la même façon, il n'y a pas de risque de déformation.

Représentation d'un morceau de pâte à la sortie de l'extrudeuse.

CRÉATION DE LA TÊTE

Exemple de métal utilisé pour une tête-roller : XC48F (acier mi-dur traité, 0,48 % de C). La durée de vie d'une tête-roller dépend de la nature du métal et de la pâte, de sa forme et de son diamètre. Pour exemple, une tête roller en XC48F qui réalise une assiette plate ordinaire en porcelaine de 240 mm de diamètre peut fabriquer 660 000 pièces environ. Le même type d'assiettes, mais festonné, seront au nombre de 500000 et seulement 350000 à 400000 pour les formes dites carrées.



Détermination du dessin : mener une droite perpendiculaire à l'axe XY coupant celui-ci en C. Pour tracer C, tracer la base du gabarit de façon que EG fasse un angle de 15° avec celle-ci (angle de bascule de la tête-roller). Les 65° n'ont qu'une valeur indicative, le sommet de cet angle détermine le diamètre de la pièce et cette arête ne doit pas être trop fragile. L'angle peut être plus ouvert.

Réalisation du gabarit : dans une tôle d'acier doux (adx) de 2 à 3 mm d'épaisseur, découper le gabarit en respectant l'angle de 30°. Faire un chanfrein de façon à donner au profil une précision et un poli rigoureux. Tracer les marquages à la pointe à tracer.

Contrôle du poids de l'ébauche : celui-ci permet, à condition d'avoir établi un étalon, de suivre les paramètres liés à la matière première. En effet si l'on considère que la calibreuse fonctionne tout au long de la fabrication de la même façon, seules quelques caractéristiques de l'ébauche ou de la matière première peuvent faire évoluer ce poids :

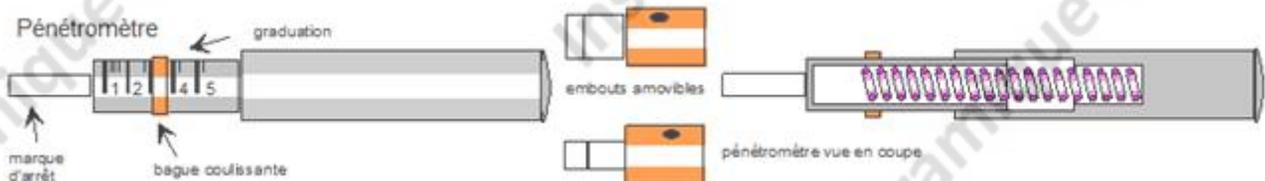
- les dimensions de l'ébauche et notamment son épaisseur,
- la fermeté de la pâte qui peut varier selon l'humidité de celle-ci,
- sa vitesse d'extrusion,
- de l'extrudeuse dont elle est issue (une extrudeuse particulière n'est pas toujours dédiée à une calibreuse)

Tous ces éléments partent de l'hypothèse que la composition de la pâte reste constante (notamment le rapport entre matières plastiques et matières dégraissantes).

Le mode opératoire consiste à peser sur une balance (portée mini 2 kg, précision 1g) une ébauche venant d'être coupée. Les résultats peuvent être en corrélation avec ceux des autres tests effectués.

Contrôle de l'humidité de la pâte : ce contrôle a priori peu important n'est cependant pas à exclure, en effet, le contrôle de la fermeté lui est souvent substitué, mais il est intéressant de suivre celle-ci puisque comme nous le savons la dérive de la fermeté est souvent liée à la différence d'humidité et si celle-ci reste constante la recherche des causes en sera facilitée.

Contrôle de la fermeté de la pâte : celui-ci permet de définir une valeur uniquement relative qui tient compte de l'humidité de la pâte, pour une composition donnée, de l'extrusion (débit, n° extrudeuse). Celle-ci peut être contrôlée avant et après l'extrusion, si le taux de fermeté varie sans que l'humidité varie également il est fort probable que nous soyons en face de dérives importantes soit dans la préparation des pâtes soit dans la composition.



CONTRÔLE DES PIÈCES CALBRÉES

Sortis de la machine, les produits devront subir plusieurs contrôles qui seront pour la plupart destructifs pour la pièce en cours et souvent cause de dommages pour le moule. On utilisera, notamment dans le cas du découpage de la pièce, un moule martyr pour chacune des séries de tests. Celui-ci pourra être utilisé environ 30 fois, les contrôles seront surtout d'ordre dimensionnel :

- découpage et comparaison des épaisseurs du profil au plan,
- diamètre et concentricité du pied,
- remplissage des reliefs,
- poids de la pièce et des rognures,
- qualité et aspect de surface.



Contrôle de l'épaisseur : c'est le plus fréquent, il permet, par la constance de ces résultats, de contrôler le bon fonctionnement des machines et l'homogénéité de la fabrication. Le mode opératoire consiste à découper une assiette directement sur son moule à la sortie de la machine suivant l'axe de celle-ci. (Attention, la découpe devra être perpendiculaire au moule et ne pas laisser des bavures)

Ensuite, on repère différents points de mesure qui seront notés tout au long de la fabrication.

Pour des raisons économiques, ce sera toujours le même moule qui servira à l'essai. Il conviendra cependant de prendre en compte le sillon provoqué par le découpage.

Le résultat de la découpe peut également être comparé à l'étalon (moule plus pièce), qui aura servi au réglage de la machine.

Cet étalon reste généralement à proximité de celle-ci, dans des conditions telles que la demi-assiette ne puisse pas prendre de retrait (couverte d'un plastique par exemple).

Certains sites de production utilisent un étalon représentant une demi-assiette fabriquée en résine. Le contrôle s'effectue à l'aide d'un réglet (uniquement destiné à cette utilisation) ou d'une double cale d'épaisseur.



L'état de surface de la peau est contrôlé visuellement. Il doit être lisse, ne pas présenter de zone de couleur différente (souvent synonyme d'hétérogénéité de température de la tête) ni d'aspect granuleux ou rugueux (calibrage trop long ou tête de roller sale).

Vérifier également en lumière rasante si l'on ne perçoit pas une trace en forme d'arc de cercle synonyme d'une mauvaise remontée de la tête.

Contrôle visuel du centre du fond de l'assiette ou de la pièce creuse .

Il ne doit subsister aucune marque au centre.

Un petit cône indique un excentrage arrière de la tête ou avant du godet. Un cercle de petit diamètre présentant un aspect plus rugueux ou de couleur différente du reste de la pièce indique un excentrage inverse au précédent. Ces deux problèmes généreront certainement une fente au centre de l'assiette. Attention, ces dérèglements de machine n'apparaissent pas toujours au début de la fabrication et sont toujours accentués par l'usure des pièces mécaniques.



Contrôle du poids de l'assiette : il rejoint le contrôle du poids des rognures, mais peut plus facilement être mis en corrélation avec les contrôles de la suite du procédé et notamment le contrôle du poids de la pièce sortie du séchoir représentatif de «l'état de séchage».

PRESSAGE EN PÂTE PLASTIQUE

Le pressage d'une pâte plastique est la mise en forme d'une ébauche en pâte plastique sous l'effet de la pression. Cette définition englobe un certain nombre de procédés de fabrication tels que :

Estampage. / Pressage des tuiles. / Fabrication de pots de fleurs.

Tous ces procédés nécessitent l'emploi d'un outillage comprenant au moins un moule en deux parties, qui sont le poinçon et la matrice. Différents matériaux sont utilisés, mais il ne faut jamais que la pâte adhère au poinçon durant la mise en forme.

Problèmes posés par l'adhérence d'une pâte plastique à son support.
Les phénomènes d'adhérence peuvent se classer en deux catégories :
Phénomène comparable aux colles.
Phénomène dû à la capillarité.

Lorsqu'une pâte plastique est comprimée, une partie de l'eau interstitielle apparaît en surface. Cette eau, augmentant fortement le taux d'humidité, va jusqu'à créer une couche de barbotine sur quelques dixièmes de millimètres. Cette transformation de surface rend la pâte adhésive à son support
Pour contrarier les effets de l'adhérence, différents procédés sont employés. En voici quelques-uns.

Supports rigides non poreux

Une huile de démoulage empêche la pâte d'être adhésive au support, mais il faut cependant qu'une couche d'air puisse s'introduire entre la pièce et son support pour permettre le démoulage, sinon il y a un risque de déformation. Le chauffage du moule permet, par la création d'une pellicule de vapeur à la surface de la pièce, de pallier l'adhérence de la pâte. Ce genre de procédé est fonction du type de pâte, de son humidité et de la température du moule.

Les formes des supports doivent être simples et posséder suffisamment de dépouilles pour permettre un décollage simultané de tous les points de la pièce, dans le cas contraire on risque une déformation par frottement. Si la pièce présente un aspect de surface (rugosité) ou une forme ne permettant pas un démoulage en dépouille, il est possible de recourir à un moule en plusieurs parties.

Supports souples peu ou non poreux

Le caoutchouc, sous l'effet de la pression, peut se déformer et revenir à sa forme initiale lorsque la pression décroît. En pressant avec de tels moules, le décollage se fait par reprise de la forme initiale. Si, malgré un décollage satisfaisant, on s'aperçoit que des particules de pâtes sont restées accrochées au caoutchouc, il convient alors d'aider au démoulage avec une huile spéciale.

Étant donné l'aspect de surface peu homogène que présentent les produits fabriqués par cette méthode, le procédé sera limité aux tuiles ou aux objets plats similaires.

Supports rigides poreux

Dans ce cas, l'eau apparaissant à la surface de la pièce est absorbée par le moule ; il n'y a plus d'adhésivité, mais une adhérence par capillarité. L'insufflation d'air comprimé dans le moule poreux au moment du démoulage permet de pallier cet inconvénient.

Il n'y a pas de limite du point de vue des formes fabriquées, car il est toujours possible d'avoir recours à l'utilisation de sous-pièces. Le procédé sera donc plus limité par le coût du moule et le temps de démoulage que par la forme de l'objet à confectionner. Les qualités du plâtre employé doivent correspondre à la pression utilisée, notamment en ce qui concerne la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à l'abrasion.

Actuellement, le pressage étant effectué sur des presses hydrauliques, le plâtre utilisé est généralement un plâtre dit « spécial pressage », le plus souvent composé de plâtre et d'adjuvants synthétiques. Mais il est préférable qu'il soit composé de plâtre alpha, celui-ci gonflant notablement, ce qui lui permet d'assurer, lors du coulage de moule dans une enceinte métallique, une précontrainte qui le rendra plus résistant à la compression. Le plâtre alpha est également très résistant à l'abrasion.

Importance de la forme de l'ébauche

Plus la pâte est plastique, moins la forme de l'ébauche a d'importance pour le pressage. Il faut, cependant, veiller que l'épaisseur minimum de l'ébauche soit égale à celle de la partie la plus épaisse de la pièce à confectionner, et que la forme et la position de l'ébauche fassent en sorte que cette partie la plus épaisse soit directement alimentée, et non pas par fluage de la pâte. L'excès de pâte doit être tel que toutes les parties du moule soient remplies et bien pressées.

Défauts dus à l'extrusion

Comme sur le calibrage roller, le défaut de fente en S est souvent présent, provoqué par un mauvais resserrage de la pâte après le dernier coup d'hélice. Il faut donc utiliser la pâte perpendiculairement à la sortie de la boudineuse, ce qui suppose d'avoir une filière parfaitement réglée pour éviter un risque de déformation.

Lors de la fabrication de grandes pièces telles que des plats à poisson, on confectionne souvent un pain parallélépipédique dans lequel on découpera des tranches horizontales. Lorsque les pièces sont confectionnées avec les tranches qui sont proches de l'axe du pain, on risque un défaut dit « arête de poisson », qui correspond à une différence de pression là où l'hélice a coupé la pâte. Aucun remède ne peut être apporté, sinon le recyclage d'une ou deux tranches par pain, mais ce défaut apparaît particulièrement sur les pâtes vitrifiables comme les grès ou sur les faïences émaillées avec des émaux transparents. L'explication de ce phénomène est que la pâte, après avoir été poussée par l'hélice, ne se resserre pas suffisamment sous le cône de sortie. Les traces du passage d'hélice sont composées de pâte dont la texture n'a pas subi la même compression que le reste de la masse, d'où une différence de porosité et un émaillage hétérogène voire des déformations.

Mécanismes mis en jeu

Au moment de la mise en forme, la pâte exsude une certaine quantité d'eau, qui sera absorbée par le plâtre. Au moment du démoulage, de l'air comprimé est envoyé dans le moule. Cet air refoulera l'eau absorbée par le moule, et la pièce pourra se détacher. La perte d'eau de la pièce est de l'ordre de 1 %.

Tous les capillaires du plâtre ne laissent pas passer l'air, il faut donc veiller à ce qu'il y ait toujours une quantité suffisante de pores débouchés, quitte à provoquer cette capillarité « ouverte ».

Pour obtenir un démoulage rapide et homogène de la pièce, les moules poreux doivent être saturés d'eau. En effet, si de l'air est emprisonné entre deux « tronçons d'eau », l'effort de l'air comprimé envoyé pour le démoulage servira à compresser l'air prisonnier et non pas à repousser l'eau absorbée. Il convient donc que le moule soit correctement saturé afin que les efforts de l'air de démoulage soient immédiatement transmis par cette eau. À noter qu'il faut toujours rajouter de l'eau au moule lors du démarrage, mais qu'il faut également en cas d'utilisation prolongée de la presse, et particulièrement lorsqu'on utilise des pâtes dégageant de fortes quantités d'eau, « dégorger le moule » régulièrement afin qu'il ne subsiste pas d'eau sur la surface du moule pendant la phase de pressage. En effet, un excès d'eau sur le moule ou sur l'ébauche sera absorbé par la surface de la pièce, provoquant des ramollissements, voire des cloques.

Domaine d'utilisation

En vaisselle, le pressage en pâte plastique se substitue facilement au coulage pour les pièces n'ayant pas de contre-dépouille. L'utilisation la plus courante est pour les pièces ayant des variations d'épaisseur importantes, qu'il serait difficile de fabriquer avec les moyens traditionnels autres que le coulage.

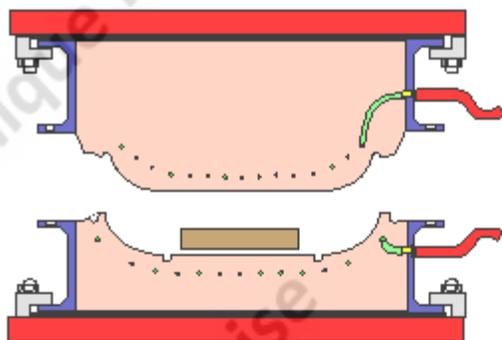
On observe une amélioration notable de la qualité dans le pressage des plats ovales, où aucune déformation n'a lieu au cours du séchage, alors qu'il n'en est pas de même, lorsque ceux-ci sont calibrés.

Un moule peut supporter environ 1000 à 2000 pressées. Si le moule est composé de plusieurs empreintes, les séries fabriquées peuvent être importantes. Les cadences de pressages sont de l'ordre d'une à deux pressées à la minute.

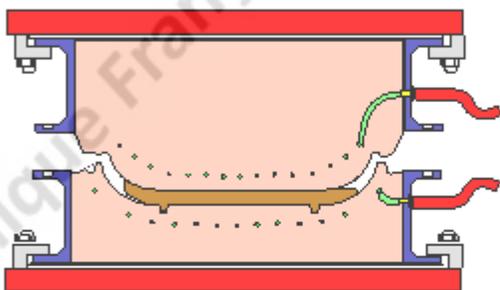
La rapidité de mise en œuvre est remarquable, car entre le début de fabrication du moule et sa mise en place sur la presse, on ne dépasse pas quatre heures, ce qui permet, à partir d'un modèle déterminé, de réduire considérablement les délais de fabrication.

Le moule de pressage est capable de produire 6000 pièces. À raison de 80 coulées par moule, il faudrait 750 moules de coulage pour obtenir la même quantité produite.

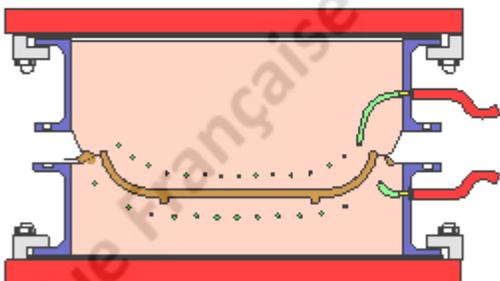
Pour le pressage, 6000 pièces sont produites en un peu plus de 33 heures, et cela avec une seule personne. Pour assurer la même production en coulage, il faudrait au minimum deux personnes.



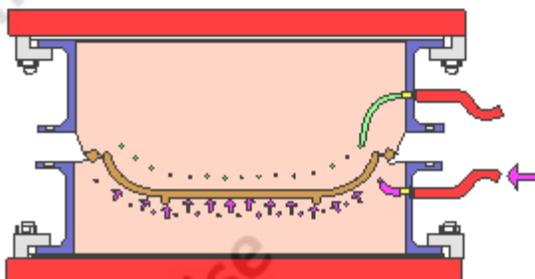
Mise en place de l'ébauche



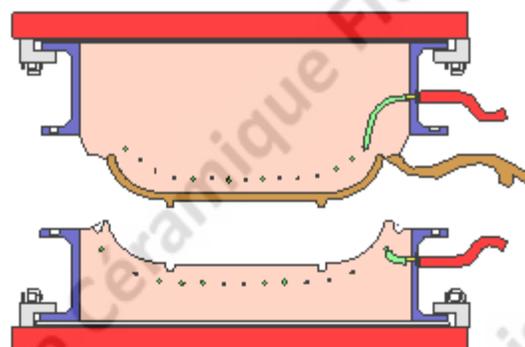
Écrasement de l'ébauche.



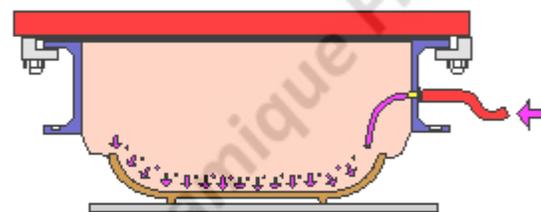
Pression maximale.
Formation de la pièce.



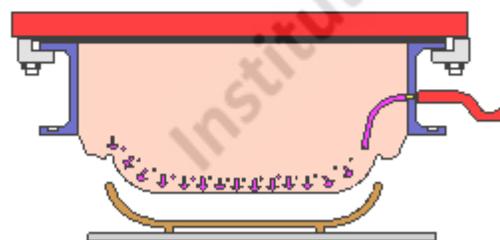
Envoi d'air comprimé dans la partie inférieure,
la pièce se décolle du moule.



Ouverture de la partie supérieure, le
pièce reste collée sur celle-ci.
La bavure est enlevée manuellement.



Mise en place d'un support de
démoulage et mise sous pression de
la partie supérieure.



La pièce se décolle et repose sur le
support.

FABRICATION D'UN MOULE RAM PROCESS

Matériel nécessaire : Châssis métalliques rectifiés. / Grillage galvanisé soudé, à mailles carrées de 1 cm de côté. / Raccords d'air amovibles. / Gaine Silisol, de diamètre intérieur de 5 mm. / Attaches en fil métallique souple. / Détendeur d'air comprimé, d'une pression maximum de 6 kg/cm². / Plâtre Keradur

Préparation du moule

Disposer le châssis métallique sur la mère de moule.

Découper le grillage galvanisé en bandes de trois ou quatre mailles et disposer celles-ci sur des supports soudés au châssis, de façon à constituer un ensemble stable et indéformable. La bande de grillage doit épouser approximativement la forme de la pièce à environ 40 mm au maximum et 30 mm au minimum en dessous de la surface de la pièce.

Relier les deux bandes de grillage à leur intersection par quelques attaches en fil métallique souple.

Visser les raccords d'air sur le châssis.

Engager la gaine Silisol sur le premier embout de raccord d'air et la disposer sur le grillage de façon à ce que chaque « spire » soit espacée d'environ 30 mm aux endroits faciles à démouler, et de 15 mm environ aux endroits difficiles à démouler. La gaine est ensuite liée par les attaches au grillage. L'extrémité libre de la gaine doit être reliée au deuxième embout de raccord d'air, ou obturée s'il n'y a qu'un embout de raccord d'air prévu. On peut également coller à chaud la gaine Silisol sur le grillage.

Savonner la mère de moule et la débarrasser de tous corps étrangers.

Il est conseillé d'utiliser ce moule le lendemain de sa fabrication, sans omettre de le saturer d'eau et de le faire « transpirer » à nouveau (opération à répéter à chaque remise en service).

Il est souhaitable que le moule dispose d'un dégorgeoir sur tout son pourtour. Au cours du montage du moule sur la presse, il est impératif de déposer des cales entre les deux parties de moule, de façon à pouvoir régler l'épaisseur de la bavure de terre, et ainsi d'empêcher les deux moules en plâtre de se toucher au premier pressage. La pression de travail du moule en air comprimé ne doit pas excéder 6 kg/cm². Pour obtenir une bonne répartition de la pression sur toute la surface du moule, il est recommandé de monter les moules de compression sur un banc de graisse appliquée sur une épaisseur d'environ 1 mm.

Pour éviter toute déchirure ou rupture des matrices de presse, la table de pressage ainsi que le plateau mobile de la presse doivent être débarrassés de toutes impuretés présentes avant le montage des matrices.

Fabrication des moules de presses en plâtre Keradur

Préparer le plâtre Keradur à raison de 3,3 kg de plâtre par litre d'eau (ce rapport plâtre/eau représente le maximum, mais on peut aussi travailler à 2,5 kg de plâtre pour un litre d'eau qui correspond au dosage minimum). Ne pas laisser le plâtre dans l'eau plus de deux minutes.

Gâcher sous vide pendant 6 minutes pour le dosage maximum, et 12 minutes pour le dosage minimum. Si l'on ne dispose pas d'une machine à gâcher le plâtre sous vide. On travaillera avec un agitateur à 1500 tours/min., pendant un temps qui ira de 9 minutes pour le dosage maximum, à 14 minutes pour le dosage minimum.

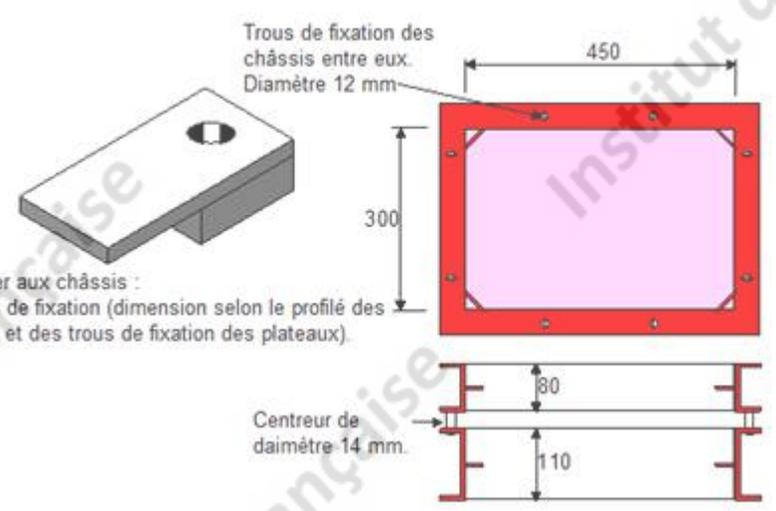
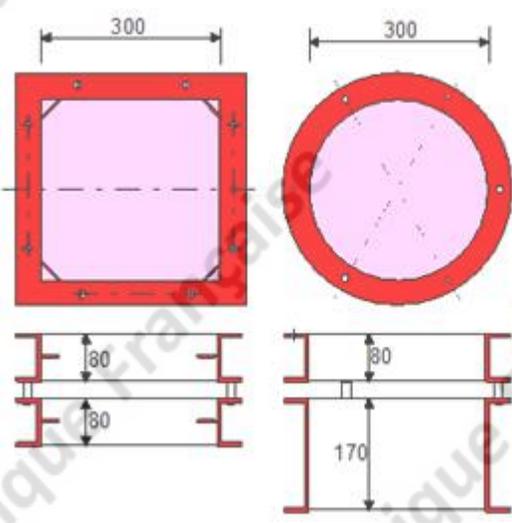
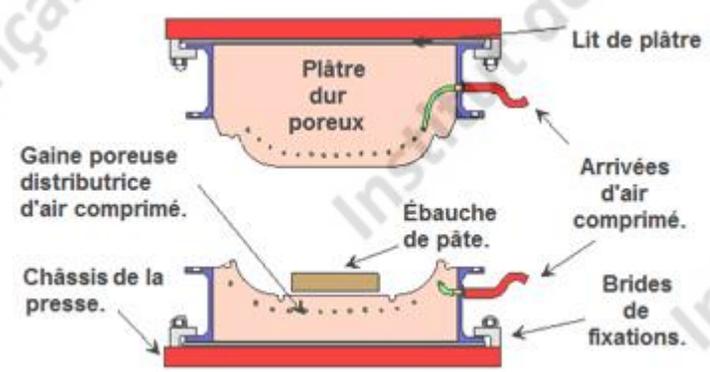
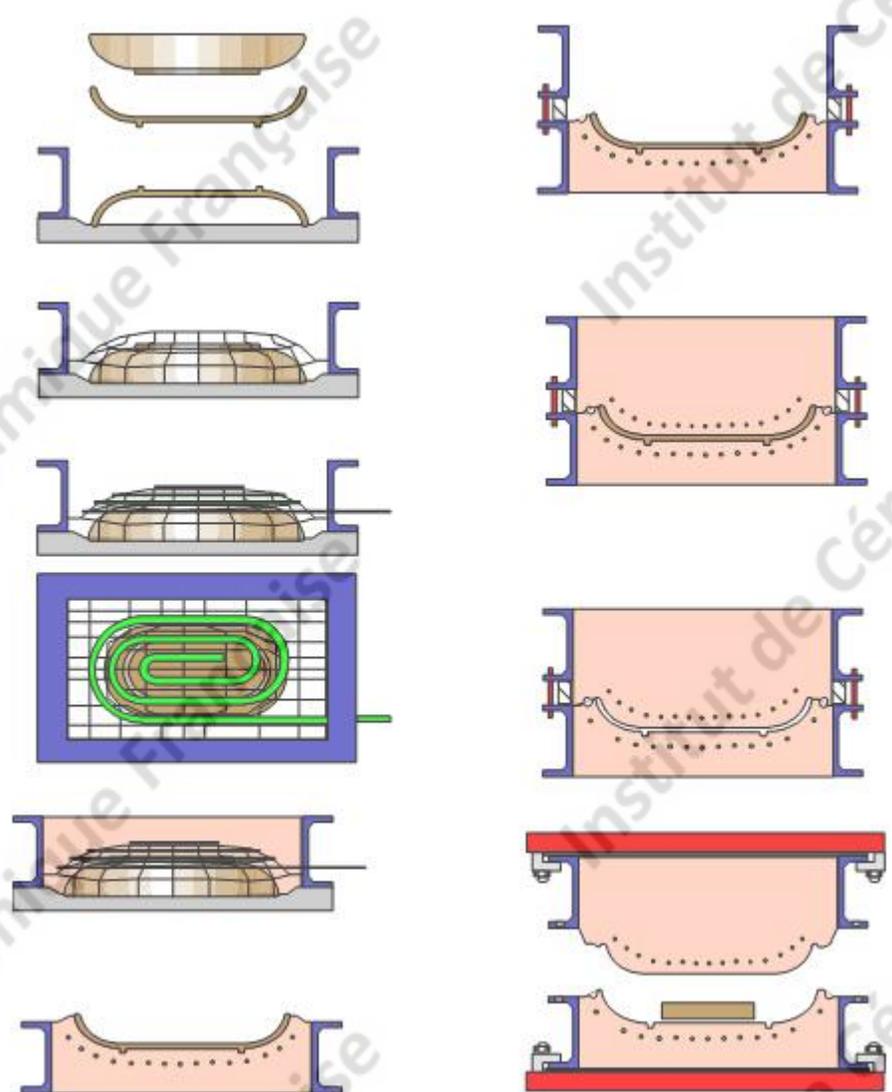
Couler le plâtre ainsi préparé dans le moule.

Enfoncer dans le plâtre une sonde de température ou utiliser un thermomètre de surface.

À environ 27°C, injecter 0.5 bar d'air sous pression, 1 bar équivalant approximativement 1 kg au cm².

Injecter ½ bar de pression d'air, toutes les minutes jusqu'à 6 bars. Au bout de trois minutes, lorsqu'on atteint 1,5 bar, procéder à la séparation des deux parties du moule.

Lorsque la pression de 6 bars est atteinte, maintenir cette pression dans les deux parties du moule pendant une heure.

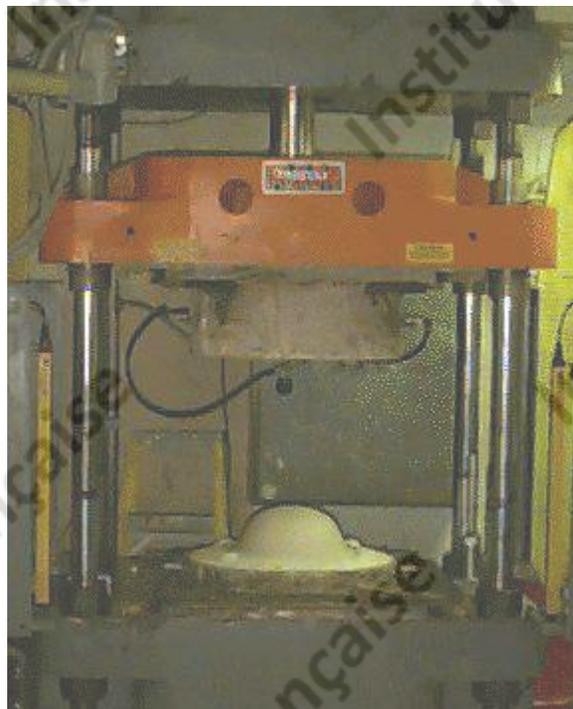


À ajouter aux châssis :
5 brides de fixation (dimension selon le profilé des châssis et des trous de fixation des plateaux).



DÉFORMATION DE LA PÂTE PENDANT LE PRESSAGE.

Le pressage en pâte plastique est la technique de façonnage induisant le plus de contraintes à la pâte. Le fond sera la partie la plus pressée, les côtés, d'une pièce de type plat à gratin, ne seront pressés que lorsque le moule sera pratiquement fermé, quant aux angles, ils ne seront pratiquement pas pressés, ou en tout dernier temps du pressage. Comme il est possible de voir sur les photos, les angles seront remplis en dernier, ces différences de vitesse seront à l'origine d'apparition de fentes.



Institut de Céramique Française



Presse en moule métallique et utilisation avec pâte plastique, pour poterie horticole.



Vues d'un moule métallique, avec ouverture en corolle pour dégagement des contres dépolis de pièces complexes.

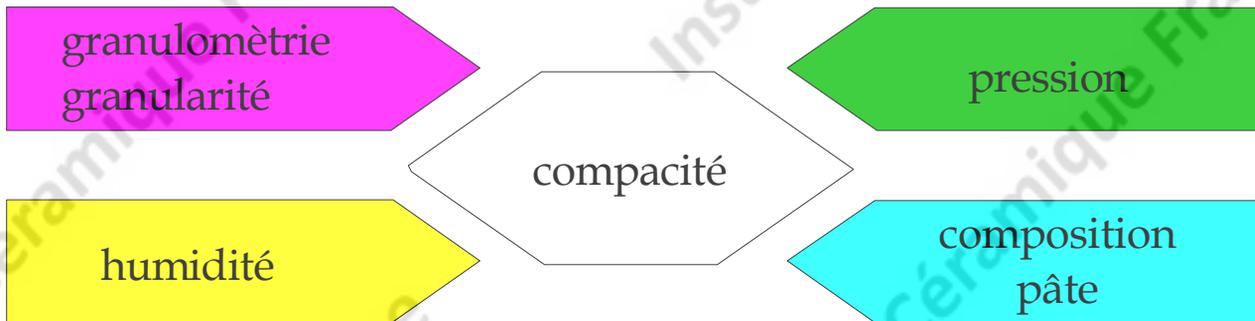


FAÇONNAGE EN PÂTES SÈCHES

FAÇONNAGE EN PÂTES SÈCHES

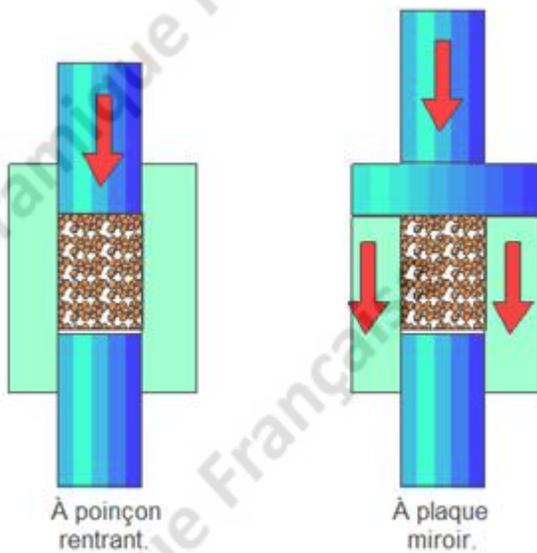
Ce procédé consiste à compacter des poudres céramiques sous l'action d'une force dans un moule appelé outillage. On l'utilise pour la fabrication de carreaux, de vaisselle et de briques réfractaires.

L'agglomération de poudre dépend :



Les presses sont du même type que celles utilisées en pâte plastique. Les moules ou outillages se présentent sous deux formes : à poinçon rentrant et à plaque miroir.

La deuxième forme permet une meilleure application de la pression de façonnage sur la masse de poudre.



Presse à carreaux



Presse à brique réfractaire.

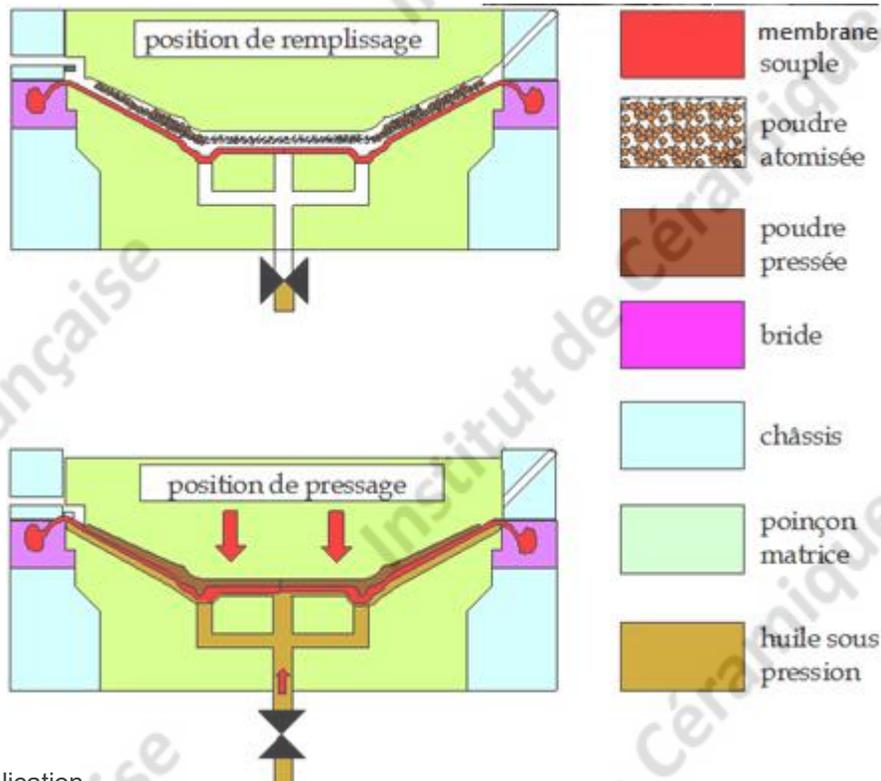


Pressage isostatique

Principe de fonctionnement :

Le pressage isostatique est le compactage d'une matière granulée ou pulvérulente, exactement dosée, introduite dans une enveloppe élastique. Par application d'une haute pression uniforme, il résulte une pièce de la forme désirée, possédant une forte résistance mécanique et présentant la même densité en tous points.

L'obtention de cette pression uniforme se fait par injection autour de la membrane souple d'un liquide soumis à une forte pression. La pression d'un liquide étant égale en tous points du même volume, celle-ci sera transmise uniformément à la membrane qui la retransmettra uniformément à la poudre.



Domaine d'application

Le pressage se substitue aux procédés traditionnels du calibrage en pâte plastique et du coulage entre deux plâtres ou même à ciel ouvert dans certains cas.

Il permet la fabrication :

- D'assiettes plates ou assiettes creuses, à bord lisse ou festonné et de formes diverses.
- De plats creux ou plats de formes identiques.
- D'articles culinaires d'épaisseurs différentes.

Ces articles peuvent être fabriqués dans différentes pâtes de faïence, de vitreous, de grès et de porcelaine.

Avantages:

- Grande homogénéité du produit cru.
- Déformation minimum à la cuisson.
- Pas de séchage.
- Garantie dimensionnelle et poids + ou - 1%.
- Stockage de la matière première (en big-bag ou en silo).
- Productivité (1 pièce pressée toutes les 7 à 10 secondes).
- Dans le cas d'un monoproduit, importante possibilité d'automatisation de fabrication, d'émaillage et de cuisson.
- Pièce d'usure en fabrication (membrane) à faible coût.
- Amélioration des qualités générales du produit.
- Changement de produits simplifié.

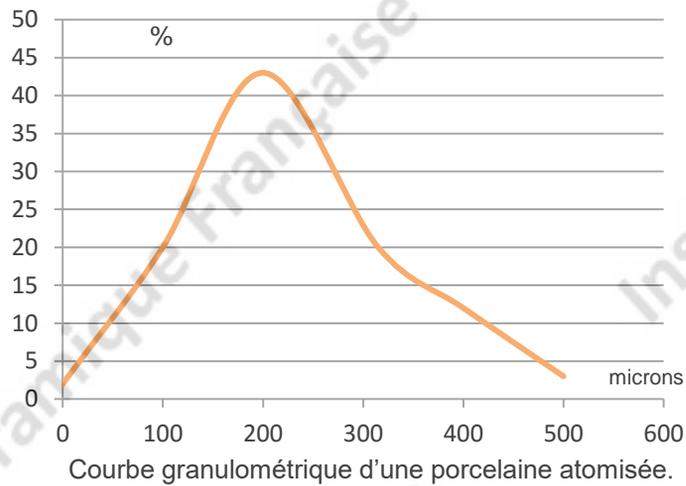
Inconvénients:

- Coût élevé de la machine.
- Coût élevé du moule en acier.
- Opérateur qualifié en maintenance.
- Complexité de la conception et réalisation du moule.
- Obligation de grande série.
- Grande nécessité d'humidité constante de la poudre (entre 1 et 3 %).

Montage de l'alvéole d'un moule.



Démoulage d'une membrane en polyuréthane.

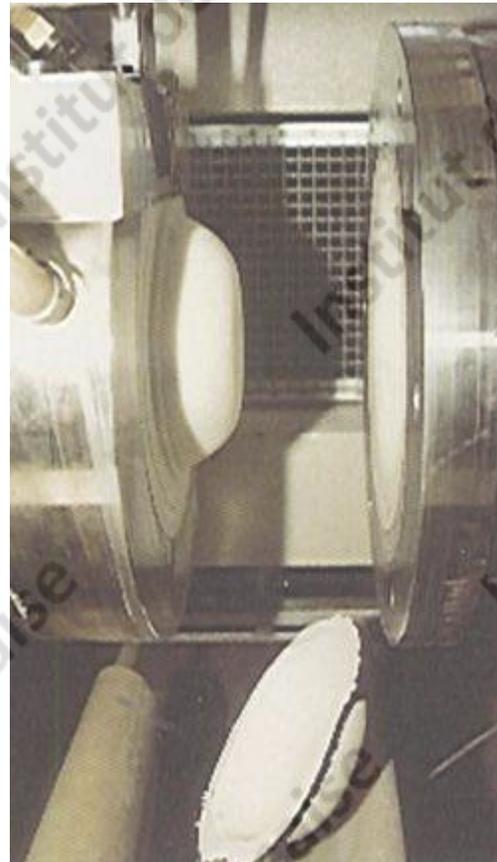


La masse céramique atomisée contient de 2 à 4 % d'humidité et 0.3 à 1% de liant organique à base d'alcool polyvinylique et polysaccharide et elle est pressée d'une manière isostatique avec une pression de 300 kg au cm². L'humidité est conservée vers 2 %, afin de minimiser les retraits de cuisson.

Phase de pressage



Phase de démoulage

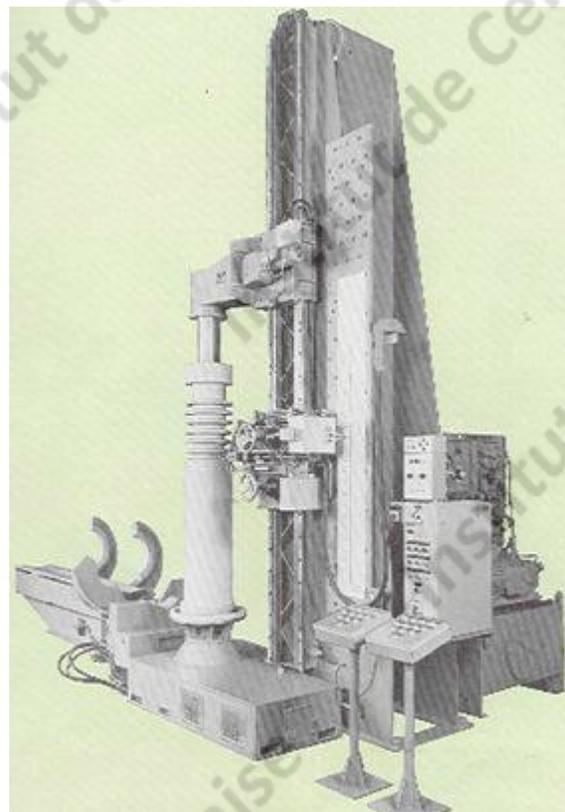


Transfert sur la machine à finir.



USINAGE DE MASSE COMPACTE SÈCHE

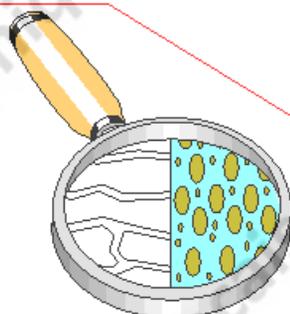
Une autre méthode de mise en forme de masses sèches consiste à partir d'ébauches cylindriques de pâte sèche, à usiner la forme désirée sur un tour à copier ou numérique. Cette méthode est principalement utilisée pour la confection des isolateurs électriques. Ce tour permet la fabrication de tous types d'isolateurs (pleins, de passage, supports, spéciaux de forme conique ...). Il copie le profil de l'isolateur dessiné en noir sur fond blanc grâce à un photoscope. L'usinage d'un isolateur s'effectue à l'aide d'un outil de coupe, à partir d'un boudin préséché. La commutation de « marche rapide » à « lente » s'effectue automatiquement par l'intermédiaire de photoscope en fonction de l'épaisseur du trait représentant le profil de l'isolateur ; dans le cas d'un copiage rapide, le tracé est épais, et pour un copiage lent il est mince. Ce procédé permet l'usinage d'isolateurs de diamètres différents.



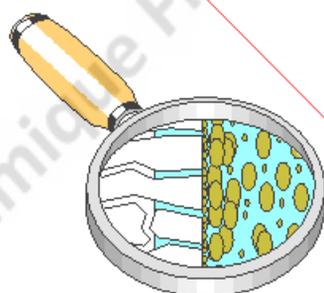
FAÇONNAGE EN PÂTES LIQUIDES

FAÇONNAGE DE PÂTES LIQUIDES COULAGE TRADITIONNEL

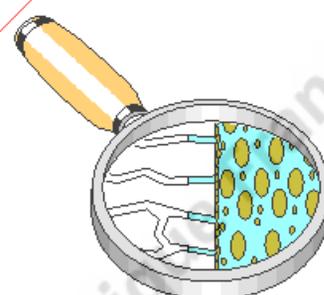
On verse dans un moule poreux, le plus souvent en plâtre, une pâte liquide appelée barbotine. La succion provoquée par la capillarité du plâtre va attirer puis absorber une partie de l'eau contenue dans cette barbotine. Ainsi, les particules composant la barbotine seront plaquées contre la paroi, jusqu'à former une épaisseur croissante avec le temps. Lorsque l'épaisseur est suffisante, le moule est vidé de sa barbotine encore liquide et la croûte formée est raffermie dans le moule.



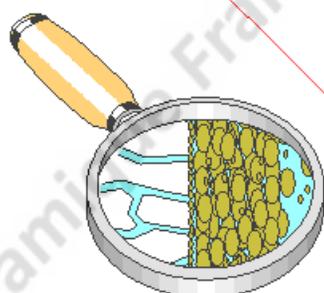
1) La barbotine est versée dans un moule en plâtre.



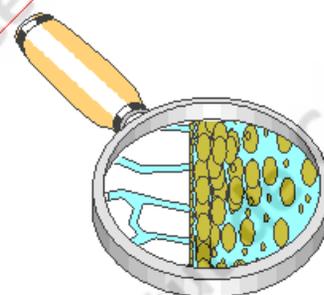
2) Par l'effet de capillarité, les pores du plâtre aspirent l'eau de la barbotine, attirant très rapidement les particules les plus fines. C'est la formation de la peau de coulage.



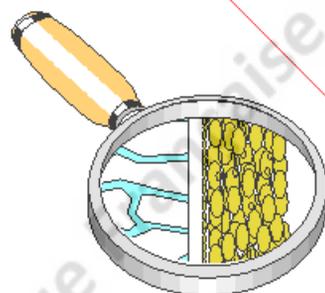
3) L'eau continue d'être absorbée par les capillaires, les particules plus grosses s'agglomèrent contre la paroi, l'épaisseur de la pièce se constitue.



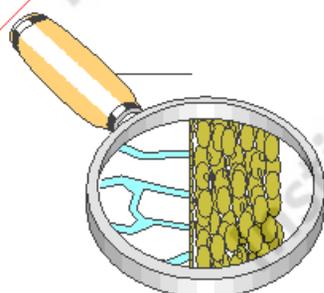
4) Les particules continuent de s'empiler par couches successives. La prise ralentit, car l'eau traverse l'épaisseur déjà existante avant d'atteindre le moule.



5) L'épaisseur désirée est atteinte, le moule est humide et il faut vider l'excédent de barbotine.



6) Le moule a été revidé, le plâtre continue d'absorber l'eau contenue dans le gâteau. C'est le raffermissement.



7) L'absorption de l'eau du gâteau et le départ d'eau par séchage ont provoqué un raffermissement et un retrait de la pièce, celle-ci est décollée du moule, elle peut être démoulée.

Facteurs influençant le coulage

Le moule

La structure capillaire d'un plâtre provient de la texture poreuse réalisée par l'enchevêtrement des aiguilles cristallines du sulfate de calcium hydraté qui se forme pendant la prise du plâtre.

Les capillaires sont irréguliers en forme et en dimension.

Trois aspects du rôle du capillaire sont à retenir :

- L'effet de succion qui dépend des pores de petit diamètre.
- L'écoulement du liquide qui dépend du diamètre des pores.
- La capacité d'absorption qui dépend du pourcentage de porosité du plâtre.

En pratique, on recherche souvent une porosité avec une classe prépondérante de pores de petit diamètre.

L'humidité d'un moule a une grande importance sur la régularité de la prise. En effet, un plâtre trop humide ou trop sec conduit à une augmentation du temps de prise.

La barbotine

Les barbotines de coulage doivent être suffisamment fluides pour remplir le moule rapidement et dans ses moindres recoins. Elles doivent contenir le moins d'eau possible, un excès d'eau ralentissant la vitesse de prise et de séchage du moule, et favorisant le piquage du moule par une dissolution lente du plâtre.

Les défloculants

Les défloculants augmentent la fluidité des barbotines, ce qui permet d'obtenir des compositions contenant moins d'eau et donc plus aptes à prendre rapidement.

Un excès de défloculants peut avoir l'effet inverse. Il existe deux sortes de défloculants :

D'origine minérale : silicate de soude et carbonate de soude.

D'origine végétale : tanin et acide humique.

De synthèse : polyacrylates.



Pour obtenir une « bonne barbotine », il ne suffit pas de connaître la quantité maximum de défloculants correspondant au minimum de viscosité, car il n'est pas avantageux d'être proche de ces valeurs extrêmes.

La granulométrie, le rapport dégraissants/argiles et la teneur en matières organiques ont également une grande influence sur les propriétés des barbotines.

Principe de la défloculation : une suspension argileuse est constituée de particules élémentaires chargées électriquement.

Les particules ont tendance à se rapprocher sous l'effet de forces d'attraction lorsqu'elles sont dans l'eau.

Si l'on change la polarité du milieu aqueux en y ajoutant des bases, les micelles auront alors tendance à se repousser et la solution deviendra plus fluide.

Le procédé de fabrication par coulage utilise une suspension généralement aqueuse (un mélange, d'eau et de particules céramiques, appelé barbotine) que l'on déshydrate par absorption du liquide suspensif (l'eau) à l'aide d'un moule poreux (généralement, en plâtre), la résultante de cette absorption dans le temps est la formation d'une croûte (gâteau, cake ou tesson) sur les parois du moule, après obtention de l'épaisseur désirée le moule est revidé.

Après raffermissement, la pièce est extraite du moule et mise à sécher.

La formation de la pièce se décompose en plusieurs étapes:

-La formation du tesson ou « prise » .

-Le ressuyage qui consiste en la disparition du film de barbotine laissé par le vidage de la barbotine excédentaire (sera assimilé à la phase de prise)

- La consolidation du tesson après revidage de la barbotine dit «raffermissement» (qui est en fait la 1^{re} phase de séchage de la pièce).

Le procédé de coulage, comme les autres procédés de façonnage, s'inscrit dans un processus de fabrication comportant plusieurs séquences, que l'on doit considérer comme interdépendantes pour assurer en fin de cycle la mise en œuvre de pièces de qualité.

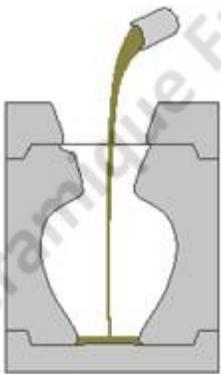
Ces différentes séquences influant sur la fabrication d'une pièce coulée sont :

- La préparation puisqu'elle détermine les propriétés de la barbotine impliquées au niveau du coulage, on doit y inclure les opérations de stockage et de transfert qui jouent sur ces propriétés. Ces propriétés sont la densité, le comportement rhéologique, la viscosité et la thixotropie, ainsi que la facilité à être perméable au passage de l'eau.

- Le moule en plâtre qui par sa texture et sa porosité assurera le pompage de l'eau de la barbotine.

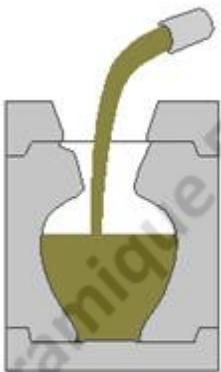
- Les conditions de séchage (naturel, forcé, en chambre ou tunnel) peuvent faire apparaître des défauts résultants de différences d'humidité du tesson et des différences d'épaisseur.

- Aux facteurs extérieurs (température des ateliers, humidité ambiante) qui influenceront sur la stabilité des caractéristiques rhéologiques de la pâte et sur le séchage des moules, ainsi que la pression pouvant être appliquée à la barbotine pendant le coulage (pression qui augmentera selon certaines conditions la vitesse de filtration de l'eau diminuant ainsi le temps de prise).

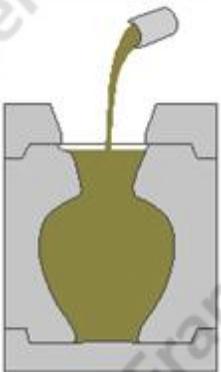


- Afin d'éviter la tache de coulage, il convient de diriger le jet sur un endroit non émaillé ou non visible de la pièce en utilisation normale. Le jet devra être le moins puissant possible afin de minimiser la tache de coulage, et éviter d'éventuelles éclaboussures qui pourraient à leur tour provoquer le même défaut. Dans le cas où l'impact du jet se trouve obligatoirement sur une partie visible ou émaillée de la pièce, on tentera de procéder au remplissage par écoulement doux le long de la nourrice par exemple.

- D'autres solutions peuvent être mises en œuvre pour tenter de diminuer l'impact du jet, en coulant avec une canne prolongeant le pistolet ou en remplissant le moule en source par le bas.

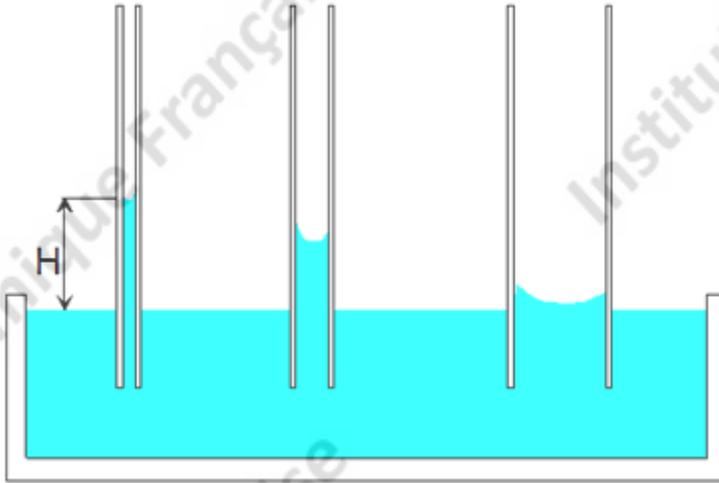


Une fois le début de remplissage effectué, le débit doit être plus important pour éviter les lignes de coulée.



Lorsque le moule est presque totalement rempli (juste avant d'arriver sous le niveau de la bride), le débit doit être ralenti pour éviter d'emprisonner des bulles d'air sur le dessus de la pièce.

Pour éviter ce problème, le moule peut être pourvu d'évents ou être coulé en position inclinée de telle sorte que l'air puisse s'échapper progressivement.



(θ est l'angle de mouillage et vaut 180° pour l'eau)

L'effet de capillarité

Un liquide mouillant ayant une tension superficielle donnée subit une *traction capillaire* inversement proportionnelle au diamètre du capillaire.

Dans un tube capillaire dont la surface est mouillée, l'eau monte d'une certaine hauteur H qui est fonction du diamètre D et de la tension superficielle σ .

Si $D/2 <$ Rayon du ménisque :

$$H = \frac{-4 \cdot \cos(\theta) \cdot \sigma}{\rho_1 \cdot g \cdot D}$$

La tension superficielle σ varie en fonction du liquide et de la température du liquide.

Pour l'eau à :

40 °C $\sigma = 6,93 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

60 °C $\sigma = 6,71 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

80 °C $\sigma = 6,24 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

La masse volumique de l'eau liquide est sensiblement égale à $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Mais $\rho_1 \cdot g \cdot H$ est en fait la différence de pression Δp entre la surface du liquide dans lequel plonge le capillaire et la surface du ménisque de l'eau dans le capillaire.

Prenons un tube capillaire de $10 \mu\text{m}$ avec de l'eau à 40°C .

$$\rho_1 \cdot g \cdot H = \Delta p = \frac{-4 \cdot \cos(\theta) \cdot \sigma}{D}$$

$$\Delta p = \frac{4,6,93 \cdot 10^{-2}}{10^{-5}} = 27600 \cdot \text{Pa}$$

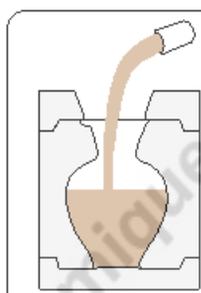
$\Delta p = P_o - P_i$ avec $P_o =$ Pression atmosphérique et P_i pression dans le ménisque.

$$P_i = P_o - \Delta p = 101300 - 27600 = 73700 \text{ Pa}$$

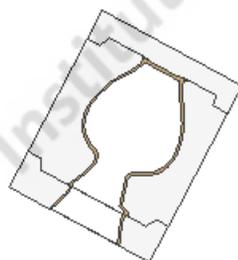
La hauteur H d'ascension capillaire est égale

$$H = \frac{\Delta p}{\rho_1 \cdot g} = \frac{27600}{1000 \cdot 9,81} = 2,81 \cdot \text{m}$$

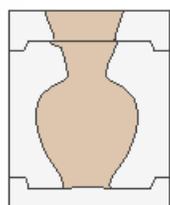
Cette force est considérable, mais elle s'applique sur des surfaces exprimées en μ^2 .



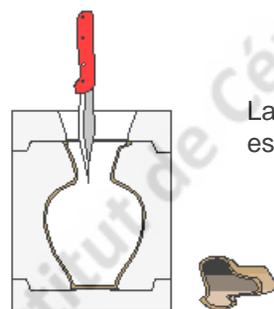
Remplissage du moule.



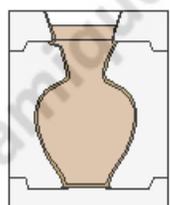
La pièce est laissée dans le moule afin que celle-ci se raffermisse suffisamment pour être démoulée.



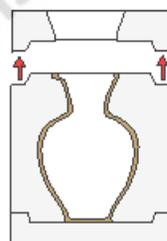
Le moule est rempli jusqu'au bord supérieur de la bride qui servira de réserve. La prise commence.



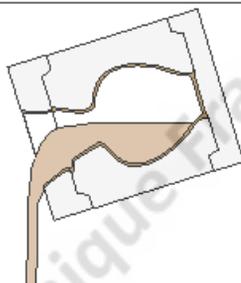
La découpe de la nourrice est réalisée.



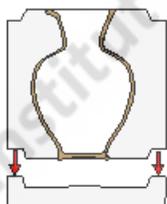
Du fait de la prise, une épaisseur commence à se former sur les parois du moule. Le niveau de barbotine descend au fur et à mesure de l'absorption d'eau par le moule.



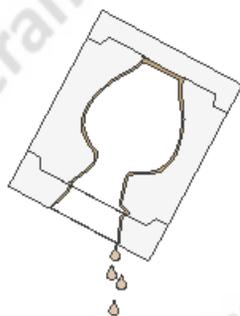
Débridage du moule.



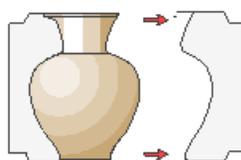
Une fois l'épaisseur atteinte, l'excédent de barbotine est revidé par retournement du moule.



Dépose du fond.



Le moule est conservé dans la position de revidage afin de permettre l'égouttage complet de la barbotine. Le plâtre continuera à absorber l'eau du tesson, c'est le ressuyage.



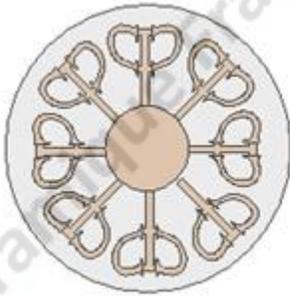
Démoulage de la pièce.



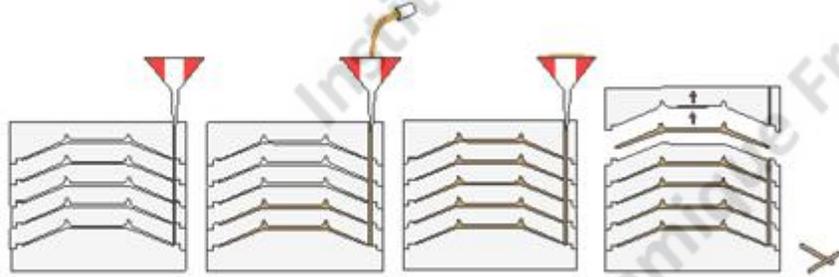
COULAGE ENTRE DEUX PLÂTRES

Le principe du coulage entre deux plâtres est le même que le coulage à ciel ouvert, à la différence près que les deux faces de la pièce seront formées par une partie du moule.

Celui-ci a l'avantage pour des épaisseurs équivalentes de diviser le temps de prise par deux, par rapport au coulage à ciel ouvert. Il représente par contre plus de difficulté pour l'obtention de pièces en contre-dépouille.



MOULES MULTIPLES POUR ANSES



MOULES MULTIPLES POUR ASSIETTES



Batterie de moules fermés



Déblocage du serre-joint



Ouverture moule



Extraction pièce

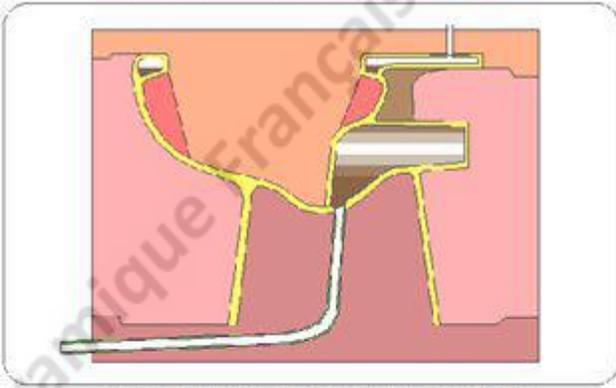


Cuve d'alimentation par gravité

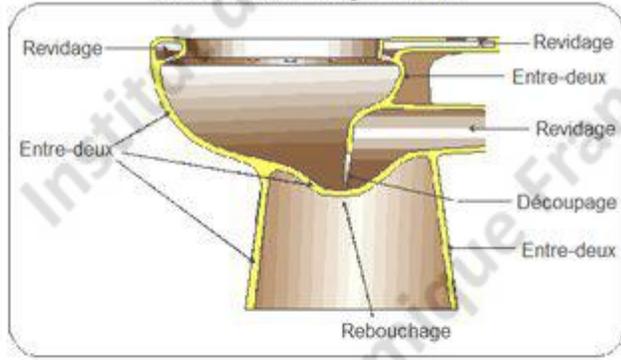
COULAGE MIXTE : Afin de pouvoir obtenir des pièces présentant sur leurs deux faces des surfaces les plus parfaites, le coulage entre deux plâtres devient souvent le moyen de les réaliser. Mais certaines pièces en contre-dépouille se prêtant mal à cette technique, des moules utilisant les deux techniques sont fabriqués (entre-deux et de revidage).



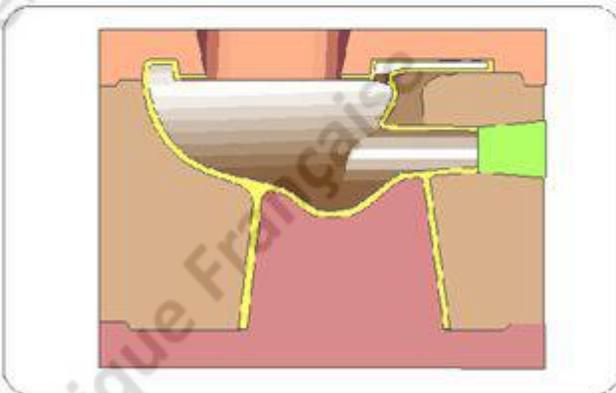
Moule pour cuvette avec revidage minimum



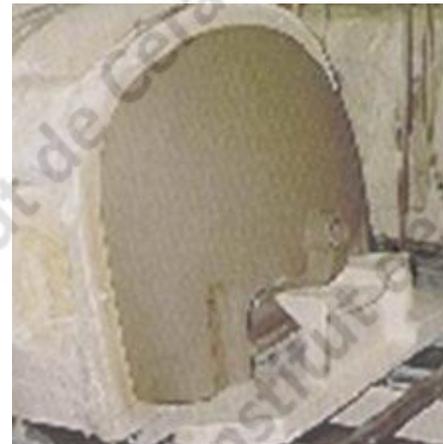
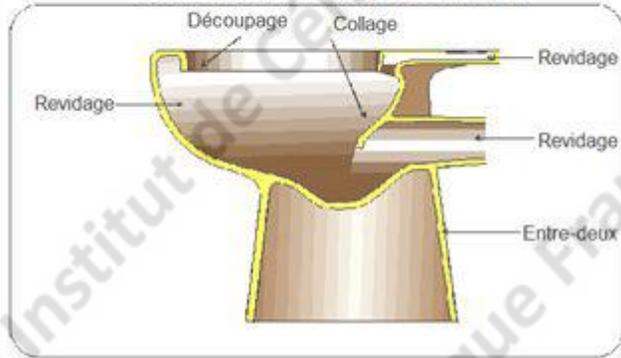
Cuvette avec revidage minimum



Moule pour cuvette avec entre-deux minimum



Cuvette avec entre-deux plâtres minimum

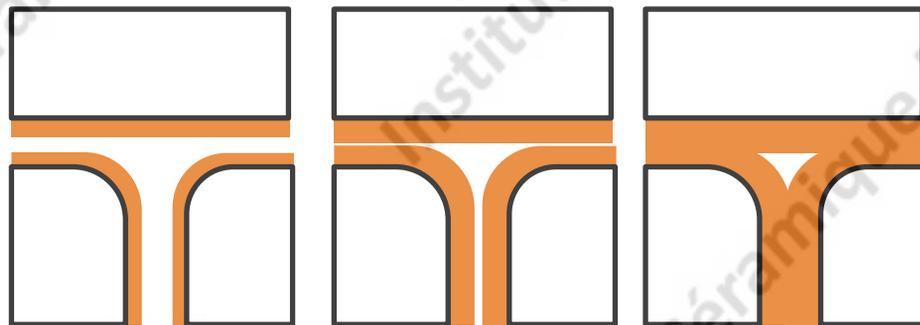


COULAGE MIXTE

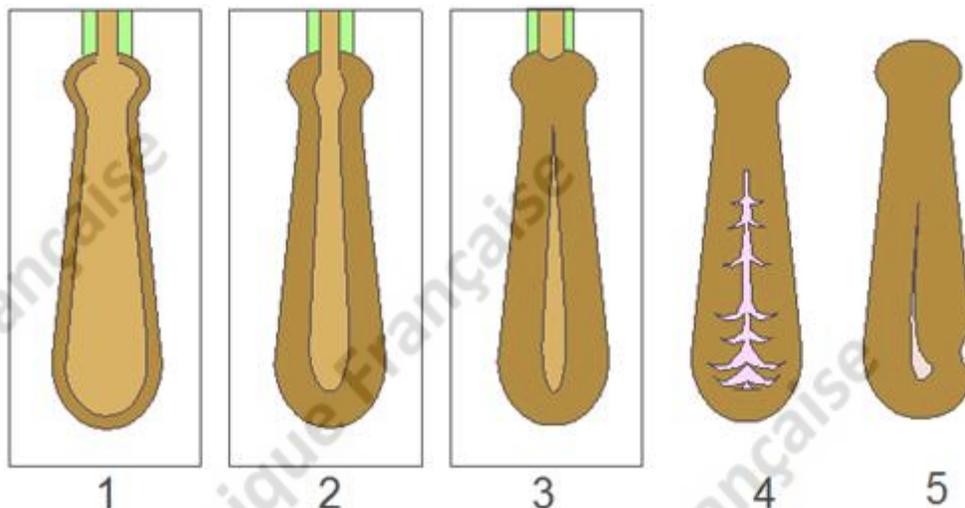
Si cette technique offre une grande plage de possibilité quant à la réalisation de pièces de forme complexe, elle présente l'inconvénient majeur de créer des différences d'humidité, donc de retrait et de fermeté qui peut occasionner des défauts de déformation au démoulage. En effet, les parties formées en revidage sont moins fermes alors que les parties entre deux plâtres peuvent, du fait de leur fermeté et leur début de retrait, serrer dans le moule.

Un autre inconvénient existe également lorsque l'on veut obtenir des épaisseurs équivalentes en revidage à celles obtenues entre deux plâtres, en effet si l'alimentation en barbotine de la partie revidée doit emprunter un circuit passant entre deux plâtres, celle-ci sera bientôt interrompue du fait de la double prise dans les parties entre-deux. De ce fait, il faut toujours aménager un circuit pour que les parties en revidé soient toujours «nourries» quitte à créer plusieurs circuits voire des circuits imperméables (tuyaux plastiques).

On peut également se trouver confronté à un problème similaire à la rencontre de trois parois entre deux plâtres, chacune des parois aura en fin de prise obstrué l'alimentation en barbotine et il y aura un raccord des trois (ou du fait des angles de raccordement, une épaisseur plus importante) un volume de barbotine dont le raffermissement s'effectuera en fait par séchage une fois la pièce démoulée ; pendant ce séchage, le départ du volume d'eau contenu dans cette poche provoquera un retrait responsable d'une dépression voire d'une fente.



- 1) Le moule est rempli de barbotine par sa partie supérieure, l'épaisseur est déjà formée.
- 2) L'épaisseur augmente en fonction du temps, le diamètre intérieur de la pièce est égal à celui de la nourrice.
- 3) L'épaisseur de prise est telle que le passage de barbotine ne peut se faire jusqu'au bas de la pièce, une poche de barbotine est complètement isolée de l'extérieur.
- 4) Après démoulage, la pièce commence son séchage, compte tenu de la forme et la rigidité de la pièce, le retrait provoqué par le départ de l'eau de la poche de barbotine ne peut se faire d'où l'apparition de fentes.
- 5) Si la pièce est démoulée assez tôt (pas assez ferme) le retrait provoqué par le départ de l'eau peut provoquer une déformation de l'extérieur de la pièce.



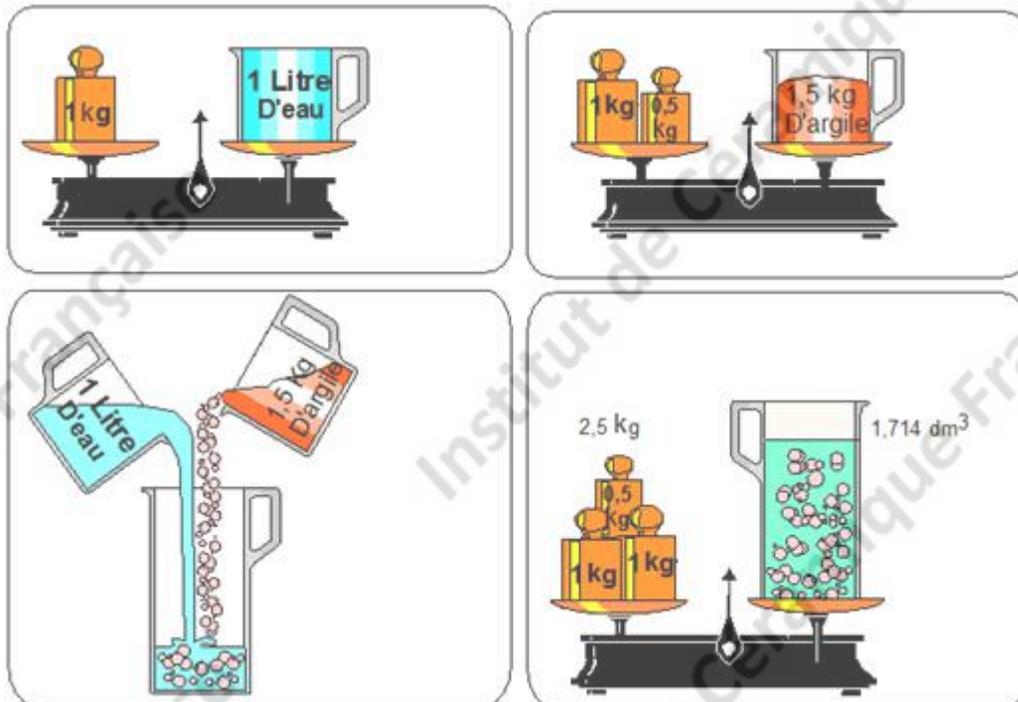
DENSITÉ - MASSE VOLUMIQUE

Ces valeurs seront essentielles dans le suivi des caractéristiques des barbotines ou des bains d'émaux, elles permettront par leur contrôle de déterminer si les dosages des différents constituants des barbotines ont été respectés.

DÉTERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE D'UNE BARBOTINE PAR CALCUL

Soit un volume de barbotine composé de 1 litre d'eau et de 1,5 kg d'argile sèche

La densité de l'eau est considérée à 1, la densité de l'argile sèche est considérée à 2,1



La masse volumique est de : $2,5 \text{ kg} / 1,714 \text{ dm}^3 = 1,458 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$

VÉRIFICATION PAR LE CALCUL :

1 litre d'eau = 1 dm^3 d'eau avec une masse volumique = $1 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$

1,5 kg d'argile avec une densité de 2,1 = $0,714 \text{ dm}^3$

Volume d'eau + volume d'argile sèche = 1 dm^3 d'eau + $0,714 \text{ dm}^3$ d'argile = $1,714 \text{ dm}^3$

Masse d'eau + masse d'argile sèche = 1 kg d'eau + $1,5 \text{ kg}$ d'argile = $2,5 \text{ kg}$

Densité de la barbotine = $2,5 / 1,714 = 1,458$

RHÉOLOGIE Science de l'écoulement et de la déformation de la matière :

Introduction

La rhéologie est l'étude de l'évolution des contraintes en fonction du cisaillement du fluide.

Formule générale d'Herschel-Bulkley : $\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$

τ tension de cisaillement (Pa), τ_0 tension seuil à l'origine «ou Yield value en anglais» (Pa)

K la consistance ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$),

$\dot{\gamma}$ taux de cisaillement (gradient de vitesse), s^{-1} et n l'indice pseudoplastique.

Cette relation permet de décrire tous les fluides suivants.

La dérivée de la fonction τ : $\eta_{\lambda} = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = n \cdot K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ Définit la pseudo viscosité η_{λ} .

Si n est différent de 1, la pseudo viscosité n'est valable que pour un taux de cisaillement donné.

La viscosité

Remarque : **La viscosité a une signification uniquement pour les fluides newtoniens ou normaux.** Il ne faut pas confondre la pseudo viscosité η_γ avec la courbe fournie par la majorité des rhéomètres $\tau/\dot{\gamma}$.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Ce rapport est souvent utilisé, mais il ne permet pas de caractériser correctement le comportement d'un fluide anormal. Il correspond à une pseudo viscosité à un gradient donné.

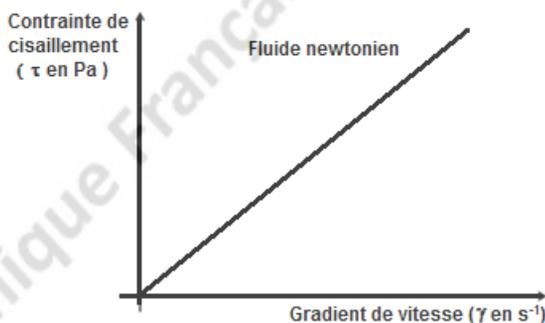
La viscosité dynamique η (Pa .s)

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}}$$

τ la contrainte tangentielle (Pa) et dv/dy le gradient de vitesse (s^{-1}) dans la direction normale y .

Le terme viscosité sera utilisé par la suite, même s'il s'applique uniquement pour les fluides newtoniens.

CLASSIFICATION DES FLUIDES



FLUIDES NEWTONIENS :

Pour un fluide newtonien, la viscosité dynamique η ne dépend pas du gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ et la viscosité a une signification physique égale à la consistance K .

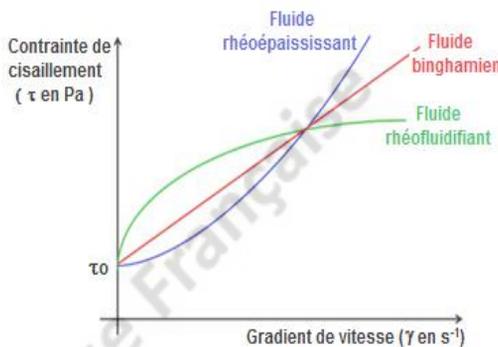
La viscosité dynamique s'exprime dans le système SI en Pa.s

en Pa.s

1 Pa.s = Poiseuille et 1 mPa.s = 1 c Poise (CGS)

Air à 20 °C : $1.8 \cdot 10^{-2}$ mPa.s, Eau à 20°C : 100 mPa.s

Huile d'olive : 10² mPa.s, Glycérol : 1 Pa.s



Consistance pour les fluides anormaux :

Miel liquide : 10 Pa.s, Polymères fondus 100 – 10000 Pa.s

Bitumes : 10⁸ Pa.s, Barbotine de coulage: 0.5 -5 Pa.s

rhéoépaississant : $n > 1$

binghamien : $n = 1$

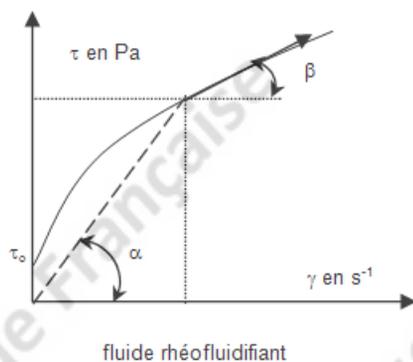
rhéofluidifiant : $n < 1$

FLUIDES BINGHAMIENS OU PLASTIQUES : ce sont les plus simples des fluides anormaux par leur comportement rhéologique. Un fluide binghamien exige une pression minimale pour provoquer son écoulement.

Pour des forces inférieures, il se comporte comme un solide (limite d'écoulement). Pour une tension de cisaillement à laquelle le fluide commence à s'écouler, il se comporte comme un fluide normal (sauf aux faibles gradients et au centre de l'écoulement où le fluide devient solide).

FLUIDES RHÉOFLUIDIFIANTS :

Le rapport $\tau/\dot{\gamma}$ est représenté par la tangente a et la pseudo-viscosité par la tangente b. Elles sont décroissantes en fonction du gradient $\dot{\gamma}$ et $\text{tg}(\alpha) > \text{tg}(\beta)$.

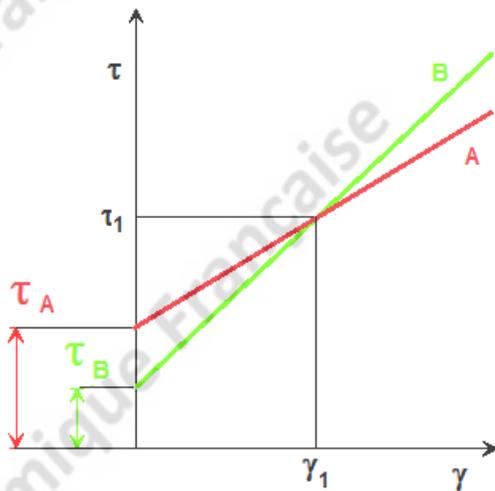


Les fluides rhéofluidifiants ou pseudoplastiques, généralement, ne présentent pas de seuil d'écoulement ; la déformation commence dès qu'une contrainte est exercée. Ce comportement rhéofluidifiant est caractérisé par une diminution de la viscosité lorsque le gradient de vitesse augmente ou que la contrainte de cisaillement augmente.

FLUIDES BINGHAMIENS OU PLASTIQUES : CAS PRATIQUE : Considérons deux barbotines binghamiennes A et B sous un gradient de vitesse γ_1 , toutes deux ont une tension de cisaillement τ_1 , soit le même écoulement. Mais sous un gradient plus faible, le taux de cisaillement de la barbotine A est plus grand que celui de la barbotine B ; A apparaît moins fluide. Ce sera le contraire pour un gradient plus élevé que γ_1 .

Ainsi la barbotine B qui apparaît la plus fluide dans des conditions ordinaires de coulage pourra se comporter comme la plus visqueuse dans les conduites et les pompes de distribution.

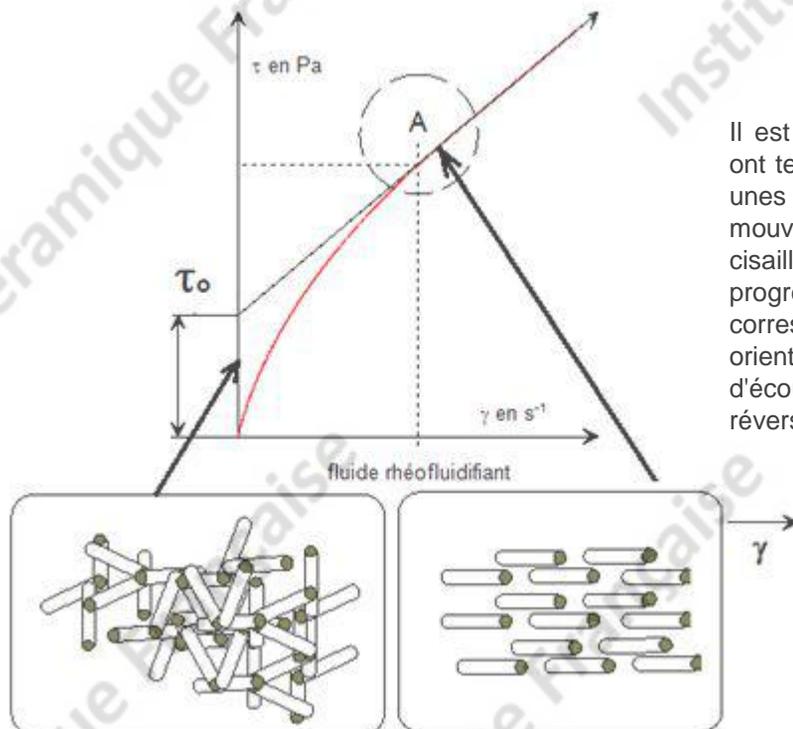
L'existence d'un seuil d'écoulement est intéressante puisque c'est lui qui assure le maintien en suspension les gros grains (chamotte, dégraissants) au sein d'une barbotine argileuse, ainsi pour une barbotine de grès sanitaire la barbotine A serait préférable de ce point de vue à la barbotine B.



FLUIDES PSEUDOPLASTIQUES ou RHÉOFLUIDIFIANTS :

Généralement, les barbotines présentent une viscosité élevée au repos et diminuant quand l'agitation augmente, et après avoir atteint un certain seuil (A) la courbe est pratiquement une droite.

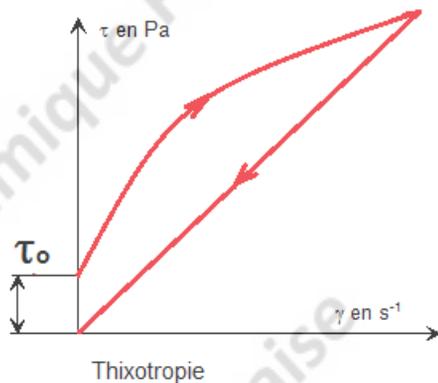
De nombreuses barbotines présentent ce comportement, en particulier celles qui contiennent des montmorillonites (bentonites). Ces substances argileuses sont en général constituées de particules élémentaires en forme de disques ou de bâtonnets.



Il est admis, que les particules allongées ont tendance, au repos à s'agglomérer les unes aux autres, s'opposant ainsi au mouvement. Sous l'action d'une force de cisaillement les particules s'orientent progressivement et, à une certaine vitesse, correspondant au point A, elles sont toutes orientées dans le même sens d'écoulement, le phénomène est réversible.

FLUIDES THIXOTROPES : Tous les liquides étudiés précédemment ont une courbe rhéologique unique, ils sont parfaitement réversibles. Il n'en est pas de même pour des substances thixotropes, pour lesquelles, la courbe ascendante ne se confond pas à celle à gradient descendant.

La thixotropie est un phénomène physique qui résulte de la non-instantanéité de la déstructuration de la texture par agitation et de réédification par le repos.



Le problème est complexe et difficile à chiffrer, parce qu'il dépend du passé rhéologique de l'échantillon et du mode expérimental de détermination. Il est difficile de reproduire un même contrôle sur un même échantillon puisque celui-ci aura ses caractéristiques changées par l'agitation préalable. C'est donc la viscosité apparente qui est mesurée dans la pratique (ateliers de coulage), cette mesure n'a de sens que si l'expérience est toujours faite dans des conditions rigoureusement identiques, sur un échantillon de barbotine ayant absolument le même passé rhéologique.

Dans la pratique industrielle l'effet thixotropique est chiffré par deux constantes : l'une caractérise l'évolution de la viscosité en fonction du temps, l'autre l'évolution de la viscosité sous l'influence du gradient de vitesse.

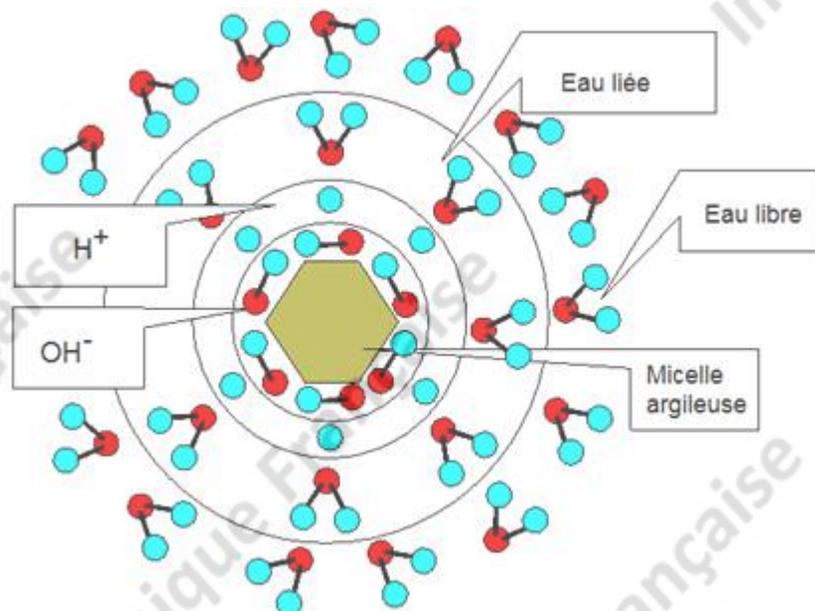
Ainsi, la mesure de la viscosité apparente d'un échantillon est faite après agitation prolongée, puis après un temps de repos fixé arbitrairement d'après les conditions d'utilisation de la barbotine en atelier (un quart d'heure par exemple).

STABILITÉ D'UNE SUSPENSION ARGILEUSE : Une suspension argileuse est constituée d'une multitude de ces particules élémentaires entourée de leur lysosphère. Chacune d'elle est sollicitée par deux forces antagonistes : d'une part, elles se repoussent mutuellement puisqu'elles sont chargées électriquement et d'autre part elles subissent les forces d'attraction moléculaires (force de Van der Waals). Ces deux forces doivent être équilibrées afin que les particules, en suspension, soient éloignées les unes des autres.

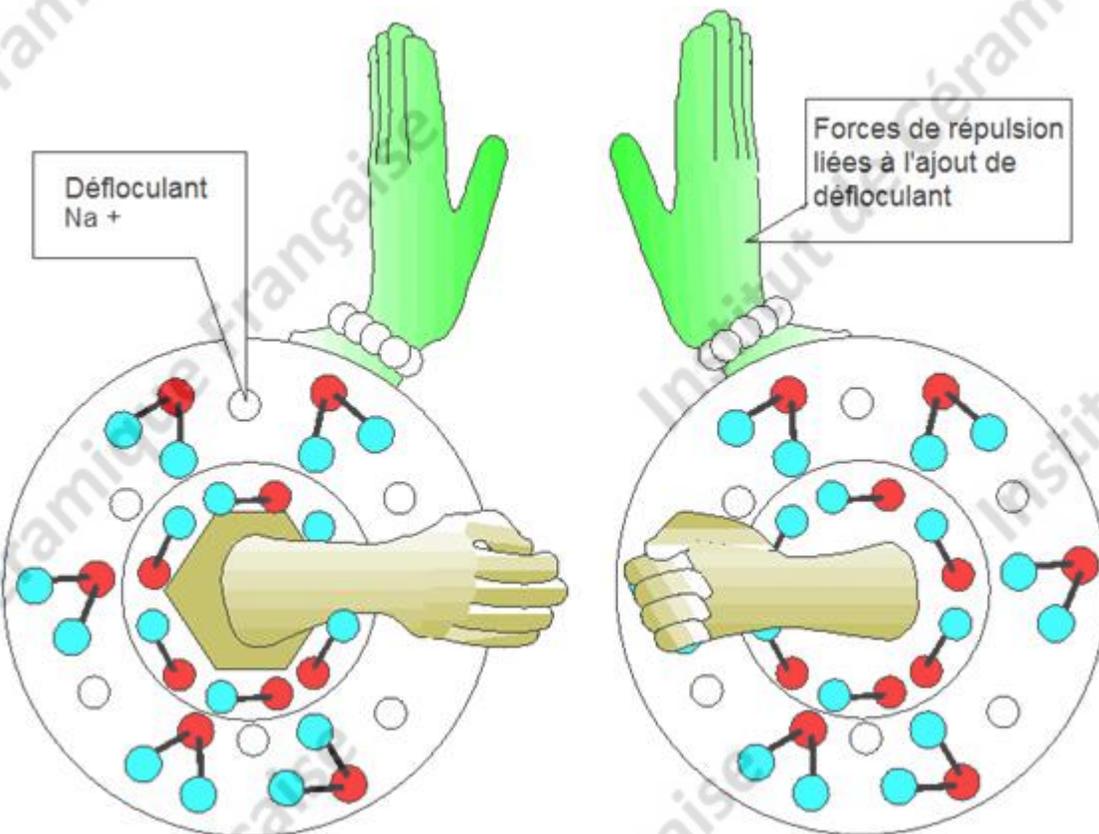
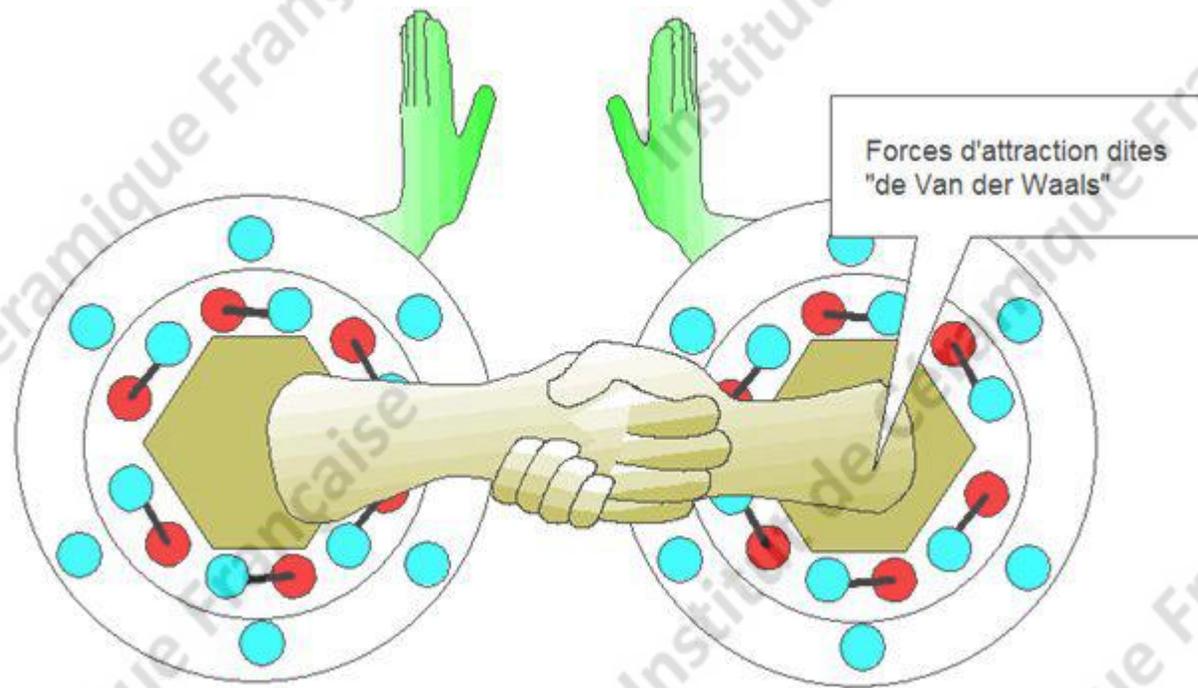
COMMENT CHANGER LA VISCOSITÉ D'UNE BARBOTINE ?

CHARGES DES PARTICULES : les particules d'argile qui sont de nature colloïdale renferment des charges électriques qui contribuent à la stabilité de leur suspension par répulsion électrostatique qui s'oppose à leur agrégation.

Or, la présence de particules chargées au sein d'un milieu aqueux entraîne une redistribution des ions du liquide, les ions de signes opposés tendant à s'accumuler autour de la particule (pour satisfaire à l'électroneutralité). De plus, l'eau étant un liquide polaire, ses molécules se trouveront orientées et plus ou moins liées à la particule et aux ions qui l'entourent.



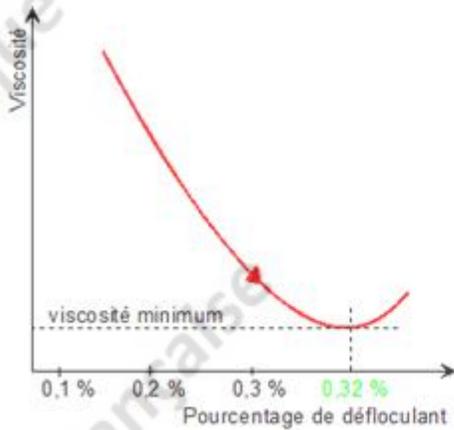
ACTION DES DÉFLOCCULANTS : afin de combattre les forces d'attraction de Van der Waals on ajoutera aux barbotines des défloculants, dont le rôle est d'apporter des ions de gros diamètre et faiblement chargés qui créeront une atmosphère ionique (force de répulsion électrostatique) de grand diamètre permettant aux particules de rester éloignées les unes des autres.



Une barbotine défloculée avec des ions Na^+ , les forces de répulsion l'emportent, les particules sont repoussées les unes des autres et la suspension est stable.

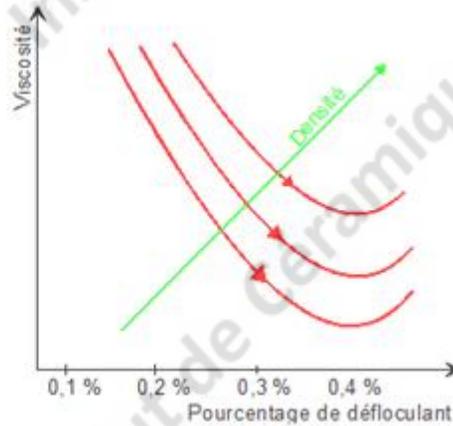
ACTION DES DÉFLOCULANTS SUR LA VISCOSITÉ

Au fur et à mesure qu'il est ajouté du défloculant, la viscosité chute et atteint éventuellement une valeur pour laquelle les forces d'attraction sont pratiquement neutralisées. En ce point de défloculation mini, la viscosité est à sa valeur la plus basse et toutes additions de défloculants auront un effet contraire.



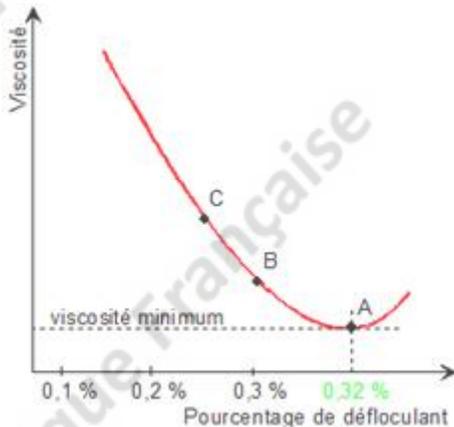
ACTION DE LA DENSITÉ SUR LA VISCOSITÉ

Comme on peut le constater sur cette série de courbes, le point de défloculation minimum ainsi que la valeur la plus basse de la viscosité sont affectés par la densité initiale de la barbotine : plus celle-ci est basse, plus la viscosité sera basse.

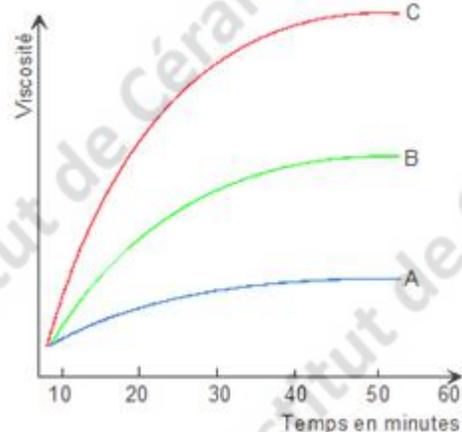


ACTION DES DÉFLOCULANTS SUR LA VISCOSITÉ ET SUR LA THIXOTROPIE

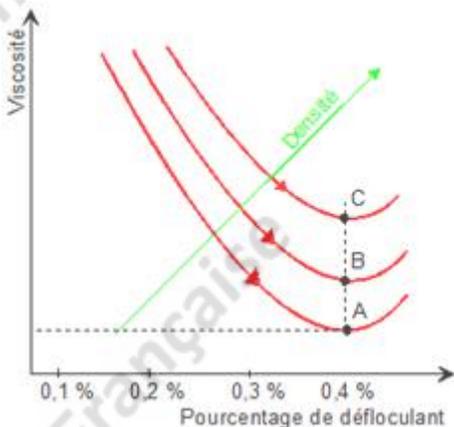
Courbe de défloculation type, avec les points A, B, C représentant la viscosité aux différents niveaux d'addition de défloculants.



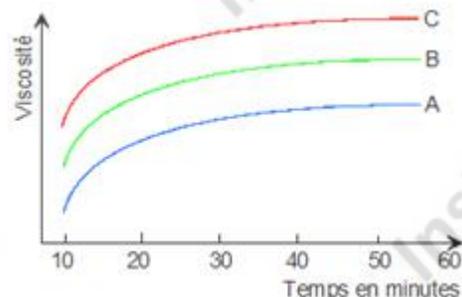
Courbe représentant la variation de viscosité dans le temps (exemple 60 minutes) des barbotines avec un pourcentage A, B et C de défloculants. Alors que la défloculation minimum (A) donne un niveau de thixotropie bas, les points B et C conduisent à des valeurs de thixotropie plus élevées.



ACTION DE LA DENSITÉ SUR LA THIXOTROPIE

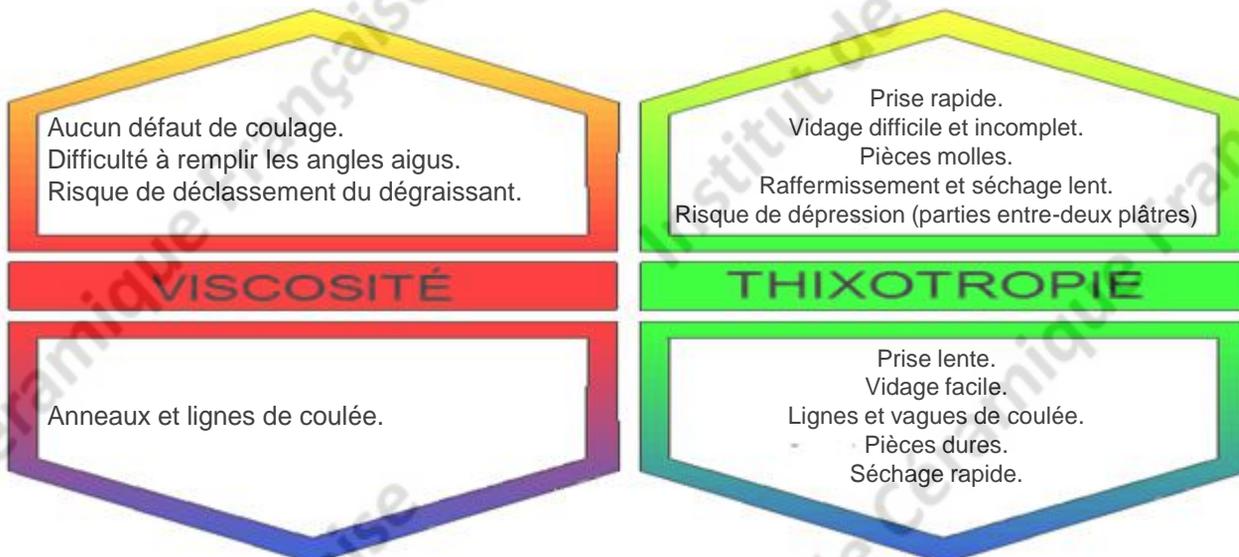


Courbe de défloculation type, avec les points A, B et C représentant la viscosité aux différentes densités, mais pour un dosage de défloculants identique.



Courbe de l'évolution de la viscosité en fonction du temps pour les barbotines de la figure de gauche, on s'aperçoit que les différents niveaux de viscosité obtenus uniquement par variation de la quantité d'eau (densité) donnent lieu à des variations de viscosité dans le temps (thixotropie) moins importantes que les figures supérieures.

VISCOSITÉ, THIXOTROPIE LES DÉFAUTS NOTABLES



CAUSES DES VARIATIONS DE PROPRIÉTÉ DES BARBOTINES

- 1) Variation de composition des matières premières (l'eau étant considérée comme matière première).
- 2) Erreur de dosage des matières premières, estimation incorrecte du taux d'humidité.
- 3) Finesse de broyage du quartz et /ou des feldspaths.
- 4) Préparation des argiles (durée de broyage ou de malaxage).
- 5) Taux de défloculants et type de défloculants.
- 6) Taux et variation des retours de barbotines.
- 7) Recyclage des déchets.
- 8) Contamination ou pollution (morceaux de plâtre, bactéries, eau de lavage...)
- 9) Effet du vieillissement.
- 10) Température.
- 11) Agitation (délayage, circulation permanente dans les tuyauteries).

LES DIFFÉRENTS DÉFLOCULANTS

SILICATES ET CARBONATE DE SODIUM

Les plus employés sont à base de silicate de sodium. Ils sont utilisés conjointement avec du carbonate de sodium, bien qu'il soit un agent de défloculation moins efficace, il possède une alcalinité beaucoup plus puissante et permet donc de réduire la quantité de silicate. Le carbonate de sodium présente en outre des avantages quant aux propriétés plastiques des pièces coulées.

Des recherches ont indiqué que l'utilisation de carbonate de sodium permettait de tirer le plus grand bénéfice possible des propriétés liées à la présence des matières organiques essentiellement contenues dans les argiles, ainsi des barbotines contenant de telles argiles nécessitent entre 0,06 % et 0,1 % en poids de carbonate de sodium pour obtenir la meilleure défloculation et le meilleur comportement au coulage. Le silicate de sodium est alors utilisé pour compléter la défloculation et pour effectuer les derniers ajustements.

HUMÂTES ET TANNÂTES

Les humâtes et les tannâtes peuvent être bénéfiques à la rhéologie de la barbotine si la masse ne contient pas assez de ces substances organiques dérivées des lignites (charbon fossile) des argiles.

ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Les molécules d'humus, qui sont plus petites que les micelles argileuses, entourent celles-ci d'une couche protectrice. Comme elles sont elles-mêmes tapissées d'une couche d'eau assez épaisse, elles empêchent les micelles argileuses de flocculer ensemble. Par contre, quand le complexe argilo-humique se trouve dans l'état flocculé, l'humus entourant les "flocs" interdit toute dispersion de l'argile qui serait provoquée par une action extérieure comme une hydratation brutale.

POLYPHOSPHATES

Bien que les agents de défloculation, à base de phosphate, ne sont généralement pas utilisés pour la défloculation des barbotines de coulage à cause de leurs effets nocifs sur les moules en plâtre, de très faibles quantités peuvent être utilisées pour éliminer les inconvénients des ions libres de calcium contenus dans les barbotines.

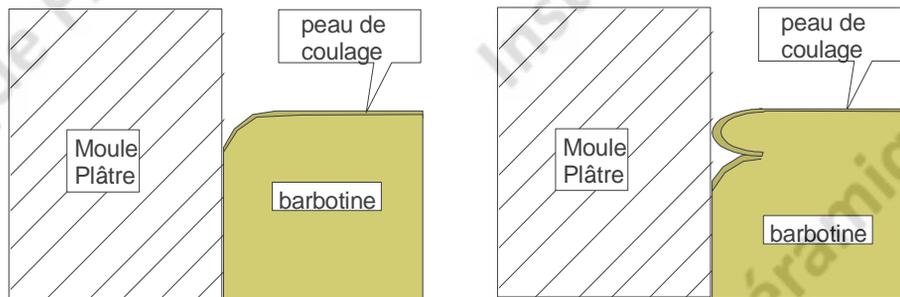
POLYACRYLATES

Les polyacrylates de sodium ou d'ammonium sont probablement l'alternative possible la plus utile face aux défloculants classiques, en effet leur action est beaucoup plus rapide et a un effet permanent, ils sont très utiles pour effectuer les derniers ajustements

FORMATION DES LIGNES DE COULAGE

Il est souvent observé sur les pièces de coulage des lignes de coulée, il s'agit d'une ligne horizontale en creux dans la pièce, qui est semblable à celle qu'aurait pu provoquer le passage d'une lame de couteau sur le pourtour de la pièce. Celles-ci sont en fait provoquées par l'arrêt de l'ascension de la barbotine dans le moule, ou par un coulage trop lent.

La surface de la barbotine est en fait plus riche en fines particules argileuses qui forment une peau.



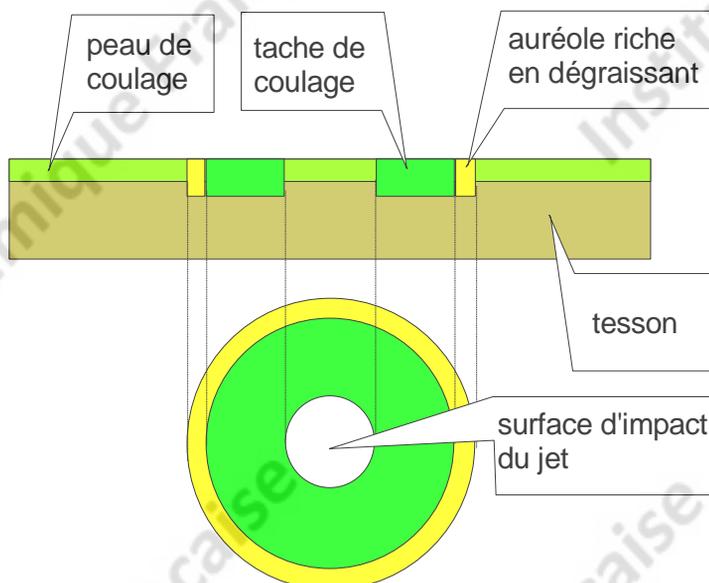
Lors du coulage, il se forme à la surface du moule une peau de coulage qui formera au contact du moule un ménisque bombé.

Au fur et à mesure du remplissage du moule, le ménisque se reformera chaque fois que la barbotine viendra recouvrir la surface précédemment coulée par rupture de la peau de coulage

Les stries apparaissent fortement à chaque arrêt en cours de coulage, mais également pour des remplissages de moules trop lents, mais elles existent également dans le cas d'un remplissage classique ou rapide, elles sont seulement moins visibles, car moins profondes. Les stries se retrouvent d'ailleurs, en négatif, sur la surface du moule. En effet, l'espace libre entre deux stries se remplit d'eau sursaturée de sulfates de calcium qui donnent des cristaux se formant sur les parois du moule, la surface devient rugueuse et sensible à l'usure au même titre que l'attaque par les alcalis de la barbotine.

FORMATION DE LA TACHE DE COULAGE

La composition de la couche superficielle d'une solution est différente de la masse elle-même. On peut montrer qu'il en est de même pour une suspension et que la tension superficielle de l'eau forme en surface une membrane qui retient les particules argileuses les plus fines. Ainsi la surface extérieure d'un jet de barbotine sera comme "gainée" par un film de particules plus fines.



On obtient ainsi à l'impact du jet une tache sous forme d'anneau circulaire riche en matière colloïdale qui apparaît serré, dense, imperméable, ayant tendance à grésier, sur lequel l'émail ne tient pas, cette auréole est entourée d'un autre anneau plus riche en dégraissants puisque la majeure partie des particules argileuses a été drainée à la surface du jet.

Afin de remédier à ce problème, il faut augmenter la tension superficielle de la barbotine, l'utilisation d'agents tensio-actifs est efficace. Mais le moyen le plus sûr est d'augmenter la densité, ce qui aura pour conséquence d'augmenter la tension superficielle. Le défaut est accentué par une forte force d'impact et par une grande porosité du moule.

Les défloculants à base de soude sont déconseillés, en effet, en migrant à la surface de la tache de coulage, ceux-ci vitrifient la pâte la rendant impossible à émailler.

FORMATION DE TRACES ET «CORNES DE COULAGE»

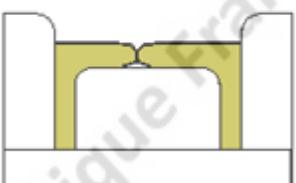
Celles-ci sont également dues au phénomène cité précédemment, mais celui-ci y est accentué puisqu'il résulte du raccordement de deux surfaces de barbotine. Il peut outre poser des problèmes à l'émaillage de la pièce, mais peut dans certains cas provoquer des déformations dues à des différences de retrait entre les zones riches en matières colloïdales et celles de proximité qui elles, seront appauvries en ces mêmes matières.



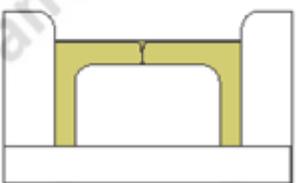
Remplissage du moule, formation de la peau de coulage à la surface de la barbotine.



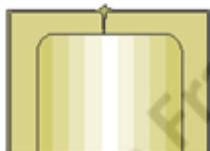
La barbotine s'étale sur la surface supérieure du noyau, chaque flux de barbotine a formé un ménisque de surface riche en particules fines.



Rencontre des deux flux de barbotine, la concentration en particules fines est multipliée par deux à cet endroit.



Le moule est rempli, la surface supérieure est plane, mais des lignes de couleurs différentes de la masse renseignent sur la présence de traces de coulage.



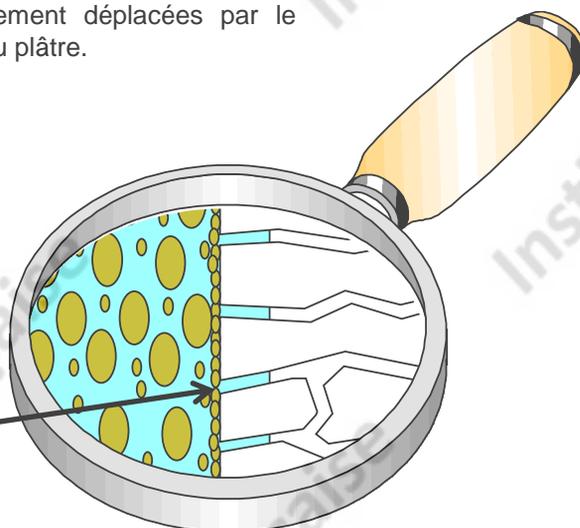
La pièce démoulée peut lors de la cuisson présenter des déformations ou des surfaces plus difficiles à émailler. Pour les produits cuits en monocuisson (sanitaire), il est parfois obligatoire de prévoir des contre-déformations ou des rectifications sur pièces crues.

FORMATION DE LA PEAU DE COULAGE

La formation de la peau de coulage est due à l'absorption rapide par le moule des particules les plus fines de la barbotine, c'est à dire des particules d'argile. En effet, celles-ci étant les plus petites elles sont facilement déplacées par le mouvement de l'eau attirée par succion dans les pores du plâtre.

Ces particules, d'argile, se plaqueront parallèlement à la surface du moule et formeront une peau relativement imperméable par rapport au reste de l'épaisseur de la pièce. Aussi, les caractéristiques du temps de prise, du temps de raffermissement devront tenir compte de la formation de l'épaisseur du gâteau et notamment de cette peau de coulage.

Peau de coulage



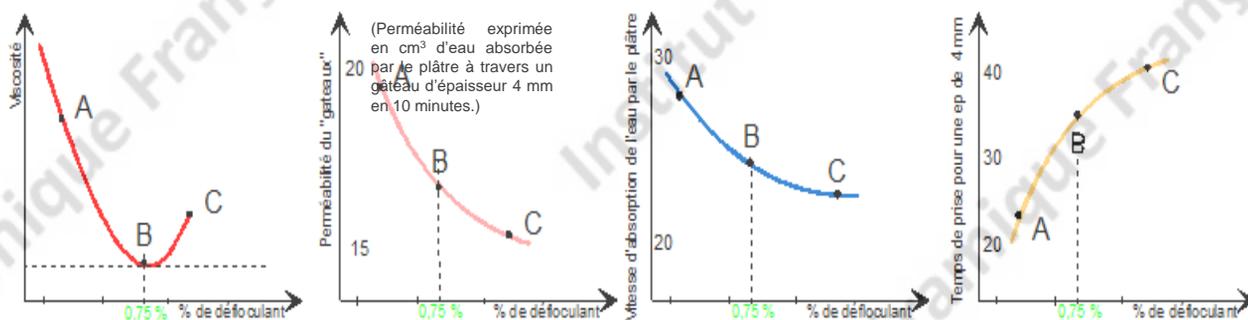
FORMATION DE LA PEAU DE COULAGE

Cette peau de coulage sera d'autant plus étanche que les premiers éléments argileux entrant en contact avec le moule seront floculés par échange de base entre les alcalis de la barbotine et le calcium du plâtre.

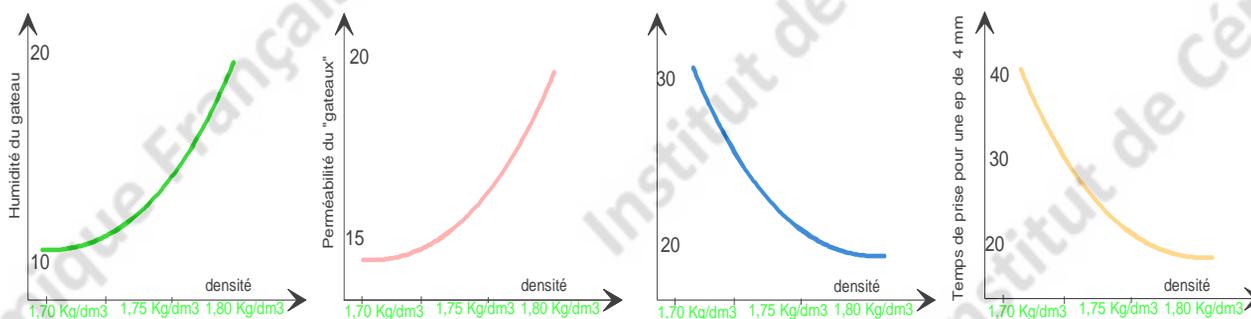
Une faible densité de la barbotine permettant un déplacement plus aisé des micelles argileuses dans la barbotine et facilitant la vitesse d'absorption de l'eau dans les premiers instants du coulage, contribuera à créer une peau de coulage plus compacte, de plus les micelles argileuses se déposant ensuite avec l'ensemble de la composition contenant moins d'eau liée, occupent un volume plus petit et peuvent se tasser plus intimement et donc diminuer la perméabilité du « gâteau ».

La quantité de défloculants joue également un rôle très important. En effet de petites quantités de défloculants en abaissant la viscosité faciliteront le déplacement des micelles argileuses qui formeront plutôt une peau imperméable, au contraire une trop forte proportion de défloculants en rendant les micelles argileuses immobiles verra son temps de prise s'allonger par augmentation de l'eau liée autour de la micelle qui au fur et à mesure de la prise viendront s'empiler sur les dernières couches du "gâteau" bouchant ainsi ses pores.

Influence du taux de défloculant sur les caractéristiques de prise



Influence de la densité sur les caractéristiques de prise



FAÇONNAGE PAR COULAGE SOUS PRESSION

Il est entendu par coulage sous pression tous types de coulage où la pression exercée sur la barbotine est supérieure à la pression atmosphérique que l'on a dans le cas d'un coulage à ciel ouvert.

Habituellement, la croûte, formée sur la paroi du moule, est créée par l'aspiration de l'eau de la barbotine par les pores du plâtre. Ce sont les seules forces capillaires qui provoquent cette aspiration, ce qui impose des temps de prise relativement longs. Mais si l'on adjoint à ces forces une poussée sur la barbotine, l'eau contenue dans celle-ci pénétrera plus facilement dans le moule, et par conséquent le temps de prise diminuera. En partant de ce principe, on peut arriver à diminuer des temps de prise de plus de 90%, mais les pressions utilisées sont telles que l'on a dû développer des matériaux plus résistants que le plâtre.

On distingue donc deux types de coulage sous pression :

- Coulage moyenne pression dans des moules plâtre entre 2 et 6 bars.
- Coulage haute pression dans des moules en résine, entre 12 et 40 bars.

Coulage moyenne pression

On trouve ce type de procédé dans l'industrie céramique. La réalisation du moule est complexe puisqu'elle se rapproche de celle d'un moule de «RAM-process». Celui-ci dispose de gaines poreuses pour pouvoir aspirer et extraire l'eau de la barbotine et véhiculer l'air et l'eau pour le démoulage. De plus, le moule doit posséder une porosité ouverte déterminée.

Les pressions d'utilisation de ce genre de moule se situent entre 2 et 6 bars, et nécessitent donc un plâtre plus résistant. Le rendement est de l'ordre de deux pièces à l'heure.

Compte tenu de la difficulté de mise en œuvre des moules, de leur coût et de leur rendement, ce procédé n'est pas très répandu, mais a permis d'évoluer vers des moules plus performants et ainsi d'accéder aux techniques de coulage haute pression.



Coulage haute pression

Il reprend le même principe que le précédent, mais les moules sont composés d'une couche de résine de synthèse poreuse et d'un réseau de canaux permettant la distribution des fluides dans le moule.

L'avantage de ces moules est de pouvoir résister à de grandes pressions (de 12 à 40 bars), ainsi qu'à l'abrasion, ce qui permet d'obtenir des pièces avec un temps de prise d'environ six minutes pour le sanitaire (petite pièce) et de descendre sous la minute pour les pièces de platerie en vaisselle.



Les avantages de ce procédé sont une amélioration du rendement et de la qualité, ainsi qu'un minimum d'encombrement. Les inconvénients sont la nécessité de grandes séries pour rentabiliser le coût de l'installation et des moules, et des contraintes de formes qui imposent des pièces qui doivent pouvoir sortir de moules en deux parties. La mise en place de sous-pièces et des plans de joint qu'elle engendre, étant peu compatible avec les pressions utilisées.

Coulage haute pression

Moule de plat carré avec languette de remplissage pour éviter la tache d'impact de la barbotine.



Moule en trois parties pour tasse avec anse.



AVANTAGES :

- Une seule manipulation de moule par modèle.
- Suppression des contraintes climatiques (liées au séchage du moule).
- Gain de place (atelier de coulage, de coulage de moule, de stockage de moules).
- Économie d'énergie (pas de séchage de moule avant et pendant le coulage).
- Qualité des pièces plus homogène et plus constante.
- Temps de prise rapide par réchauffement de la barbotine dans une cuve.
- Moins de retrait.
- Tesson plus ferme.
- Formation du personnel plus rapide qu'en coulage traditionnel.
- Changement rapide de série.
- Durée de vie des moules plus importante.
- Rentabilité par opérateur.
- Moins de finition sur les pièces.

INCONVÉNIENTS :

- Coût de la presse (de 150000 euros à 500000 euros).
- Coût du moule (par sous-traitance de 3000 euros à 10000 euros).
- Pas de correction de moule, mais réparation possible et délicate .
- Technologie des presses nécessitant un service de maintenance.
- Complexité de conception des modèles et des moules .
- Pâte très plastique à éviter (argile grasse).
- Stockage des moules dans l'eau javellisée.
- Obligation de grande série.

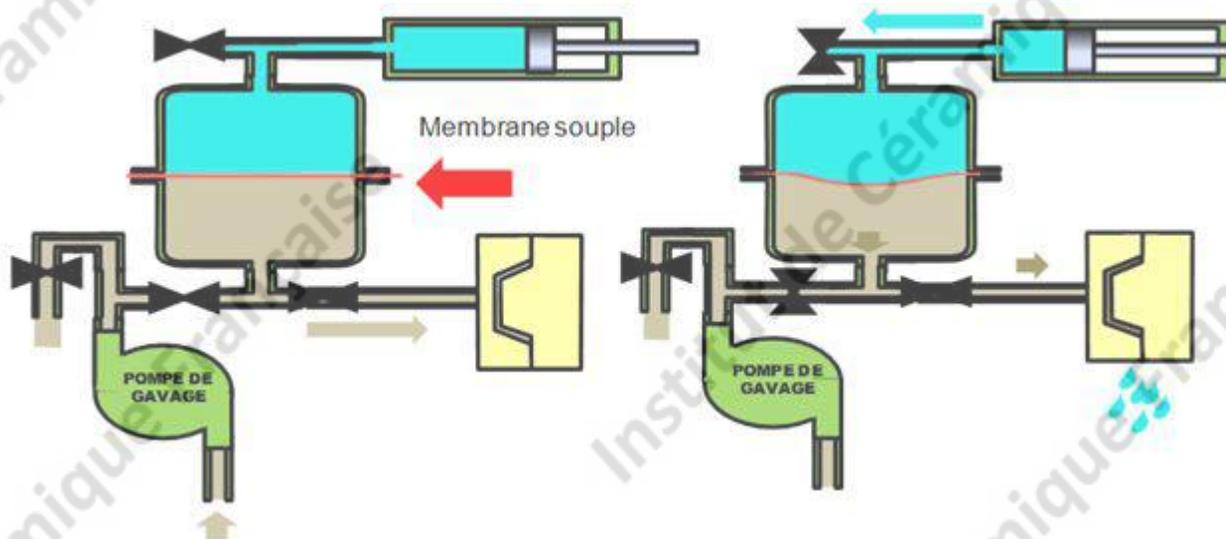
PRESSE DE COULAGE SOUS PRESSION



Principe de fonctionnement de la machine CSP

Le système de génération de pression de barbotine comprend :

- Un système diviseur de pression et multiplicateur de débit commandé par un régulateur de pression proportionnel à une consigne délivrée par le programmeur de cycles et travaillant en boucle fermée avec un capteur de pression de barbotine.
- Un accumulateur de transfert qui contient la barbotine de coulage à l'intérieur d'une vessie (boudruche). La capacité de la boudruche couvre généralement toute la gamme des produits coulables dans la capacité de moulage de la machine.
- Un ensemble de vannes qui distribue la barbotine soit vers le moule venant de l'accumulateur, soit de l'alimentation vers l'accumulateur pour son remplissage.



EN PRODUCTION :

Pour diminuer le temps de prise, favoriser le raffermissment, fluidifier la barbotine, celle-ci passe par un réchauffeur. Ce réchauffeur est constitué d'un serpentin réchauffant une cuve ou une canalisation de barbotine.

Naturellement, plus le réchauffeur est proche du point d'utilisation de la barbotine, moins il y a de déperditions calorifiques.

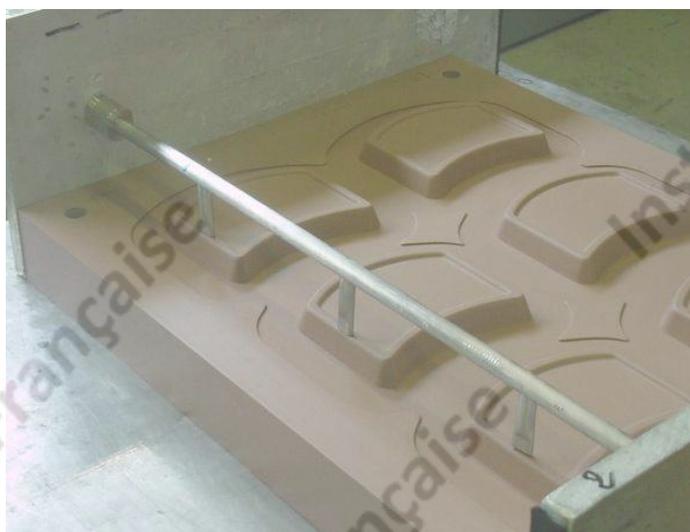
Domaine d'utilisation de la barbotine : 45°C. Cette consigne est à majorer de 5% par mètre d'éloignement du point d'utilisation.

La barbotine alimente une boudruche en caoutchouc qui sera comprimée par de l'eau mise sous pression par un piston hydraulique à la demande du volume de remplissage.

La barbotine arrive au moule par un tuyau flexible résistant à des pressions importantes de l'ordre de 12 à 40 bars.

Le moule est alimenté en barbotine par un tuyau en inox noyé dans la partie du moule et pincé à son extrémité constituant le point d'injection.

Ce point d'injection pourra être placé sur ou contre l'intérieur du pied de la pièce, à 1cm de la grande extrémité pour une pièce à fond plat, au centre du fond pour une pièce à totale symétrie ou de révolution.



Remarques sur la pression de barbotine et la pression de fermeture.

Lors de l'établissement d'un programme, la courbe de fabrication est réalisée en renseignant chaque segment de progression par une pression et un temps pour l'atteindre.

Des paliers sont parfois nécessaires en cours de fabrication, mais surtout sur la fin pour finaliser le produit.

La pression de barbotine ne doit pas être nécessairement la pression maximum. Ce sont les résultats qualitatifs et en terme de productivité que le choix sera fait.

Une pression de barbotine maximum entraîne une pression de fermeture importante et risque de nuire à la bonne qualité de la pièce.

Plus les pressions de fermeture sont élevées, plus les moules risquent de souffrir mécaniquement et leur durée de vie de diminuer.

Mieux qu'une pression maximum de barbotine pour obtenir une pièce, il convient de travailler à la fois sur la pression et la durée en même temps.

Ce ne sont ni la surface totale du moule ni la surface de la portée «d'étanchéité» de la partie creuse du moule qu'il faut lier à la pression de fermeture. La valeur qu'il est nécessaire de mettre en relation avec la pression est la surface projetée de la pièce vue du fond.

Dans le cas d'une pièce dont les bords sont droits, on utilisera la dimension du fond.

Si à l'inverse, pour fabriquer une assiette, la dimension du fond et de l'aile seront pris en compte .

Démoulage des pièces.

En fin de cycle, le choix de la position de la pièce au démoulage (sur pied ou sur bord) étant fait , l'air arrive dans le moule fixe pour que la pièce reste collée sur la partie mobile. La pièce est maintenue par un système d'aspiration manuel (plaque de silicone perforée ou ventouse) . L'air est envoyé dans le moule mobile et pousse l'eau contenue dans le moule. Ainsi l'eau décolle la pièce qui est retenue aspirée par les ventouses. Après coupure de la dépression, la pièce est posée sur un support, le surplus de pâte de l'alimentation est coupé puis lissé à l'éponge .



Quant au nombre de ventouses :

Il faut éviter dans le cas de grandes pièces un nombre trop faible de ventouses. Cela peut entraîner une déformation et oblige à augmenter la dépression sur la ventouse. Cette dépression provoquera une succion de la peau de coulage voire un arrachement de la matière.

Par ailleurs, une trop forte dépression sur la ventouse provoquera une marque sur la pièce qu'il faudra finir à l'éponge. Il est donc nécessaire de multiplier le nombre de ventouses ou d'avoir une plaque d'élastomère de bonne rigidité épousant la forme du fond de la pièce, percée en plusieurs endroits pour assurer une aspiration homogène.

Pour les pièces de 500 à 1000 cm², il faut compter 15 cm² de ventouse, diamètre 43 pour 100 cm² de pièce. Pour les pièces plus petites ou étroites, inférieures à 500 cm², on compte le même rapport de 15 cm² de ventouse par 100 cm² de pièce, mais avec des ventouses de 8 à 9 cm² soit 33 de diamètre.

Plus la disposition des ventouses épousé la forme du fond de la pièce, moins celles-ci risquent de se déformer, ce qui facilitera le travail de l'opérateur pour les phases de découpe et finition de la « carotte » de coulage au point d'injection.

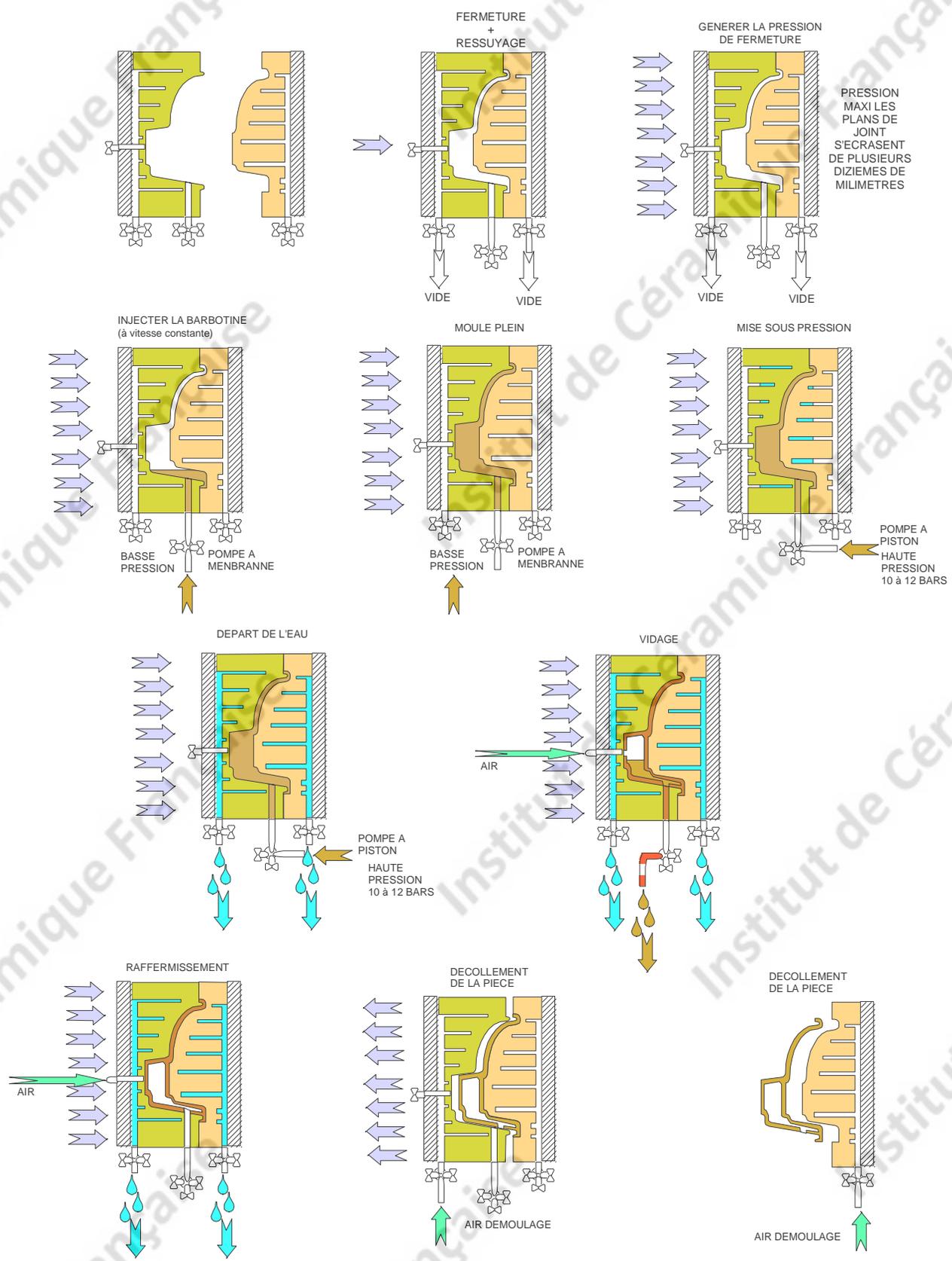
EMPREINTES MALES ET FEMELLES D'UN MOULE MULTIPLE

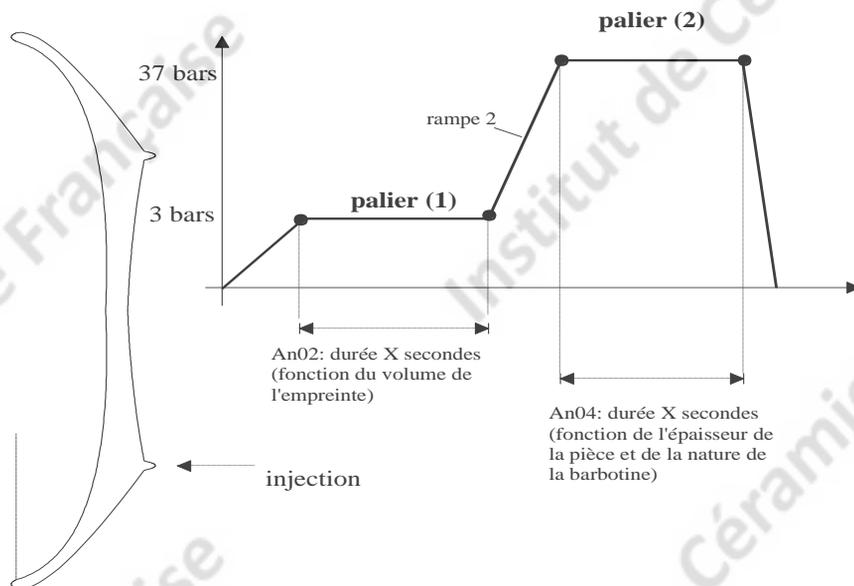


VENTOUSE POUR MOULE À EMPREINTES MULTIPLES



Institut de Céramique Française





- Le palier (1) de coulage permet de remplir complètement le moule, la migration de l'eau commence à travers du moule et une première « peau » se développe sur toute sa surface .(quelques 1/10) Créant ainsi une "toile filtrante".
- La pression d'injection peut alors commencer à augmenter selon le programme établi sur le graphique, rampe (2). (Attention une montée trop rapide de cette rampe à tendance à écarter trop vite le moule.)
- Lors de cette phase de montée en pression les particules en suspension s'agglutinent alors sur la première peau augmentant ainsi son épaisseur.
- La pression finale correspond au degré de cohésion en cru de la pièce.
- La durée du palier (2) permet la filtration jusqu'au cœur de la pièce.

Nota:

Le temps de maintien en pression du dernier palier ne doit pas être trop long, "productivité moindre" et reste dépendant des caractéristiques de la pâte.

La pression ne doit pas être trop élevée, car il risque de se produire un phénomène de feuilletage: Le film créé au cœur de la pièce ne peut se "souder" faute d'humidité...



SÉCHAGE

Quel que soit le mode de façonnage utilisé, la pâte céramique contient une quantité d'eau qu'il est nécessaire d'évacuer avant la cuisson afin d'éviter les fentes ou la casse des pièces, dues à un échauffement trop rapide.

EFFETS DU SÉCHAGE

Durcissement :

Au fur et à mesure que les pâtes perdent de l'eau, leur plasticité diminue et elles deviennent rigides, ce qui permet leur manipulation.

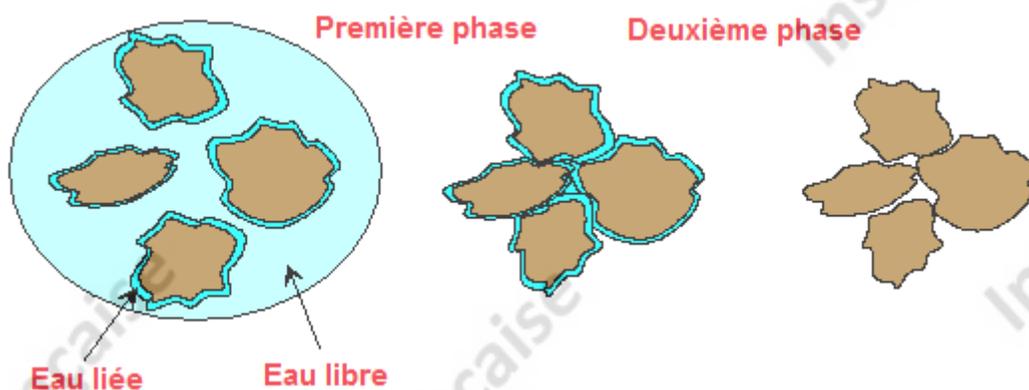
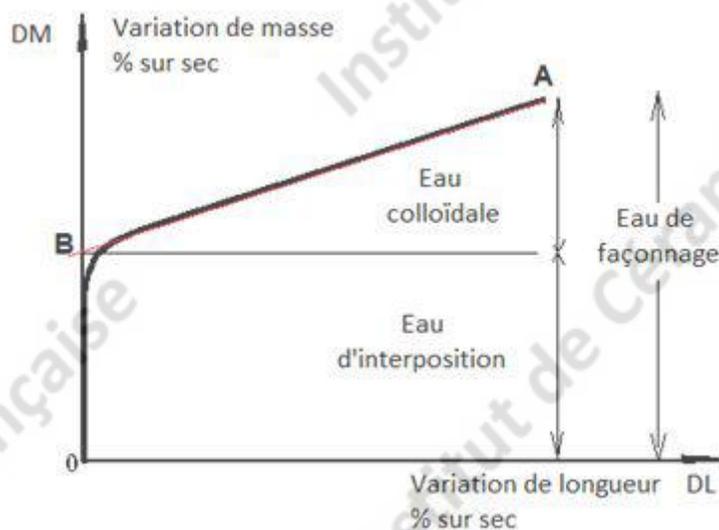
Retraits et perte de poids

L'eau qui s'évapore provoque une perte de masse et une diminution de volume. Il y a deux phases :

Le retrait est proportionnel à la masse d'eau éliminée : c'est le départ de l'eau libre (colloïdale).

L'eau continue de s'évaporer sans retrait de la pâte, celle-ci devient poreuse et le volume des pores correspond au volume d'eau éliminé dans cette phase : c'est le départ de l'eau d'interposition ou eau liée.

Ces différentes phases sont mises en évidence par la «courbe de Bigot». C'est dans la première phase que peuvent se produire les accidents tels que déformations, fentes, gerces...

Courbe de BIGOT

LES DIFFÉRENTS MODES DE SÉCHAGE

SÉCHAGE PAR CONVECTION : l'air sert d'agent de transport thermique et à la vapeur d'eau. Il lèche les pièces en transmettant sa chaleur pour permettre la migration de l'eau à travers la pâte et par diffusion, capte la vapeur d'eau issue de celle-ci.

SÉCHAGE PAR CONDUCTION : le produit à sécher se trouve sur des surfaces chauffantes, la chaleur est transmise par contact direct, il faut effectuer le transport de la vapeur par convection.

SÉCHAGE PAR RAYONNEMENT : l'air ne participe pas au transport de la chaleur, celle-ci est transmise par rayonnement lumineux (le plus souvent à l'aide de résistances électriques chauffées au rouge) ou par des parois chaudes (plaques réfractaires chauffées à l'arrière par des brûleurs par exemple.) Le transport de la vapeur doit de nouveau être effectué par un brassage de l'air et une évacuation de celui-ci.

SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES : la chaleur est directement appliquée au cœur de la pièce par les pertes diélectriques sous des ondes hautes fréquences, qui provoquent l'élévation de température.

MÉCANISME DU SÉCHAGE

L'évaporation de l'eau se fait à la surface de la pièce.

Il y a migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur du produit.

Pour éviter des différences de retrait trop rapide dans la masse des pièces pendant la première phase du séchage, il faut :

- ralentir l'évaporation superficielle de l'eau.
- faciliter le cheminement de l'eau à travers les pièces.

FACTEURS INFLUANT SUR LA VITESSE D'ÉVAPORATION SUPERFICIELLE

Température et humidité de l'air :

La quantité d'eau qui peut être absorbée par un mètre cube d'air croît rapidement avec la température.

Elle n'est pas infinie et dépend également de l'humidité de l'air au départ.

Si l'air envoyé dans le séchoir est déjà saturé, par temps d'orage par exemple, celui-ci ne pourra absorber qu'une très faible quantité d'eau.

Renouvellement de l'air séchant :

Lorsque l'air envoyé dans le séchoir est saturé en eau, il faut l'évacuer et introduire de l'air sec afin de poursuivre le séchage.

Ventilation :

Afin que toutes les capacités de l'air séchant soient utilisées et que le maximum de surface d'une pièce soit en contact avec celui-ci, il est nécessaire de ventiler pour assurer une circulation et un brassage le plus homogène possible.

Nature de la surface à sécher :

Une surface rugueuse développe une plus grande surface de séchage qu'une surface lisse.

FACTEURS INFLUANT SUR LE DÉPLACEMENT DE L'EAU DANS LA PIÈCE

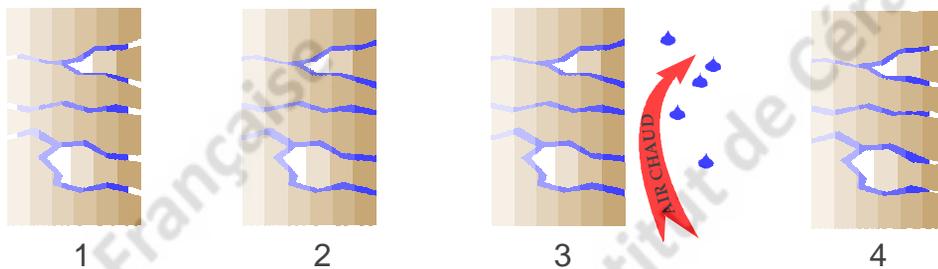
La température du produit à sécher : comme tout liquide, l'eau chaude est plus fluide que l'eau froide et de ce fait oppose moins de résistance à son évacuation.

L'épaisseur de la pièce.

La nature de la pâte : une pâte maigre sèche plus rapidement qu'une pâte grasse.

La technique de façonnage : suivant le mode de façonnage la texture sera plus ou moins serrée. L'étude des caractéristiques, de température et d'humidité de l'air (hygrométrie) et la connaissance du comportement de la pâte pendant les différentes phases de séchage, permettra de conduire cette étape dans les meilleures conditions de coût et de vitesse tout en préservant la qualité des produits.

PHÉNOMÈNE DE CROÛTAGE :



1) migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur de la pièce dans l'air ambiant.

2) arrivée de l'eau à la surface de la pièce, amorçage des pores.

3) passage de l'air séchant (trop chaud et trop sec) absorbant rapidement l'eau venue en surface.

4) défaut de croûtage où le départ d'eau trop rapide a provoqué le séchage et le retrait de la surface rompant ainsi l'amorçage des pores.

Le séchage est stoppé, les pièces ont une apparence sèche et risquent d'exploser lors de la cuisson.

LES SÉCHOIRS

SÉCHAGE NON RÉGULÉ

Séchage en plein air : les produits sont disposés sur des rayonnages, sous des hangars à l'abri des intempéries et des vents trop secs.

Séchage en atelier : les pièces sont disposées sur des rayonnages dans les ateliers et séchées par l'air chaud issu de générateurs d'air chaud ou de la récupération des fours.

Séchage en chambre : les pièces sont disposées sur des chariots étagères à l'intérieur d'enceintes chauffées et parfois munies de brasseurs d'air.

SÉCHAGE RÉGULÉ

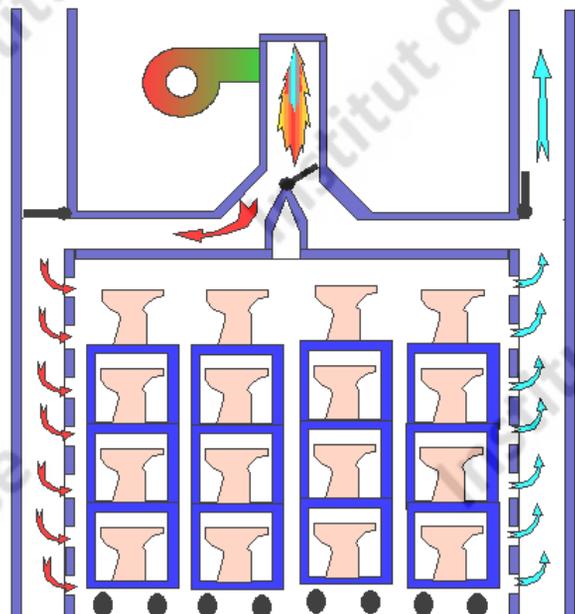
Séchoirs en chambres :

Ils sont généralement constitués de cellules indépendantes isolées thermiquement.

L'arrivée d'air chaud a le plus souvent comme origine un brûleur à gaz couplé à un ventilateur permettant de réguler la température et la ventilation.

L'humidité est régulée par simple extraction de l'air du séchoir à l'aide d'un programmeur agissant sur l'ouverture et la fermeture d'un registre situé dans la cheminée d'extraction.

Certains séchoirs haut de gamme sont munis de générateurs de vapeur afin de régler l'humidité plus précisément.

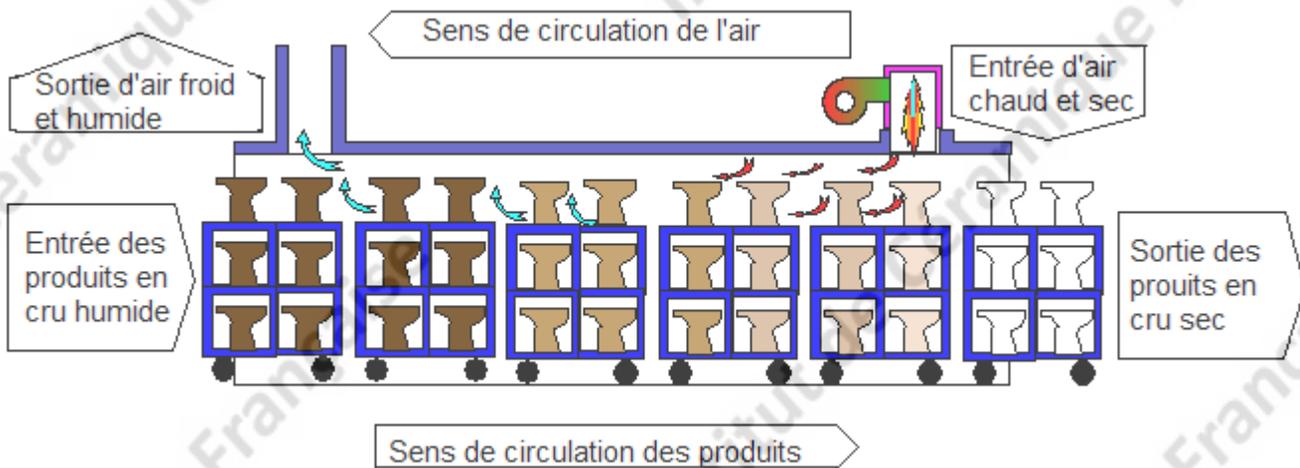


Séchoirs tunnel :

Des wagonnets chargés de pièces à sécher circulent dans un tunnel à contre-courant d'un flux d'air au départ chaud et sec.

Au fur et à mesure de son avancée sur les produits, la température de cet air baisse et son humidité augmente, il arrive, ainsi sur les produits entrants, sans risque de séchage trop brutal. Durant son parcours, celui-ci peut être récupéré et réchauffé pour améliorer son pouvoir séchant.

Ces séchoirs sont souvent couplés aux fours tunnel permettant ainsi une récupération de l'énergie des fumées.

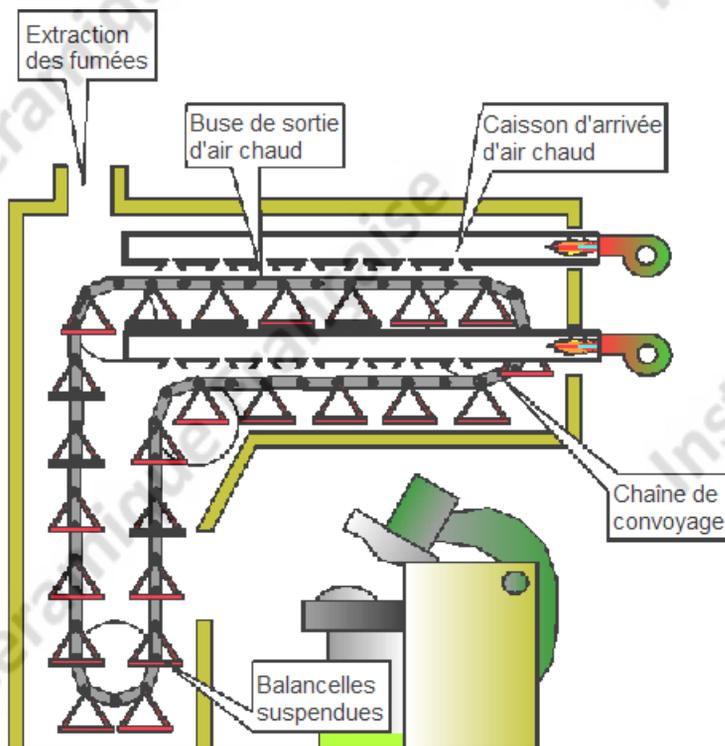


Séchoirs à balancelles :

Ils sont composés d'une enceinte isolée, dans laquelle circulent des balancelles mues par un système de chaîne formée en boucle.

Cette méthode permet de desservir des machines du type calibreuse roller où les moules subissent le séchage avec les pièces fraîchement calibrées.

Ceci permet aux machines de production de fonctionner avec un nombre de moules très inférieur à celui que nécessiterait un séchage en atelier.



Séchoir micro-ondes (ou mixte : thermique + micro-ondes)

La plupart des séchoirs utilisent l'énergie thermique pour évacuer l'eau contenue dans les pièces par l'intermédiaire d'un air chaud comme agent caloporteur.

Le séchage par micro-ondes utilise l'énergie hautes fréquences permettant d'atteindre instantanément le cœur des pièces.

Les molécules d'eau s'échaufferont et commenceront à migrer vers l'extérieur.

Ce système est souvent couplé à un générateur d'air chaud classique, car il est difficile à régler lors de la première phase du séchage.

CONTRÔLE DU SÉCHAGE

L'HYGROMÉTRIE

Cette étude permet de déterminer la quantité d'eau (humidité) contenue dans l'atmosphère.

En règle générale, un air est caractérisé par :

- SA TEMPÉRATURE,
- SON HUMIDITÉ,
- SA VITESSE

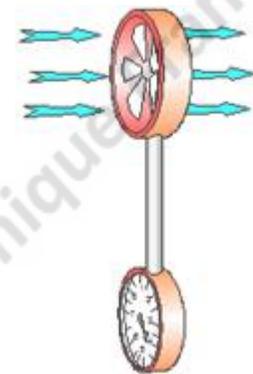
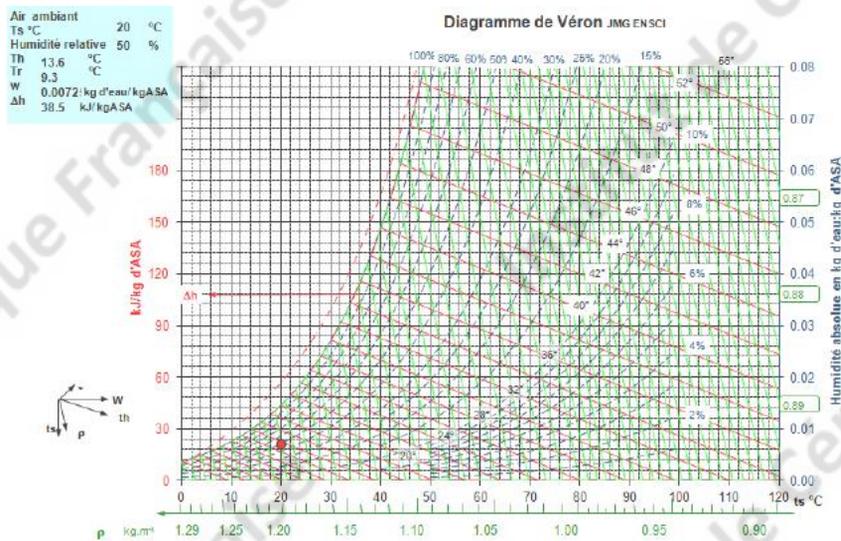
Pour déterminer ces caractéristiques, on utilise des thermomètres, des psychromètres, des hygromètres et des manomètres.

Ces données liées à l'utilisation d'un **diagramme hydrographique** permettent de définir les caractéristiques de l'air et de ce fait, de maîtriser la conduite du séchage.

Il s'agira de respecter les deux phases :

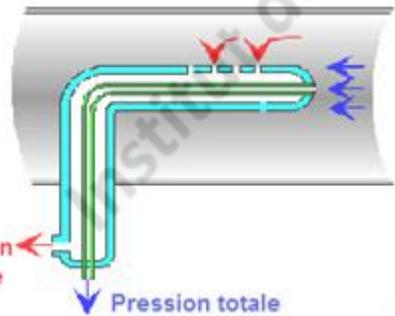
1^{re} phase : les pièces sont chauffées et l'eau colloïdale s'évapore par ventilation d'air tiède et humide.

2^e phase : l'eau d'interposition s'évapore rapidement par ventilation d'air chaud et sec.



Anémomètre

TUBE DE PITOT



$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{Pd}{\rho_g}}$$

V = vitesse du gaz ($m \cdot s^{-1}$)

$g = 9,81 s^{-2}$

ρ_g = masse volumique du gaz ($kg \cdot m^{-3}$), à la température de la mesure.

Pd = pression dynamique (Pa)

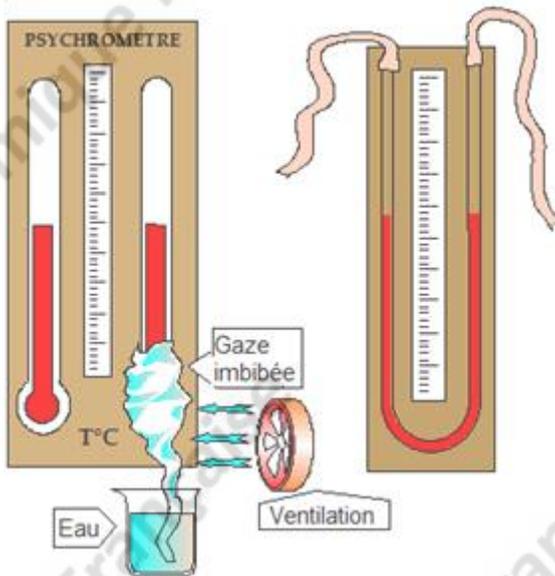
La pression au manomètre

$Pd = \rho_{eau} \cdot g \cdot h$, h = hauteur de la colonne d'eau.

L'appellation mm CE, millimètre colonne d'eau est souvent utilisée, car $\rho_{eau} = 1000$, d'où le formule avec h en mm.

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h \text{ mmCE}) \cdot \frac{\rho_{eau}}{\rho_g}}$$

APPAREILS DE CONTROLES



Psychromètre

Manomètre

MESURE DE L'HUMIDITÉ DES PRODUITS

Plusieurs appareils permettent de faire cette mesure directement comme les thermobalances où un échantillon est en même temps pesé et séché à l'aide d'une lampe infrarouge ou une résistance. Lorsque la balance ne perçoit plus de variation de perte de masse, l'échantillon est considéré comme sec. La masse sèche est enregistrée et le % d'eau éliminée est affiché.

Pour la détermination de l'humidité des produits sur le terrain loin de toute source électrique, il existe un appareil fonctionnant par réaction chimique de l'eau avec du carbure de calcium.

Principe du speedy :

Cet appareil se présente sous la forme d'une bouteille métallique pourvue d'une fermeture étanche et d'un capteur de pression.

Une quantité déterminée de matière à tester est introduite dans la bouteille (balance à fléau fournie) et le bouchon est rempli de carbure d'acétylène.

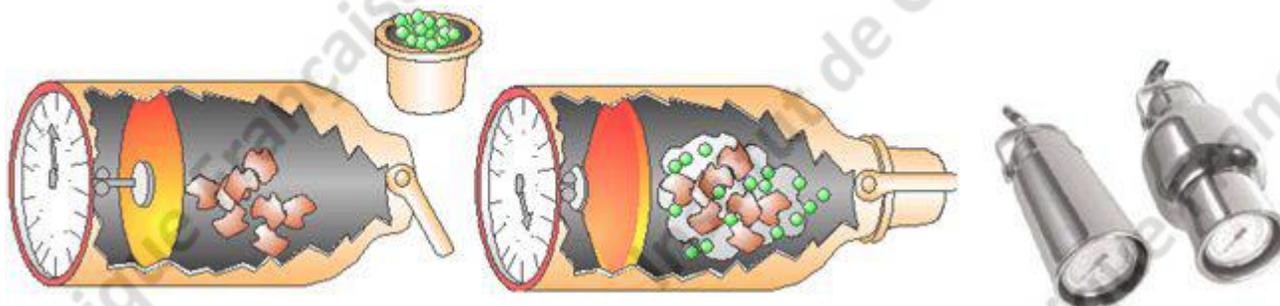
La bouteille est refermée en position horizontale de telle façon que la poudre et le réactif ne puissent être en contact et commencer à réagir avant la fermeture complète de l'appareil.

L'ensemble est agité.

La réaction chimique de l'eau contenue dans le produit en présence de carbure de calcium génère un volume de gaz (acétylène).

Ce gaz provoque une augmentation de pression à l'intérieur du dispositif.

La variation de pression est directement traduite en % d'humidité sur le cadran à l'arrière du speedy.



MESURE DES RETRAITS ET CONDUITE DU SÉCHAGE :

C'est pendant la première phase : phase de retrait (départ de l'eau libre) que le plus grand nombre de fentes ou de déformations risquent d'apparaître.

Le plus dangereux n'étant pas le retrait en tant que tel, mais les différences de retraits (ou contraintes) existant au sein d'une même pièce.

Ces hétérogénéités de retraits peuvent venir notamment :

- des variations d'épaisseurs.
- Des parties en revidé plus humides que celles entre deux plâtres.
- Des collages de parties n'ayant pas exactement la même humidité.
- De la façon dont la pièce repose sur son support de séchage (frottements).
- De la manière dont l'air passe sur les pièces :
 - aérodynamisme des formes,
 - division de l'air de séchage.

Chaque type de pâte possédant une résistance aux contraintes d'hétérogénéité de retrait différente, seule la détermination expérimentale de la cinétique de séchage permettra de déterminer comment le conduire.

Appareils permettant de déterminer les différentes phases de retrait :

Rétractomètre mesurant le retrait d'un échantillon de pâte en fonction du temps.

Barelattographe mesurant les variations de perte de masse en fonction du retrait.



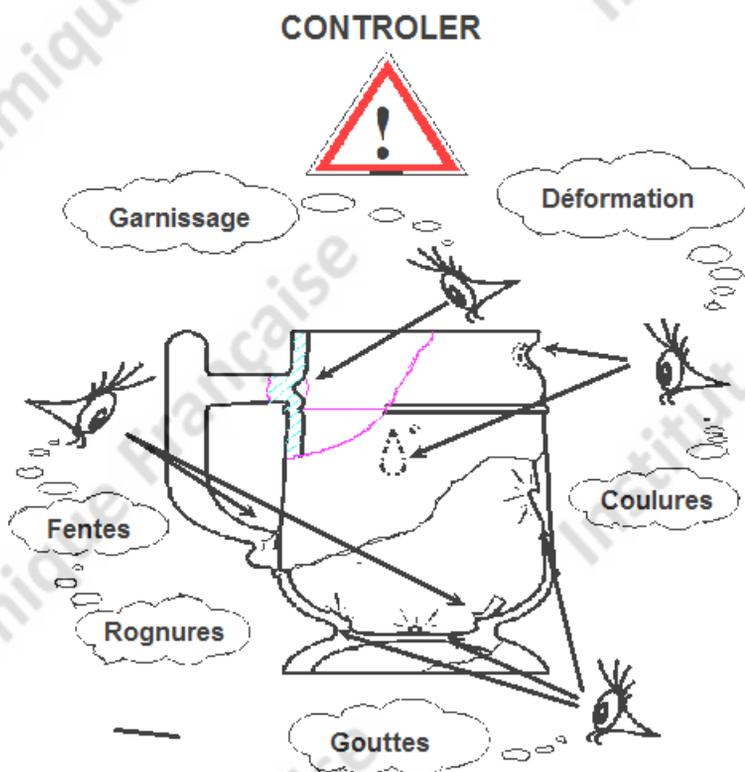
Barelattographe

FINITION

La finition permet de donner à la pièce sa forme finale, exempte de tout défaut. La plupart des « défauts » sont en fait les marques laissées par les différents matériels et outillages qui ont permis sa fabrication. C'est notamment le cas des coutures de coulage qui correspondent au plan de joint des moules, des bavures au bord des assiettes qui correspondent au raccord tête/moule, et de toutes les marques qu'une pièce non raffermit peut subir.

La plupart du temps, la finition est effectuée manuellement, compte tenu de la complexité des formes que l'on trouve dans le domaine de la céramique.

Cependant, pour des pièces simples comme les assiettes, on a pu mettre au point des mécanismes entièrement automatisés.



FINITION DES COUTURES SUR LES SURFACES ARRONDIES

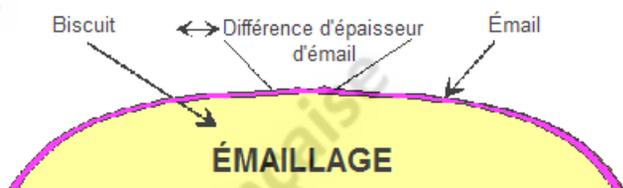


FINITION DES COUTURES

Épaisseur de la pièce ↔ Différence de texture ↔ Peau de coulage



Épaisseur de la pièce ↔ Différence de texture ↔ Peau de coulage



ÉMAUX - ÉMAILLAGE

CHIMIE RAPPEL

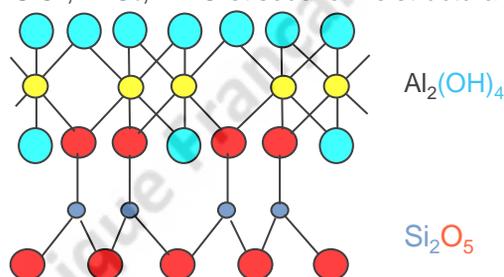
ÉLÉMENTS : Les matériaux sont composés d'éléments classés par grande famille, les différentes familles auront des qualités et des caractéristiques propres, chaque élément est représenté par un symbole composé d'une ou deux lettres.

ATOME : l'atome est la plus petite partie composant une matière

MASSE MOLAIRE D'UN ÉLÉMENT : par convention, le symbole de chaque élément est suivi d'un nombre représentant sa masse molaire (une mole est un groupe d'atomes ou de molécules composé de 6.022×10^{23} atomes ou molécules), la masse molaire est la masse de cette mole.

CORPS PURS : un corps pur est composé d'un ou plusieurs éléments, les matériaux composés d'un seul élément se nomment les corps purs simples (exemple l'oxygène O_2 composé de deux atomes d'oxygène), les matériaux composés de plusieurs éléments se nomment des corps purs composés (exemple l'oxyde de silicium, la silice est composée d'un atome de silicium et de deux atomes d'oxygène SiO_2)

EXEMPLE : la kaolinite est un corps pur composé, sa formule de la kaolinite, sous forme d'oxyde, s'écrira $2SiO_2$, Al_2O_3 , $2H_2O$ et sous forme structurale $Al_2(OH)_4 \cdot Si_2O_5$



MÉLANGE : un mélange est un assemblage de molécules de corps purs simples ou composés différents, exemple la porcelaine est un mélange de : silice, feldspath, kaolin.

FORMULE MOLAIRE DE LA KAOLINITE $2SiO_2$, Al_2O_3 , $2H_2O$

La masse molaire de la kaolinite sera égale à la somme de la masse molaire de ses composants :
D'après les tableaux de masses molaires:

Masse de l'oxygène dans la silice = 16×2 atomes = **32 grammes**
Masse du silicium dans la silice = 28×1 atome = **28 grammes**
Masse totale d'une mole de silice = $32 + 28$ = **60 grammes**
Masse totale de silice = 60×2 moles = **120 grammes**

Masse de l'oxygène dans l'alumine = 16×3 atomes = **48 grammes**
Masse de l'aluminium dans l'alumine = 27×2 atomes = **54 grammes**
Masse totale mole d'alumine = $48 + 54$ = **102 grammes**
Masse total d'alumine = 102×1 mole = **102 grammes**

Masse de l'oxygène dans l'eau = 16×1 atomes = **16 grammes**
Masse de l'hydrogène dans l'eau = 1×2 atomes = **2 grammes**
Masse totale d'une mole d'eau = $16 + 2$ = **18 grammes**
Masse totale d'eau = 18×2 moles = **36 grammes**

Masse totale d'une mole de kaolinite = $120 + 102 + 36$ = **258 grammes**

Compositions centésimales

kaolinite	% Molaire	% Massique
SiO_2	40.00	46.54
Al_2O_3	20.00	39.50
H_2O	40.00	13.96

L'ANALYSE CHIMIQUE: C'est la masse de chaque corps composé qui sera représenté sous forme de pourcentage de la masse totale.

Exemple : dans le cas de la syénite, la formule molaire est la suivante :



Le début consiste à calculer la masse de chaque mole du composé.

		A	B	A * B	C	A*B*C
Nom	Symbole chimique	Masse atomique	N atomes par mole	Masses	N moles	Masses totales
8 SiO₂						
Oxygène	O	16	2	32		
Silicium	Si	28	1	28		
Silice	SiO₂			60	8	480
4 Al₂O₃						
Oxygène	O	16	3	48		
Aluminium	Al	27	2	54		
Alumine	Al₂O₃			102	4	408
3 Na₂O						
Oxygène	O	16	1	16		
Sodium	Na	23	2	46		
Soude	Na₂O			62	3	186
K₂O						
Oxygène	O	16	1	16		
Potassium	K	39	2	78		
Potasse	K₂O			94	1	94
Calcul de la masse totale de chaque élément						
Masse SiO ₂						480
Masse Al ₂ O ₃						408
Masse Na ₂ O						186
Masse K ₂ O						94
Masse totale						1168
Calcul du % de chaque élément par rapport à la masse totale (1168 g)						
% = masse de chaque élément divisée par 1168 et multipliée par 100						
% SiO ₂						41 %
% Al ₂ O ₃						35 %
% Na ₂ O						16 %
% K ₂ O						8 %
Total						100%

LE POURCENTAGE MOLAIRES: C'est simplement le % de chaque élément en fonction de son nombre de moles.

8SiO₂, 4 Al₂O₃, 3Na₂O, K₂O

Calcul du nombre de moles de chaque élément	
N moles SiO ₂	8
N moles Al ₂ O ₃	4
N moles Na ₂ O	3
N moles K ₂ O	1
N moles totale	16
Calcul du % de chaque élément par rapport au nombre totale de moles (16)	
% = n moles de chaque élément divisée par 16 et multipliée par 100	
% SiO ₂	50 %
% Al ₂ O ₃	25 %
% Na ₂ O	19 %
% K ₂ O	6 %
Total	100%

Cette représentation servira notamment au calcul des coefficients de dilution.

REPRÉSENTATION MOLAIRES dite STœCHIOMÉTRIQUE . Il s'agit dans cette méthode de transcrire la formule dans une écriture qui rassemblera à gauche les éléments basiques (fondant soude et potasse) au centre les éléments amphotères comme l'alumine, et à droite les éléments dits acides comme la silice.

8SiO₂, 4 Al₂O₃, 3Na₂O, K₂O devient donc :

3Na₂O 4 Al₂O₃ 8SiO₂
K₂O

Afin de pouvoir comparer différentes formules entre elles, il a été admis que ce n'est pas la quantité totale qui serait comme dans les précédentes méthodes la référence , mais que ce serait la somme des bases à condition d'être ramenée à 1

	Bases 3Na ₂ O 1 K ₂ O	Amphotères 4 Al ₂ O ₃	Acides 8SiO ₂
Total	4	4	8
Ramené avec la somme des bases =1	1	1	2

La représentation de la formule dite de Seger devient donc

0.75 Na₂O Al₂O₃ 2SiO₂
0.25 K₂O

Cette représentation servira notamment au calcul d'acidité des glaçures.

Éléments chimiques

Alcalins modificateur émaux (basique)				Métaux pauvres		
Alcalinoterreux modificateur émaux (basique)				Non-métaux formateur de réseau		
Métaux de transition				Métaalloïdes		
Lanthanides				Halogènes		
Actinides				Gaz rares		
Numéro atomique	Nom	Symbole	Masse atomique g	Masse volumique kg / m3	Température de fusion °C	Température d'ébullition °C
1	Hydrogène	H	1.00794	0.08988	-259.1	-252.87
2	Hélium	He	4.002602	0.1785	-272.2	-268.934
3	Lithium	Li	6.941	535	180.5	1341.85
4	Béryllium	Be	9.012182	1844	1287.0	2469
5	Bore	B	10.811	2600	2076.0	3927
6	Carbone	C	12.0107	2267	3527.0	4027
7	Azote	N	14.00674	1.2506	-210.1	-195.79
8	Oxygène	O	15.9994	1.429	-218.3	-182.95
9	Fluor	F	18.9984032	1.696	-219.6	-188.12
10	Néon	Ne	20.1797	0.8999	-248.6	-246.08
11	Sodium	Na	22.98977	968	97.7	882.95
12	Magnésium	Mg	24.305	1738	648.8	1090
13	Aluminium	Al	26.9815386	2702	658.9	2449.85
14	Silicium	Si	28.0855	2329	1412.0	3241
15	Phosphore	P	30.973761	1823	44.2	276.9
16	Soufre	S	32.065	1960	115.2	444.674
17	Chlore	Cl	35.453	1560	-101.5	-34.05
18	Argon	Ar	39.948	1.7837	-189.4	-185.8
19	Potassium	K	39.0983	856	63.4	759
20	Calcium	Ca	40.078	1540	842.0	1484
21	Scandium	Sc	44.95591	2985	1541.0	2836
22	Titane	Ti	47.867	4507	1669.9	3289
23	Vanadium	V	50.9415	6110	1910.0	3407
24	Chrome	Cr	51.9961	7140	1907.0	2665
25	Manganèse	Mn	54.938045	7440	1244.0	2061
26	Fer	Fe	55.845	7874	1538.0	2861
27	Cobalt	Co	58.9332	8900	1495.0	2927
28	Nickel	Ni	58.6934	8908	1455.0	2913
29	Cuivre	Cu	63.546	8960	1084.6	2563
30	Zinc	Zn	65.409	7135	419.5	906.85
31	Gallium	Ga	69.723	5904	29.8	2204
32	Germanium	Ge	72.64	5323	938.3	2834
33	Arsenic	As	74.9216	5727	816.9	614
34	Sélénium	Se	78.96	4280	220.5	685
35	Brome	Br	79.904	3103	-7.3	58.78
36	Krypton	Kr	83.798	3.733	-157.4	-153.22
37	Rubidium	Rb	85.4678	1525	39.3	688
38	Strontium	Sr	87.62	2630	768.0	1377
39	Yttrium	Y	88.90585	4472	1526.0	3336
40	Zirconium	Zr	91.224	6511	1852.0	4409
41	Niobium	Nb	92.90638	8570	2477.0	4744
42	Molybdène	Mo	95.94	10220	2617.0	4639
43	Technétium	Tc	97.9072	11500	2157.0	4265

Numéro atomique	Nom	Symbole	Masse atomique g	Masse volumique kg / m ³	Température de fusion °C	Température d'ébullition °C
44	Ruthénium	Ru	101.07	12370	2334.0	4151
45	Rhodium	Rh	102.9055	12450	1964.0	3695
46	Palladium	Pd	106.42	12023	1551.9	2963
47	Argent	Ag	107.8682	10491	961.9	2162
48	Cadmium	Cd	112.411	8642	321.1	766.85
49	Indium	In	114.818	7286	156.6	2072
50	Etain	Sn	118.71	7290	231.9	2623
51	Antimoine	Sb	121.76	6681	630.6	1587
52	Tellure	Te	127.6	6236	449.5	988
53	Iode	I	126.90447	4940	113.7	184.4
54	Xénon	Xe	131.293	2950	-111.8	-108.11
55	Césium	Cs	132.90545	1878.5	28.4	669.3
56	Baryum	Ba	137.327	3660	725.0	1897
57	Lanthane	La	138.90547	6166	918.0	3464
58	Cérium	Ce	140.116	6689	795.0	3426
59	Praséodyme	Pr	140.90765	6773	931.0	3512
60	Néodyme	Nd	144.242	7010	1024.0	3074
61	Prométhium	Pm	144.9127	7264	1042.0	3080
62	Samarium	Sm	150.36	7540	1072.0	1794
63	Europium	Eu	151.964	5243.4	826.0	1596
64	Gadolinium	Gd	157.25	7900.4	1313.0	3250
65	Terbium	Tb	158.92535	8229.4	1356.0	3230
66	Dysprosium	Dy	162.5	8551	1409.0	2567
67	Holmium	Ho	164.93032	8794.7	1461.0	2695
68	Erbium	Er	167.259	9066	1597.0	2868
69	Thulium	Tm	168.93421	9320.8	1545.0	1944
70	Ytterbium	Yb	173.04	6965.4	824.0	1196
71	Lutétium	Lu	174.967	9840.4	1652.0	3402
72	Hafnium	Hf	178.49	13310	2233.0	4603
73	Tantale	Ta	180.94788	16450	2996.0	5458
74	Tungstène	W	183.84	19250	3407.0	5555
75	Rhénium	Re	186.207	21020	3185.0	5596
76	Osmium	Os	190.23	22610	3027.0	5012
77	Iridium	Ir	192.217	22650	2443.0	4428
78	Platine	Pt	195.084	21450	1768.3	3827
79	Or	Au	196.966569	19320	1064.4	2856
80	Mercure	Hg	200.59	13546	-38.8	356.62
81	Thallium	Tl	204.3833	11850	304.0	1473
82	Plomb	Pb	207.2	11343.7	327.5	1749
83	Bismuth	Bi	208.9804	9798	271.3	1564
84	Polonium	Po	208.9824	9196	254.0	962
85	Astate	At	209.9871	7000	302.0	337
86	Radon	Rn	222.0176	9.73	-71.0	-61.7
87	Francium	Fr	223.0197	1870	27.0	676.85
88	Radium	Ra	226.0254	5790	696.0	1736.85
89	Actinium	Ac	226.0254	10070	1430.0	3198
90	Thorium	Th	232.03806	11724	1842.0	4820
91	Protactinium	Pa	231.03588	15430	1572.0	4026.85
92	Uranium	U	238.02891	19070	1132.2	4134
93	Neptunium	Np	237.0482	20480	637.0	3999.85
94	Plutonium	Pu	244.0642	19816	639.4	3227
95	Américium	Am	243.0614	13610	1173.0	2607
96	Curium	Cm	247.0703	13511	1347.0	3109.85
97	Berkélium	Bk	247.0703	14780	996.0	2000
98	Californium	Cf	251.0796	15100	900.0	1469.85
99	Einsteinium	Es	252.083	8840	859.9	1400
100	Fermium	Fm	257.0951	8800	1527.0	1320
101	Mendélévium	Md	258.0984	9000	827.0	1270
102	Nobélium	No	259.101	9300	827.0	1200
103	Lawrencium	Lr	262.1097	9520	1627.0	1170
104	Rutherfordium	Rf	261.1088	9800		1100
105	Dubnium	Db	262.1142	10070		1020
106	Seaborgium	Sg	263.1183	10370		920
107	Bohrium	Bh	264.1247	10660		880
108	Hassium	Hs	265.13	10880		780
109	Meitnerium	Mt	268.1388	11210		730
110	Darmstadtium	Ds	281	11540		650
111	Roentgenium	Rg	280	11760		570
112	Copernicium	Cn	285	11990		530
113	Ununtrium	Uut	284	12350		480
114	Ununquadium	Uuq	289	12570		440
115	Ununpentium	Uup	288	12900		390
116	Ununhexium	Uuh	293	13130		300
117	Ununseptium	Uus	294	13270		280
118	Ununoctium	Uuo	294	13650		100

ÉMAUX GÉNÉRALITÉS

DÉFINITION : Les émaux céramiques représentent une famille de produits faisant partie d'un groupe très important de substances vitreuses appelées verres. Un certain nombre d'oxydes minéraux ont la propriété de former un verre et parmi ceux-ci la silice et l'anhydride borique. Les émaux sont des mélanges complexes de silicates et de borates.

BUT DE L'ÉMAILLAGE : Remédier à la porosité de certaines pâtes, et donner aux pièces un plus bel aspect avec une surface résistante à la rayure, susceptible de pouvoir se prêter à certains effets décoratifs et surtout se nettoyer facilement.

TERMINOLOGIE

VERNIS : Les vernis sont des glaçures fines à basse température de cuisson, ils sont souvent employés pour les terres rouges, notamment les tuiles et briques.

GLAÇURES : Le nom de glaçure est donné aux vernis transparents sur pâtes poreuses ou plus généralement à un revêtement dont la température de cuisson est inférieure à celle du support.

COUVERTES : Ce terme représente les vernis transparents dont la température de cuisson est égale à celle du support, et de nos jours aux compositions où le verre sera formé pendant la cuisson céramique du produit, ceci s'applique pratiquement à toutes les pâtes vitrifiées.

ÉMAUX : L'émail représente toutes compositions vitrifiables posées sur une matière céramique. Cette dénomination s'étend aux couleurs vitrifiables posées sur un revêtement déjà cuit, mais plus généralement ce terme englobera toute la famille des revêtements céramiques puisque toute la terminologie de la pose des revêtements céramiques sera basée sur le mot «émail ».

NATURE DE L'ÉMAIL : La nature des émaux devra être différente selon leur température de cuisson . Pour les émaux haute température (1300°C et plus), il suffira de broyer certaines matières naturelles telles que feldspaths et pegmatites.

Pour les températures inférieures, il est nécessaire d'utiliser des fondants qui sont principalement le plomb, le bore et les alcalis. L'introduction de ces fondants exige une fusion préalable de la totalité ou d'une partie de la composition afin d'obtenir des composés insolubles, ces produits s'appellent des frites. On verse dans l'eau un mélange en fusion, on obtient ainsi de petits grains à structure vitreuse faciles à broyer, cette opération se nomme l'étonnage (refroidissement rapide de verre en fusion dans un bassin d'eau froide).

Les émaux à basse température, émaux pour verre (550°C) pour aluminium (500°C) pour métaux (800°C) sont des compositions totalement frittées. Lorsque la température de cuisson s'élève, le pourcentage de fritte diminue et est remplacé progressivement par des matières naturelles : silice, feldspath...

La préparation des émaux se fait essentiellement par broyage. Le broyage s'effectue, soit à l'eau dans des broyeurs à billes de corindon et revêtement en silice ou en alumine voire même en caoutchouc, soit en sec par la même méthode, parfois à l'alcool (pour les granulométries très fines ou pour éviter l'hydrolyse de certains matériaux). Après broyage, si nécessaire, on sèche de façon à vendre les émaux prêts à l'emploi. Les émaux peuvent être : transparents ou opaques, incolores ou colorés, brillants ou mats. Les compositions peuvent varier considérablement selon la température de cuisson et selon la nature du support céramique à émailler.

Un émail est un verre formé toujours de silice et très souvent d'alumine, de chaux, de soude, de potasse ; parfois, d'opacifiant à base d'oxyde d'étain ou de zircon et de colorants.

Tout ceci parmi les composés les plus courants, les combinaisons entre tous ces éléments sont donc infinies. Cependant, ils ont chacun un rôle particulier et il est rarement possible d'obtenir simultanément toutes les qualités requises : il faut accepter certains compromis.

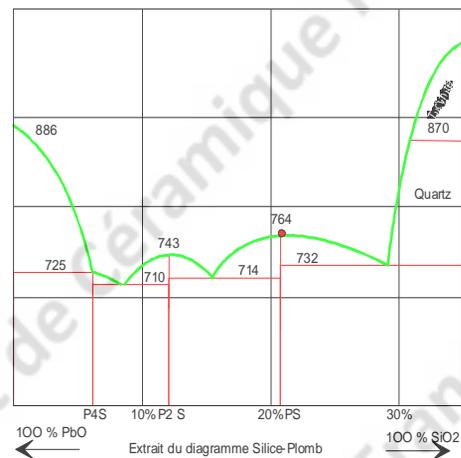
La mise en place de ces compromis se fera par le calcul de la composition de l'émail afin que celui-ci possède les qualités requises et dans un deuxième temps par l'aménagement de cette composition afin qu'elle soit facile à utiliser, et ce à un coût raisonnable.

ÉMAUX CLASSIFICATION

Classification générale : Dans le tableau ci-dessous sont données les limites des compositions molaires des différentes classes d'émaux utilisées dans l'industrie de la céramique traditionnelle en précisant :

- la nature et les proportions molaires des principaux oxydes présents dans la composition
- la terminologie
- la nature des supports
- les températures de cuisson les plus courantes

Tableau donné pour 1 mole de fondant	Oxydes			Terminologie	Support	Température de cuisson
	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	SiO ₂			
CaO Na ₂ O			2 à 4	verre	normaux	1100 - 1400 °C
PbO CaO			1 à 2	vernis	poterie	900 - 1100 °C
PbO CaO	0,1 à 0,2		1 à 2,5	vernis glaçure	faiences	900 - 1100 °C
CaO Na ₂ O K ₂ O	0,1 à 0,3	0,2 à 1,2	1,5 à 3,5	émaux glaçure	métaux faiences	800 - 850 °C 950 - 1100 °C
CaO Na ₂ O K ₂ O	0,3 à 0,5	0,1 à 0,6	2,5 à 3,5	glaçure	faiences grès-vitréous	1100 - 1250 °C
CaO Na ₂ O K ₂ O	0,4 à 0,6		3 à 6	couvertes	grès-vitréous porcelaines	1200 - 1300 °C
CaO K ₂ O	0,6 à 1,4		4,5 à 12	couvertes	vitréous porcelaines	1200 - 1450 °C



LES ÉMAUX PLOMBEUX : ce sont des silicates de plomb, ces glaçures ont pour formule $PbO, xSiO_2$.

Si on se réfère au diagramme PbO-SiO₂ ci-contre la composition de base de ces émaux est le métasilicate PbO, SiO₂ répondant à la composition centésimale suivante : 21,3% de silice, 78,7 % d'oxyde plombeux ; d'après le diagramme, ce mélange fond à 764°C ; en fait dans la pratique courante il faut atteindre 900°C pour obtenir un verre parfaitement fondu susceptible d'être coulé.

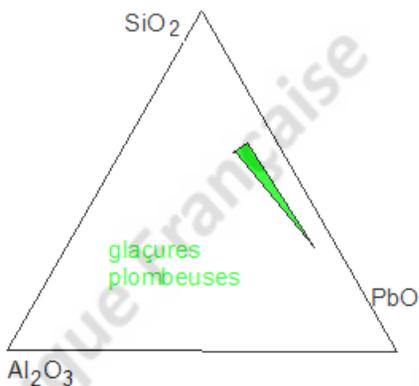
L'ajout de silice favorise d'abord la fusibilité dans la mesure où le nombre de moles ne dépasse pas 0,6. Au-delà, l'ajout permet d'élever la température de fusion du mélange qui est sensiblement proportionnelle au nombre de moles de silice introduites. La température de fusion des silicates de plomb est donc une affine du type $y = ax + b$, définie dans un intervalle donné ($> 0,8$ mole). Toutefois, les glaçures qui dépassent 1,5 mole ont tendance à se dévitrifier, lors de la recuisson, cette dévitrification dépend étroitement des conditions de cuisson.



Courbe liquidus en fonction du nombre de moles de silice ajoutée au métasilicate de plomb (PbSiO₂)

Les silico-aluminates de Plomb : lorsque la dévitrification n'est pas recherchée et, pour pallier certains inconvénients (solubilité du plomb), il est nécessaire d'introduire de l'alumine aux compositions précédentes. Cette nouvelle série d'émaux à la formule.

Générale suivante : $PbO, 0,1 Al_2O_3, xSiO_2$. En maintenant le rapport silice alumine égal à 10, la température de fusion des mélanges est identique à la série précédente et définie dans le même intervalle de température. Le rapport silice/alumine est défini par la règle du dixième, certains auteurs préconisent la règle du vingtième qui conduit à des glaçures plus tendres.



LES SILOCO-ALUMINATES PLOMBO-ALCALINS : la composition de ces émaux évolue dans les limites suivantes :

0,5 à 0,8 PbO
2,75 SiO₂
0,2 à 0,05 CaO
0,3 à 0,15 Na₂O ou K₂O

0,1 à 0,2 Al₂O₃

2,3 à

La limite de composition centésimale de ces émaux est donnée dans le diagramme ci-contre, la teneur en PbO peut varier de 40 à 70 %.

ÉMAUX BORACIQUES : il y a différentes catégories :

Émaux essentiellement calciques

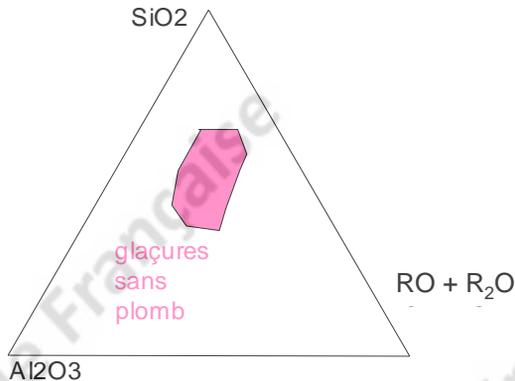
0,5 à 1 CaO	0,1 à 0,5 Al ₂ O ₃	0,5 à 4 SiO ₂
0,1 à 0 (MgO, BaO, ZnO)		0,1 à 1,2 B ₂ O ₃
0,4 à 0 Na ₂ O, K ₂ O		

Émaux moyennement calciques

0,2 à 0,7 RO	0,1 à 0,7 Al ₂ O ₃	2,2 à 5 SiO ₂
0,8 à 0,3 Na ₂ O, K ₂ O		0,1 à 1,9 B ₂ O ₃
avec dans les oxydes RO, 0,2 < CaO < 0,45		

Émaux opacifiés à l'oxyde de titane

0,15 à 0,4 RO	0 à 0,03 Al ₂ O ₃	2 à 4,2 SiO ₂
		0,6 à 1 B ₂ O ₃
0,85 à 0,6 Na ₂ O, K ₂ O	0,08 à 0,1 P ₂ O ₅	0,7 à 1,4 TiO ₂



LES DIFFÉRENTES CLASSES D'ÉMAUX.
Émaux boraciques : Ces émaux sont caractérisés par une forte teneur en oxydes alcalins (grande fusibilité, coefficient de dilatation élevé) et par une faible teneur en alumine, afin de favoriser la dévitrification. La composition centésimale de ces glaçures est définie dans le diagramme ci-dessus, les différentes teneurs en oxydes évoluent dans les limites suivantes.

Glaçure pour faïences	Émaux pour tôle
30% < SiO ₂ < 65%	40% < SiO ₂ < 50%
10% < B ₂ O ₃ < 40%	9,5% < B ₂ O ₃ < 18%
8% < Al ₂ O ₃ < 20%	Al ₂ O ₃ < 3%
Essentiellement calciques	Essentiellement alcalins avec prédominance de Na ₂ O

ÉMAUX À BASE DE BORE ET DE PLOMB :

Les frittés de bore et de plomb sont élaborés séparément, car le frittage simultané entraîne une solubilité plus grande de PbO.

Émaux plumbo-boraciques

0,5 à 1 PbO	0,1 à 0,4 Al ₂ O ₃	1,85 à 2,7 SiO ₂
0,5 à 0 (RO+R ₂ O)		0,1 à 0,4 B ₂ O ₃
avec dans RO CaO variant de 0 à 0,4		

Émaux boracico-plombeux

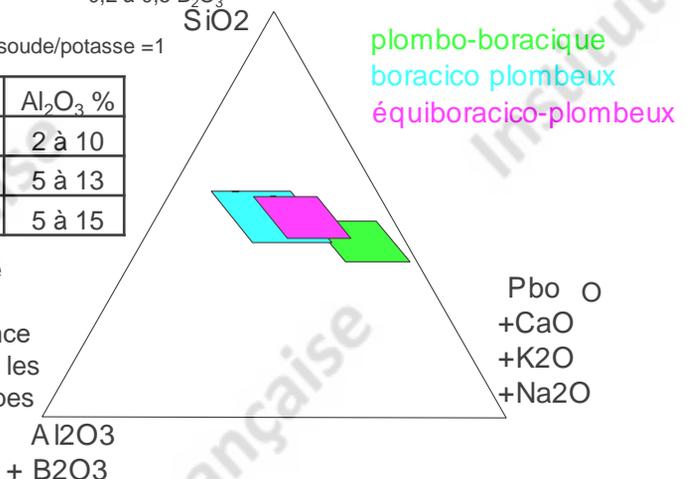
0,1 à 0,5 PbO	0,15 à 0,5 Al ₂ O ₃	1,75 à 3,9 SiO ₂
0,6 à 0,2 RO		0,5 à 0,9 B ₂ O ₃
0,3 R ₂ O		
avec dans RO, CaO variant de 0,2 à 0,6		
et dans R ₂ O le rapport soude/potasse=1		

Émaux équiliboracico-plombeux

0,2 à 0,4 PbO	0,15 à 0,4 Al ₂ O ₃	2,3 à 3,3 SiO ₂
0,3 à 0,4 RO		0,2 à 0,5 B ₂ O ₃
0,5 à 0,2 R ₂ O		
avec dans RO, CaO variant de 0,3 à 0,4 et dans R ₂ O le rapport soude/potasse = 1		

Désignation	PbO %	SiO ₂ %	B ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %
Plumbo boracique	30 à 60	30 à 45	1 à 10	2 à 10
Boracico plumbeux	6 à 30	38 à 56	8 à 16	5 à 13
Equiboracico plumbeux	13 à 26	44 à 54	4 à 10	5 à 15

Toutes ces glaçures peuvent être pré-opacifiée par le silicate de zirconium (zircon) ZrSiO₄.
 Le diagramme ci-contre délimite le domaine d'existence de ces émaux. Dans le tableau ci-dessus on trouve les fourchettes en % des différents oxydes suivant les types de glaçures.



ÉMAUX SANS BORE ET SANS PLOMB :

Glaçure pour 1160 – 1200 °C

0,65 à 1 RO 0,1 à 0,35 Al₂O₃ 1,4 à 3,5 SiO₂

0,35 à 0 R₂O

avec dans RO, CaO variant de 0,25 à 0,6, ces glaçures peuvent être opacifiées au zircon (0,2 à 0,3 mole).

Couvertes pour cuisson à la montre N° 9 (1280°C)

0,7 CaO

0,5 Al₂O₃

4 SiO₂

0,3 K₂O

Si à cette base on rajoute 1 mole de SiO₂, tout en conservant le rapport silice/alumine égale à 8 et en gardant les proportions de potasse et de chaux fixes, on élève la température de fusion de la couverte d'une montre, la formule théorique de ces couvertes est donc :

0,7CaO

(x/8)Al₂O₃

xSiO₂

0,3 K₂O

avec X variant entre 3 et 12

Couverte pour cuisson à 1230°C

0,8 à 0,6 RO 0,35 à 0,5 Al₂O₃ 3 à 4,5 SiO₂

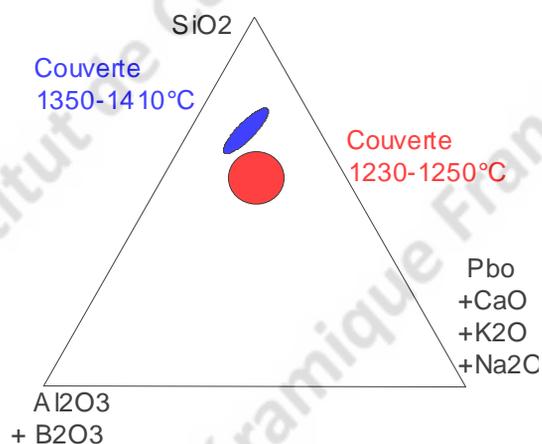
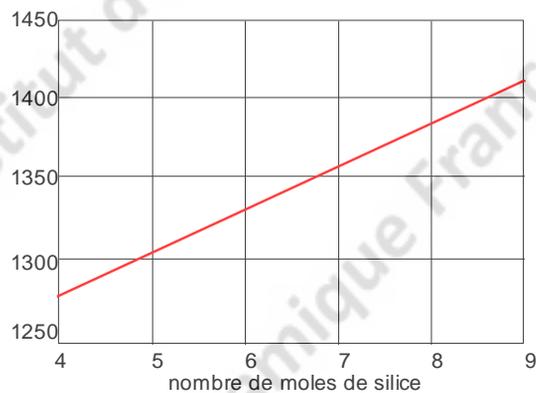
0,2 à 0,4 R₂O

couvertes opacifiées à 0,2 à 0,4 SnO₂

Couverte 1350°C à 1410°C

1 à 0,2 RO 0,6 à 1,2 Al₂O₃ 7,5 à 10,5 SiO₂

0 à 0,8 R₂O



LES FORMATEURS DE RÉSEAU :

LA SILICE (SiO_2) : C'est l'oxyde fondamental du verre, et donc des émaux, c'est le principal formateur de verre tant par ses qualités que par son abondance et donc son prix attractif. La quantité de silice contenue dans les émaux peut varier de 50% à 75% compte tenu de sa réfractarité. Plus la quantité de silice sera importante, plus la cuisson de l'émail devra se faire à haute température. Un excès de silice peut amener à la dévitrification des glaçures donc à l'apparition de cristaux.

Il existe plusieurs formes de silice. La plus couramment employée dans les compositions d'émaux est le quartz, mais lors de l'échauffement la silice est susceptible de passer d'une forme à l'autre. Les quatre formes de silice sont : le quartz, la tridymite, la cristobalite, et la silice vitreuse (deux autres variétés de silice ont été découvertes, il s'agit de la coésite et de la stishovite).

Au cours de la cuisson, la silice pourra prendre des formes successives en tendant toujours avec l'élévation de la température à se transformer en silice vitreuse ; ce fait est très important puisque, la silice vitreuse a un coefficient de dilatation très bas qui confère aux émaux une remarquable résistance au tressaillage.

En augmentant les proportions de silice, la viscosité augmentera également ainsi que la tension superficielle de l'émail. La silice pure fond à 1710°C , mais on abaisse facilement ce point de fusion de plusieurs centaines de degrés en ajoutant des minéralisateurs (modificateurs de réseau plus communément appelés fondants).

Matières premières amenant de la silice :

Anhydride silicique (SiO_2) : sous forme de sable quartzeux, beaucoup plus réactif que la cristobalite (qui est stable à haute température), et que le silex qui libère de la vapeur d'eau entraînant un dégagement gazeux préjudiciable à l'affinage de l'émail (à noter que l'opale et la calcédoine sont une forme de silice hydratée que l'on trouve dans le silex, galet de mer par exemple).

Silicates d'alumine ($x \text{SiO}_2, y \text{Al}_2\text{O}_3, z \text{H}_2\text{O}$) : il s'agit la plupart du temps d'un kaolin ou d'une argile réfractaire cuisants très blancs. L'introduction se fait soit sous forme crue avec un maximum de 12% soit sous forme calcinée (moločite), car une trop grande proportion de matière argileuse dans les émaux risque de provoquer des fissures de retrait engendrant des retirements d'émail à la cuisson.

Le deuxième avantage d'introduire de la silice sous forme d'un silico-aluminate est de provoquer à haute température la dissociation de la kaolinite avec formation de silice vitreuse et de mullite qui abaissent le coefficient de dilatation de l'émail.

Dans la majeure partie des cas, les silico-aluminates sont utilisés pour l'introduction de l'alumine dans les compositions des émaux, la silice l'accompagnant sera rarement en quantité suffisante pour former un émail ; aussi le rajout se fera par du quartz broyé.

Silico-aluminates alcalins ou alcalino-terreux : $x \text{SiO}_2, y \text{Al}_2\text{O}_3, z \text{R}_2\text{O}$ ou RO : ce sont des fondants dits naturels parmi lesquels on peut citer les feldspaths (potassiques, sodiques ou mixtes, les pegmatites (feldspath + silice libre (quartz)) ou les syénites néphéliniques, roches composées principalement de néphéline, de feldspaths sodiques et potassiques.

L'ANHYDRIDE BORIQUE (B_2O_3) : C'est un oxyde formateur de réseau et, selon la composition de l'émail, il peut avoir des réactions différentes.

Si un maximum de bore est en configuration tétraédrique, la structure vitreuse est peu lâche, les liaisons sont fortes. Coefficient de dilatation, viscosité et tension superficielle atteignent des valeurs optimales ainsi que l'élasticité, la brillance et la dureté.

S'il y a un excès de bore dans la composition ou d'un manque d'oxydes basiques favorisant l'augmentation de la coordinence du bore. Pour des émaux, la structure vitreuse est beaucoup plus lâche, d'où variation et inversion des propriétés de l'émail, augmentation du coefficient de dilatation, diminution de la viscosité.

En conclusion, l'ajout de B_2O_3 à un émail augmente la fusibilité, diminue la viscosité et sa tension superficielle. Les coefficients de dilatation et l'élasticité de l'émail sont étroitement liés à la teneur en B_2O_3 ; une teneur maximum de 12% est conseillée, car au-delà de ces pourcentages, coefficient de dilatation et élasticité varient en sens inverse.

Matières premières contenant du bore :

- l'acide borique H_3BO_3
- le borax $Na_2B_4O_7$, soit à l'état cristallisé à 10 molécules d'eau soit à l'état anhydre
- le tétra borate de calcium CaB_4O_7

tous ces composés sont solubles il convient donc de les fritter avant emploi.

L'ANHYDRIDE PHOSPHORIQUE (P_2O_5) : c'est un formateur de réseau, il contribue à consolider la structure vitreuse. Il a tendance à augmenter la tension superficielle, par contre il diminue le coefficient de dilatation.

Les matières premières permettant d'introduire P_2O_5 sont des phosphates alcalins ou alcalino-terreux, la cendre d'os ou de végétaux.

L'ALUMINE (Al_2O_3) : l'alumine est considérée comme anti-dévitrifiant, car elle a tendance à consolider le réseau de la structure vitreuse lorsqu'elle intervient comme oxyde formateur. Du fait de sa haute réfractarité (point de fusion $2010^\circ C$), Al_2O_3 est introduit dans des proportions molaires bien définies, le rapport silice/alumine devant se situer autour de 10.

L'augmentation de l'alumine dans un émail en restant dans les proportions ci-dessus, ne modifie que très peu la fusibilité et le coefficient de dilatation. Par contre, la viscosité et la tension superficielle sont très nettement augmentées lorsque le pourcentage d'alumine augmente et l'alumine peut favoriser la brillance de l'émail. En outre, une augmentation du pourcentage d'alumine en renforçant la structure vitreuse rendra l'émail plus résistant chimiquement et mécaniquement.

Matières premières apportant de l'alumine : il est très rare d'introduire Al_2O_3 pure pour les raisons suivantes :

- prix élevé,
- dureté très élevée, donc difficile à broyer (pour cette raison, les billes des broyeurs sont fabriquées en corindon qui est une variété d'alumine),
- présence d'impureté,
- peu réactive.

Elle est donc le plus souvent introduite sous forme de kaolin ou de molochite, ou d'un fondant naturel (feldspath, syénite) ou sous forme de bayérite (hydrate) donnant de l'alumine gamma réactive.

LES MODIFICATEURS DE RÉSEAU :

L'OXYDE DE PLOMB : agissant comme un modificateur de réseau, les émaux plombés ont une structure peu rigide et l'ajout de PbO à un émail entraînera les variations suivantes de propriétés :

- forte augmentation de la fusibilité
- légère augmentation de la dilatation
- diminution de la viscosité et de la tension superficielle
- augmentation de la brillance et de l'élasticité

PbO à l'état non combiné est toxique (risque de saturnisme). Il doit impérativement être combiné par frittage avec d'autres oxydes de la phase vitreuse afin d'éliminer les risques de solubilité de PbO.

Matières premières apportant PbO :

- la cérusite $PbCO_3$ carbonate naturel
- la céruse, mélange de carbonate et d'hydrocarbonate de plomb obtenu par voie chimique $2CO_3Pb, Pb(OH)_2$
- la litharge : PbO
- le minium Pb_3O_4 obtenu par oxydation de la litharge
- les silicates de plomb, il existe désormais des silicates de plomb sous forme de fritte

En règle générale, l'introduction de PbO s'effectue sous forme de minium. En effet, les oxydes et sels de plomb ont une fâcheuse tendance à se réduire sous l'action de la chaleur ; il est donc plus judicieux de prendre la forme la plus oxydée. Par ailleurs, il est bon de prendre les précautions suivantes :

Le minium doit être réparti de manière homogène dans le mélange

La composition à fritter doit contenir des composés chimiques susceptibles de libérer de l'oxygène donc des oxydants tels que les nitrates de sodium et de potassium.

La fusion du mélange doit se faire en atmosphère oxydante.

Tout ceci afin d'éliminer la réduction de PbO en plomb métallique. Si cette réduction a lieu, les frites obtenues présentent des parties noirâtres plus ou moins intenses en coloration et en nombre.

L'emploi du plomb comme fondant dans les glaçures est encore très répandu. En effet, celui-ci est facile d'emploi (malgré les risques) et présente l'avantage de fondre graduellement et de façon très régulière. Les glaçures au plomb sont douces et brillantes avec des couleurs sous émail très fortement développées. De plus, ces glaçures au plomb sont transparentes avec des effets de profondeurs qu'il est difficile de retrouver dans les glaçures sans plomb.

L'OXYDE DE CALCIUM (CaO) : il agit comme modificateur de réseau, c'est un fondant puissant à haute température, mais du fait de sa réfractarité, il aura tendance à durcir les émaux basse température à moins d'être en présence d'autre fondant à base de plomb ou de sodium ; mais il peut se combiner facilement à la silice pour former notamment la Wollastonite qui se forme en milieu acide à 1125°C

Il est introduit dans les glaçures sous forme de craie $CaCO_3$, borocalcite, spath fluor (CaF_2) bien connu comme fondant dans l'industrie céramique.

Sous forme de craie, il risque de provoquer des bouillonnements dus au dégagement de CO_2 .

La somme des parts moléculaires de Na_2O , K_2O , et CaO étant égale à 0,4 avec $CaO = Na_2O + K_2O$.

Attention à la formation de silicate de calcium $CaSiO_3$ qui provoque la cristallisation de la glaçure (qualité parfois employée pour obtenir des glaçures mates, risque de cristallisation de 700 à 850°C).

Peut former des rosettes cristallisées en présence de soufre dans l'atmosphère.

Les glaçures contenant CaO sont propices à l'opacification au zircon.

L'ajout de chaux augmente la tension superficielle.

Dans la pâte, il facilitera le passage du quartz à la cristobalite renforçant la résistance au tressillage.

L'OXYDE DE MAGNÉSIUM (MgO) : il semble qu'en faible quantité, MgO intervient comme modificateur de réseaux. En règle générale, pour des teneurs inférieures à 5%, MgO augmente la fusibilité des masses fondues et la brillance des émaux. Au-delà de 5%, la réfractarité augmente, il est donc conseillé de l'utiliser dans des émaux cuisant à haute température. Il diminue le coefficient de dilatation, s'il y a cristallisation de silicate ou de cordiérite, l'effet est plus net.

Il augmente fortement la tension superficielle et la viscosité.

L'ajout de cobalt, à des émaux contenant du magnésium, crée un pourpre au lieu du bleu habituel, à très haute température de fortes concentrations de MgO peuvent générer des marbrures rouges

Matières premières apportant MgO :

- carbonate de magnésium (giobertite)
- dolomie (carbonate double de calcium et de magnésium)
- talc

L'OXYDE DE ZINC (ZnO) : il a une action plus fondante que MgO et CaO

Par action sur la tension superficielle, il permettra d'augmenter la brillance des émaux et de faciliter le « mouillage » du support diminuant sensiblement les défauts de retraitement. Dans les flux très acides (riche en silice), ZnO peut se combiner avec SiO₂ pour former un silicate nommé willémitte : SiO₂, 2ZnO. Cette propriété sera mise à profit pour l'élaboration des émaux cristallisés surtout lorsqu'il entrera en forte proportion.

Il est capable de modifier un grand nombre de couleurs à base d'oxyde

L'OXYDE DE BARYUM (BaO) : c'est un fondant souvent utilisé en substitution de CaO à condition de ne pas dépasser 5%, car sa réfractarité rendrait la surface des glaçures mates

Il diminue l'élasticité, la tension superficielle et la viscosité ; il diminue le coefficient de dilatation.

Matières apportant BaO : L'oxyde de baryum est très peu utilisé, car il a tendance à se carbonater assez facilement à l'air libre, c'est pourquoi il est introduit dans les émaux sous forme de carbonate de baryum (withérite).

L'oxyde de baryum favorise l'obtention des céladons et des bleus de fer en réduction. Il est possible d'obtenir des bleus de cuivre dans des glaçures riches en baryum.

OXYDE DE SODIUM Na₂O : d'un rayon ionique important et il agit comme un modificateur de réseaux.

Ces actions principales sont :

- augmentation de la fusibilité
- forte augmentation du coefficient de dilatation
- diminution de la viscosité et de la tension superficielle
- diminution de la stabilité vis-à-vis des agents chimiques et des agents acides et de la dureté

Comme l'oxyde de potassium, l'oxyde de sodium est rarement introduit pur dans les compositions vitrifiables céramiques. Le pouvoir fondant de Na₂O est sensiblement équivalent à celui de K₂O, mais son coefficient de dilatation est moins élevé. La viscosité sera sensiblement diminuée avec l'utilisation de Na₂O par rapport à K₂O ; par contre, il diminue moins la tension superficielle. Dans leurs réactions au développement des couleurs, ils peuvent réagir différemment. Le manganèse par exemple donnera du pourpre rougeâtre dans une glaçure sodique alors qu'il sera bleuté dans des glaçures potassiques.

Matières apportant Na₂O :

- feldspath albite : 6SiO₂, Al₂O₃, Na₂O
- les pegmatites (mélange de silice et de feldspaths)
- néphéline
- le chlorure de sodium utilisé pour le glaçage au sel des poteries ou tuyauteries de grès (il favorise aussi l'élimination de coloration parasite par transformation du fer en chlorure de fer volatil)
- carbonate de soude.

OXYDE DE POTASSIUM K₂O : d'un rayon ionique important et il agit comme modificateur de réseaux.

Ces actions principales sont :

- augmentation de la fusibilité
- forte augmentation du coefficient de dilatation
- diminution de la viscosité et de la tension superficielle
- diminution de la stabilité vis-à-vis des agents chimiques et notamment des agents acides

L'oxyde de potassium n'est pas utilisé seul dans les compositions des émaux, mais intervient dans les réactions avec les autres oxydes à haute température. Pour former des complexes généralement très fusibles, il est le plus souvent apporté sous forme de feldspath orthose, soit seul sous forme de nitrate ou de carbonate.

Son apport au coefficient de dilatation de l'émail est très élevé, ce qui fait de lui un des composants favorisant le plus le tressailage. Par contre, il est le plus efficace pour abaisser la tension superficielle des émaux, il a le plus bas coefficient des oxydes courants composant le verre. Il diminue la résistance mécanique et la résistance aux attaques chimiques.

Matières premières apportant K₂O :

- feldspath orthose : 6SiO₂, Al₂O₃, K₂O considéré comme ayant un palier de vitrification plus étendu que les feldspaths sodiques
- les pegmatites (mélange de silice de feldspaths)
- Néphéline 2SiO₂ Al₂O₃ (Na K)₂O (fusibilité plus importante que les feldspaths))
- le nitrate de potassium (salpêtre) 2KNO₃ se décomposant à la cuisson en K₂O + 2 NO₂ + 0,5 O₂ est surtout utilisé pour l'apport de K₂O pur dans les émaux est préféré au carbonate de potassium pour sa fusion oxydante (attention soluble dans l'eau il doit être fritté)
- bichromate de potassium sert à l'élaboration des colorants vert de chrome et des roses.

QUALITÉS D'UN ÉMAIL

FUSIBILITÉ :

La recherche d'une fusibilité correcte permettra à l'émail de napper convenablement à la cuisson en donnant une couche unie, lisse et glacée, sans moutonnement.

Les gouttes et traînées produites à l'émaillage doivent :

- S'estomper, s'aplanir et devenir invisible.
- Avoir assez de fluidité pour recouvrir les griffures, les égratignures occasionnées à la glaçure crue.
- Posséder un palier de cuisson étendu, c'est-à-dire supporter sans inconvénient les hétérogénéités de température du four

RECHERCHE DES CONSTITUANTS LES PLUS APPROPRIÉS :

Oxydes basiques : augmentent la fusibilité, principalement le plomb et les alcalins (Na_2O , K_2O)

Oxydes amphotères : Al_2O_3 durcit la composition ainsi que Mn_2O_3 , Cr_2O_3 , par contre Fe_2O_3 augmente la fusibilité.

Oxydes acides : SiO_2 , SnO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , P_2O_5 augmentent la réfractarité tandis que B_2O_3 est un fondant énergétique.

On peut classer (au point de vue pondéral) l'efficacité des rajouts par ordre de fusibilité croissante de la façon suivante : Al_2O_3 , MgO , CaO , SiO_2 , B_2O_3 , PbO , K_2O , Na_2O ,

UTILITÉ DES FRITES : On fait des frites lorsque l'on utilise des fondants, car la plupart des composés à base de fondants sont solubles dans l'eau tels que les alcalins, les nitrates et les carbonates et les produits boraciques comme le borax.

Pour rendre ces produits insolubles dans l'eau, on les fond ensemble avec d'autres matières premières principalement la silice, de façon à former un silicate complexe stable, insoluble et qui puisse être utilisé comme n'importe quel autre constituant de l'émail au broyage.

Une autre raison d'utiliser des frites est de rendre non toxiques les émaux pour l'utilisateur. Certaines matières premières comme le plomb par exemple qui est un des constituants essentiels des émaux sont dangereuses par ingestion pour l'organisme. Certains silicates ou plutôt aluminosilicates de plomb ne sont pratiquement pas attaqués par le suc gastrique de l'estomac.

Par ailleurs, lors de la cuisson de la pièce émaillée, les divers constituants de l'émail réagissent entre eux. Cette réaction donne lieu à des dégagements gazeux, gaz carbonique pour les carbonates, vapeur d'eau pour les produits argileux, qui seront éliminés lors de la cuisson de la fritte et ainsi n'apparaîtront pas à la cuisson de la pièce émaillée évitant ainsi les risques de bullage.

Un autre but du frittage est d'améliorer la fusibilité par création d'eutectiques. En effet, la température de fusion d'un mélange de deux ou plusieurs composants ne se rapporte pas à la moyenne de leur température de fusion respective, mais ils réagissent entre eux pour former de nouveaux composés capables de fondre à des températures plus basses que la température de fusion du composé fondant le plus bas. Par exemple, en mélangeant de l'alumine (point de fusion à 2050°C) et de la silice (point de fusion à 1710°C) n'importe lequel de leurs mélanges fond en dessous du point de fusion de l'alumine et dans le cas d'un mélange composé de 10% d'alumine et 90% de silice, la température de fusion sera de 1540°C . On peut, pour comparer, citer l'exemple de la glace qui fond à 0°C pour se transformer en eau, alors qu'en présence de sel, la transformation débutera à -17°C .

La finesse de broyage est également un élément déterminant de la fusibilité. En effet, plus un matériau sera broyé finement, plus la surface spécifique (surface totale des grains d'1g de matières) sera importante et la surface d'échange offerte aux réactions et à la température sera augmentée.

substances	part en moles	température de fusion
feldspath orthose	1	1220
quartz	1	1710
feldspath orthose	2	1265
quartz	3	
feldspath orthose	1	1285
quartz	2	
feldspath orthose	1	1292
quartz	3	
feldspath orthose	1	1317
quartz	6	
anorthite	1	1550
albite	1	1200
anorthite	5	1521
albite	1	
anorthite	2	1490
albite	1	
anorthite	1	1450
albite	1	
anorthite	1	1394
albite	2	
anorthite	1	1362
albite	3	
anorthite	1	1265
albite	8	
oxyde de plomb	1	876
silice	1	1710
oxyde de plomb	22	540
silice	1	
oxyde de plomb	42	526
silice	9	
oxyde de plomb	7	508
silice	2	
oxyde de plomb	9	661
silice	22	

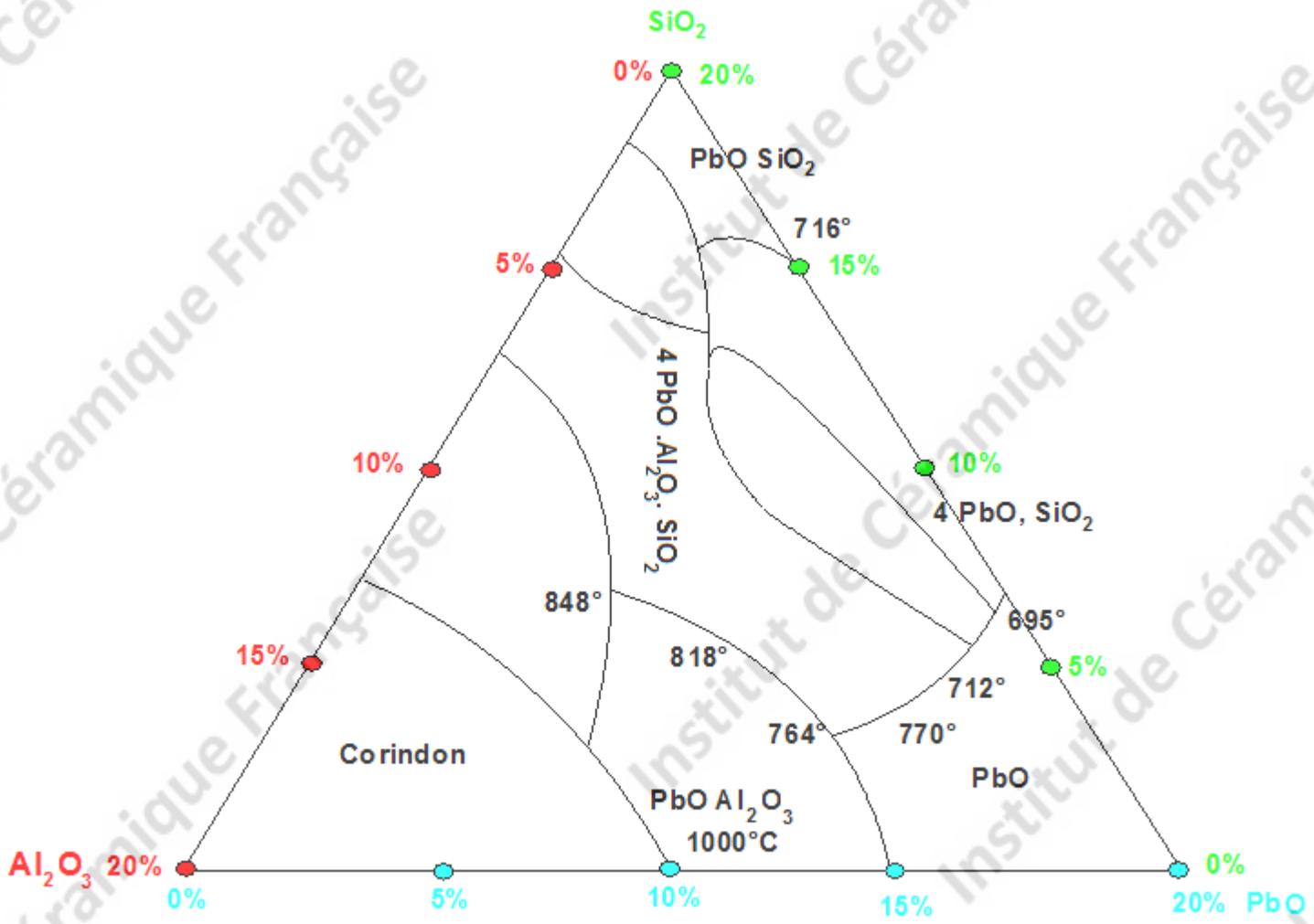


DIAGRAMME TERTIAIRE SYSTEME $\text{PbO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$

VISCOSITÉ :

Les émaux doivent posséder assez de viscosité pour ne pas dépouiller les arêtes et ne pas former de gouttes au pied des pièces.

ACTION SUR LA COMPOSITION : Les corps suivants augmentent la viscosité, permettant de napper l'émail sans couler, par action décroissante

Al_2O_3 : le plus énergétique

SiO_2

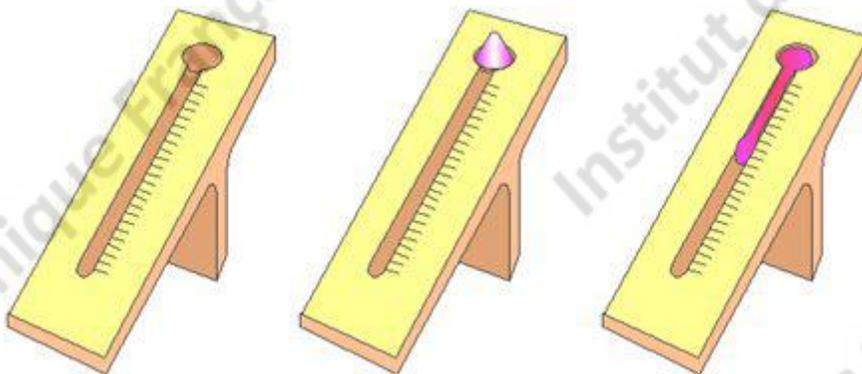
CaO : à partir d'un certain pourcentage

MgO

En verrerie, avec une substitution moléculaire égale, l'alumine détermine une augmentation de la viscosité qui est de 8 à 9 fois celle produite par la chaux et 4 fois celle due à la magnésie.

Par contre, l'oxyde de zinc et l'oxyde de baryum diminuent la viscosité des émaux, mais surtout les alcalis et le bore agissent énergiquement dans ce sens.

Un moyen simple pour apprécier les écarts de fusibilité et de viscosité consiste à faire des plaques de fusibilité. Sur des plaques de tesson inclinées comportant à la partie supérieure une cavité prolongée vers le bas par une rainure, on dispose un poids connu d'émail à tester (le plus souvent sous forme d'un cône). On mesure ensuite la longueur d'écoulement après cuisson, par ailleurs la forme de la goutte d'émail renseigne sur la viscosité et la mouillabilité du tesson.



Test de la fusibilité sur plaque inclinée

Il est possible sur le même principe de confectionner des cônes d'émail cru (hauteur et diamètre 30 mm) en utilisant la blanose comme liant et en appréciant après cuisson l'augmentation de diamètre et l'écrasement de l'échantillon.

ACTION SUR L'ÉTAT GRANULOMÉTRIQUE :

Un broyage poussé augmente la tension superficielle donc favorise le défaut de retraitement en diminuant la mouillabilité sur le tesson.

De plus, la grande quantité d'air occlus dans une poudre, augmentant avec la finesse des particules, nécessitera une plus grande quantité d'eau pour mettre en suspension cette poudre.

Au ressuyage de l'émail au cours de l'émaillage, les particules tendent à se rapprocher et cela d'autant plus que les vides à combler sont importants. N'importe quelle matière à l'état d'extrême division acquiert une certaine plasticité et un retrait au séchage.

Un broyage moins long combat efficacement cette tendance .

ACTION PAR LA TEMPÉRATURE DE FUSION DE LA FRITTE :

En élevant la température de fusion des frittes, la volatilisation de certains éléments augmente.

Les corps peuvent exister sous trois états : exemple pour l'eau : solide : glace en dessous de 0°C liquide : eau de 0°C à 100°C: gaz vapeur au-delà de 100°C

(le mercure est le seul métal liquide à température ordinaire, mais devient solide à - 39°C et vapeur après 350°C).

Lorsque les produits sont chauffés suffisamment haut, ils se vaporisent. Ce sont les produits qui fondent à plus basse température qui se vaporisent en premier : alcalis, plomb, bore...

Ainsi la réfractarité de la fritte augmente et donc sa viscosité à une température d'utilisation donnée.

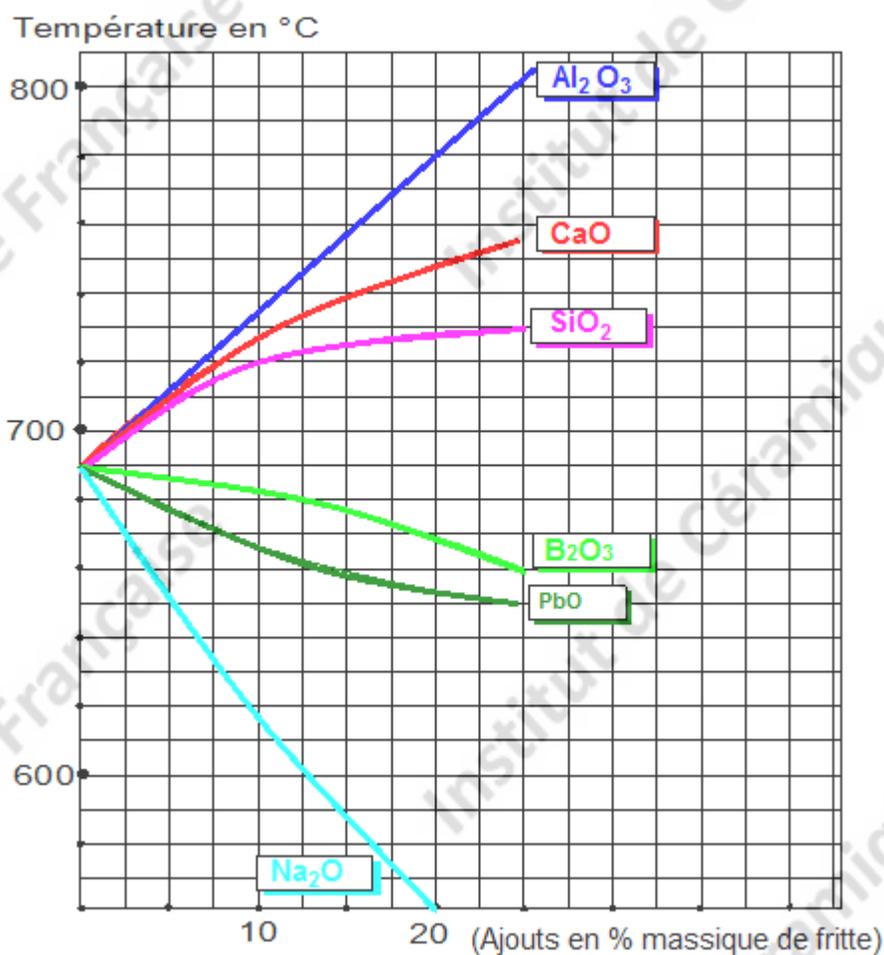
ACTION DE L'ATMOSPHÈRE DE CUISSON :

La tension superficielle d'un émail varie en cuisson réductrice. Il est ainsi bien connu qu'on ne peut avoir une bonne adhérence sur un métal en cuisson réductrice. Il faudra donc autant que possible que la cuisson de l'émail se fasse en atmosphère oxydante (sauf émaux à effet).

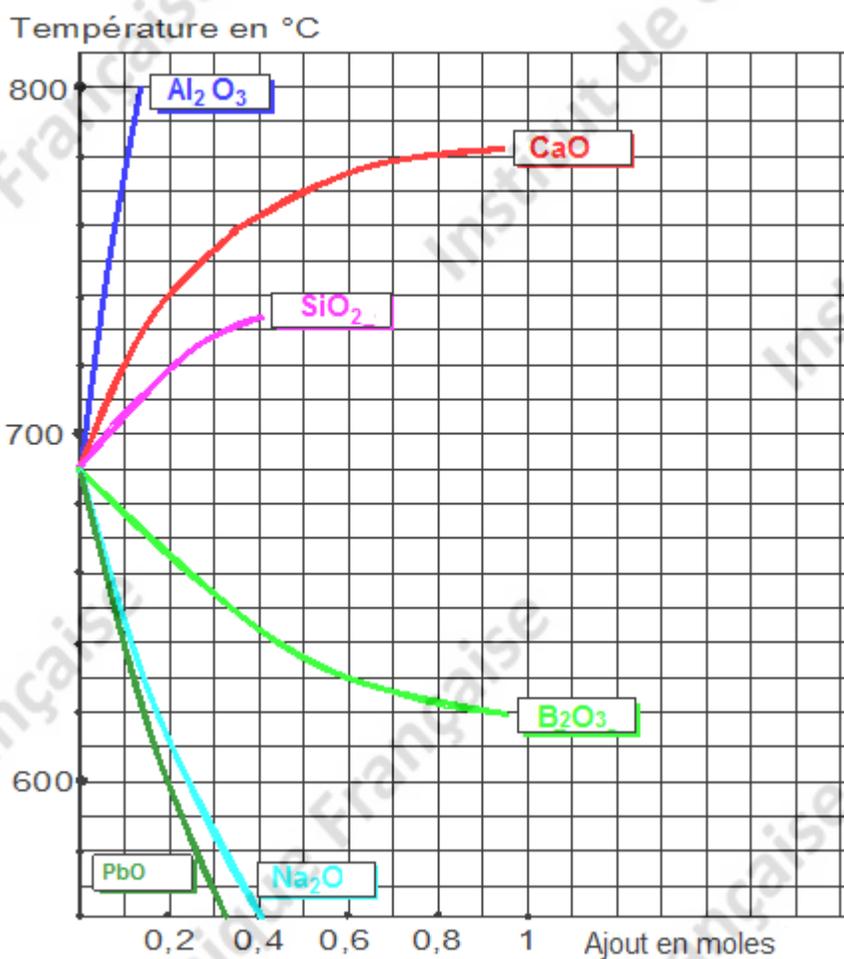
PALIER DE CUISSON :

L'émail doit supporter sans inconvénient majeur les différences de température que l'on rencontre dans les fours. Le palier d'utilisation est en rapport avec la plus ou moins grande rapidité, avec laquelle la viscosité diminue en fonction de la température. Ici encore, l'alumine joue un rôle extrêmement favorable. On peut classer par ordre d'influence décroissante approximative : Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO , BaO , PbO , B_2O_3 , Alcalis.

Influence des divers oxydes métalliques sur la fusibilité d'une fritte



Influence des divers oxydes métalliques sur la fusibilité d'une fritte



TRANSPARENCE :

La transparence d'un émail peut être affectée par de nombreux facteurs et en particulier :

- une absence de dévitrification, un voile laiteux,
- des attaques chimiques par des composés sulfureux,
- présence de bulles.

DÉVITRIFICATION :

Cette dévitrification est due à un excès d'acidité (la dévitrification désigne une recristallisation).

Cette dévitrification n'est pas toujours indésirable et constitue parfois le phénomène de base de la fabrication de certains produits, c'est le cas des verres dits «opales», dans lesquels sont introduits des fluorures, peu solubles à basse température, qui précipitent en donnant une phase dévitrifiée très fine.

Dans les émaux, l'alumine est utilisée comme anti-dévitrifiant par excellence. D'ailleurs, il existe une règle très ancienne qui préconise d'introduire toujours un nombre de molécules d'alumine égal au 1/10^{ème} du nombre de molécules de silice.

Quand il y a dévitrification il faut en premier :

- Augmenter l'alumine.
- Diminuer le baryum, s'il y en a.
- Diminuer les alcalis.
- Remplacer Na_2O par K_2O .

Parfois, des émaux riches en B_2O_3 présentent une certaine opalisation ; le remède évident est alors de diminuer la teneur en B_2O_3 .

À noter que la multiplicité des bases retarde la dévitrification ; les silicates alcalino-terreux ont plus tendance à dévitrifier les émaux que les silicates alcalins.

VOILE LAITEUX :

Ce voile est souvent provoqué par un excès de chaux qui est difficilement soluble dans le flux vitreux. C'est pour cette raison qu'elle est souvent introduite par une fritte. La teneur en chaux devra être plus basse dans une composition sans fritte.

La teneur en chaux est proportionnée à celle en silice, elles doivent évoluer de pair.

ATTAQUE SULFUREUSE :

Du soufre est encore rencontré dans l'industrie céramique, soit dans les matières premières de la pâte, soit dans celles de l'émail ou dans les combustibles liquides .

Les vapeurs sulfureuses se condensent sur l'émail, réagissent en particulier avec les alcalins pour donner des sulfates alcalins non solubles dans le flux vitreux ; ils donnent à la surface de l'émail des dépôts blanchâtres en forme de lentille qui se décolent facilement.

Dans les cas les plus graves, les émaux présentent une croûte.

Les émaux plombés résistent assez bien aux vapeurs sulfureuses, d'autant mieux que la teneur en plomb est élevée, parce qu'ils sont alors moins alcalins.

Les émaux alcalins ou fortement alcalins résistent mal aux attaques sulfureuses et présentent le défaut de lentille de sulfates alcalins.

Les émaux très riches en alcalino-terreux ne résistent pas aux attaques sulfureuses et il y a dans ce cas, apparition d'un bullage important avec rugosité à la surface.

PRÉSENCE DE BULLES AU SEIN DE L'ÉMAIL

ÉTUDE THÉORIQUE DU BULLAGE : deux points sont à considérer : la grosseur et le nombre de bulles. Tant que leur diamètre reste inférieur à 0,1 mm, limite de l'acuité visuelle, elles sont indiscernables à l'œil nu, mais même de petit diamètre elles contribuent à absorber la lumière en partie et donnent au verre une tendance à l'opacification, qui peut aller jusqu'à l'opacification si le nombre devient considérable.

Pour se dégager et venir crever en surface, les bulles devront vaincre la viscosité de l'émail.

La formation de bulles est provoquée par l'existence ou la formation au sein de la glaçure de petits volumes gazeux, qui sous l'influence de la température se dilatent et se réunissent les uns aux autres pour former des bulles. Si bien qu'une élévation de température, qui favorise cette coalescence par diminution de la viscosité ou un plus long palier en fin de cuisson, entraîne l'obtention d'un émail présentant moins de bulles au cm², mais des bulles beaucoup plus grosses deviennent visibles.

CAUSES

Le dégazage d'un émail est fonction de sa fluidité et tous les facteurs susceptibles d'augmenter la viscosité s'opposeront au dégagement des bulles.

Facteurs favorisant la présence de bulles dans l'émail :

- une basse température de cuisson
- une teneur élevée en alumine
- une allure de cuisson trop rapide (qui ferme superficiellement l'émail avant que le dégagement gazeux soit terminé).

À noter que la porosité de la couche d'émail cru est généralement de l'ordre de 30% et que tous ces vides sont naturellement remplis d'air.

Ils donnent des bulles au début de la vitrification de l'émail. Si du verre parfaitement transparent est broyé, et si cette poudre est mise à cuire, l'émail obtenu est complètement bullé.

Une température insuffisante de biscuitage dans le cas de faïence (principalement avec des émaux opaques beaucoup plus visqueux que les transparents), de même la monocuisson dans le cas de composition ou cycle de cuisson mal étudiée. Le carbonate de calcium et/ou magnésium peut ressortir à la deuxième cuisson sous forme de gaz si la transformation : $\text{CaCO}_3 = \text{CO}_2 + \text{CaO}$ n'est pas complètement réalisée à la cuisson biscuit (cycle trop rapide ou enfournement trop dense par exemple)

CONDITION POUR AVOIR DE BEAUX ÉMAUX BIEN GLACÉS

POUR UN ÉMAIL TRANSPARENT : avoir une grande fluidité qui permettra à l'émail de se dégazer et de napper, ou avoir une très forte viscosité pour empêcher le grossissement des bulles. Il faut avoir au départ une composition donnant un émail transparent et avoir des frites bien affinées (débullées). L'augmentation de la fluidité par adjonction de fondant doit être parcimonieuse, en effet, le tesson sera plus facilement attaqué par l'émail dans le cas d'une grande fluidité. C'est ainsi que les émaux boraciques et alcalins attaquent fortement ; avec un tesson magnésien, on peut même voir apparaître des taches jaunâtres. De plus, un émail très fluide ne se prête pas ou mal à l'émaillage de surfaces verticales.

POUR UN ÉMAIL OPAQUE : il faut toujours avoir une forte viscosité (d'ailleurs parmi les règles pour obtenir une opacification correcte figure une bonne viscosité)

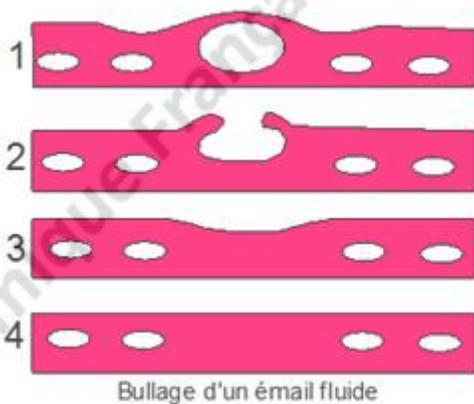
Un bel émail opaque sera celui qui contient de très petites bulles et dont la viscosité sera choisie pour permettre un nappage suffisant, mais pas superflu.

POUR UN ÉMAIL MAT : un émail mat est en fait un émail cristallisé, qui dit cristallisation, dit composition très fluide pour permettre aux composés cristallisants de venir en surface de l'émail.

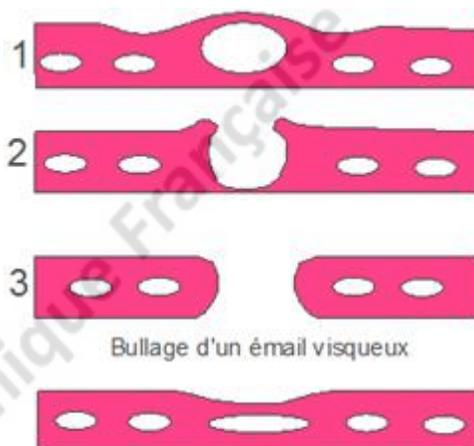
POUR UN ÉMAIL BRILLANT : pour obtenir un émail brillant, le cycle de cuisson et notamment la vitesse de refroidissement sont primordiaux. Pour améliorer la brillance, un refroidissement rapide, dès la fin du palier, est pratiqué (pendant les premiers 200 °C de la descente). Cette descente très rapide empêchera la naissance des cristallisations qui altéreraient la brillance.

ÉTUDE PRATIQUE DU BULLAGE : Un émail absolument exempt de bulles n'existe pas.

Les quatre causes principales du bullage : 1 le processus de fabrication, 2 la pâte, 3 l'émail et 4 la cuisson.



Bullage d'un émail fluide



Bullage d'un émail visqueux



Bullage d'un émail fortement visqueux

EXAMEN DES DIFFÉRENTES SORTES DE BULLES :

Au stade 1 les bulles se regroupent, grossissent et parviennent à migrer vers la surface de l'émail.

Au stade 2 les grosses bulles arrivent à percer la surface de l'émail et à éclater.

Au stade 3, dans les cas de cet émail fluide, le « cratère » laissé par l'éclatement de la bulle se refermera au stade 4 la couche d'émail se sera complètement homogénéisée

1 Dans le cas de cet émail visqueux, les bulles auront beaucoup plus de mal à traverser l'émail.

2 après leur éclatement, la forte viscosité de l'émail ne permettra pas de venir combler le cratère.

3 l'émail n'ayant pas pu combler le cratère voit le périmètre de celui-ci s'arrondir sous l'effet de la tension superficielle, et dépouiller le fond de celui-ci de toutes traces d'émail.

En fin de cuisson, l'émail présente de petits cratères surplombant une grosse bulle. Souvent pour avoir un émail brillant, on pousse la cuisson. Ceci doit être évité avec un émail visqueux ; en liquéfiant trop un émail visqueux, le bullage et sa trop forte viscosité l'empêchent de se napper, l'émail obtenu est bullé par excès de cuisson.

Dans les cas 2, 3, 4, il y a visibilité du bullage, on l'appelle coque d'œuf ou pin-hole.

ÉTUDE PRATIQUE DU BULLAGE : conséquences pratiques.

Les émaux transparents en général fluides peuvent être surcuits.

Les émaux opaques en général visqueux ne doivent pas être trop cuits.

CAUSES PRATIQUES DU BULLAGE : le bullage est dû aux gaz formés pendant la cuisson.

Ceci est inévitable, car un émail est composé de constituants divers : kaolin, feldspaths, frittes, colorants, éléments qui réagissent entre eux, et les réactions provoquent des dégagements gazeux.

Parfois, ces dégagements gazeux se produisent dans le tesson et les bulles passent à travers l'émail.

POROSITÉ DU TESSON : lorsque l'on trempe un corps poreux dans l'eau, le liquide pénètre dans les capillaires par les deux extrémités à la fois. Le liquide comprime ainsi l'air à l'intérieur du corps poreux et lorsque la pression atteint la pression de débouchage des gros pores, l'air est chassé au-dehors, provoquant le bruit caractéristique d'un corps poreux qui est plongé dans l'eau. L'air s'échappe par les gros pores, car l'eau est attirée par succion par les capillaires, et cette succion est d'autant plus forte que le diamètre des capillaires est petit ; en fait, les plus petits se vident d'air au profit des gros.

Ce phénomène peut provoquer des accidents d'émaillage par manque d'émail aux emplacements correspondant aux pores les plus gros, par où l'air s'échappe. Ainsi, un dégoré trempé sur une seule face ne présentera pas de défaut à la sortie cuisson, alors que le même dégoré émaillé par immersion sur toute sa surface présentera un défaut de bullage.

Lors de la cuisson d'un émail visqueux se fermant très tôt, comme c'est le cas pour les émaux stannifères, le défaut peut être évité en désémaillant le pied de la pièce.

Ceci explique la pratique de tremper des pièces de biscuit dans l'eau juste avant leur émaillage, pour expurger la majeure partie de l'air contenu dans les pores. L'émail peut également être encollé. En effet, la colle par action de rétention d'eau ralentira et retardera l'absorption de l'eau.

INFLUENCE DE LA POROSITÉ DU TESSON : on s'aperçoit que plus la texture de la pâte est serrée, moins le défaut de bullage dû au tesson est important. Cela peut même se produire sur des pièces fabriquées avec la même pâte, mais où le mode de fabrication aura plus ou moins serré la pâte (coulage et pressage par exemple). Un écart de porosité de 0,5% suffit pour que le défaut apparaisse.

Des essais en monocuisson ont les mêmes résultats selon la température de fermeture de la pâte.

D'autres essais avec des biscuits cuits à des températures variables, mais toujours très proches de la vitrification de la pâte afin de supprimer le risque de dégazage du tesson ont montré que l'émail était plus « beau » lorsque le tesson était plus cuit. Cependant, certains émaux malgré des viscosités proches ne réagissent pas de la même manière face au phénomène de bullage : cela tient au fait que leur température de vitrification peut être différente et qu'ils deviennent ainsi plus ou moins imperméables aux gaz (au moment où ceux-ci sortent de la pâte).

ATTAQUE DE L'ÉMAIL PAR LES RÉACTIONS GAZEUSES AU COURS DE LA CUISSON : Dans le cas de combustible fioul, il peut y avoir une attaque chimique de l'émail : par la réduction, par le soufre ou par la proximité d'autres émaux polluants. Ceci peut être une source de bullage, de même, il peut avoir une succion de l'émail par la proximité de réfractaires très poreux .

CAUSES EN RELATION AVEC LA PÂTE EN MONOCUISSON : la pâte et l'émail sont cuits en une seule fois, aussi toutes les réactions de la pâte susceptibles de provoquer des dégagements gazeux devront se faire pendant que la viscosité de l'émail permettra aux bulles de s'échapper. Si le dégagement gazeux n'est pas terminé en fin de cuisson, il peut avoir dans le cas d'un émail très fluide : un nappage et un émail non bullé, dans le cas d'un émail fluide : un nappage insuffisant et un émail bullé et dans le cas d'un émail visqueux : un mauvais nappage et un émail bullé.

La sécurité amène à utiliser des pâtes dont le dégazage est terminé avant que l'émail soit fondu.

Les pâtes de faïence dolomitique ne conviennent pas pour la monocuisson, à cause de la décomposition tardive de la dolomie.

BICUISSON : température insuffisante de biscuitage : il est indispensable de cuire le biscuit à une température supérieure à celle de l'émail

IMPURETÉS : il peut y avoir au sein de la masse de pâte des éléments qui peuvent provoquer des dégagements gazeux en fin de cuisson ou du moins entrer en combinaison avec l'émail à cette température, citons pour exemple la présence de pyrites.

CAUSES EN RELATION AVEC L'ÉMAIL :

Ce sont les cas les plus fréquents. En général, le défaut le plus apparent se trouve dans les surépaisseurs d'émail.

Émaux alcalins (bleu chinois par exemple) : ces produits laissent passer en solutions des quantités importantes de composés alcalins. Ces derniers étant en général solubles se dissolvent en partie lors de la fabrication de l'émail, et lors de la mise en œuvre.

On cuit donc sur la pièce une composition légèrement différente de la composition originelle. Ceci conduit à un nouvel état d'équilibre et à des dégagements gazeux. Outre l'utilisation rapide des bains d'émaux et la diminution du temps de contact avec l'eau, aucune solution n'existe, même si les colles limitent le phénomène.

Réaction avec le colorant : l'émail attaque le colorant au cours de la cuisson et le décompose en ses éléments constitutifs. Cette attaque se fait plus ou moins facilement. On peut avoir des colorants parfaitement inertes et d'autres qui provoqueront le bullage de l'émail dans certaines conditions d'utilisation, notamment de température. La réaction d'un colorant sera différente de 1000°C à 1200°C (se méfier de MnO₂ et CoO qui se dissolvent dans les émaux avec un dégagement important)

Température insuffisante de cuisson de l'émail : souvent, un émail commence à buller avant de napper. On peut avoir du bullage par manque de cuisson ou par excès de cuisson dans le cas des émaux très visqueux (c'est le cas particulier d'émaux composés avec les frites au manganèse).

Le manque de cuisson peut également se manifester en changeant de four ou d'allure de cuisson. C'est parfois le cas, lors d'une baisse de production dans les fours tunnel ou le temps de passage se trouve allongé et/ou les émaux sont soumis à une cuisson plus longue ou plus importante sans pour autant que la différence soit sensible sur les cônes pyrométriques.

CAUSES DU BULLAGE EN RELATION AVEC LA CUISSON DE L'ÉMAIL :

Le changement de température d'un corps provoque une modification de ses propriétés et l'émail n'échappe pas à cette règle. Du fait de l'hétérogénéité que présente l'ensemble tesson émail, les réactions de chacun des constituants devront être prévues de telle façon qu'elles ne s'altèrent pas mutuellement. De plus, la proximité des divers constituants provoquera des réactions qui n'auraient pas existé si ceux-ci avaient été cuits séparément. On aura donc à se préoccuper :

- des réactions du tesson.
- Des réactions de l'émail.
- Des réactions d'oxydoréduction par l'ambiance de cuisson.
- De l'influence réciproque de chacune de ces réactions.

CAUSES DU BULLAGE EN RELATION AVEC LA CUISSON DE L'ÉMAIL :

Les biscuits de faïence et les dégourdis de porcelaine ont des capillaires de l'ordre d'une fraction de micron. Les gaz qui peuvent exister dans l'atmosphère des fours sont légers et par conséquent pourront pénétrer facilement dans ces pâtes fines. Le changement de composition de l'atmosphère du four autour de la pièce à cuire provoque à l'intérieur de celle-ci une surpression si l'atmosphère s'enrichit en gaz léger et une dépression, si l'atmosphère s'enrichit en gaz lourd (la pièce sera donc soumise selon les changements d'atmosphère du four à une véritable respiration).

Tout gaz se dilatant avec la chaleur, on observe lors de l'élévation en température et donc de l'augmentation de la pression au cœur de la pièce, la migration des gaz vers la périphérie de celle-ci, ceux-ci viendront s'ajouter à ceux engendrés par l'émail.

Lorsque le palier de cuisson est suffisamment long pour permettre l'homogénéisation de la température à l'intérieur du tesson et pour permettre aux bulles de venir crever à la surface de l'émail, il y a un minimum de bulles et l'émail est bien nappé.

Ceci peut expliquer que certains émaux réussissent mieux en four électrique où les variations de pression n'existent pas ou peu.

REMÈDES À APPORTER AU DÉFAUT DE BULLAGE EN GÉNÉRAL :

Pour pallier le bullage, il faudra :

- réduire les dégagements gazeux après « fermeture » de l'émail,
- éviter les phénomènes de coalescence,
- favoriser le nappage.

Les facteurs qui semblent avoir le plus d'influence sont :

- la nature et les propriétés du tesson,
- la nature et les propriétés de l'émail,
- les conditions de cuisson

REMÈDES EN AGISSANT SUR LA NATURE ET LES PROPRIÉTÉS DU TESSON :

- proscrire les constituants apportant trop de matière organique, sulfates et sulfures dont la décomposition gazeuse est nuisible,
- éviter une trop grande finesse des constituants,
- éviter la présence de soufre,
- veiller à l'homogénéité de la cuisson du tesson pour avoir une porosité constante,
- éviter les surfaces rugueuses, ainsi que la poussière et toutes souillures du tesson,
- éviter de poser l'émail sur un biscuit trop poreux (il est parfois utile de le tremper dans l'eau).

REMÈDES EN AGISSANT SUR LA NATURE ET LES PROPRIÉTÉS DE L'ÉMAIL :

Éviter d'introduire des quantités trop importantes :

- de carbonates, de fluorures, de sulfates qui se décomposent,
- produits qui se volatilisent tels que B_2O_3 ou PbO .

Veiller à :

- choisir des matières comme les feldspaths ou les pegmatites fondant sans engendrer trop de bulles,
- utiliser lorsque c'est possible (couvertes opacifiées) certains additifs à base de lithium qui sont favorables pour donner à la surface un aspect lisse et brillant,
- contrôler la finesse et à l'homogénéité de l'émail,
- augmenter la viscosité et la tension superficielle des émaux pour éviter le grossissement des bulles et leur coalescence, ou l'inverse pour favoriser leur éclatement à la surface,
- éviter l'excès d'adjuvant organique,
- surveiller l'épaisseur de la couche d'émail.

REMÈDES AGISSANT SUR LES CONDITIONS DE CUISSON :

- atmosphère aussi oxydante que possible pour décarburer la masse,
- cuire l'émail entre une température limite supérieure ou le bullage devient apparent et une température inférieure ou l'émail ne bulle pas,
- veiller à l'isothermie du four,
- en principe il vaut mieux agir sur le palier que sur la température finale de cuisson, d'autant que plus la température sera élevée plus les phénomènes de coalescence seront favorisés par diminution de la viscosité, par ailleurs si la tension superficielle reste importante le brillant sera amélioré,
- éviter une montée en température trop rapide qui retarde la décomposition de certains composés et provoque des dégagements gazeux après la fermeture de l'émail,
- cuire en oxydant jusqu'à $1050^\circ C$ afin de bien brûler les composés du carbone de l'émail et permettre les décarbonatations,
- éviter les combustibles riches en soufre.

ABSENCE DE COLORATIONS PARASITES

Tous les métaux habituellement utilisés dans l'industrie céramique (fer, cuivre, cobalt, manganèse, etc..) peuvent évidemment colorer. Les colorations parasites peuvent être apportées sur la surface des émaux soit par des traces de fer dans les matières premières des émaux ou du support, par des sels de vanadium dans certaines argiles, par des traces de cuivre pouvant provenir des matières premières, mais également des réseaux de distribution d'eau.

Le fer étant le métal le plus répandu sur terre il devient donc l'ennemi n°1 du céramiste. En tant que pollution, ce phénomène est d'autant plus accentué que la majorité de la production de pièces céramiques tend vers le blanc ou des couleurs claires, son action est fortement renforcée en présence d'alumine, pour la cuisson de la porcelaine où la moindre pollution colorée n'est pas tolérée. Le moyen final, pour éviter le développement de la coloration, est le couvrage ou la cuisson en réduction à partir d'une certaine température afin de transformer l'oxyde de fer en une variété développant une couleur bleutée plutôt que jaunâtre en oxydant.

Les émaux fortement plombés peuvent avoir une coloration jaune ou jaune-verdâtre assez désagréable. Les alcalins agissent énergiquement comme des «décolorants » en formant des plombâtes et réduisent, ainsi la quantité de l'oxyde PbO libre, par contre la chaux n'a aucun pouvoir décolorant, bien au contraire du fait qu'elle exige pour sa propre saturation une quantité importante de silice. Elle augmente de ce fait la quantité de PbO libre qui lui est fortement colorant. C'est d'ailleurs un fait d'expérience que les émaux plombo-calcaires sont toujours fortement colorés. (La coloration est attribuée à un eutectique entre PbO et $PbSiO_3$ qui serait jaune-verdâtre.) Cette coloration est plus simplement combattue optiquement par l'azurage de l'émail, c'est-à-dire par l'adjonction d'une légère coloration bleue à partir d'une fritte au cobalt par exemple (quelques %) soit par ajout au broyage d'un très faible pourcentage (0,01 à 0,025 %) de sulfate de cobalt fixé avec 0,1% de carbonate de soude pour permettre une bonne dispersion. Quant, aux sels de vanadium, ils se concentrent et développent des colorations parasites essentiellement sur les parties du tesson qui auront séché plus rapidement que les autres, ils donnent des colorations jaunâtres du tesson et développées par la suite à la cuisson émail. Un petit ajout de 2 à 5 % de carbonate de baryum dans la composition de la pâte peut être bénéfique.

D'autres colorations peuvent apparaître sur la surface des émaux en provenance d'autres émaux avoisinants dans le four ou de composés volatils qui se seront déposés sur les parois du four et des réfractaires et qui, lors de la cuisson suivante, pourront se volatiliser à nouveau et venir en réaction avec la surface de l'émail. Le cas le plus courant est le « rosissement » des blancs à base d'étain lorsqu'ils sont en présence de composés de chromes que l'on trouve souvent dans les couleurs foncées et notamment dans certains noirs mats

ÉCLAT DE L'ÉMAIL

La brillance d'un émail est fonction du pouvoir réfléchissant de la lumière éclairante, ce pouvoir dépend de l'indice de réfraction du produit. Les produits qui augmentent le plus la brillance, sont d'abord Pb et Ba , viendront ensuite, à degré moindre, les alcalis, le bore. Le zinc et la chaux améliorent également à condition d'être utilisés en faible pourcentage

DÉVELOPPEMENT DES COLORANTS

Il n'existe pas d'émaux développant de façon correcte toutes les nuances d'une palette, il convient donc de choisir son émail en fonction de ses colorations futures ou développer plusieurs bases afin d'obtenir une palette de couleurs la plus vaste possible.

Un émail ne doit pas être trop agressif vis-à-vis des constituants des colorants afin que le complexe formé, par ces constituants, ne soit pas détruit et la couleur dénaturée. En fin de cuisson, l'émail alors en phase liquide à un pouvoir de dissolution important, la dissolution si elle est sélective peut aller jusqu'à détruire certains éléments du colorant, les émaux transparents habituellement plus fluides que les émaux opaques développeront mieux la couleur (d'autant plus que le milieu transparent est optiquement plus favorable à la transmission de celle-ci). Par contre, la stabilité de la couleur est plus faible dans les émaux transparents qui supporteront moins facilement les excès de température.

Pour bien développer les couleurs, la base de l'émail devra contenir le maximum de l'élément principal du colorant, en effet l'émail (ayant un pouvoir solvant sur le colorant) risque de dénaturer la couleur par dissolution complète de certains éléments du colorant. A contrario, si l'émail contient déjà un fort pourcentage des principaux éléments du colorant il en sera très vite saturé et les éléments du colorant restant seront en suspension dans l'émail et contribueront à la coloration.

- Les jaunes de Naples $Sb-Pb$ préfèrent les bases fortement plombées.
- Les jaunes à base de zircon préfèrent des bases contenant du zircon.
- Les verts victoria exigent beaucoup de calcium.

RÉSISTANCE À L'ATTAQUE CHIMIQUE

On demande de nos jours que la plupart des céramiques à usage utilitaire, carreaux, vaisselle et sanitaire soient résistants aux agents chimiques et présentent toutes garanties d'innocuité.

La résistance aux agents chimiques dépend essentiellement de l'acidité. Hors, les émaux fusibles, cuits à basse température, contiennent beaucoup de fondants qui sont principalement des bases. Il est possible de dire que plus un émail est fusible, moins il résistera aux attaques chimiques, c'est pourquoi les couvertes, cuites à haute température, nécessitent peu de fondants et elles résisteront mieux aux attaques.

Les éléments qui diminuent la résistance aux acides et base sont par ordre croissant :

- Li_2O , Na_2O , K_2O , l'attaque des émaux progressant très vite avec l'augmentation du pourcentage de ces produits.

Les éléments, qui augmentent la résistance aux attaques acides, sont par ordre croissant.

- BaO : à faible pourcentage

- MgO

- B_2O_3 : si pas en excès.

- CaO : efficace, sauf pour des % élevés.

- Al_2O_3 : à faible %.

- TiO_2 : à faible % à cause de son pouvoir colorant.

- SiO_2 : le plus efficace.

- ZrO_2 : augmente la résistance aux attaques basiques, mais diminue la résistance aux attaques

- acides.

Pour un émail, la résistance aux agents chimiques basiques est plus difficile à trouver, car malgré ce que l'on pourrait supposer les ions alcalins sont défavorables.

Les ions MgO , CaO , ZnO ainsi que PbO , Al_2O_3 et B_2O_3 augmentent la durabilité.

Les glaçures de faïence contenant des colorants au cuivre sont très facilement attaquables par les acides, en effet, le cuivre fragilise les liaisons du réseau formateur.

Dans le cas de la résistance aux solutions alcalines (basiques) le rôle de la texture superficielle de l'émail est important, la surface de l'émail doit être aussi lisse, plane et homogène que possible, toutes les hétérogénéités, bulles, saillies, fentes seront autant de points faibles qui favoriseront l'attaque de l'émail (par augmentation de la surface d'échange entre l'émail et la solution d'attaque)

Les acides attaquent l'émail par échange entre les ions modificateurs de réseaux et les ions hydrogénés de l'acide. Plus le pH de la solution sera bas, plus l'attaque sera forte.

Lors d'une attaque par solution alcaline, il y a d'abord la mise en solution des ions formateurs du réseau sous forme de silico-aluminates, puis lorsque le réseau est suffisamment détruit, la réaction se poursuit entre la solution alcaline et les ions modificateurs de réseaux. Pour augmenter la résistance aux bases, il faut donc introduire des ions fortement liés aux ions formateurs pour former des silicates insolubles (Ba , Ca , Pb , Zn , Zr , Al).

Lors de l'attaque de l'émail par l'eau ou la vapeur, les alcalins de l'émail sont extraits et forment une solution alcaline qui attaque le réseau siliceux.

PROBLÈME DE LA TOXICITÉ DES ÉMAUX

Certains éléments constituant les émaux sont plus ou moins toxiques pour l'organisme : le plomb, le cadmium, et à un degré moindre le baryum et le zinc, sans omettre les composés à base d'uranium désormais exclus des matières premières utilisées en céramique depuis quelques dizaines d'années.

Ce chapitre concernera essentiellement la toxicité et les risques relatifs à l'utilisation du plomb. La toxicité peut avoir deux origines :

Celle concernant le personnel de fabrication des ateliers de préparation des émaux et d'émaillage et celle des utilisateurs de pièces émaillées avec des compositions au plomb où celui-ci pourra être solubilisé par des agents extérieurs.

TOXICITÉ POUR LE PERSONNEL DE FABRICATION

Le cas de la toxicité dans les ateliers de fabrication sera traité ultérieurement, le plomb peut pénétrer dans l'organisme, par les voies respiratoires, mais également par ingestion ou à travers des plaies ouvertes et la nécessité de travailler de telle façon à ne jamais être en contact direct avec les matières premières contenant du plomb, par l'usage de gants et de protection imperméable, d'éviter de respirer toutes poussières lors de la pulvérisation de l'émail par exemple par le port de masque, de se laver après chaque utilisation de ces produits. Il faut rappeler que si le plomb pénètre rapidement et facilement dans l'organisme, il lui faut plusieurs années pour être éliminé totalement par celui-ci.

TOXICITÉ POUR L'UTILISATEUR

Concernant les céramiques alimentaires. La toxicité n'existe que sous certaines conditions :

- Les aliments soient acides et en contact avec l'émail : vinaigre, le vin, les jus de fruits...
- La dissolution du plomb n'étant pas instantanée, il est nécessaire que le contact entre les aliments acides et le plomb dure plusieurs heures.
- L'organisme ait une faculté limitée d'éliminer des éléments toxiques et que des seuils de tolérance existent.

FACTEURS INFLUENÇANT LE DÉGAGEMENT DU PLOMB

Le plomb permet d'obtenir des compositions d'émaux qui cuisent plus bas que des compositions sans plomb. Il permet, également, d'obtenir des émaux ayant une dilatation plus basse et une surface plus belle, il donne un palier d'utilisation assez large qui permet de s'adapter facilement aux hétérogénéités de température du four, il donne un éclat et un brillant plus élevé que les autres fondants et permet un nappage plus grand estompant les irrégularités de surface.

La solubilité du plomb dépend de la composition globale de l'émail et en particulier de la présence d'opacifiant et de colorants qui influent de façon notable.

De plus, le mélange de fritte à faible solubilité ne donne pas forcément une glaçure à faible solubilité. La présence d'alcalis, de bore peut accentuer la solubilisation du plomb, on peut mélanger une fritte plombeuse peu soluble et une fritte sans plomb et obtenir une glaçure libérant beaucoup de plomb.

La solubilité du plomb n'est pas proportionnelle à la teneur en plomb de l'émail, les alcalis, le bore, le fluor, l'oxyde de zinc et l'oxyde de cadmium, ont tous, tendance à augmenter le dégagement en plomb.

Il faut cuire l'émail à la température pour laquelle il a été conçu, absolument éviter d'obtenir des émaux mats en sous cuisant des glaçures au plomb, car une cuisson insuffisante augmente les risques de solubilité, de plus lors de la rectification de la composition d'émaux (pour remédier au tressillage par exemple, il est bon de vérifier si ce changement n'a pas augmenté la solubilité du plomb).

Lors de la cuisson les glaçures au plomb doivent être correctement ventilées, le dégagement de plomb pour une glaçure donnée est plus faible lors de la cuisson en four gaz, qu'en électrique.

Lors de la cuisson, le plomb se volatilise facilement et peut venir se déposer sur la surface de pièce émaillée avec une glaçure non plombeuse.

Ne jamais fritter B_2O_3 et les alcalis en même temps, faire deux frittes distinctes et réserver les alcalis pour la fritte boracique, si les deux composés sont frittés ensemble ils donneront naissance à des borates de plomb solubles.

- Composer la fritte plombeuse pour qu'elle soit aussi acide que possible
- Introduire 0,1 à 0,2 mole d'alumine ou de chaux pour stabiliser le plomb
- Le tressillage augmentant la surface d'attaque des acides il peut aller jusqu'à doubler la solubilité du plomb par unités de surface s'il arrive à pénétrer sous la glaçure.

DILATATION

La condition essentielle pour l'obtention d'une « bonne » glaçure est son adaptation au tesson auquel elle doit adhérer parfaitement, les propriétés du tesson et de l'émail doivent s'harmoniser de telle façon qu'après cuisson tous deux ne fassent qu'un.

La dilatation et la contraction des corps, en particulier des solides, sont fonction de leur composition chimique et de leur passé thermique (exemple de l'acier trempé).

Lors de la phase de refroidissement dans une cuisson céramique le tesson et l'émail subiront une contraction, les deux corps pourront alors être soumis à des forces contraires qui pourront après durcissement de l'émail engendrer la destruction de l'émail, et/ou du tesson.

Il faudra pour assurer une bonne adaptation de ces deux corps que leur coefficient de dilatation soit aussi proche que possible (et pas seulement sur un point particulier), on recherche un coefficient de dilatation inférieur à celui du tesson afin que l'émail soit en compression (le delta de coefficient peut avoisiner les 17%), mais il faudra également que leur résistance mécanique et leur élasticité soient suffisantes pour compenser les différences de coefficient de dilatation.

Le coefficient de dilatation n'est pas seulement fonction de leur composition, mais également de leur tension interne. Les glaçures exemptes de contraintes ont un coefficient de dilatation plus faible que celles qui sont sous contrainte, la différence de dilatation pouvant atteindre 2%, ces contraintes peuvent être provoquées par le tesson de nature différente, mais également par le passé thermique de celui-ci.

Ceci est également valable pour les glaçures, en effet lors d'un refroidissement rapide la périphérie du tesson ou de l'échantillon d'émail durcira rapidement, l'intérieur de l'échantillon ne pourra alors pas se contracter normalement puisqu'il sera « tenu » par la carapace extérieure, après refroidissement une glaçure ainsi traitée sera en tension à l'intérieur et en compression à l'extérieur (procédé bien connu pour la fabrication du verre dit « sécurit »). Lors du réchauffement d'un échantillon dans un dilatomètre arrivé à une certaine température dite « température inférieure de recuisson », on a un ramollissement léger de celui-ci et relâchement des tensions internes. Il y a contraction apparente de l'échantillon qui fausse la mesure, il faudra prêter attention à la préparation de l'échantillon de telle façon que celui-ci ait été refroidi lentement afin d'éviter toutes tensions internes. Les différences de coefficient de dilatation peuvent donner naissance à deux défauts opposés : le tressailage et l'écaillage, plus rarement des différences très importantes dans le cas de pièces émaillées sur une seule face ou dont les deux faces, pour une assiette, par exemple n'ont pas reçu le même émail, peuvent provoquer des fentes voir même la casse complète de la pièce (défaut se produisant souvent bien après le refroidissement).

LE TRESSAILLAGE : il se présente sous la forme de fines fêlures dans l'épaisseur de l'émail, celles-ci suivent la plupart du temps une distribution en forme d'étoile ou de spirale et elles sont, dans leur dessin fortement, influencées par le mode de fabrication du tesson (donc des contraintes qu'il a pu subir lors de sa mise en forme), ces fêlures formeront en se croisant une multitude de petites surfaces géométriques proches du carré dont les dimensions pourront varier de quelques dixièmes de millimètres à plus d'un centimètre selon la différence de coefficient de dilatation.

Lors de différences importantes de dilatation, ces petites surfaces seront concaves et leur présence sera détectable au toucher.

L'apparition la plus constatée du tressailage est à la sortie du four où un léger crépitement à chaque apparition d'une fêlure retentit, ceci est dû au « choc thermique » provoqué par la sortie de pièces trop chaudes dans le milieu ambiant.

Les fêlures peuvent apparaître après une sortie plus tardive, donc à une température plus basse, ce qui ne que rallonger le temps d'apparitions et ne contribue que peu à éviter le défaut, cependant il convient d'éviter les chocs thermiques pour des pièces qui sont sensibles à ce défaut.

À la fin du chapitre, il sera évoqué que c'est un des moyens de contrôler la résistance au tressailage des pièces cuites. Ce défaut est rédhitoire pour toutes les pièces céramiques utilitaires, comme la vaisselle, les carreaux et les appareils sanitaires, en effet, les fêlures permettront à l'eau, à l'humidité, et à tous agents chimiques de pénétrer jusqu'au tesson et si celui-ci est poreux comme dans le cas des faïences des impuretés pourront s'installer dans les pores du tesson et ils seront susceptibles de donner naissance à des bactéries, rendant impropre l'utilisation de la pièce en question.

Tressaillage



L'ÉCAILLAGE : l'émail se soulève par petite surface pointue et très fine, il se détache parfois complètement du tesson, le défaut apparaît sur les arêtes, sur les surfaces bombées et il est facilité par une forte épaisseur, dans les cas extrêmes on peut avoir de grande plage de tesson sans émail ou dans le cas des carreaux, une déformation convexe.

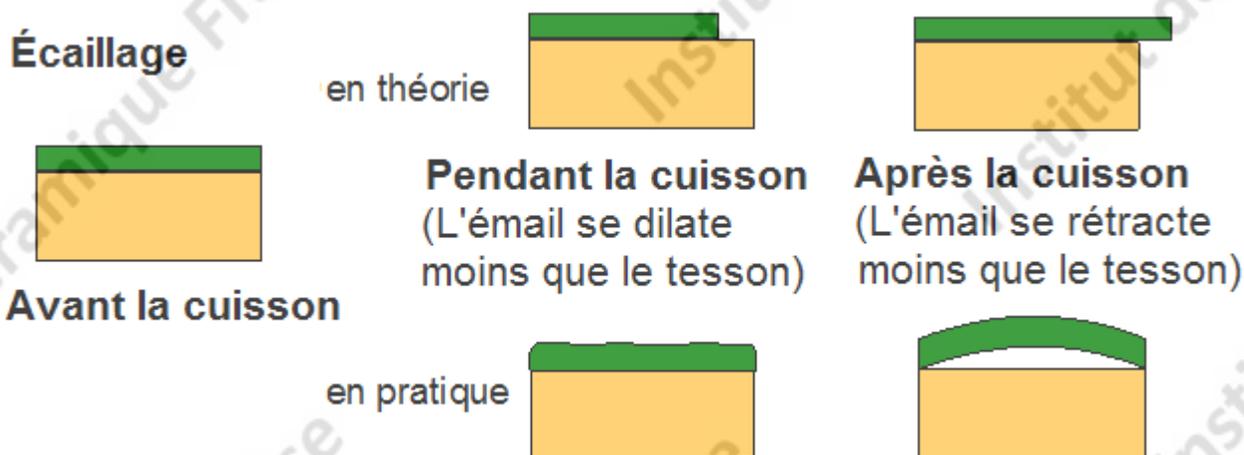
Ce défaut apparaît, généralement, dès la sortie du four, mais peut également se déclencher à la suite d'un choc pendant le défournement ou le tri, ce défaut apparaît généralement moins que celui de tressaillage puisque la plupart des matériaux sont beaucoup plus résistants à la compression qu'à la tension.

PELAGE : attention ce défaut est assez semblable à l'écaillage et pour le praticien qui ne peut pas avoir sous les yeux les deux types de défauts simultanément, le risque de confusion existe, ce défaut ressemble beaucoup à l'écaillage, mais n'occasionne pas l'arrachage du biscuit, celui-ci est provoqué par une mauvaise adhérence de l'émail sur le tesson la plupart du temps trouvant son origine dans une finition en humide sur pièce sèche trop longue ou trop poussée.

L'eau en détrempant la pièce entraînera la partie argileuse et laissera en surface du tesson une surface rugueuse essentiellement composée de la partie dégraissante de la pâte. Ces matières premières plus réfractaires que l'ensemble de la pâte n'offriront pas à l'émail une surface propre à un bon accrochage, ce défaut peut donc se produire sur un émail parfaitement accordé au tesson, aussi faut-il se garder d'une conclusion hâtive en ce qui concerne les solutions à mettre en œuvre.

Si le problème s'avère être du pelage (aussi appelé «écoussage»), la seule solution courante de l'industrie outre le fait de remédier à une trop forte finition est de badigeonner les surfaces à risque, les bords par exemple, de carbonate de soude, une glaçure assez proche du tressaillage donc, plus fusible, tendra à diminuer le défaut.

Écaillage



POST TRESSAILLAGE : Ce défaut apparaît sur des pièces ayant subi une cuisson de petit feu (décor) après la cuisson émail, les pièces ne présentant pas de défaut de tressaillage à la sortie de la cuisson émail. Au cours de la cuisson décor, il peut se produire à une certaine température, l'apparition de fentes de tressaillage dont les lèvres ont baillé légèrement. Ces lèvres sous l'effet de la température se sont ramollies et rebouchées, les arêtes s'adoucissent, mais la température est restée insuffisante pour obtenir un nappage complet.

TRESSAILLAGE INVISIBLE OU REFERMÉ : nous mentionnons ici un phénomène particulier qui se produit lorsque certaines pièces émaillées, dont l'accord n'est pas parfait, sont soumises à un choc thermique violent par refroidissement brusque, l'émail se refroidissant rapidement se contracte énergiquement, tandis que le biscuit encore chaud reste dilaté. Il peut alors se produire une rupture de la couche d'émail. Lorsque le biscuit est refroidi à son tour et normalement contracté, l'accord se rétablit et le défaut devient pratiquement invisible.

VIEILLISSEMENT : le défaut s'apparente à celui du tressaillement, et met en jeu les mêmes phénomènes de dilatation, il affecte essentiellement les tessons poreux et ce d'autant plus que la pièce présentera une face (pour les carreaux de mur) ou une partie non émaillée (pied des assiettes de faïence). Ce défaut apparaîtra après des mois de stockage dans les magasins ou même après plusieurs années d'utilisation chez le client.

Tout corps céramique, non vitrifié est susceptible d'absorber à nouveau de l'humidité, capable de se fixer en hydratant l'argile cuite du tesson, il a été établi que cette eau ne pouvait pas être totalement évacuée par un chauffage à 105°C-110°C. Sous l'effet de cette hydratation, le tesson gonflera légèrement (0,05 %), mais suffisamment parfois pour mettre la glaçure en tension et provoquer le défaut de tressaillement. Les effets et les risques de tressaillement tardif peuvent être décelés par étude du comportement des pièces en autoclave ou celles-ci sont soumises à une pression de vapeur reproduisant l'effet de la pénétration de l'humidité dans le temps.

FACTEURS INFLUENÇANT LE TRESSAILLEMENT TARDIF

Porosité : pour une même composition de pâte, le gonflement sera plus important si la porosité est plus importante, par contre il n'existe pas de corrélation entre la porosité et le gonflement de pâtes de nature différente.

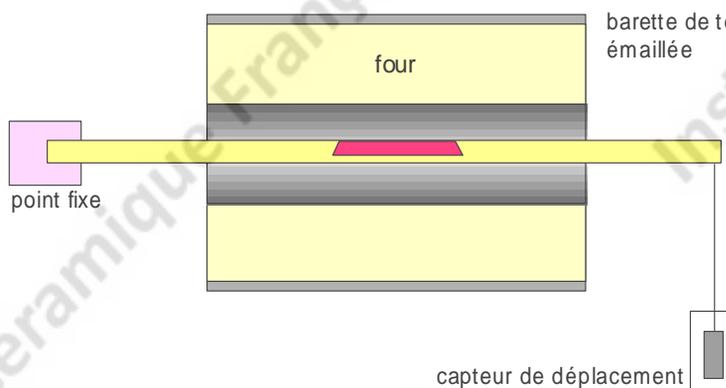
Température de biscuitage : en liaison directe avec la porosité, on établit que le gonflement diminue lorsque la température de biscuitage augmente pour arriver à une inertie totale avec les produits vitrifiés.

Finesse de broyage : le gonflement augmente lorsque le broyage des constituants du tesson augmente, ce qui corrobore le fait que cette prise d'humidité soit un phénomène de surface.

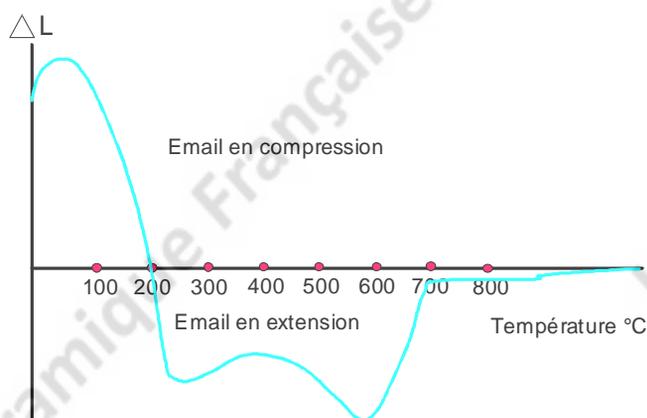
Constitution de la pâte : on a constaté que la chaux et la magnésie diminuent le gonflement, à un degré moindre Fe_2O_3 et TiO_2 sont bénéfiques, les pâtes dolomitiques sont réputées pour ne pas être sensibles à ce défaut.

TEST AU TENSIONNOMÈTRE

Le dilatomètre n'enregistrant que les déformations propres de deux échantillons distincts et sans contrainte, Steger a conçu un appareil qui présente l'avantage de mesurer la résultante des contraintes apparaissant à l'échauffement ou au refroidissement d'un ensemble émail tesson.



Le système tesson-émail est matérialisé, par un bilame fixé à une de ses extrémités et dont la force peut être enregistrée ou le déplacement engendré par les variations de dilatation en cours de cuisson, le tesson étant toutefois le siège de tension interne il est préférable d'utiliser un système différentiel afin d'éliminer celles-ci (on opère sur deux demi-barreaux dont l'un est émaillé et pas l'autre).



Exploitation des courbes

Au cours du refroidissement, l'émail reste suffisamment fluide pour épouser les contractions du tesson et ceci jusqu'au point d'accrochage, ce phénomène se traduit par une droite pratiquement confondue avec l'axe de déformation. En fait, le point d'accrochage correspond à une température critique. Au-delà de cette température, la viscosité de l'émail est relativement faible et n'augmente pas de façon brutale, ce qui permet aux tensions émail-tesson qui apparaissent, d'avoir un « temps de relaxation » tel qu'elles s'estompent rapidement. Pour les températures en deçà du point d'accrochage le temps de relaxation est suffisant pour que les tensions apparaissent et la courbe présente alors des points singuliers caractérisés par des fléchissements.

ANALYSE DILATOMÉTRIQUE

L'analyse dilatométrique des matières premières céramiques fournit des indications intéressantes sur leur comportement au feu en précisant les variations de leur dimension en fonction de la température, et la vitesse avec laquelle elles se produisent. Elle permet ainsi dans la plupart des cas :

- une identification facile des espèces minérales,
- de déceler les transformations allotropiques et les réactions à l'état solide qui ont lieu au cours de la chauffe, phénomènes souvent accompagnés d'une nette augmentation de volume,
- d'obtenir des renseignements précieux pour la conduite optimum de la cuisson d'une composition céramique

L'ensemble des valeurs qui suivent a été établi par des appareils capables de mesurer les variations dimensionnelles d'un échantillon céramique en fonction de la température (tesson ou émail), de nombreux types d'appareils existent, mais les deux grandes familles prépondérantes sont celles des dilatomètres absolus où les variations dimensionnelles de l'échantillon sont mesurées en direct et les dilatomètres différentiels où les variations dimensionnelles de l'échantillon sont comparées pendant le test à celles d'un étalon cuisant dans les mêmes conditions. C'est de cette dernière famille que fait partie le dilatomètre «Chevenard», bien connu des céramistes.

Ces appareils fiables, mais très complexes d'utilisation, ont laissé place à une nouvelle génération où l'informatique a considérablement amélioré les performances, notamment en ce qui concerne le traitement des données.

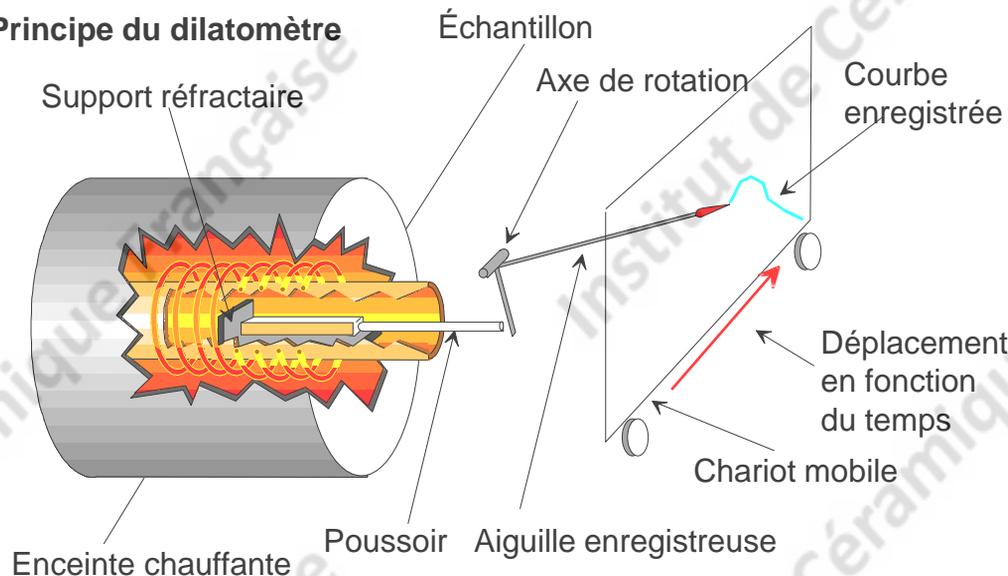
Porcelaine	: 30 à 45	$\times 10^{-7}$	Vitreous	: 40 à 50	$\times 10^{-7}$
Pâtes alumineuses	: 30 à 40	$\times 10^{-7}$	Faïences tendres	: 60 à 100	$\times 10^{-7}$
Faïences dures	: 50 à 90	$\times 10^{-7}$			

DILATATIONS DES PRINCIPAUX ÉMAUX :

Glaçures et émaux de faïences	: 57 à 100	$\times 10^{-7}$	couvertes de porcelaine	: 37 à 45	$\times 10^{-7}$
Silice vitreuse	: 5,4	$\times 10^{-7}$	couvertes de pâte culinaire	: 32	$\times 10^{-7}$

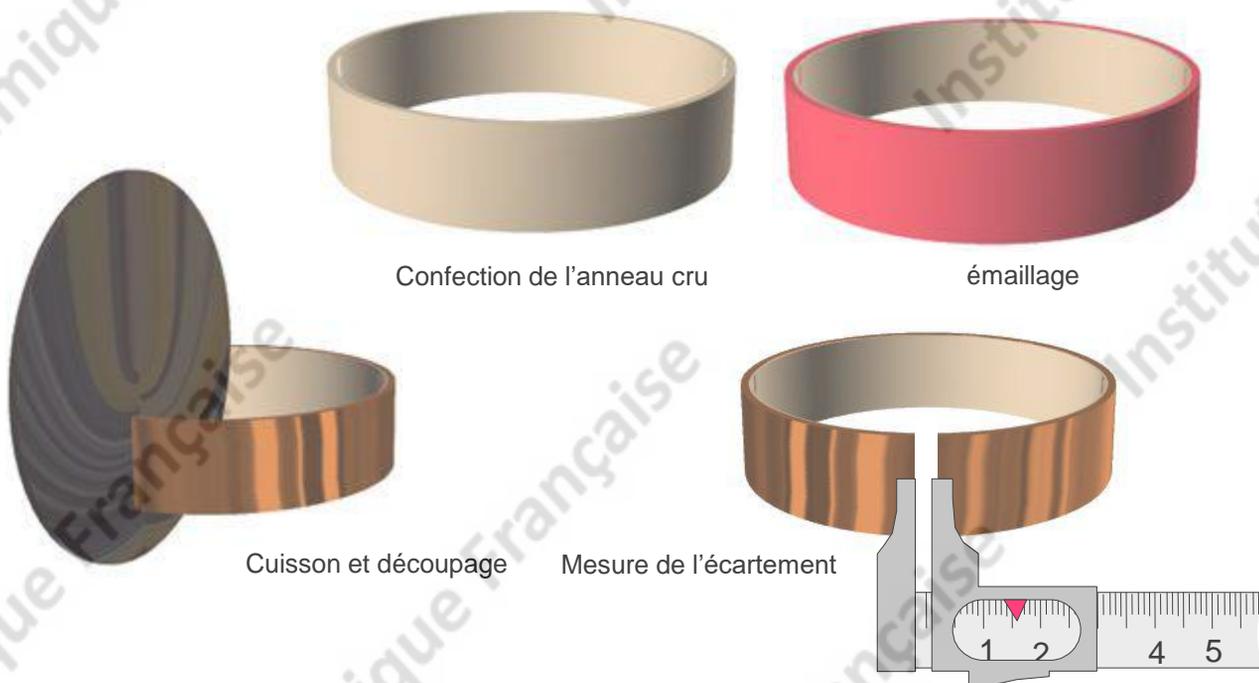
(également celui du verre pyrex)

Principe du dilatomètre



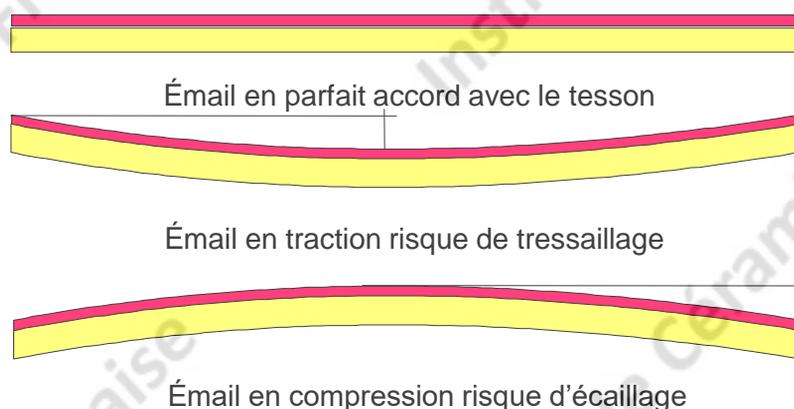
Dilatation d'anneaux

Une autre méthode consiste à fabriquer des anneaux d'environ 10 cm de diamètre et de 3 cm de haut pour une épaisseur de 4 mm, ces anneaux seront émaillés uniquement sur leur face extérieure. Après cuisson, le diamètre sera mesuré en plusieurs endroits, l'anneau sera ensuite découpé de haut en bas, la tension de l'émail aura tendance à faire déformer l'anneau, si leur coefficient de dilatation n'est pas identique, si la fente à tendance à se refermer l'émail est écaillant, si la fente à tendance à s'ouvrir l'émail est tressaillant.



MESURE DE LA DÉFORMATION DE PLAQUETTES

L'essai consiste à émailler des pièces de biscuit de forme particulière et de mesurer les déformations que la tension ou la contraction de l'émail pourra leur faire subir, bien sûr ces tests doivent se faire sur des pièces relativement fines et en présence d'un étalon, pour que les résultats puissent être appréciables.



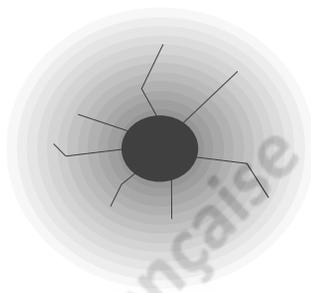
Confectionner ou découper des plaquettes de biscuit (attention le mode d'obtention de celle-ci ou leur mode de façonnage devra toujours être rigoureusement le même et le plus proche des types de fabrication de l'unité de fabrication, aussi faut-il choisir un mode d'obtention qui soit significatif et reproductible sur plusieurs années) d'une dimension de 2cm par 10cm et d'une épaisseur de 4mm.

Émailler celle-ci avec des quantités d'émail toujours identiques (à moins de vouloir tester l'influence de l'épaisseur sur les forces de tension et de contraction), positionner celle-ci sur une plaque réfractaire non déformée, pourvue d'un mince lit d'alumine qui laissera libre cours aux déformations des échantillons sans risque d'accrochage sur la plaque, après la cuisson, il suffit de mesurer la flèche créée par la déformation de la cuisson. Ces échantillons cuits peuvent également subir le test du choc thermique par la suite.

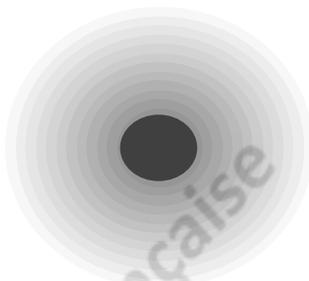
TEST DU POINÇON OU MÉTHODE RIGBY

Les aspects d'un choc occasionné sur une surface émaillée seront de natures différentes selon que la glaçure sera en tension ou en compression, si la glaçure est en tension il apparaît sur le point d'impact de fines trésaillures.

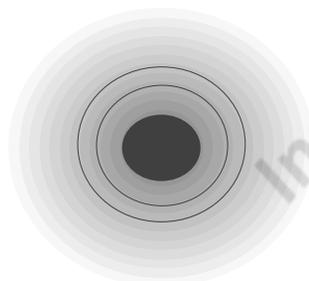
Dans le cas contraire, elle est en compression, le point d'impact sera entouré concentriquement d'une ligne ou d'une fêlure délimitant la zone de rupture de l'émail, si l'émail et le tessou sont en accord seul le point d'impact est apparent.



Tendance au tressaillage



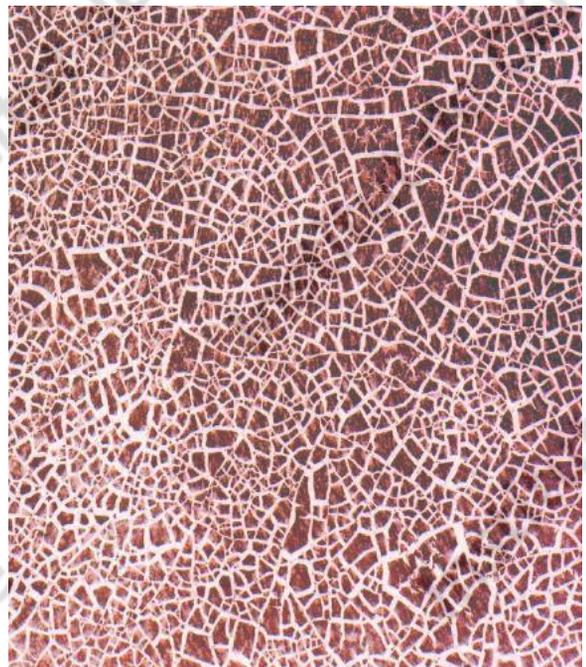
Accord en émail et tessou



Tendance à écaillage



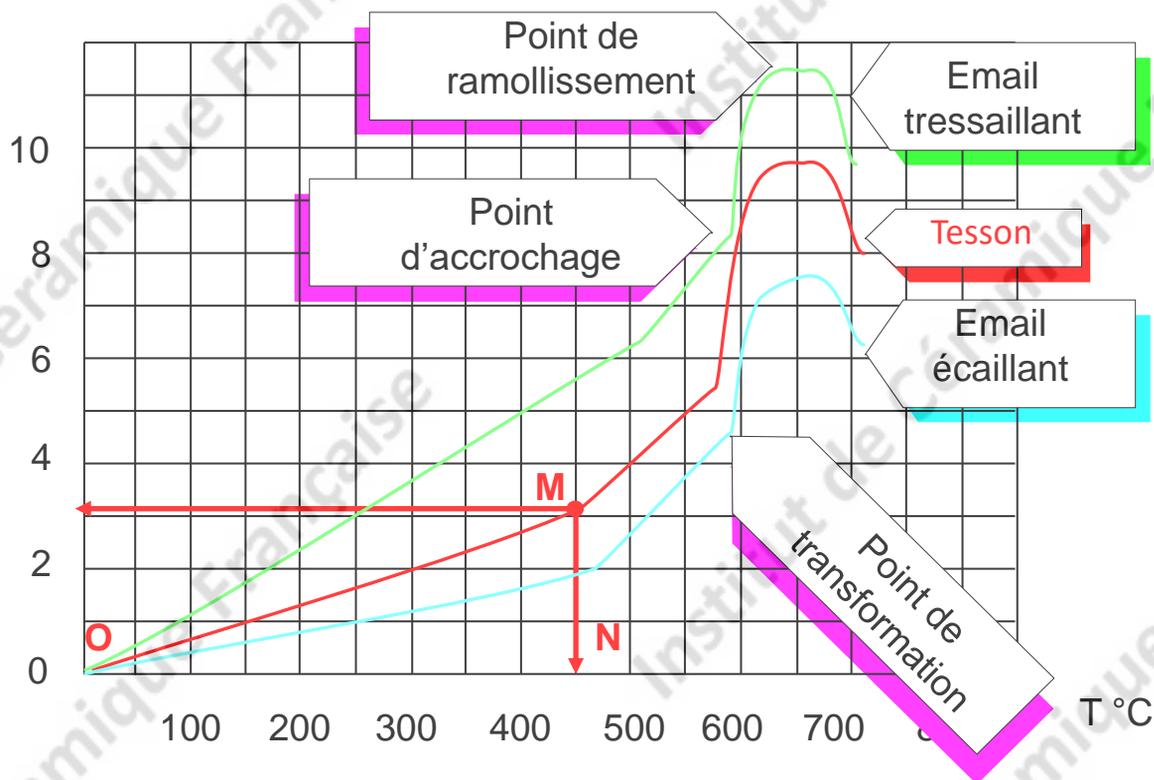
Pièces écaillées, à gauche l'engobe est trop réfractaire, à droite sur finition des angles.



Pièces tréaillées (à droite, apparition d'efflorescences à travers l'émail craquelé).

Comparaison entre les courbes de dilatation d'un tesson et d'émaux

Dilatation en ‰

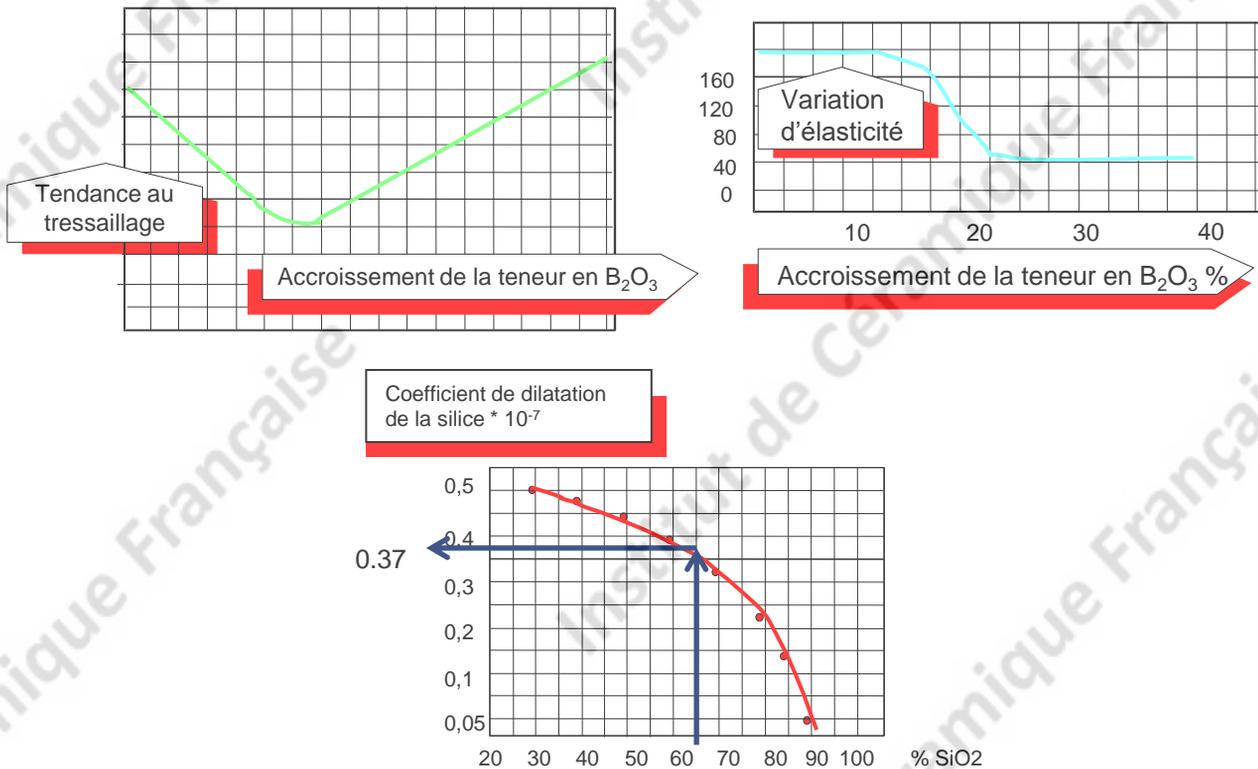


Pour le point M le calcul du coefficient de dilatation linéaire γ :

$$\gamma = \frac{MN}{ON} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{450} = \frac{3}{450\,000} = \frac{6,6}{1\,000\,000} = 66 \cdot 10^{-7}$$

RÔLE DE L'ANHYDRIDE BORIQUE (B_2O_3)

L'anhydride borique en quantités appropriées est généralement considéré comme inhibiteur de tressailage compte tenu de son faible coefficient de dilatation, mais la diversité des glaçures dans lesquelles il est employé ne corrobore pas toujours ce fait, en effet son caractère amphotère au même titre que l'alumine, le fera réagir différemment selon la base dans laquelle il est inclus, en fait l'effet résultant d'un accroissement de la teneur en B_2O_3 atteint un point optimum (établi à 12%)



RÔLE DE LA SILICE DANS LA DILATATION

Avant d'entamer le chapitre sur la résolution des problèmes d'accord entre pâtes et émaux, il convient de connaître les réactions de la pâte à l'élévation de température et surtout de son constituant principal la silice qui pourra selon sa nature réagir différemment selon qu'il s'agit d'une pâte vitrifiée ou d'une faïence.

La silice existe dans la nature sous quatre formes :

- le quartz
- la cristobalite
- la tridymite
- la silice vitreuse

La forme la plus courante étant le quartz, la cristobalite étant souvent commercialement trouvée sous le nom de silice amorphe.

Comme on peut le voir sur le schéma des courbes de dilatation des silices, il existe une grande différence de dilatation entre ces différents types de silice.

Aussi, introduire de la cristobalite dans une pâte tendrait à diminuer le tressailage alors que l'introduction de silice vitreuse aurait certainement l'effet inverse, cependant le problème du choix de type de silice à incorporer dans les pâtes et émaux n'est pas si simple puisque la silice sous l'action de la température pourra passer d'une forme à l'autre, il conviendra de bien connaître le type de silice que l'on devra avoir au moment où l'émail et le tesson seront en phase d'accrochage.

La silice contenue dans les émaux se trouve toujours à l'état vitreux et aura souvent tendance à favoriser l'accord en diminuant le coefficient de dilatation.

Dans les pâtes de faïence contenant peu de fondant, la silice restera à l'état cristallin, quartz ou cristobalite, la tridymite étant rare, l'augmentation de silice aura alors tendance en relevant le coefficient de dilatation à diminuer le tressailage ou augmenter l'écaillage.

Dans les pâtes vitrifiées, l'ajout de silice aura tendance à abaisser le coefficient de dilatation de la pâte et augmentera les risques de tressailage

On essaie habituellement pour les pâtes de favoriser le passage du quartz à la cristobalite, en effet, celle-ci possédant un coefficient de dilatation beaucoup plus important, elle aura tendance à diminuer le défaut de tressailage.

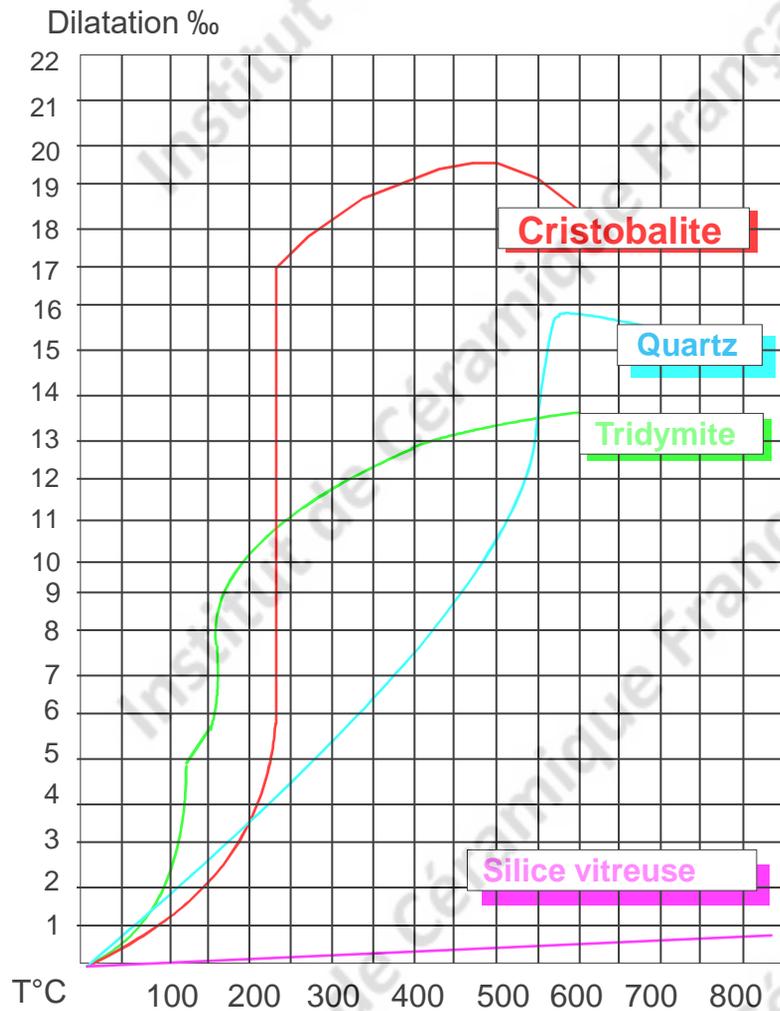
Dans les pâtes de faïence, la transformation du quartz en cristobalite débute vers $950^{\circ}C$, mais n'est véritablement sensible qu'au-delà de $1200^{\circ}C$, c'est pourquoi beaucoup de faïenciers préfèrent introduire une part importante de silice dans leur pâte sous forme calcinée, c'est-à-dire de cristobalite.

Pendant la cuisson, le quartz libre du tesson se transformera en cristobalite bêta. En dessous de 220°C, celle-ci se transformera en cristobalite alpha avec une concentration du volume de 3 à 7%, à cette température la glaçure s'est solidifiée et la contraction du tesson la mettra en compression.

Les facteurs influençant le passage du quartz en cristobalite sont :

- la température de cuisson
- la finesse des grains de silice (il faut 50 à 55 % inférieur à 0,01mm de diamètre)
- l'action de catalyseur comme les alcalis et les alcalino-terreux
- la forme du quartz utilisé (le silex est dans ce sens préférable au quartz ou au sable siliceux)
- le poids spécifique de la silice utilisée qui doit être en théorie de 2,5.

Attention si ces facteurs sont extrêmes, il pourrait avoir formation de silice vitreuse et l'effet inverse serait obtenu.



REMÈDES PRATIQUES POUR COMBATTRE LES DÉFAUTS DE TRESSAILLAGE ET D'ÉCAILLAGE

TRESSAILLAGE :

Action sur la pâte :

- augmenter la teneur en silice (pour un tesson de faïence la teneur en silice doit être de 73 à 75 %)
- broyer les constituants plus fins (surtout la silice)
- augmenter la teneur en fondant alcalin et alcalino-terreux (pour les pâtes poreuses)
- diminuer la teneur en fondants alcalins (pour les pâtes vitrifiées)
- augmenter l'argile et diminuer le kaolin
- et pour les pâtes poreuses uniquement, augmenter le temps et la durée de cuisson (surtout en palier)

Action sur l'émail :

- augmenter la silice (attention à introduire la silice au début du broyage, plus sa finesse sera grande, plus vite elle se transformera en silice vitreuse)
- faire un ajout de 5 à 10 % de kaolin au broyage
- diminuer les alcalis dans la fritte
- augmenter la température et la durée de cuisson
- développer la couche intermédiaire

ATTENTION : les augmentations de la quantité de silice et de température pour la pâte et pour l'émail ne sont pas destinées aux mêmes réactions dans le cas des pâtes, la création de la cristobalite sera favorisée, dans le cas des émaux, la formation de silice vitreuse sera favorisée.

ATTENTION : les changements cristallins de la silice sont souvent estompés lors de l'augmentation de la vitesse des cuissons, les cycles rapides actuels vont à l'encontre de la formation de la cristobalite dans le tesson, et également à l'encontre de la formation de la couche intermédiaire.

LA COUCHE INTERMÉDIAIRE

Il serait inexact de croire qu'à la suite de la cuisson émail, celui-ci recouvre le tesson en formant une carapace qui conserve son indépendance et son individualité, sans qu'il y ait un accrochage plus intime entre la couche d'émail et le tesson.

Un émail est un matériau complexe comprenant des éléments fusibles et des éléments réfractaires. Au cours de la cuisson émail, les éléments fusibles entreront très vite en fusion et enroberont les éléments les plus réfractaires, il s'ensuivra une dissolution partielle ou totale de ces éléments réfractaires pour ne former plus qu'un « verre homogène ».

Si l'émail est susceptible de dissoudre une partie de ses propres composants réfractaires, il en est de même pour les composants du tesson. Cette dissolution sera d'ailleurs sélective, certains constituants étant plus facilement dissous que d'autres, de sorte que la surface du tesson sera plus ou moins irrégulièrement corrodée et formera des anfractuosités qui contribueront grandement à l'accrochage et à l'adhérence de l'émail sur le tesson.

De plus du fait de cette dissolution, la composition de la glaçure se trouvera changée aux abords du tesson et l'on retrouvera parfois la composition initiale qu'à proximité de la surface.

Cette couche intermédiaire bénéficiera de caractéristiques intermédiaires tant physiquement que chimiquement.

Les facteurs influençant le développement de cette couche intermédiaire sont :

Pour le tesson :

- la nature du tesson (composition, granulométrie, état de surface) et sa porosité
- réactivité du tesson suivant sa température de biscuitage, en monocuisson l'accord est plus facile du fait que la matière argileuse se dissout plus facilement dans l'émail
- finesse des constituants de la pâte qui conditionne l'effet de surface
- état de surface du tesson, un tesson rugueux offrira plus de surface d'attaque à l'émail
- la structure du tesson, une structure grésée ayant une très grande compacité s'opposera à une dissolution par l'émail, d'autre part on risquera avec des émaux visqueux, dont la couche crue prend toujours un léger retrait au début de la cuisson, d'être confronté à un manque d'adhérence et à un glissement de l'émail (attention à la migration de sels fusibles vers les parties anguleuses).

Pour l'émail :

- de sa composition
- sa répartition en fritte et ajout
- sa température de cuisson (vitesse et durée)
- la viscosité et la fluidité de l'émail fondu (également la tension superficielle)
- l'épaisseur d'émaillage, car c'est seulement après une certaine épaisseur que l'on retrouvera la composition initiale

Le développement de la couche intermédiaire est un moyen efficace pour favoriser l'accord, aussi la vitesse et le temps de la cuisson émail seront les facteurs prédominants pour s'assurer du bon accrochage de la glaçure et du tesson.

Point d'accrochage : la similitude des courbes de dilatation de l'émail et du tesson ne sera pas seule garante d'un bon accord, en effet il faut que l'émail à une température donnée puisse s'accrocher par perte de sa viscosité au tesson, c'est à ce moment où les deux couches étant liées, que d'éventuelles contraintes peuvent naître des contractions de ces deux matériaux différents.

Le positionnement du point d'accrochage sera déterminant. Celui-ci doit se trouver dans une zone où les courbes de dilatation ne présenteront plus ou peu de différence permettant ainsi un parfait accord.

Par exemple dans le cas des faïences où une partie de la silice se trouve toujours sous forme de quartz au refroidissement, on essaiera d'avoir un point d'accrochage au-dessus du point quartz pour bénéficier de la contraction du tesson et avoir la possibilité de mettre la glaçure en compression pour éviter le tressaillage.

L'ÉLASTICITÉ DES ÉMAUX

Lors de leurs utilisations, les pièces céramiques à usages domestiques sont souvent soumises à des chocs thermiques ou à des phénomènes de dilatation du fait de leur capacité à absorber de l'eau et à les voir se dilater lors de périodes de chauffe répétées (four, micro-onde, lave-vaisselle ...)

Les émaux résisteront d'autant mieux à ces sollicitations qu'ils seront liés intimement à la pâte, mais il rentrera en ligne de compte un élément nommé «module d'Young», qui permet de définir la capacité d'un émail à se déformer. Plus ce module sera élevé, plus la résistance de l'émail aux sollicitations de dilatation sera également élevée. Mais les tensions entre le tesson et l'émail seront plus élevées, ce qui implique des propriétés mécaniques également élevées, sinon le risque de rupture sera plus important.

Au même titre que pour les phénomènes de dilatation, chaque oxyde composant les céramiques possède son propre au module d'élasticité, il est donc possible d'évaluer le module d'élasticité final d'un émail par le calcul.

	Module d'élasticité GPa
SiO ₂	64 à 69
Al ₂ O ₃	112
K ₂ O	40
Na ₂ O	58
Li ₂ O	78
CaO	109
BaO	61
MgO	90

	Module d'élasticité GPa
ZnO	59
PbO	42
P ₂ O ₅	51
BeO	107
CoO	84
Fe ₂ O ₃	51
NiO	60

TEST DE RÉSISTANCE AU TRESSAILLAGE À L'AUTOCLAVE

La résistance au tressailage se mesure généralement en soumettant les pièces émaillées à l'action de la vapeur. La vapeur en pénétrant dans le tesson, provoque une dilatation de celui-ci due à l'absorption d'humidité. La compression s'exerçant sur la glaçure diminue et celle-ci passe en tension et finit par tressailler, dans certains cas on procède au test par cycle de chauffage et refroidissement.

Le procédé est habituellement cyclique : on chauffe à la vapeur à 3,5 kg/cm² de pression une vingtaine de pièces qui seront ensuite refroidies dans l'eau froide, on répète les cycles plusieurs fois et à chaque cycle on note le nombre d'échantillons présentant le défaut de tressailage.

La moyenne sera calculée en multipliant le nombre de pièces tressaillées par le nombre de cycles correspondant et en divisant le résultat total par le nombre d'échantillons testés : Le nombre de cycles est de 15 et les pièces ne présentant pas de défaut seront considérées comme ayant résisté à 16 cycles.
 Nombre de cycles moyens = ((1x7)+(1x8)+(2x9)+(1x10)+(2x11)+(1x12)+(2x13)+(2x14)+(3x15)+(5x16))/20.

Nombre de cycles moyens = 256 / 20(nombre de pièces) = 13

Par ce procédé, les faïences sont jugées satisfaisantes à une valeur de 12.

Pour les pâtes vitrifiées, il y a couramment à 20 cycles. Pour les carreaux de faïence, le chiffre ne dépasse guère 6 sauf s'ils ont des compositions spéciales à base de talc.

Test de résistance au tressailage : Méthode d'Harkort

Des éprouvettes d'essais sont trempées dans un bain de glycérine porté à une température donnée (on débute en principe à 120°C) pendant un temps déterminé (de 10 à 15 minutes), puis on les plonge brusquement dans l'eau à 20°C (eau préalablement teintée à l'aide d'un colorant organique).S'il y a apparition de fissures, l'eau colorée en pénétrant dans les fissures permet de les détecter. La température du bain de glycérine est donc élevée progressivement de 20°C en 20°C et cela, jusqu'à l'obtention de l'apparition des premières fissures.

ATTENTION : les échantillons devront être découpés dans le biscuit et ensuite émaillés chacun avec la même quantité d'émail, la cuisson devra être simultanée et si possible accompagnée d'un échantillon étalon, si les échantillons sont découpés dans des pièces émaillées les tensions occasionnées lors du découpage risquent de fausser la mesure

Échelle de résistance au tressailage pour la faïence fine d'après Harkort	
Température d'apparition des premières fissures en °C	Durée quand l'échantillon tressaille au cours d'un stockage naturel.
120	Quelques jours.
150	3 à 4 mois
160	15 mois
170 - 180	30 mois
190	Sans tressailage après 30 mois
200	Sécurité complète

BRILLANCE DE L'ÉMAIL. La tension superficielle est un facteur déterminant de la brillance et du nappage de l'émail. Elle agit sur la surface de l'émail pour la rendre lisse et glacée. Cette propriété peut être comparée à la faculté que présente le caoutchouc d'un ballon d'avoir une surface beaucoup plus brillante quand il est gonflé.

Exemple, le cas d'un émail semi-mat broyé 5h qui a été rendu plus brillant en poussant le broyage à 20 h. Outre l'aspect granulométrique, il est possible d'agir sur la tension superficielle par des ajouts d'oxydes, ainsi l'aluminate de sodium à la dose de 0,2 à 0,4 % du poids de la fritte augmente la tension superficielle des émaux et a une incidence favorable sur par exemple l'émail opacifié au titane qui a une tension superficielle assez faible.

BULLAGE DES GLAÇURES. Elle s'oppose au grossissement des bulles, de même que le savon permet de créer de grosses bulles en baissant la tension superficielle de l'eau, une faible tension superficielle d'un émail favorise le grossissement des bulles qui se sont formées en son sein pour une raison quelconque.

Elles s'agglomèrent les unes aux autres, les plus grosses absorbant les plus petites si l'on prolonge le palier. En porcelaine, il est préférable d'avoir un grand nombre de petites bulles invisibles à l'œil nu, que de prendre le risque de voir apparaître de grosses bulles. En fait, la présence de cette multitude de petites bulles joue le rôle d'opacifiant en détournant la lumière comme le ferait un pigment.

Elle empêche les bulles éclatées de se refermer. Lorsqu'au cours de la cuisson d'un émail, il se forme des bulles qui éclatent, on observe un comportement différent suivant la valeur de la tension superficielle de l'émail. Pour une tension faible, le pore créé par la bulle se referme, si la tension est élevée les bords se retirent et il y a la formation d'un cratère.

ELLE ATTÉNUÉ LA VISIBILITÉ DE LA COQUE D'ŒUF. Ce défaut est dû à de petits cratères surplombant une bulle de diamètre de 100 μm à 200 μm . Ces cratères sont formés lors du refroidissement, grâce à la mince pellicule de glaçure au-dessus des bulles, dépression provoquée par la contraction des bulles et par la pression atmosphérique. Par une forte tension superficielle, la surface de la glaçure agit comme une pellicule tendue qui s'oppose à la formation de cratères. La coque d'œuf sera d'autant moins prononcée que la tension superficielle sera élevée (autre nom du défaut : peau d'orange).

ELLE S'OPPOSE À LA FORMATION DE LA COUCHE INTERMÉDIAIRE. Un émail possédant une forte tension superficielle est peu mouillant, et par conséquent, en contact moins intime avec le tesson, ce qui nuit à la formation de la couche intermédiaire.

ELLE PRODUIT DE FORTS RETIREMENTS D'ÉMAIL. Lorsque le biscuit présente des aspérités, des endroits anguleux ou difficiles à atteindre pour l'émail, si celui-ci est trop riche en matière plastique, il aura tendance à se fissurer en cru (surtout dans les plus fortes épaisseurs), une tension superficielle élevée ne contribuera pas au mouillage parfait du tesson.

Des retirements naîtront de ces imperfections. Les émaux opacifiés présentent une forte tendance au retrait surtout en sanitaire où ils sont posés en fortes épaisseurs, la magnésie favorise ce défaut.

Dans des émaux contenant une forte proportion de zinc, des fendillements ont provoqué des retirements à la cuisson, ces fendillements ont été attribués à la formation de silice colloïdale par hydrolyse.

ACTION SUR L'OPACIFICATION DE L'ÉMAIL. Exemple : les émaux à forte tension superficielle (sans bore) ont une meilleure capacité à dissoudre l'oxyde de titane que les émaux boraciques. Paradoxalement, la forte tension superficielle de ceux-ci contrarie cette dissolution et rend plus facile l'opacification que l'utilisation des émaux au bore.

PENDANT LA FUSION DE L'ÉMAIL. Pendant la fusion de l'émail, la formation de composés à faible tension superficielle favorise le mouillage des composants non encore attaqués.

Si pour une fritte ne contenant pas de bore il est ajouté 0,2 à 0,5 % de B_2O_3 , il se forme au début de la fusion une pellicule qui enrobe les constituants et diminue la tension superficielle de contact des différents grains, facilitant ainsi la fusion.

Il peut y avoir pendant la confection des frites une volatilisation de certains alcalis ce qui changera la composition initiale et augmentera la tension superficielle, l'ajout de 0,5% de Na_2O permet parfois de rétablir la composition originale.

COMMENT MODIFIER LA TENSION SUPERFICIELLE D'UN ÉMAIL ?

Par une composition chimique appropriée : Comme pour le coefficient de dilatation d'une glaçure, le coefficient de tension de celle-ci peut être déterminé mathématiquement, en fonction du coefficient de tension de chaque constituant et de ses proportions dans le mélange.



Quartz	27,5
TiO ₂	39,8
Na ₂ CO ₃	49,6
NaNO ₃	2,9
Fluosilicate Na	2,5
Spath fluor	3,7

Par l'état granulométrique : un broyage trop poussé augmente la tension superficielle (rappelons que c'est un phénomène lié à la surface et que l'augmentation de la division engendre l'augmentation de la surface spécifique).

Par ajout au bain d'émail : les traces d'impuretés abaissent considérablement la tension superficielle, ainsi à un émail exempt de bore. Si l'on rajoute une très petite quantité de borax, on lutte très efficacement contre la formation de cratère, le borax par addition au moulin enrobe les particules d'émail d'une pellicule boracique qui en abaissant la tension superficielle, permet à l'émail de couler dans les bulles éclatées en surface, si ce rajout était fait pendant le frittage l'action serait nulle.

On peut substituer au borax du sous-nitrate de bismuth, ou un silico-titanate de sodium contenant des traces de chaux et de fluor, on peut citer la formule d'un fondant :

COMMENT MODIFIER LA TENSION SUPERFICIELLE D'UN ÉMAIL ?

Par la température de fusion de la fritte d'émail : les frites surfondues donneront des émaux ayant de plus fortes tensions superficielles que des frites fondues à une température normale, cette augmentation de tension est attribuée à la volatilisation des alcalis et des fluorures pendant la fusion de la fritte.

Par changement de l'atmosphère de cuisson : la tension superficielle augmente en réducteur, on peut avoir des différences de valeur de 20%, pour le même émail selon s'il est cuit en oxydant ou en réducteur.

COMMENT DÉTERMINER LES VARIATIONS DE TENSION SUPERFICIELLE ?

Il existe beaucoup d'appareils qui permette d'effectuer cette mesure bien que dans le cas des verres ou émaux en fusion, l'opération soit considérablement plus difficile compte tenu de la température à laquelle on doit opérer.

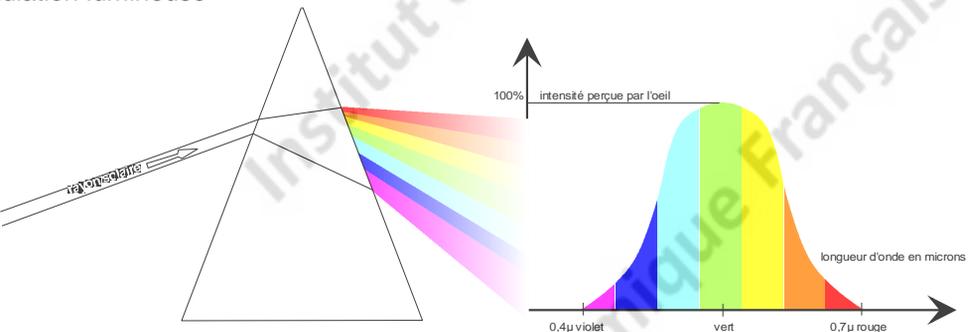
Pour le praticien, il suffira de confectionner des pastilles de 1cm de diamètre et de quelques millimètres de hauteur et d'apprécier après passage au four gradient, par exemple, l'effet de la variation de la température sur l'angle de raccordement au support, la surface occupée par la goutte fondue, sa transparence au centre et au milieu, le halo qui peut cerner la goutte.

Il possible également sur un carreau d'appliquer une couche d'émail qui sera strié à l'aide d'un couteau, il suffira ensuite d'apprécier le taux de «fermeture » des stries sous l'effet de la température ou de divers rajouts. L'essai d'écoulement d'un petit cône d'émail cru sur une plaque de biscuit inclinée et graduée peut également en plus des informations sur la fusibilité, donner une idée de la tension et de la viscosité par la forme de la goutte d'extrémité, en effet une goutte très chargée d'émail sera le signe d'une tension importante.

COLORATION

LA COULEUR : La couleur est une sensation qui est transmise au cerveau par l'œil, lorsque celui-ci reçoit une certaine quantité de radiation lumineuse

La lumière solaire, dite lumière blanche, se décompose en réalité d'une association de plusieurs couleurs que l'on peut mettre en évidence en décomposant un rayon solaire par un prisme.



Le spectre de l'arc-en-ciel est obtenu avec ses sept couleurs les plus importantes : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Chacune de ces couleurs correspond à une radiation de longueur d'onde donnée variant entre $0,4 \mu\text{m}$ pour le violet et $0,7 \mu\text{m}$ pour le rouge, l'ensemble de toutes ces radiations constitue la lumière blanche.

L'intensité lumineuse perçue varie beaucoup avec la longueur d'onde, la courbe ci-contre, montre comment varie la sensibilité de l'œil moyen aux différentes longueurs d'onde, avec un maximum pour le vert alors que la perception est pratiquement nulle pour le rouge et le violet.

LA COULEUR ET LES OBJETS : les objets lorsqu'ils sont éclairés absorbent une certaine quantité de radiation, chacune étant définie par une longueur d'onde et ils renvoient certaines d'entre elles vers l'œil. Dans le cas de la lumière du jour, la couleur absorbée par l'objet et la couleur perçue par l'œil sont dites complémentaires.

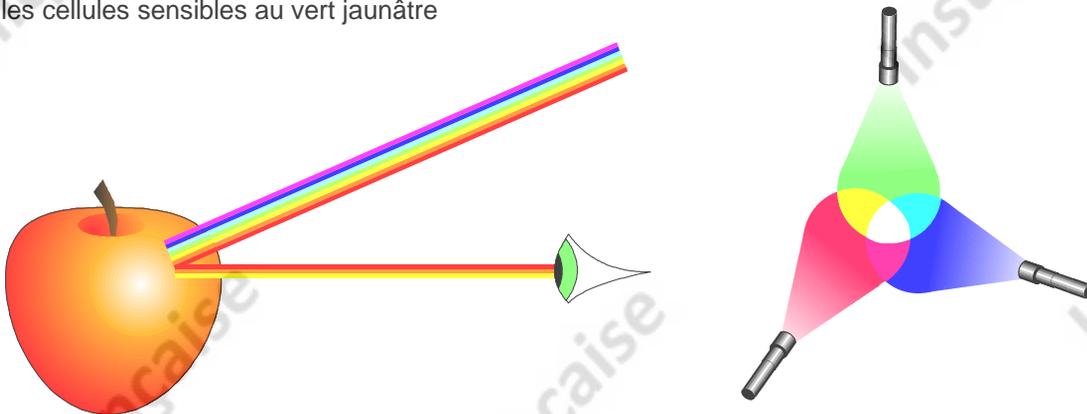
Ainsi,

- un objet blanc réfléchit toute la lumière
- un objet noir absorbe toute la lumière
- un objet gris absorbe partiellement, mais dans les mêmes proportions, toutes les radiations
- un objet coloré absorbe une partie de la lumière qu'il reçoit
- un objet transparent incolore se laisse traverser sans rien absorber

Un objet paraît rouge parce qu'il est capable de renvoyer les radiations rouges en absorbant les autres. Il est évident que si la lumière est différente autrement dit le nombre de radiations différentes, l'objet absorbant le même nombre de radiations, réfléchira la différence qu'il n'a pas absorbée, c'est-à-dire un nombre de radiations différentes et par conséquent une couleur différente.

Par ailleurs, on a établi que l'œil humain éprouve des sensations de couleur, grâce à des cellules nerveuses de la rétine, ces cellules sont de trois sortes :

- les cellules sensibles au bleu violacé
- les cellules sensibles au rouge
- les cellules sensibles au vert jaunâtre



Toutes les couleurs pourront donc être composées de façon tertiaire, par addition du bleu, du vert et du rouge, les quantités relatives X,Y,Z de ces trois couleurs constituent les coordonnées trichromatiques.

En projetant sur un écran les couleurs vertes, rouges et bleues, à l'endroit de la superposition le blanc est présent, il s'agit d'une synthèse additive. Par contre si dans une glaçure transparente on ajoute un colorant rouge, vert, et bleu on obtiendra une couleur proche du noir, il s'agit d'une synthèse soustractive, où les colorants verts et bleus absorberont le rouge, les colorants rouges et bleus absorberont le vert et les colorants rouges et verts absorberont le bleu.

LES APPAREILS DE MESURE DE LA COULEUR

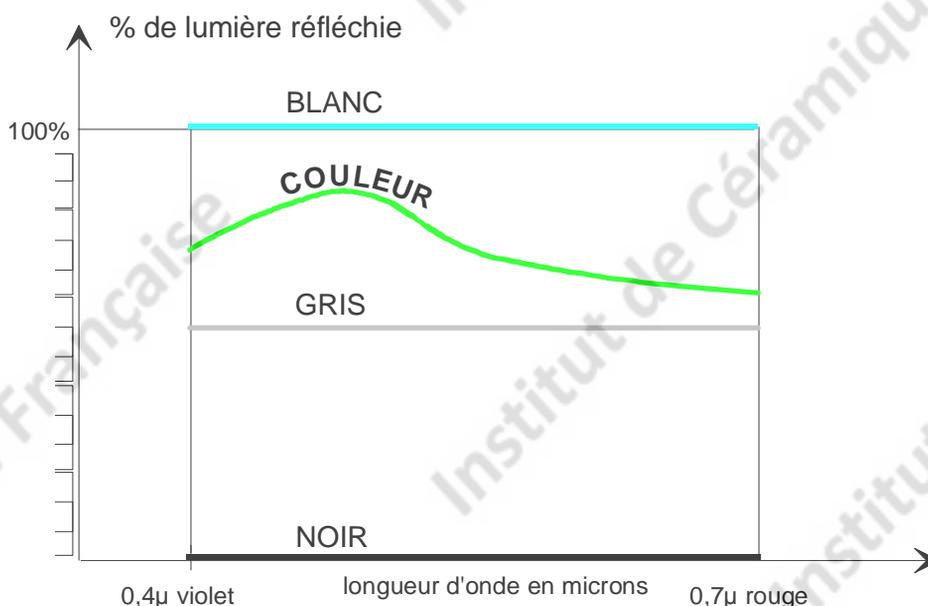
L'œil humain ne peut pas en toute impartialité comparer les couleurs. En effet, les couleurs ne sont pas perçues de la même manière par tous et la lumière ambiante ne peut pas être définie comme identique dans des endroits différents, aussi il a été mis au point des appareils de mesure de la couleur qui reproduiront toujours les mêmes caractéristiques d'ambiance lumineuse. Il existe deux principes de mesure de la couleur :

La colorimétrie : elle reproduit pour l'œil la même sensation de couleur que l'objet à caractériser à partir des trois couleurs tertiaires, le bleu, le vert, le rouge cela par superposition de celles-ci dans des proportions différentes. Lorsque la couleur est identique, les taux de chaque couleur sont relevés et il est possible de définir la couleur de l'échantillon numériquement.

La spectrophotométrie : le principe qu'un même nombre de radiations déterminé produit la même sensation lumineuse, il suffit de déterminer la quantité de chaque radiation reçue pour calculer la couleur.

En portant en abscisse d'un graphique les longueurs d'onde de $0,4\mu\text{m}$ à $0,7\mu\text{m}$, et en ordonnées le pourcentage de lumière réfléchi, toute couleur pourra être représentée par une figure, un blanc sera représenté par une droite horizontale partant du point 100% des ordonnées puisque celui-ci réfléchit toutes les radiations, le noir sera lui représenté par une droite horizontale au niveau 0 des ordonnées puisqu'il absorbe toutes les radiations, un gris sera une ligne horizontale puisqu'il absorbe partiellement toutes les radiations, mais dans les mêmes proportions, une couleur sera représentée par une ligne quelconque.

Ces appareils ont permis une définition précise de la couleur, permettant une reproduction fidèle, outre les avantages d'impartialité entre fabricants d'émaux et céramistes. Par exemple, il a permis de mettre au point des systèmes de tri automatique de produits d'après leurs couleurs. L'inconvénient majeur de ces appareils étant évidemment leur prix.



ÉTUDE DES DIVERS PROCÉDÉS DE COLORATION EN CÉRAMIQUE :

Il existe deux moyens d'obtenir une coloration : soit par pigmentation où le colorant reste en suspension dans l'émail, soit par dissolution où le colorant forme un verre coloré.

La caractéristique principale des colorants céramiques est de résister à l'action de la température de cuisson nécessaire à l'obtention de la pièce colorée. Pour chaque température, il existe un nombre déterminé de colorants. Quand la température augmente, ce nombre tend à diminuer.

Les colorants céramiques sont de deux sortes :

- les oxydes ou sels métalliques, nous les appellerons colorants simples ou naturels,
- les mélanges de plusieurs produits réagissant entre eux sous l'action de la chaleur, pour avoir une teinte intense et stable, ils s'appelleront colorants composés ou artificiels.

COLORANTS

LES COLORANTS SIMPLES OU NATURELS : ce sont principalement des sels ou des oxydes métalliques. Si ce procédé de coloration est peu coûteux, il ne permet pas d'obtenir des couleurs aussi attrayantes qu'avec les colorants composés.

LE COBALT : les composés du cobalt sont des colorants donnant une très forte coloration bleue, on peut trouver dans le commerce :

L'OXYDE DE COBALT NOIR : titrant environ 71% de cobalt

L'OXYDE DE COBALT GRIS : titrant environ 75% de cobalt

Ces oxydes peuvent servir à la coloration des émaux par introduction à la fusion de l'émail. De 0,1 à 3% pour des tonalités allant du bleu pâle au bleu de sèvres très foncé.

En ce qui concerne l'azurage des glaçures, on prépare une fritte fortement colorée (par ex 1 à 2 % de cobalt) ayant la composition normale de la fritte à colorer. Ce concentré est ensuite rajouté au broyeur par petite quantité,

il peut également être introduit directement dans le broyeur, mais il faut prendre des précautions, car la répartition du cobalt est difficile à obtenir. De plus, il provoque de forts bouillonnements si l'on dépasse certains pourcentages.

On peut également utiliser le :

CARBONATE DE COBALT (CoCO₃) environ 50% de cobalt, il est plutôt utilisé pour la décoration.

NITRATE DE COBALT de 15 à 16% de cobalt, soluble dans l'eau.

CHLORURE DE COBALT de 24 à 25% de cobalt.

LE CUIVRE : les produits à base de cuivre donnent une forte coloration verte, bleue ou rouge selon la nature de la base à colorer et selon les l'atmosphère de cuisson.

OXYDE DE CUIVRE (CuO) a environ 78% de cuivre, il se volatilise vers 1000°C, aussi un émail riche en cuivre peut donner des colorations parasites sur les pièces avoisinantes, du fait de ce manque de stabilité, l'usage de cuivre n'est pas conseillé pour les hautes températures.

EN CUISSON OXYDANTE

- lorsqu'il est introduit à moins de 6% dans un émail, il peut donner une teinte verte dans les émaux peu alcalins, c'est à dire riche en plomb ou en bore
- une teinte bleue dans les émaux très alcalins, ou la potasse est préférable à la soude
- lorsqu'il est introduit à plus de 10% tout l'oxyde de cuivre ne peut se dissoudre dans la glaçure et donne des émaux métallisés
- le cuivre se dissolvant rapidement donne aux décors des contours imprécis

EN CUISSON RÉDUCTRICE :

- le cuivre donne une belle coloration rouge due à la présence de cuivre métallique colloïdal

CARBONATE DE CUIVRE OU CENDRES VERTES : c'est un carbonate basique de cuivre dont la composition est mal définie, jusqu'à 5% il donne des tons turquoise, en général plus bleus qu'avec CuO, là encore la teinte dépend de l'alcalinité de l'émail.



LE CHROME : le chrome dans les émaux céramiques donne généralement une coloration verte.

OXYDE DE CHROME (Cr_2O_3) :

- de couleur verte, assez stable jusqu'à 1300°C
- il est faiblement soluble dans les émaux, les couleurs sont souvent opaques, il agit plus comme un pigment que comme colorant
- avec 5% on obtient des verts très sombres
- il est très réfractaire et à tendance à durcir les émaux
- il est peu sensible à l'atmosphère de cuisson
- les teintes obtenues seront plus claires avec les émaux calciques
- la présence de zinc dans l'émail fait virer la teinte au brun
- bien qu'étant réfractaire, il peut se volatiliser à partir de 1100°C et rosir d'autres pièces opacifiées à l'étain
- dans les émaux fortement plombés, il donnera une cristallisation rouge par formation de chromate de plomb rouge.



LE FER : il est la base des plus anciens colorants connus en céramique, il existe plusieurs oxydes de fer.

(Fe_2O_3) : de couleur jaune à rouge

(Fe_3O_4) (magnétite) : de couleur noire

- dans les émaux avec un taux allant jusqu'à 6%, les oxydes de fer se dissolvent pour donner une couleur jaune paille plus ou moins foncée. En augmentant le pourcentage, on tire vers la couleur noire
- dans les émaux alcalins et à condition de pousser la cuisson pour bien dissoudre le colorant et de refroidir lentement, on obtient une cristallisation particulière que l'on appelle « aventurine »
- ces composants sont très sensibles à la température
- ces composants sont très sensibles à l'atmosphère de cuisson. Pendant la cuisson de la porcelaine, cette particularité sert à réduire les sels ferriques généralement rouges en sels ferreux très peu colorés.



LE NICKEL :

- c'est un colorant extrêmement puissant
 - la température a sur lui une grande influence, selon celle-ci, il peut donner avec des changements de températures du brun, du kaki, du vert et du bleu
 - ainsi que la composition de la base à colorer
- OXYDE DE NICKEL NOIR** : titrant environ 97,9% de NiO
OXYDE DE NICKEL GRIS VERT : titrant environ 97,5% de NiO
- il est préférable de l'utiliser sous forme de fritte colorée, ce qui lui assure plus de stabilité,
 - la plus grande stabilité est obtenue avec les émaux plombeux
 - dans les émaux riches en zinc des teintes bleues sont obtenues avec 2%,
 - en augmentant le calcium et le baryum au profit du zinc, du violet apparaît.



L'URANIUM INTERDIT D'UTILISATION

- ces composés sont interdits d'utilisation
 - ils servaient à obtenir des rouges très vifs impossibles à obtenir avec d'autres colorants
- OXYDE D'URANE** (UO₂) noir et (UO₃) rouge
URANATE DE SOUDE (U₂O₇Na₂) jaune
- l'urane donnait des colorations rouge très intense, en présence de très forte teneur en plomb jusqu'à 1100°C
 - la présence de bore était préjudiciable au développement de ces rouges.
 - il était nécessaire de cuire en oxydant la moindre réduction faisant varier irrémédiablement au noir
 - UO₂ donnait des colorants très stables jusqu'à 1400°C



MANGANÈSE : il est utilisé sous forme de bioxyde de manganèse

BIOXYDE DE MANGANÈSE (MnO₂)

- couleur noire de 85 à 90 % de MnO₂
 - il donne un brun violacé sur blanc stannifère
 - il provoque des bouillonnements dans les émaux
 - il doit être introduit à la fusion de la fritte compte tenu de l'important bouillonnement qu'il dégage
- Ce bouillonnement est dû à la décomposition $3\text{MnO}_2 = 2\text{Mn}_3\text{O}_4 + 0.5 \text{O}_2$ et $\text{Mn}_3\text{O}_4 = 3\text{MnO} + 0.5 \text{O}_2$
Cette décomposition n'est jamais complète et une masse fondue sans bouillon peut en voir apparaître si on la chauffe à une température plus élevée.
- Dans les émaux plombeux sans bore et peu d'alcalis, on obtient une teinte brun-rouge intense.
 - Dans les émaux alcalins, la couleur vire au pourpre.



LES COLORANTS COMPOSÉS

Ils sont obtenus en faisant réagir entre eux, généralement sous l'action de la chaleur, des oxydes métalliques.

Le procédé de fabrication des colorants composés est le suivant :

- mélanges des matières premières (oxyde métallique ou sel métallique)
- calcination à température donnée, à une atmosphère donnée, pendant un temps donné
- broyage
- lavage (élimination des sels solubles)
- pulvérisation

COLORANT JAUNE

Jaune de Naple			
Matières premières	Jaune	Jaune clair	Orange
Antimoine Sb_2O_3	35	23	26,3
Plomb PbO	51	38	39,7
Fer Fe_2O_3			14,3
Alumine Al_2O_3	14	11	
Craie $CaCO_3$		12	
Nitrate KNO_3		13	19,8
Température de calcination	950°C	950°C	1000°C

JAUNE DE NAPLE :

- ce sont des antimoniates de plomb
- ils sont stables jusqu'à 1050°C
- le pourcentage moyen est de 5 à 8%
- ils peuvent être utilisés sur et sous émail
- varie du jaune citron à l'orangé
- les teintes foncées sont obtenues avec des émaux à fortes teneurs en plomb
- on peut obtenir une teinte orange en ajoutant un peu d'oxyde de fer
- l'ajout d'oxyde d'étain adoucit la teinte
- si la température est trop élevée, ils se décolorent (cette instabilité est due à la volatilisation de l'antimoine)
- les émaux contenant beaucoup d'alcalis ou de bore détruiront rapidement le colorant
- ils doivent être cuits en oxydant

JAUNES ÉTAÏN VANADIUM : ce sont des colorants réalisés en calcinant un mélange intime d'oxyde d'étain et un vanadate (généralement un vanadate d'ammonium $VO_3 N H_4$).

- c'est un dépôt colloïdal de vanadium sur les cristaux d'oxyde d'étain
- la cuisson en réduction les décolore complètement
- il augmente la viscosité de l'émail et a tendance à provoquer des retirements
- les bases les plus recommandées sont celles à faible viscosité, donc à faible teneur en alumine, et fortement plumbeuses ou boraciques
- on doit parfois introduire 1 à 2 % d'oxyde d'étain à la base pour favoriser le développement du colorant
- pourcentage d'utilisation : de 3 à 10% dans les bases transparentes
- pourcentage d'utilisation : de 1 à 5 % dans les bases opacifiées au zircon
- les meilleurs résultats sont obtenus dans les bases stannifères
- la tonalité obtenue est jaune citron
- ils sont plus stables que les jaunes de Naples à la température environ 1300°C
- ils doivent être cuits en atmosphère oxydante
- ils sont affaiblis par un broyage trop poussé

JAUNE AU TITANE

Sans parler du rutile qui est un minerai de titane pouvant servir de colorant aux émaux, on peut obtenir des colorants en ajoutant à une combinaison titane-antimoine divers oxydes métalliques tels que le nickel, chrome, tungstène...

TITANATE DE NICKEL (TiSbNi) : c'est un colorant jaune citron de tonalité très vive, est exclusivement utilisé pour les émaux pour tôle.

JAUNE DE FER : des jaunes paille peuvent être obtenus en combinant le rutile avec de l'oxyde de fer.

Des ajouts de zinc développent la puissance colorante

ZnO	36,7 %
Fe ₂ O ₃	18,1 %
TiO ₂	45,2 %

TITANATE TI, Sb, Cr :Composition donnant des colorants du jaune orange au beige chamois.

Oxyde de titane 75 à 90 %

Oxyde d'antimoine 10 à 20 %

Oxyde de chrome 2 à 5 %

Uniquement utilisé pour les émaux sur métaux.

Pourcentage d'utilisation de 2 à 5%

JAUNE ZIRCONIUM VANADIUM :

- ils sont pratiquement insensibles à l'atmosphère de cuisson
- la tonalité est moins belle qu'avec les jaunes d'étain-vanadium
- ils sont obtenus en calcinant un mélange intime de zirconium et de vanadate
- ils sont stables jusqu'à 1300°C
- ils se développent mieux dans les bases à forte viscosité contenant des alcalino-terreux, calcium, magnésium, baryum et le moins possible de plomb et de bore
- pourcentage d'utilisation dans les bases transparentes : 8 à 12 %
- pourcentage d'utilisation dans des bases opacifiées à l'étain ou au zircon (le zircon étant préférable)

JAUNE AU PRASÉODYME : ils ont les avantages des jaunes Zr-V et Sn-V sans en avoir les inconvénients.

- la couleur est jaune citron lumineux
- peu sensible aux variations d'atmosphère
- ils sont formés par inclusion de praséodyme dans une molécule de silicate de zirconium au moment de la formation de celle-ci
- ils sont stables jusqu'à 1350°C
- ils se développent dans toutes les bases et particulièrement dans celles qui contiennent du zircon qui sert alors à stabiliser le colorant
- les bases plumbeuses sont favorables à son développement
- l'ajout de zinc peut être également bénéfique
- pourcentage d'utilisation de 3 à 8 % dans les bases transparentes au-delà de 5% l'augmentation de couleur n'est plus en rapport avec l'augmentation de colorant, en dessous de 2% il a tendance à se dissoudre
- pourcentage d'utilisation dans les bases opacifiées au zircon de préférence 1 à 5%
- un broyage trop poussé affaiblira la teinte,
- ils se mélangent bien au rouge pink CRSN, aux roses CrAl et MnAl pour donner du corail,
- ils se mélangent également bien au bleu de vanadium.

LES COLORANTS VERTS : on peut les séparer en deux groupes :

Ceux contenant du chrome, les verts victoria et les verts CrCo et ceux qui ne contiennent pas de chrome, principalement les verts de vanadium.

VERTS VICTORIA : les verts produits par le chrome sont en général assez foncés.

En combinaison avec le calcium on obtient des verts herbe très lumineux «vert victoria » :

- ils sont préparés par calcination d'un mélange à base de silice, de chrome et de calcium
- ils sont formés de dépôts colloïdaux de chrome très finement divisés sur des silicates de chaux
- ils peuvent convenir pour la coloration des émaux et des couleurs
- ils sont stables jusqu'à 1200°C, après le colorant est décomposé par l'émail et l'on retrouve les tons foncés de l'oxyde de chrome

Vert Victoria			
Matières premières			
Craie	14	21	25,9
Chlorure de calcium	5		
Silice	10	30	20
Spath fluor	8	13	15,5
Bichromate de potassium	18	36	
Oxyde de chrome			18,6
Chlorure de sodium			20

La base doit être sans zinc, par risque de brunissement.

- la base doit être riche en alcalino-terreux surtout en calcium, mais attention au matage de la glaçure si les pourcentages sont trop élevés
- dans les émaux plombeux les teintes sont plus jaunes par formation de chromate de plomb
- les verts victoria sont très sensibles aux vapeurs sulfureuses
- le pourcentage d'utilisation est de 5 à 10% dans une base transparente
- 5 à 10 % dans une base opaque au zircon

VERTS DE CHROME ET VERTS CHROME-COBALT :

- ils sont de couleur vert foncé
- la teinte peu varier du vert clair pour les compositions contenant beaucoup de chrome au bleu vert intense pour les compositions riches en cobalt
- ils sont parmi les colorants les plus intenses surtout en présence d'alumine
- la silice, le zinc, le nickel peuvent modifier les nuances(notamment brunâtres pour le zinc)
- ils sont stables jusqu'à 1300°C
- employés à faible pourcentage ils donnent des tons grisâtres
- ils peuvent être mélangés à tout type de colorant dont le jaune
- les bases à l'oxyde d'étain doivent être évitées, la réaction chrome étain donnant des pinks
- les bases au zircon sont plus conseillées celui-ci jouant le rôle de stabilisant
- pourcentage d'utilisation dans les bases transparentes de 1 à 5 %
- pourcentage d'utilisation dans les bases opaques de 2 à 5 %

Vert au chrome et vert chrome cobalt						
Matières premières	vert	vert	Bleu vert	Vert jaune	Vert olive	Jaune verdâtre
Oxyde de chrome	30	21	15	12	16	32
Feldspath	20	15	15			
Silice	50	60	60	42	42	28
Oxyde de cobalt		4	10			
Oxyde de nickel				6	8	16
Borax				40	34	24

LES VERTS DE VANADIUM

- Par mélange de jaune Sn-V, soit Zr-V, soit ZrPr avec un bleu de vanadium, Zr-Si-V, mais les colorants jaunes ayant une densité différente de celle des bleus, des phénomènes de démixtion peuvent provoquer des nuances. Seul le jaune ZrPr de composition similaire au bleu donne des mélanges stables, et donne des verts exceptionnels
- en préparant directement un colorant vert et en calcinant ces composants
- ils sont stables jusqu'à 1300
- la teinte peut être stabilisée en introduisant un peu de zircon dans la base
- les verts de vanadium sont très stables vis-à-vis des agents chimiques
- le pourcentage d'utilisation dans les bases transparentes est de 5 à 10% en rajoutant 1 à 2% de zircon
- le pourcentage d'utilisation dans les bases opaques au zircon ou à l'étain est de 2 à 5%

COLORANTS BLEUS où l'on distingue les colorants à base de cobalt, silicate de cobalt, zincate de cobalt et les colorants à base de vanadium.

LE COBALT

L'oxyde de cobalt utilisé seul provoque des bouillonnements de l'émail par dégagement d'oxygène, à haute température il peut provoquer le défaut de coque d'œuf.

ALUMINATES DE COBALT :

- ils sont obtenus par calcination d'un mélange intime d'alumine et d'oxyde de cobalt
- un colorant très intense est obtenu, dit «bleu roi», «bleu céleste» ou «bleu de Thénard»
- pour faciliter la calcination les deux composants doivent être très finement divisés
- en ajoutant du zinc à la composition on obtient des « bleus célestes » encore plus intenses, ce qui permet également un meilleur développement de la couleur à plus basse température
- composition classique de bleu (AL, Zn, Co) :
- alumine hydratée 15,
- oxyde zinc 3,
- oxyde de cobalt 1
- ils sont stables jusqu'à 1300°C
- ils sont peu sensibles à l'atmosphère de cuisson
- la tonalité peut virer rapidement au bleu de Sèvres par dissolution du colorant par l'émail et transformation en silico-aluminates de cobalt, cette dissolution étant facilitée par une faible viscosité, il faut utiliser des bases fortement alumineuses et pauvres en plomb, alcalis, bore et silice
- la présence de zinc de magnésie ou de phosphate fait virer la teinte au violet
- en absence d'alumine le cobalt seul donne des variations de teintes surtout en cuisson réductrice
- le pourcentage d'utilisation est de 1 à 5% dans une base transparente
- le pourcentage dans une base opaque est de 1 à 2% pour le zircon et à l'étain pour les tons pastels
- ces produits sont extrêmement réfractaires et durcissent les émaux

SILICATES DE COBALT :

- un des plus anciens colorants céramiques, il fut utilisé au 15e et 17e siècle sur les faïences stannifères de Delft, Rouen, Nevers,
- ces colorants sont connus sous les noms : bleu Mazarin, bleu de Sèvres, bleu Willow, bleu royal
- ils sont très stables à toutes températures
- ils sont très stables à toutes atmosphères
- ils sont très solubles dans les émaux et peuvent flouer certains décors
- le zinc et la magnésie feront virer la couleur au violet outremer
- ils ont une dominante rouge qui les rend impropres aux mélanges de confection des verts
- le pourcentage d'utilisation pour une base transparente est de 0,5 à 5%
- le pourcentage d'utilisation pour une base opaque au zircon ou étain pour les pastels est de 1 à 2%
- ils sont assez fusibles et ont tendance à faire couler les émaux.

Bleus silicates de cobalt			
Matières premières			
Oxyde de cobalt	45	30	30
Feldspath	23	40	40
Silice	20	20	20
Craie	10		
Alumine hydratée	12		
Carbonate de baryum			10

ZINCATE DE COBALT VERT DE RINMANN :

- c'est un mélange de cobalt et de zinc
- le zinc en quantité importante aide au développement de la couleur
- il est utilisé pour les émaux et pour les engobes

BLEUS DE VANADIUM

- Ils sont obtenus par l'insertion d'une molécule V2O4 dans le réseau du silicate de zirconium SiO4 Zr pendant sa formation à une température de calcination de 900°C, pour faciliter cette insertion, des minéralisateurs sont utilisés tels que le fluorure de sodium. formule type :
- oxyde de zirconium 62%, silice 30%, métavanadate d'ammoniaque 5%, fluorure de sodium 3 divers 0 à 2
- ils sont stables jusqu'à 1300°C
- ils sont insensibles à l'atmosphère de cuisson
- ils donnent une coloration bleu turquoise claire
- ils se développent bien dans toutes les bases principalement celles au zircon
- dans les émaux plombeux, ils donnent des tons plus verdâtres que dans les bases sans plomb
- ils peuvent se mélanger avec n'importe quel autre colorant
- ils sont assez réfractaires
- les pourcentages dans les émaux transparents contenant 1 à 2% de zircon sont de 5 à 10%
- les pourcentages d'utilisation dans les émaux opaques sont de 5 à 10%
- les teintes sont plus verdâtres dans les bases opaques à l'étain
- un broyage trop poussé affaiblit la teinte

COLORANTS ROSES

ALUMINATES DE CHROME

- les combinaisons chrome alumine donnent des rouges ou des roses selon la structure cristalline formée pendant la calcination à très haute température
 - ils sont stables jusqu'à 1400°C
 - les teintes sont plus jaune à basse température et bleussent quand la température augmente
 - ils sont particulièrement utilisés dans les bases opaques pour sanitaire où l'on obtient un rose saumon
 - cette couleur rose saumon ayant la particularité de changer selon la nature de la lumière
 - pour un bon développement, les bases doivent être sans calcium, riches en zinc et en alumine, pauvres en bore et en plomb
 - la base doit contenir suffisamment de zinc et d'alumine pour que les composants du colorant ne soient pas dissous dans le flux vitreux
 - ils peuvent être mélangés avec des jaunes au vanadium ou au praséodyme pour donner des saumons
 - ils peuvent être mélangés avec des bruns clairs au zinc pour donner des corails
 - le pourcentage d'introduction ne doit pas dépasser 10% sinon la surface de l'émail sera défectueuse
- La moyenne des compositions se situe dans les fourchettes du tableau ci-dessous.

Aluminates de chrome	
Alumine	70 à 80%
Acide borique	15 à 10%
Bichromate de potassium	15 à 10%
Oxyde de zinc	0 à 15%
Température de calcination 1300°C	

ROSES A L'OR

- il est d'un prix de revient très élevé
- les couleurs obtenues vont du pourpre violacé au rose rubis
- il est parfois appelé pourpre de Cassius
- c'est un dépôt colloïdal d'or sur un précipité d'étain
- à signaler que le chlorure d'or peut être mélangé à des couvertes de porcelaine

ALUMINATES DE MANGANÈSE : le spinelle aluminate manganèse est d'une teinte rose possédant une grande fraîcheur de ton.

- il est très stable à la température jusqu'à 1400°C
- on l'obtient en faisant réagir du phosphate de manganèse avec de l'alumine, calcination de 1100°C à 1150°C
- ils peuvent être utilisés comme colorant des émaux, mais avec des bases peu agressives, fortement alumineuses sans bore et sans plomb, ni zinc
- il est très réfractaire, un excès fait mater les émaux
- le pourcentage d'utilisation est de 5 à 10% dans les émaux alumineux
- le pourcentage d'utilisation dans les engobes et pâtes blanches grésées est de 1 à 5%
- ils sont surtout utilisés comme colorants de pâte

Roses aluminates de manganèse			
Matières premières			
Phosphate de manganèse	17 à 20%		25%
Alumine	67 à 61 %	68 à 86%	65%
Phosphate d'ammonium	12 à 14%		
Nitrate d'ammonium	4 à 5%		
Nitrate de potassium			10%
Carbonate de manganèse		8 à 10 %	
Acide phosphorique		12 à 2%	

COLORANTS ROUGES

PINKS CHROME ÉTAIN

- ce sont les seuls rouges utilisables au-delà de 1000°C
- les teintes données sont assez violacées
- ils sont obtenus en calcinant en atmosphère très oxydante, un mélange : calcium, oxyde d'étain, et chrome

Roses chrome étain						
Matières premières	rouge	cramoisi	rouge	rouge	rouge	lilas
Oxyde d'étain	60	45,5	52	65	84	70
Craie	31	32,7	26	28	9	20
Silice	3	14,6	19	4	6	
Oxyde de chrome		3,6				
Borax		3,6				4
Bichromate de potassium			3	3		3
Chromate de plomb	3				1	
Kaolin	3					
Température de calcination 1000°C						

La teinte obtenue varie essentiellement en fonction des proportions chrome étain, lorsque le rapport $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ est voisin de 1/15, la couleur est pourpre, entre 1/17 et 1/20 on obtient des rouges foncés, au-delà de 1/25 la couleur tend vers le rose

- ils sont stables jusqu'à 1300°C
- ils exigent une cuisson oxydante, ils sont détruits par une cuisson réductrice
- ils se développent bien dans les bases riches en calcium
- il faut éviter les bases contenant du zinc, celui-ci faisant virer la partie chrome au brun
- les bases alcalines et boraciques détruisent la coloration rouge et la teinte vire au violine
- la magnésie est également très néfaste
- pour aider au développement et augmenter la résistance à la T° : ajouter 2 % d'oxyde d'étain à la base
- pourcentage d'utilisation dans les émaux transparents 10 à 20 % et des émaux opaques sont obtenus
- pourcentage d'utilisation dans les bases opaques 5 à 15 % (de préférence opacifiées à l'étain)
- peut servir en décoration avec adjonction de fondant calcaire

ROUGES CORAIL

- ce colorant est de la même famille que les bleus de vanadium et les jaunes au praséodyme
- ils sont obtenus en introduisant du fer dans une molécule de silicate de zirconium en formation
- ils sont très stables jusqu'à 1350°C
- ils se développent bien dans toutes les bases, particulièrement celles au zircon
- en se mélangeant avec les bleus de cobalt ou de vanadium on obtient des gris rosés
- avec les jaunes Sn-V, Zr-V et surtout Si-Zr-Pr, on obtient des tons pêche, chamois
- les pourcentages d'utilisation sont 5 à 10% dans les émaux transparents, une teinte corail foncé
- les pourcentages d'utilisation sont 2 à 5 % dans les émaux opacifiés à l'étain ou au zircon, es roses très stables sont obtenus

ROUGES CHROMATE DE PLOMB

- la combinaison du chrome et du plomb par voie chimique conduit à une gamme allant du jaune citron ou rouge foncé
- ils peuvent servir à la coloration des émaux, à condition que la base soit très riche en plomb
- à faible pourcentage le chromate de plomb se dissout pour donner une coloration jaune dorée
- à partir d'une certaine teneur on peut obtenir de belles cristallisations rouges
- ce colorant est sensible aux vapeurs sulfureuses qui le font noircir

ROUGES DE FER

- ce sont des combinaisons de fer et d'alumine
- le mélange doit être intime et calciné à faible température, mais on est obligé de faire une coprécipitation chimique, le mélange n'étant pas suffisant
- ils sont stables jusqu'à 900°C
- ils exigent des fondants très puissants
- ils ne sont pratiquement utilisés que pour la coloration des couleurs sur émail

ROUGES CADMIUM SÉLÉNIUM

- la combinaison de soufre avec le cadmium et le sélénium, produit des colorants, sulfoséléniures de cadmium
- les teintes peuvent aller du jaune au rouge vermillon
- ils agissent sous forme de pigments
- résistants à la température jusqu'à 1050°C
- ils sont obtenus par calcination à basse température 600 à 700°C, d'un mélange de soufre, de cadmium et de sélénium

COLORANTS BRUNS

- ils ont en commun la présence de chrome
- les teintes vont du beige chamois au brun foncé par adjonction d'autres oxydes colorants ou d'oxydes non colorant comme le zinc, l'alumine, l'étain
- les quatre familles principales sont : Cr-Zr
 - Cr-Fe-Zn (les plus courants)
 - Cr-Fe-Zn-Al
 - Cr-Mn avec ou sans Zn
- après mélange intime, on calcine fortement
- ils sont très résistants jusqu'à 1400°C
- ils sont peu sensibles à l'atmosphère de cuisson
- la présence de zinc est déterminante pour la stabilité du colorant
- il est conseillé pour les colorants bruns, contenant du zinc d'en ajouter 2 à 5% à la base
- pour les colorants sans zinc l'ajout de 0,2 à 0,5% à la base éclaircira la teinte
- un ajout d'alumine dans la base donnera des couleurs plus intenses et plus rouges avec Fe-Cr-Zn
- avec l'élévation de la température les émaux auront tendance à jaunir par volatilisation du chrome
- pourcentage d'utilisation de 2 à 10% dans les émaux transparents
- 0,5 à 5% dans les bases opacifiées au zircon ou à l'étain, un ajout d'oxyde de zinc à la base est conseillé
- les bruns à base de chrome sont peu sensibles à la finesse de broyage

Bruns						
Matières premières	Rouge brun	Fauve clair	Jaune chamois	Brun verdâtre	Brun foncé	brun
Oxyde de chrome	33	11	16	46	49	14
Oxyde de fer	33	11	15			
Oxyde de zinc	34	50	60	18		73
Alumine		28	9			
Silice				36		
Bioxyde de manganèse					51	
Acide borique						13

COLORANTS GRIS

- des teintes grises sont obtenues, soit par utilisation d'un colorant noir en faible pourcentage,
- soit par addition d'oxydes métalliques divers,
- soit par l'utilisation de colorants gris composés, spécialement
- des compositions zirconium-cobalt-nickel ou étain-cobalt-nickel
- des compositions étain-antimoine

GRIS ZIRCONIUM COBALT NICKEL ou ÉTAÏN COBALT NICKEL

- ces gris sont très stables à toutes températures
- les compositions des bases, contenant du zinc exaltent la couleur bleue du cobalt contenu dans le colorant
- les fondants : plomb, bore, alcalis... en facilitant la dissolution du colorant dans l'émail, dénatureront la couleur
- la présence d'opacifiant est recommandée pour l'utilisation de ces produits
- les pourcentages d'utilisation vont de 1 à 5%
- de tous les colorants céramiques, les gris sont les plus difficiles à contretyper

GRIS ÉTAÏN ANTIMOÏNE

- ils ont un prix de revient élevé et de ce fait sont peu utilisés
- ils sont formés par dépôt colloïdal d'antimoine métallique sur de l'oxyde d'étain
- les tonalités obtenues peuvent varier du gris clair au gris bleu et gris ardoise
- ils sont stables à toutes températures et toutes atmosphères
- ils se développent bien dans toutes les bases, principalement dans celles qui contiennent de l'oxyde d'étain
- le bore et les alcalis auront tendance à faire virer la teinte au gris bleu
- les pourcentages d'utilisation varient de 1 à 5%

COLORANTS NOIRS

- les colorants noirs sont obtenus par calcination de divers oxydes métalliques, tels que : oxyde de chrome, oxyde de cobalt, oxyde de fer, de manganèse et de nickel
- la teinte est très variable selon la base utilisée
- la base de presque tous les noirs est composée de fer-chrome et cobalt, on nuance les besoins avec le manganèse et le nickel
- ces colorants sont très fusibles à haute température
- les plus beaux noirs obtenus le sont par le mélange de frites colorées à la fusion par des oxydes métalliques
- ils exigent des atmosphères oxydantes, car la réduction provoquera la métallisation des oxydes
- ne pas dépasser 10% après on risque la métallisation de la surface de l'émail
- pourcentage d'utilisation de 5 à 10% dans les émaux transparents
- 1 à 3% dans les bases opacifiées pour faire des gris.

Colorants noirs				
Matières premières				
Oxyde de fer	41,1	36,3		60
Oxyde de chrome	32,4	6,8	90	
Oxyde de cobalt	20,6	31,8	10	30
Bioxyde de manganèse	5,9	12,2		10
Oxyde de nickel		12,9		

Rappel sur les principes de la coloration : la coloration d'un émail céramique peut s'effectuer par deux mécanismes :

- par pigmentation où le colorant est en suspension dans le flux vitreux. C'est le cas le plus général de la coloration céramique, presque tous les colorants composés agissent comme pigments, il en est de même pour certains opacifiants.
- par dissolution où le colorant se dissout pour donner un verre coloré

FACTEURS INFLUENÇANT LE DÉVELOPPEMENT DE LA COULEUR

LA TEMPÉRATURE : les pigments ont une limite de stabilité face à la température au-delà de laquelle ils sont décomposés par l'émail.

LA BASE : pour bien développer un colorant la base devra contenir le plus possible de l'élément prépondérant du colorant, en effet le pouvoir solvant de l'émail à haute température sera moins agressif si le flux vitreux est déjà chargé par sa propre composition des éléments du colorant.

LE BROYAGE : plus les grains de colorant sont petits, plus ils se dissolvent rapidement.

LE POURCENTAGE DE COLORANT : on considère que les premiers pourcentages de colorant sont rapidement dissous, une fois la base saturée, la coloration apparaît.

L'ATMOSPHÈRE DE CUISSON : la plupart du temps, elle doit être oxydante pour ne pas réduire les oxydes qui de ce fait changeraient de couleur, cependant pour certains effets ou couleurs, la cuisson en réduction est demandée

LA VITESSE DE CUISSON

OPACIFIANTS

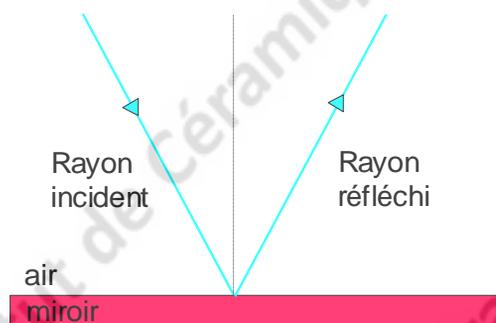
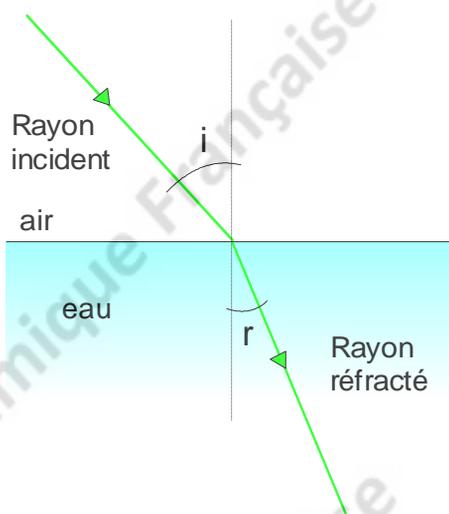
L'OPACIFICATION

DÉFINITION : un émail opaque est un émail de base transparente coloré ou non dans lequel, des particules d'opacifiants sont en suspension (dimensions de l'ordre du micron), le rôle de ces particules est d'arrêter ou de réfléchir une partie de la lumière.

L'opacification des émaux céramiques est obtenue selon deux procédés totalement différents :

- dans l'émail, des opacifiants sont introduits qui s'y dissolvent à chaud et qui, lors du refroidissement ou de la recuisson de l'émail, recristallisent de façon homogène dans la masse de l'émail, c'est l'opacification par dévitrification
- dans l'émail des composés sont introduits qui se dissolvent difficilement à chaud et qui restent en suspension dans le flux vitreux
- les principaux phénomènes physiques qui intéressent l'opacification sont : la réflexion, la réfraction, la diffusion, la diffraction de la lumière

La réflexion : si un faisceau de lumière frappe la surface de l'émail, il est réfléchi dans une direction telle que l'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux.



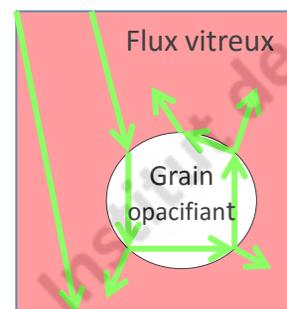
La réfraction est le brusque changement de direction que subit un faisceau lumineux lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre milieu transparent (c'est le cas de l'eau et de l'air où un objet partiellement immergé donnera une impression de cassure), la différence d'angle est due à la différence de vitesse de propagation de la lumière selon les milieux qu'elle traverse

$$\text{L'indice de réfraction} = \frac{\sin(i)}{\sin(r)}$$

La diffusion : si la lumière pénètre dans l'émail, elle frappe les particules d'opacifiant et elle est réfléchie par diffusion dans toutes les directions.

La diffraction : déviation subie par la lumière en rasant un corps opaque. Lorsque le corps est très petit, du domaine des colloïdes, la lumière réfléchie est plus riche en rayons bleus et violets (faible longueur d'onde), qu'en rayons oranges et rouges, la lumière paraît bleuâtre.

L'opacité est due à la diffusion de la lumière par suite de la présence de particules très fines dont les propriétés optiques sont différentes de celle de la glaçure. La diffusion dépend essentiellement du nombre et de la grosseur des particules en suspension ainsi que de la différence de leur indice de réfraction avec celui du milieu. La quantité de lumière réfléchie sera d'autant plus grande que la différence d'indice de réfraction sera importante. Dans le cas d'une incidence oblique, la quantité de lumière réfléchie devient plus importante au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'incidence rasante.



En général, l'indice de réfraction (n) des glaçures et des verres oscille entre 1,5 et 1,7. Les indices de réfraction (n') des opacifiants usuels étant :

- oxyde de titane (rutile) : 2,70
- oxyde de titane (anatase) : 2,52
- oxyde de zirconium (zircon) : 2,40
- oxyde de cérium : 2,10
- oxyde d'antimoine : 2,09
- oxyde d'étain : 2,04
- silicate de zirconium (zircon) : 1,85

La proportion de lumière réfléchie peut être exprimée en % d'après la formule :

$$\% = \frac{(n - n')^2}{(n + n')^2}$$

Pour une glaçure d'indice 1,5 le coefficient de Fresnel sera de 1,06% pour le zircon, et de 5,5 % pour la zircon, l'opacification apportée par la zircon sera donc 5 fois supérieure à celle apportée par le zircon, tous autres facteurs étant égaux.

MÉCANISME DE L'OPACIFICATION

Par recristallisation de l'opacifiant : on ajoute à la glaçure certains produits qui s'y dissolvent à chaud, mais qui recristalliseront au refroidissement, soit dans leur état initial, soit sous une autre forme, ce procédé nécessite un frittage de la glaçure ou de plusieurs de ses composants.

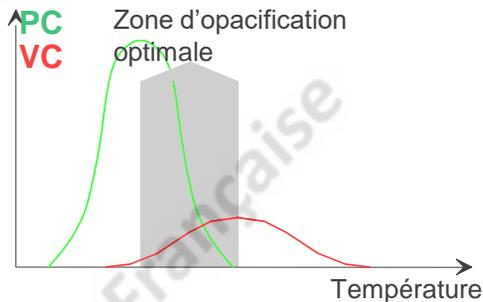
Le processus de chaque cristallisation obéit aux lois de Tammann, la cristallisation des corps en suspension dépend de deux facteurs :

- le pouvoir spontané de cristallisation (ou nucléation) qui est relatif au nombre de germes qui prennent spontanément naissance dans l'unité de volume pendant l'unité de temps :

$$PC = \frac{\text{nombre de germes}}{\text{Volume} \times \text{temps}}$$

- la vitesse de cristallisation (VC), c'est-à-dire la vitesse linéaire avec laquelle les cristaux croissent à partir des germes.

$$VC = \frac{\text{longueur du cristal}}{\text{Temps}}$$



Le pouvoir et la vitesse de cristallisation sont fonction de la température et peuvent être représentés sur le même graphique. Il croît en fonction de l'éloignement de la température de solidification, il passe par un maximum et redevient pratiquement nul à partir d'une certaine température au-dessus de laquelle les particules susceptibles de cristalliser sont solubles. La courbe VC présente elle aussi un maximum, mais qui n'a pas lieu à la même température que pour PC. La zone maxima d'opacification est celle qui se trouve entre les deux maxima (en gris), c'est dans celle-ci que l'on obtient le plus grand nombre de cristaux et les cristaux les plus gros.

En T1, les conditions sont favorables à la nucléation, mais avec une faible VC. Les cristaux correspondants sont des particules colloïdales ou de dimensions voisines des longueurs d'onde inférieure de la lumière visible, donc réfléchissant une lumière bleuâtre.

En T2 où la nucléation est presque nulle, la formation de peu de gros cristaux est observée.

T3 est la température supérieure de cristallisation. En dessous de T1 la viscosité trop importante empêche la cristallisation.

La température optimale est certainement celle où les deux courbes se croisent.

Par l'incorporation mécanique de l'opacifiant : à la glaçure ou à la fritte des produits sont ajoutés qui s'y dissolvent difficilement à chaud et resteront en suspension à la fois dans la glaçure fondue et dans la glaçure refroidie.

- Ajout au moulin de zircon, d'oxyde d'étain ou de cérium, l'opacification des glaçures se fait en ajoutant 1 à 5 % d'opacifiant dans le broyeur

• dans les émaux hautes températures 1200 à 1300°C pour la porcelaine, le grès et le vitreous, le mécanisme de l'opacification résulte essentiellement d'une dispersion des particules de zircon introduites dans le mélange en cru. L'ajout de zircon dans le broyeur est de l'ordre de 10 à 15 %.

La quantité de zirconium passant en solution dans la matrice et éventuellement susceptible de cristalliser sous forme de zircon au refroidissement est très faible par rapport à la quantité de zircon non attaqué. L'opacification face à cette résistance sera donc d'autant plus marquée que le zircon sera divisé et bien réparti.

Quant à la zircone, elle ne trouve pas son emploi dans ce type d'émaux puisqu'elle sera plutôt dissoute dans le flux vitreux pour recristalliser en zircon en refroidissant : compte tenu de son prix, il est préférable d'introduire directement le zircon.

Paramètres influant sur les caractéristiques optiques d'un émail :

la réflectance représente le rapport entre l'intensité de la lumière diffuse réfléchie et l'intensité de la lumière incidente, elle est généralement exprimée en % de la réflectance sur une substance parfaitement blanche

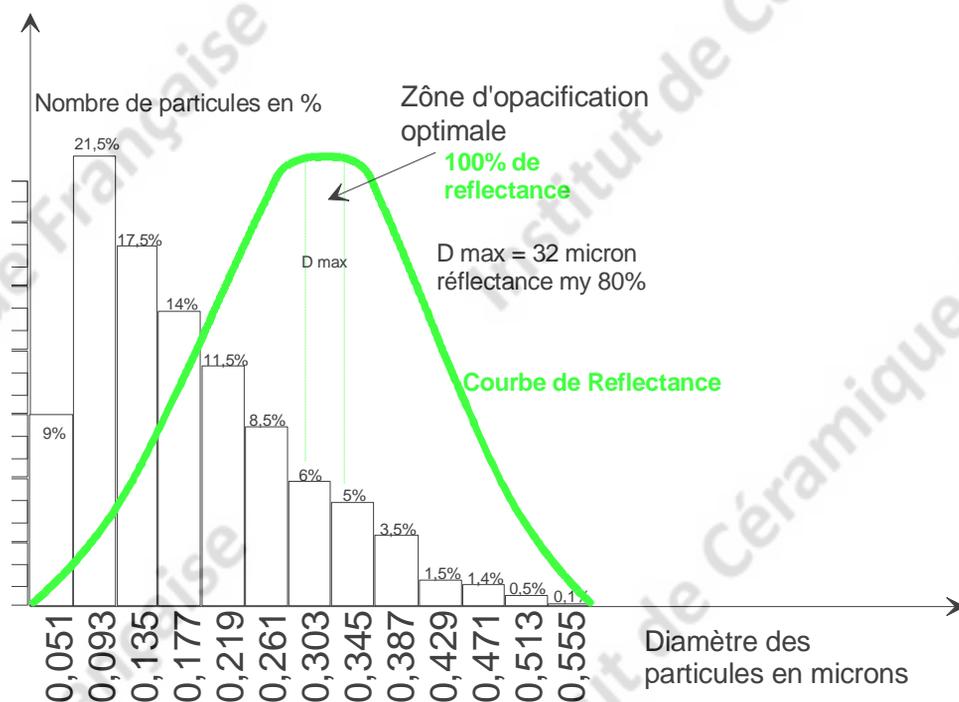
- la blancheur caractérise la pureté de la lumière réfléchie par l'émail dans les limites de la sensibilité spectrale de l'œil humain. La lumière blanche est composée en quantité d'énergie égale de toutes les longueurs d'onde du spectre visible.

Paramètres :

- l'indice de réfraction de l'opacifiant
- le taux de cristallisation, dépendant lui même de :
 - la température de cuisson
 - la durée de cuisson
 - la vitesse de cristallisation (prépondérante dans le cas de cristallisation rapide)

La constitution de la fritte

Certaines additions dans la composition du flux vitreux favorisent la recristallisation de l'opacifiant, tel est le cas de l'alumine dans les émaux de zirconium, de PbO dans les émaux stannifères et l'anhydride phosphorique dans les émaux au titane.



Paramètres influant sur les caractéristiques optiques d'un émail :

La forme des particules : l'oxyde de titane existe sous deux formes allotropiques :

- l'anatase dont les cristaux sont des octaèdres quadratiques d'indice de réfraction 2,52 et dont le spectre d'absorption de la lumière se caractérise par un maximum dans le bleu,
- le rutile dont les cristaux sont des prismes quadratiques d'indice 2,70 et dont le spectre d'absorption se caractérise par un maximum dans le jaune, les cristaux de rutile plus gros favorisent le coefficient de diffusion donc, le pouvoir couvrant et la réflectance

Une trop grande proportion d'anatase donne des nuances bleutées, et trop de rutile donne des nuances crèmes, un bon rapport entre les deux donnera du blanc.

L'absorption sélective dans le flux vitreux : elle est due à la formation de composés colorés par réaction entre l'opacifiant et les autres composés de la fritte (par exemple le zirconate de plomb et l'antimoniote de plomb tous deux donnant à l'émail une teinte jaunâtre).

PRINCIPAUX OPACIFIANTS. Les composés de zirconium : le silicate (zircon) et l'oxyde (zircon).

Le sable de zircon, il est abondamment extrait sur la côte australienne, par un triage perfectionné, il est séparé de ses impuretés, la qualité préparée pour les émaux contient relativement peu d'impuretés, la composition type peut être :

- ZrO ₂	66,20%
- SiO ₂	33,20%
- TiO ₂	0,12%
- Fe ₂ O ₃	0,05%
- Al ₂ O ₃	0,20%

Le zircon broyé, introduit dans les frites, il est préparé au moulin à partir du sable de zircon, il répond à la composition granulométrique suivante :

- 44 microns	0,5 à 1%
- 40 à 20 microns	69,5%
- 20 à 10 microns	12%
- 10 à 5 microns	9%
- 5 à 2 microns	4,5%
- < à 2 microns	3,5%

Le zircon micronisé : il est caractérisé par une grande finesse, tous les grains sont compris entre 0 et 10 microns, il est utilisé par ajout au moulin dans la fabrication des frites et des émaux pour porcelaine et grès.

L'oxyde de zirconium : appelé à l'état naturel baddeleyite dont la teneur en ZrO₂ varie entre 90 et 96%.

Influence de la nature de l'émail :

Sa composition influence grandement la recristallisation des composés de zirconium, différents silicates complexes peuvent se former, mais leur indice de réfraction est toujours plus faible que celui de la zirconite et du zircon.

La présence d'alumine est indispensable à une bonne recristallisation de ZrO_2 ou $ZrSiO_4$, la présence des oxydes de zinc, baryum, et calcium est favorable, lors de l'utilisation d'opacifiant au zircon, la présence du zirconium et de l'alumine diminuera fortement la fusibilité de l'émail.

Il faut donc diminuer la quantité de silice au profit des alcalins, la résistance aux acides sera diminuée, mais la résistance aux attaques alcalines sera renforcée.

* la zirconite donne avec les composés du plomb ZrO_2PbO , qui a un indice de réfraction de 2,1 très favorable à l'opacification, malheureusement ce composé donne à l'émail une teinte jaunâtre

* le pouvoir couvrant des émaux à base de zircon est moins important que ceux à base d'étain ou de titane et doivent donc être appliqués en épaisseur plus forte, l'épaisseur diminuera l'élasticité de l'émail

* les composés de zircon ou les émaux à base de zircon supportent bien les cuissons prolongées

* les flux sodiques sont plus propices à l'opacification que les flux potassiques

* la présence de CaO est nécessaire pour fixer la silice et permettre la recristallisation de ZrO_2

EXEMPLE DE FRITTE POUR FAÏENCE

- Quartz	20%
- Feldspath	15%
- Kaolin	10%
- Craie	10%
- Oxyde de zinc	5%
- Borax	15%
- Acide borique	5%
- Nitrate de potasse	3,5%
- Zircon broyé	16,5%

EXEMPLE DE COMPOSITION D'ÉMAIL SANITAIRE

- Feldspath orthose	37,4%
- Kaolin	5,65%
- Craie	16%
- Quartz	27,95%
- Zircon micronisé	13%

LES PRINCIPAUX OPACIFIANTS

L'oxyde d'étain SnO_2 : il est connu à l'état naturel sous le nom de cassitérite, il doit être très pur. Ne pas contenir de trace d'étain métallique, qui provoque des points noirs ou même une teinte grisâtre, il ne doit contenir ni fer, ni cuivre, ni chrome. Les limites d'emploi sont très larges et s'étendent aux émaux fusibles très plombés, peu acides, aux glaçures presque sans plomb riche en SiO_2 , B_2O_3 et Al_2O_3 et enfin aux émaux non frittés de hautes températures.

Les émaux stannifères sont très sensibles à la réduction, il est recommandé d'introduire le plomb de ces glaçures sous forme de minium Pb_3O_4 et la potasse sous forme de nitrate KNO_3 qui dégage de l'oxygène pendant la cuisson.

L'oxyde d'étain diminue le coefficient de dilatation, augmente l'élasticité de l'émail, la résistance aux acides et aux solutions alcalines et améliore le brillant, il a tendance à donner des retirements.

L'opacification à l'oxyde d'étain a deux origines, une partie de celui-ci est dissoute dans la glaçure et recristallisera au refroidissement, et une autre partie restera en suspension dans le flux vitreux. Il faudra donc refroidir assez lentement pour avoir une zone de cristallisation permettant la formation et l'accroissement de germes cristallins, cela est le cas pour les glaçures riches en plomb où un refroidissement trop rapide peut donner une glaçure transparente, par contre dans les frites alcalines, il reste dissous sous forme de stannate et devra, par conséquent, plutôt être rajouté au moulin.

Dans les couvertes, SnO_2 ne sera pas dissous et restera en suspension dans le flux vitreux.

Formule stœchiométrique d'une fritte avec plomb :

- 2,2 SiO_2
- 0,268 Al_2O_3
- 0,559 PbO
- 0,109 ZnO
- 0,166 MgO
- 0,166 K_2O
- 0,192 SnO_2

Formule stœchiométrique d'une glaçure sans plomb :

- 2,98 SiO_2
- 0,44 Al_2O_3
- 0,20 ZnO
- 0,38 CaO
- 0,41 K_2O
- 0,11 SnO_2

Formule centésimale d'émail non fritté pour cuisson sanitaire :

- Feldspath 33,85%
- Kaolin 10,75%
- Quartz 34,95%
- Craie 14,45 %
- SnO_2 6,00%

L'oxyde de titane : il est assez peu employé pour les émaux céramiques, par contre il est couramment utilisé dans les émaux pour tôle, il doit être très pur, la moindre impureté à base d'oxyde métallique aura un grand effet de coloration. Le fer, le chrome, le cuivre, le vanadium, le manganèse et le nickel sont particulièrement nuisibles, les émaux pour tôle à base d'oxyde de titane présentent des qualités supérieures à celle des autres émaux dans les domaines de la réflectance : le brillant, la résistance chimique et l'abrasion. Par contre, il est très sensible aux conditions de frittage, une température trop élevée pouvant entraîner la dissociation de TiO_2 par perte d'oxygène. Les émaux présentent alors des effets bleutés dus à une présence trop forte en anatase.

L'oxyde de titane est un fondant et de ce fait, la quantité de silice introduite dans les émaux a pu être fortement augmentée, on peut trouver près de 50% de silice, 20% de TiO_2 qui, tous deux, contribuent à une bonne résistance chimique.

La présence d'alumine (anti-dévitifiant) n'est pas souhaitable.

L'oxyde d'antimoine Sb_2O_3 : on devra l'utiliser de préférence dans les glaçures sans plomb, car il forme des antimoniates de plomb jaunes, il doit être fritté, car il est soluble dans l'eau, et réagit avec le kaolin pour donner à la glaçure un aspect terne, au cours de la fusion de la fritte il peut se former des composés volatils toxiques Sb^{3+} .

L'oxyde de cérium Ce_2O_3 : il possède un très grand pouvoir opacifiant surtout s'il est rajouté au moulin, il tend à donner des émaux jaunâtres (dus à la présence de terres rares comme l'oxyde de didyme) cette coloration est accentuée en présence de plomb, il augmente fortement la viscosité des émaux.

BROYAGE

Seule la pratique du broyage des émaux en broyeurs à boulets par voie humide sera abordée. En effet, elle fait l'unanimité chez les céramistes et les fabricants d'émaux, seuls quelques professionnels préparent leurs émaux dans des turbodéliteurs de grande puissance à partir de matières premières prébroyées chez le fournisseur.

Les broyeurs à billes plus souvent appelés « alsing » sont constitués par un tambour métallique cylindrique tournant autour de son axe horizontal. Ils sont garnis intérieurement d'un revêtement en pavés de silex taillés, en brique de corindon ou porcelaine dure alumineuse. Ils sont chargés de corps broyant, généralement sphériques, de même nature que le revêtement, il existe, également, des revêtements en élastomère améliorant l'efficacité du broyage par rebond du corps broyant.

Une fois le broyeur chargé de la masse à broyer, celui-ci est mis en rotation, le broyage est assuré par le relevage des corps broyant et leur cascade sur la matière première.

Le broyage est certainement une des interventions fondamentales qui intervient dans le processus de la préparation des émaux, parce qu'il doit fournir un produit hautement raffiné, parfaitement homogène, stable dans le temps et non pollué.

Pour obtenir un broyage optimum, outre la bonne qualité du revêtement et de la charge broyante, il est indispensable d'observer quelques règles : celles-ci ont été établies mathématiquement et parfois de façon empirique, mais l'utilisation de ces broyeurs date de plusieurs dizaines d'années, et ce pratiquement dans toutes les industries transformant du minerai. Les règles énoncées ci-dessous conduiront facilement à un broyage optimum dès les premiers essais .



Le broyage des émaux est indispensable ; tous les composants d'un émail ne sont pas dans la nature, ou selon les fournisseurs, livrés à la même dimension. La silice peut avoir des grains d'un diamètre de plusieurs

dizaines de millimètres, le kaolin peut être livré en granulés de 1cm de diamètre, les frites peuvent être livrées en paillettes dépassant également le cm.

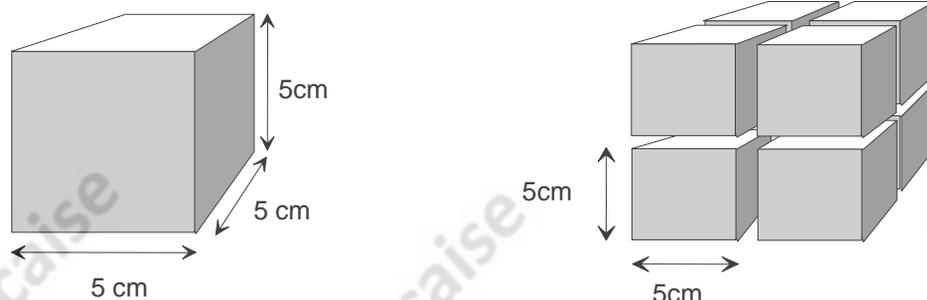
Ces dimensions ne sont pas celles pouvant être utilisées avec les systèmes d'application céramique (pistolet, trempage), de plus, tous ces produits ne sont pas à la même granulométrie.

Afin d'obtenir une poudre homogène pour l'ensemble des constituants, d'assurer un mélange intime de ceux-ci, et de descendre la granulométrie (étude de la grosseur des grains), il est indispensable de broyer.

POURQUOI broyer les émaux ?

La caractéristique principale d'un grain d'émail sera de fondre, celui-ci sera soumis à l'action de la chaleur soit dans des fours électriques (rayonnement), soit à gaz (convection). (rayonnement : par ondes) (convection : transmission par un gaz chaud)

Dans les deux cas, pour fondre totalement, l'ensemble du grain devra être porté à sa température de fusion, et ceci jusqu'au cœur. La chaleur sera donc transmise par le gaz chaud (convection) à la surface du grain, et ensuite sera transmise de la surface jusqu'au cœur du grain (conduction). Il est évident que plus la surface d'une masse à cuire sera importante, plus celle-ci pourra recevoir de chaleur du gaz.



Imaginons un grain d'émail dont la forme serait un cube de 10 cm de côté, et dont la masse serait de 2,5 kg. En le chauffant par sa surface extérieure, la chaleur se répartirait sur 10 cm X 10 cm X 6 faces = 600 cm².

En divisant (par broyage) ce cube en 8, 8 cubes de 5cm de côté sont obtenus, soit une surface totale de : 5cm * 5cm * 6 faces * 8 cubes = 1200 cm² soit une surface du double de la précédente. La même masse (2,5 kg) de matière pourra donc recevoir deux fois plus de chaleur, et donc fondre plus vite.

LA VITESSE DE BROYAGE :

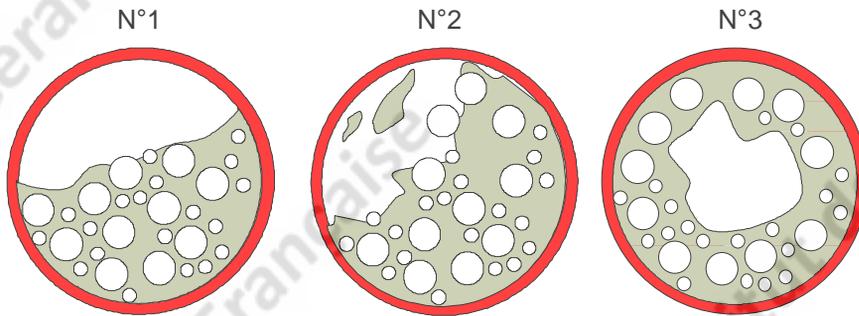
La vitesse du broyeur est exprimée en tours par minutes, plus rarement en mètres par minute, elle est d'une importance fondamentale pour obtenir le meilleur broyage.

Comme illustré par les trois croquis ci-dessous, la vitesse idéale est celle qui permet le roulement des billes en maintenant celles-ci en contact permanent avec les produits à broyer, évitant qu'il ne se forme une zone morte dans la partie basse du broyeur.

La formule de Kendall, indique que la vitesse correcte doit correspondre à un pourcentage de la vitesse critique, cette vitesse critique est étroitement liée à l'angle de rupture défini au moment où la sphère sous l'effet de la rotation, se détachera de la paroi du broyeur pour rouler vers le bas en écrasant les produits comme indiqué sur le croquis N°1.

La formule de la vitesse en tour/minute $N = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$ où D est le diamètre intérieur du broyeur en mètres.

$N = \frac{30}{\sqrt{R}}$ où R est le rayon intérieur du broyeur en mètres



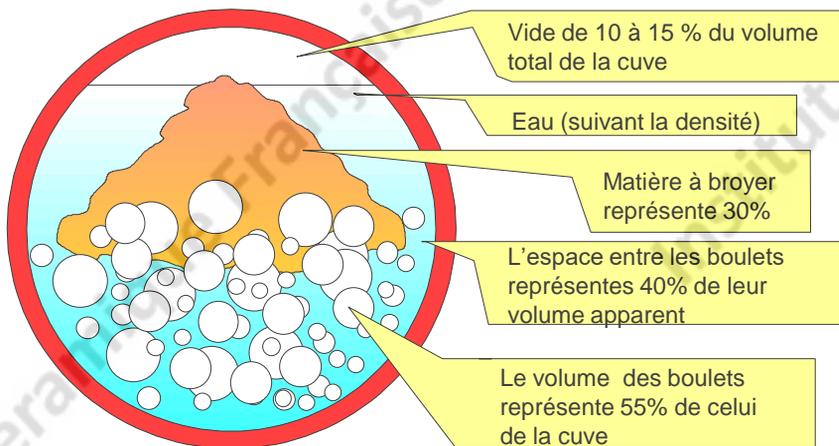
Vitesse trop lente: les billes restent dans le fond du broyeur et ne participent pas au broyage.

Vitesse normale, les billes montent jusqu'à 75% de la hauteur du broyeur et sous l'effet de la gravité retombent en roulant les unes sur les autres, broyant des particules d'émail à chaque contact entre billes

Vitesse trop importante, l'ensemble de la masse des billes plus émail est plaqué contre la paroi par la force centrifuge, donc aucun mouvement des billes entre elles.

L'importance de cet angle de rupture est grande parce que s'il est dépassé, il donne naissance au phénomène indiqué dans le croquis N°2 qui montre la projection des corps broyés dans la zone libre, produisant des chocs par la suite de la chute des sphères, et par conséquent une perte de l'énergie de broyage et une usure rapide des sphères et des parois.

Le nombre correct de tours par minutes, s'obtient en la calculant un pourcentage de la vitesse critique, le pourcentage varie selon les capacités des broyeurs. En règle générale, plus un broyeur est petit, plus il tourne vite.



Pour des broyeurs de 60 à 1500 litres de capacité utile
•de 65 à 80% de la vitesse critique.

Pour des broyeurs de 2500 à 10000 litres
•de 55 à 60 % de la vitesse critique.

Pour des broyeurs de 11000 à 23000 litres
•de 45 à 55 % de la vitesse critique.

CHARGE DES SPHÈRES

La charge des sphères doit toujours occuper 55% du volume utile du broyeur de façon à obtenir des temps de broyage les plus brefs, et un produit plus homogène et plus raffiné en raison de la plus grande probabilité des contacts entre sphères et matières premières. En portant la charge à 60% ou en la diminuant à 45%, il en résulte une diminution du rendement du broyeur de 25%, une augmentation du temps de broyage et de la température finale.

CHARGE DES PRODUITS À BROYER : CAS DES FRITES

Le broyage optimum d'émaux s'obtient lorsque le volume total du chargement dépasse légèrement les espaces vides qui restent entre les sphères broyeuses. Le pourcentage sur le volume utile du broyeur est de 25% environ, alors que le poids sera obtenu en multipliant ce volume par le poids spécifique de la fritte.

CHARGES DES PRODUITS À BROYER : CAS DES ARGILES ET DES MASSES.

Pour les masses céramiques, il faut effectuer une dispersion et un léger broyage, les matériaux étant habituellement plus tendres que les frites, ils se laissent agresser plus facilement par les sphères. Le broyage optimum s'obtient en occupant 45 à 50% du volume utile du broyeur, et, malgré la quantité de corps broyant souvent moindre (la masse de matière à broyer représentant 130% de la masse des sphères), on obtient un broyage régulier et homogène, sans altération des temps de broyage.

DIMENSIONS DES SPHÈRES :

Le broyage étant le résultat d'une action étroite entre les sphères, il s'ensuit que plus petites seront les sphères, plus important sera le nombre de contacts entre les éléments broyeurs. Il est évident que la dimension de la charge des sphères est liée aux caractéristiques physiques du produit à broyer, de la taille initiale du produit et de la finesse de la granulométrie finale demandée.

Pour cela si l'on considère seulement le diamètre maximum de la matière à broyer, et le diamètre des sphères, on procède au calcul selon la méthode suivante :

$(\text{Diamètre de la bille})^2 = 1000 * \text{diamètre moyen de la particule à broyer} * K.$

Avec $K = 0,7$ pour les matériaux tendres et $K = 1,2$ pour les matériaux durs.

Cette formule donne des chiffres approximatifs utiles, mais ne peut pas prétendre être absolue. Car les plus petits diamètres de bille seront freinés par la viscosité de la barbotine, et leurs diamètres seront déterminés pour que leurs poids puissent combattre cette viscosité.

Pratiquement, il faut mettre trois dimensions de bille dans le broyeur, pour augmenter l'efficacité du broyage en multipliant les points de contact, pour éviter le rainurage du revêtement, pour assurer l'étalement granulométrique des particules à broyer. En effet, il n'est pas rare d'avoir un rapport de 100 à 1 entre le diamètre d'entrée des particules et leur diamètre de sortie.

Actuellement sur le marché, il y a trois qualités de billes et de revêtements : en silex, en porcelaine dure alumineuse et en corindon. Le choix du matériau est très important, car, outre les caractéristiques de résistance à l'usure des divers revêtements, il faudra également tenir compte des poids spécifiques des matériaux composant les billes, puisque le taux de remplissage doit être initialement calculé en % du volume utile du broyeur, puis seulement en poids pour le remplissage.



EXEMPLE DE CALCUL DE CHARGE DE BILLES

Pour un broyeur de 1000 litres, il faudra environ 500 à 550 litres de billes (le calcul sera fait avec 500L).

Les vides entre les billes représentant 40 % du volume total des billes, le volume réel des billes représentera seulement 60% de ces 500 litres soit 300 litres.

Si l'on fait le calcul avec des billes de silex de densité 2,4, le poids de billes est $2,4 \times 300 = 740$ kg.

Avec des billes de porcelaine dure de densité 2,8 le poids de billes est $2,8 \times 300 = 840$ kg.

Avec des billes de corindon de densité 3,55 le poids de billes est $3,55 \times 300 = 1065$ kg.

Au cours du broyage, il faudra faire un rajout périodique avec les plus grosses billes seulement (l'usure des plus grosses fera qu'elles viendront remplacer celles de taille médiane, etc. Il est donc inutile de rajouter l'ensemble des diamètres).

La perte de poids ne diminue pas le nombre de points de contact, c'est pourquoi une charge perdant parfois jusqu'à 20% de son poids donne des résultats proches de ceux de la charge initiale, cependant pour des raisons de reproductibilité des caractéristiques granulométriques des émaux, il est préférable de garder une charge constante.

ATTENTION, les broyeurs dont les charges passent du silex à l'alumine ou au corindon doivent voir leur taux de remplissage recalculé.

CALCUL DE LA CHARGE À BROYER

Il se fait en multipliant le taux de remplissage (de 25 à 30%), par le volume utile du broyeur et par la densité de la fritte à broyer.

Un tableau récapitulatif donne la corrélation entre les différentes caractéristiques du broyage :

- volume utile
- masse de billes de chaque diamètre
- masse de la charge à broyer
- vitesse du broyeur en tours / minutes
- nature des corps broyants.

Caractéristique des billes de porcelaine et de corindon	Diamètre mm	Volume cm ³	Masse g	Nombre par kg	Volume des vides
Billes en porcelaine dure	30	14,13	39	26	40,52
Dureté Mohs 8,5	40	33,51	92,2	11	42,17
Masse volumique 2,8 g/cm ³	50	65,45	180	6	43,84
% d'alumine 55 %	60	113,09	311	3	45,50
	70	179,5	493,6	2	47,15
Billes en corindon	25,4	8,57	30,5	31	39,68
Dureté Mohs 9	31,8	16,83	60	16	40,94
Masse volumique 3,55 g/cm ³	38,1	28,94	103	10	41,87
% d'alumine 90 %	44,4	45,80	162,6	6	43,12
	50,8	68,60	243,5	4	44,06

Tableau récapitulatif des caractéristiques à mettre en œuvre pour un broyage optimum

Volume utile en litres		230	350	570	935	1570	2245	4000	8250	10000	26000	32700
Porcelaine	Masse de billes totale	190	290	475	775	1285	2000	3350	6900	8500		
	Billes D= 30 mm	57	88	145								
	Billes D= 40 mm	76	115	185	230	385	600					
	Billes D= 50 mm	57	88	145	315	515	800	1015	2050	2550		
	Billes D= 60 mm				230	385	600	1320	2800	3400		
	Billes D= 70 mm							1015	2050	2550		
Corindon	Masse de billes totale	241	375	600	1000	1700	2650	4250	8750	10900		
	Billes D= 25,4 mm	60	95	150								
	Billes D=31,7 mm	121	185	300	250	425	675					
	Billes D= 38,1 mm	60	95	150	500	850	1300	1060	2200	2650		
	Billes D=44,5 mm				250	425	675	2130	4350	5600		
	Billes D= 50,8 mm							1060	2200	2650		
Silex	Galets de 80 à 100 mm								4375	5450	15500	19500
Masse de la charge à broyer sèche		100 à 125	175 à 200	280 à 320	450 à 500	710 à 800	1070 à 1250	1700 à 2000	3000 à 4000	4200 à 5000	11000 à 12000	14000 à 15000
Vitesse en tr/min.		39	35	32	27	24	20	17	16	15	13	13

Évolution du broyage en fonction de perturbations des caractéristiques ci-dessus.

Augmentation de la charge de sphères broyantes : usure plus forte des billes et revêtement.

Broyage plus fin par multiplication des points de contact, perte d'efficacité, par diminution de l'espace libre et déplacement du centre de gravité de la masse totale.

Augmentation de la charge à broyer : broyage plus lent, tonnage supérieur par opération, usure moindre.

Broyeur peu chargé en bille et charge à broyer (au tiers par exemple) : par suite de l'augmentation de l'espace libre, augmentation de l'efficacité du broyage par percussion, au détriment de l'attrition, tonnage moindre par opération, grande usure des corps broyants et du revêtement.

Broyeur trop chargé : perte d'efficacité importante.

La quantité d'eau dépend essentiellement de la densité finale à obtenir. Il est possible, pour le broyage, d'utiliser une quantité d'eau qui mettra la masse dans un état de viscosité à la limite de l'impossibilité d'écoulement par gravité. Des quantités d'eau peuvent être ajoutées en fin de broyage pour ajuster la densité.

REMARQUE : il est indispensable, lors de la mise en route d'un broyeur neuf ou possédant un revêtement neuf, de procéder au nettoyage de celui-ci en incorporant l'équivalent du volume des sphères en sable (de Nemours par exemple) afin de débarrasser le revêtement de toutes les aspérités dues à la construction.

ADJUVANTS

Les adjuvants pour émaux sont utilisés pour obtenir les effets suivants :

- réglage de la viscosité
- optimisation de la concentration en matières solides
- mise au point de propriétés rhéologiques spécifiques
- optimisation des procédés d'émaillage
- augmentation de la résistance à l'abrasion de l'émail cru
- amélioration de l'état de surface de l'émail
- amélioration du nappage
- réglage du temps d'absorption ou ressuyage
- amélioration de la cohésion entre tesson et couche d'émail
- augmentation de la durée de conservation et de stockage des émaux

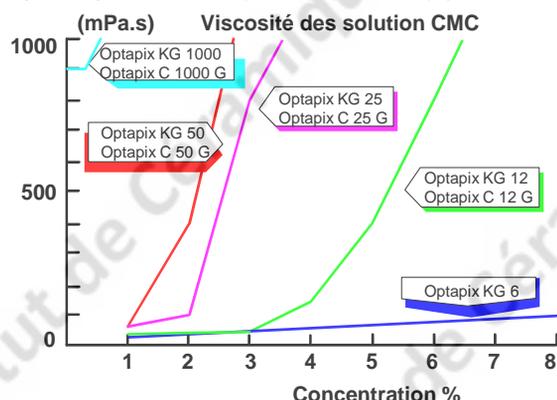
LES DÉFLOCULANTS :

Les défloculants sont utilisés dans le domaine de l'émaillage pour assurer le réglage et le contrôle de la viscosité des émaux et de leur teneur en matières solides. Ils se présentent liquides ou sous forme de poudre. L'emploi de défloculants liquides est particulièrement intéressant pour le réglage de la viscosité directement sur les chaînes d'émaillage.

LES LIANTS : l'emploi des liants a pour but d'améliorer la cohésion interne à l'émail. On obtient ainsi, d'une part, une adhérence mécanique améliorée en surface de l'émail (accrochage) et, d'autre part, une meilleure cohésion entre émail et tesson, ceci ayant pour effet de s'opposer à l'effet de coulure en surface et d'empêcher l'écaillage (en cru) de l'émail sur les bords.

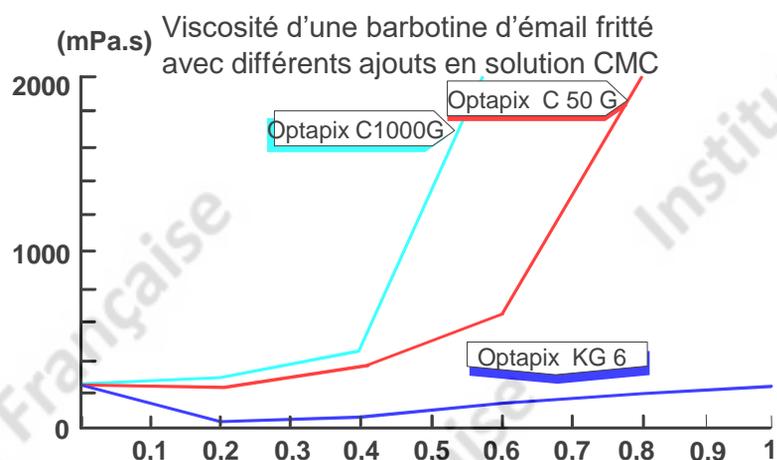
On fait aujourd'hui usage de polymères organiques, polymères synthétiques. En plus de leurs propriétés en tant que liants, ils présentent aussi des avantages en ce qui concerne le réglage du temps de ressuyage, de l'écoulement et de la viscosité. En particulier, les carboxyméthylcelluloses (CMC) (blanose) présentent un grand intérêt.

Défloculants	Compositions chimiques	Applications
Giessfix G1	À base de phosphate	Émaux, engobes
Giessfix G3	À base de phosphate	Émaux non frittés Émaux argileux
Dolapix G6	Polyélectrolyte synthétique	Émaux frittés
Dolapix PC67	Polyélectrolyte synthétique	Émaux frittés, engobes, émaux cru



CMC : ces produits qui correspondent à la gamme des optapix KG et optapix C..G sont des carboxyméthylcelluloses de sodium (Na-CMC), présentant un haut degré de pureté. Leurs différences sont dues à leur degré de polymérisation, c'est-à-dire à leur longueur de chaîne, facteur qui intervient dans la viscosité d'une solution (voir graphique ci-dessus) ainsi que dans les propriétés relatives aux techniques d'emploi.

Avec les CMC à chaîne courte comme l'optapix KG6, optapix KG12 et optapix C12G, outre l'effet liant recherché, on obtient également un effet fluidifiant, avec les CMC à chaîne moyenne comme l'optapix KG50 et l'optapix C50G, l'effet électrolyte est déjà neutralisé par l'augmentation de la viscosité propre, et ont donc après peu d'effet sur elle. Les types à haut polymère (chaîne longue) tels que l'optapix KG 1000C et l'optapix C 1000G exercent un effet épaississant sur les barbotines d'émail (voir graphique ci-contre).



D'une façon générale, on peut dire que l'effet liant augmente avec l'accroissement du degré de polymérisation, et que la capacité de rétention d'eau, c'est-à-dire le temps de ressuyage, s'accroît aussi, ce type de produit se présente sous forme de poudre ou de granulats qui sont plus faciles à délayer. Ils doivent dans le cas de stockage prolongé des bains d'émaux, être protégés des bactéries par introduction d'un agent conservateur bactéricide (l'acide acétique convient). Ces produits ne doivent pas être incorporés dans le broyeur en même temps que la charge de fritte sinon l'effet du broyage cassera les chaînes de polymère et les caractéristiques rhéologiques de la barbotine s'en trouveront modifiées, cependant elles peuvent être introduites dans les dernières trente minutes de broyage, ou lors de la préparation du bain d'émail, juste avant utilisation.

CMC			
Produits	Emplois	Procédés d'application	Valeurs indicatives de concentration
Optapix KG 6	Porcelaine	Pulvérisation	0,2 à 0,4%
	Faïence mono cuisson et bicuisson	Cloche	0,3 à 0,5%
		Turbine	0,05 à 0,1%
Rideau			
Optapix KG 12/C12G	Porcelaine	Pulvérisation	0,1 à 0,3%
Optapix KG 25/C25G	Faïence mono et bicuisson	Cloche	0,3 à 0,5%
		Turbine	0,2 à 0,4%
Optapix KG 50/C50G	Mono cuisson	Turbine	0,2 à 0,4%
		Rideau	
	Carreau étiré bicuisson	Turbine	0,2 à 0,4%
		Rideau	0,03 à 0,1%
Optapix KG1000/C1000G	Faïence mono et bicuisson	Cloche	0,1 à 0,2%

Liants à base de polymères			
Produits	Emplois	Procédés d'application	Valeurs indicatives de concentration
Optapix G 108 Flussig	Porcelaine	Trempage Pulvérisation	0,5 à 1,5 %
Optapix KG 25/C25G	Porcelaine	Trempage Pulvérisation	0,3 à 0,5%
	Carreaux	Cloche	0,2 à 0,4%

LIANTS À BASE DE POLYMÈRES : tous les produits types CMC provoquent un allongement du temps de ressuyage, dans le cas où pour ne pas modifier ni le temps de ressuyage ni la rhéologie, les produits suivants seront nécessaires :

AGENT DE NAPPAGE : optapix G1133 améliore les propriétés d'écoulement de l'émail et donc du nappage. En réduisant la tension superficielle, on obtient un meilleur mouillage du tesson et une surface plus lisse de la couche d'émail. Son utilisation est recommandée dans le cas d'émaux blancs brillants et de cuisson rapide.

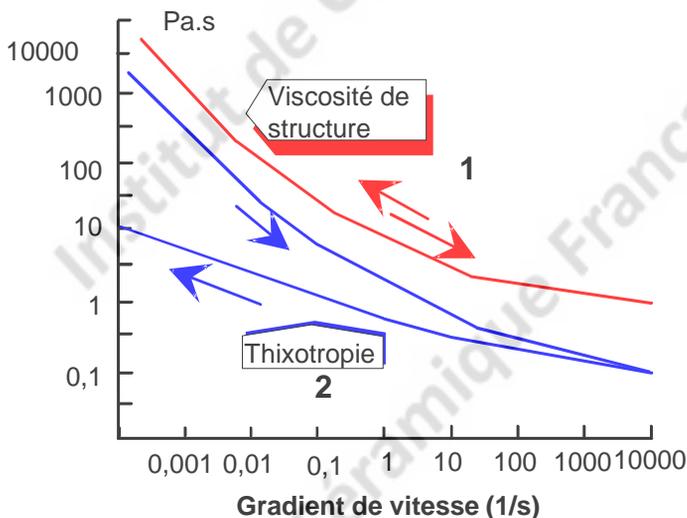
STABILISANT à base électrolytique : l'effet de ce groupe de produits est dû à l'influence exercée sur la charge des particules d'émail en surface. Avec un ajout de ces additifs, on apporte à l'émail des propriétés thixotropiques qui s'opposent à la sédimentation. Ces produits stellmittel ZS et Produkt KG 1279 ne provoquent pas d'allongement du temps de ressuyage, mais leur emploi favorise la déshydratation de la barbotine d'émail. Dans le cas des émaux appliqués par trempage, ces produits sont utilisés pour réguler la couche d'émail et pour éviter les défauts de goutte et de bourrelet.

STABILISANT à base de gonflants : en formant dans la suspension une structure moléculaire de poids élevé, ces produits Peptapon 5 et Produkt KG 1201 stabilisent les barbotines d'émail. La gélification s'oppose à la sédimentation.

ADJUVANTS RHÉOLOGIQUES : la qualité de l'état de surface des pièces émaillées dépend en premier lieu du comportement rhéologique de la barbotine d'émail, les différents phénomènes rhéologiques à maîtriser sont : viscosité, thixotropie, limite d'écoulement, viscosité de structure

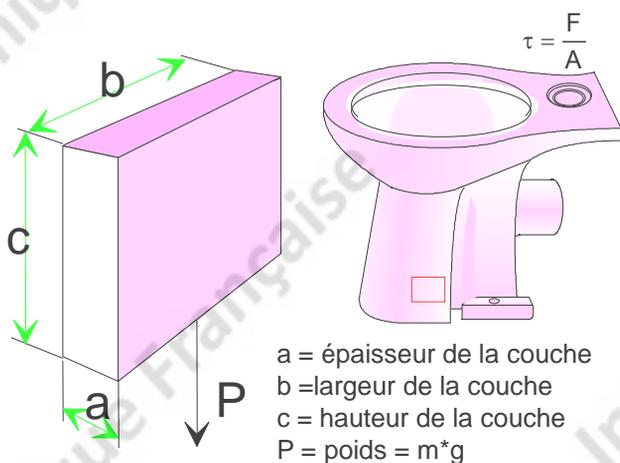
COURBES D'ÉCOULEMENT, la figure ci-contre représente le comportement rhéologique d'un système à viscosité de structure (1) et d'un système thixotrope (2). Avec 1, la viscosité chute quand la vitesse de cisaillement augmente, lorsque le cisaillement diminue, la viscosité remonte sans temps de retard.

Avec les systèmes thixotropes, après la chute de la viscosité due au cisaillement, la viscosité remonte suivant des mesures qui sont variables en fonction du temps, la viscosité des systèmes thixotropes dépend donc des contraintes de cisaillement et du temps.



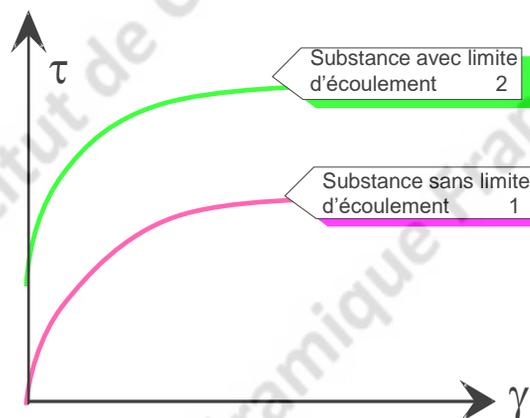
LIMITES D'ÉCOULEMENT : les matières sans limites d'écoulement sont celles qui pourront se mettre en mouvement sans forces extérieures, celles qui ont une limite d'écoulement devront pour vaincre les forces de leur propre structure interne faire appel à l'aide de forces extérieures.

Comportement de l'émail sur une surface verticale : détermination de l'épaisseur de la couche d'émail sur une surface verticale.



Exemples :

$\tau = 20 \text{ Pa}$	$d = 1,7 \text{ g/cm}^2$	$a = 1,2 \text{ mm}$
$\tau = 15 \text{ Pa}$	$d = 1,7 \text{ g/cm}^2$	$a = 0,9 \text{ mm}$
$\tau = 10 \text{ Pa}$	$d = 1,7 \text{ g/cm}^2$	$a = 0,6 \text{ mm}$



τ = contrainte de cisaillement

A = surface de cisaillement = $b \cdot c$

$F = m \cdot g$

m = masse de l'échantillon = $V \cdot d$

g = accélération terrestre = $9,81 \text{ m. s}^{-2}$

V = volume de l'échantillon = $a \cdot b \cdot c$

d = densité de l'émail

Il en résulte la valeur limite de l'écoulement.

$$\tau = \frac{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot g}{b \cdot c}$$

Cette formule prouve que la limite d'écoulement est indépendante de la largeur de la couche, ainsi que sa longueur, en simplifiant la formule, il est possible d'extraire l'épaisseur a :

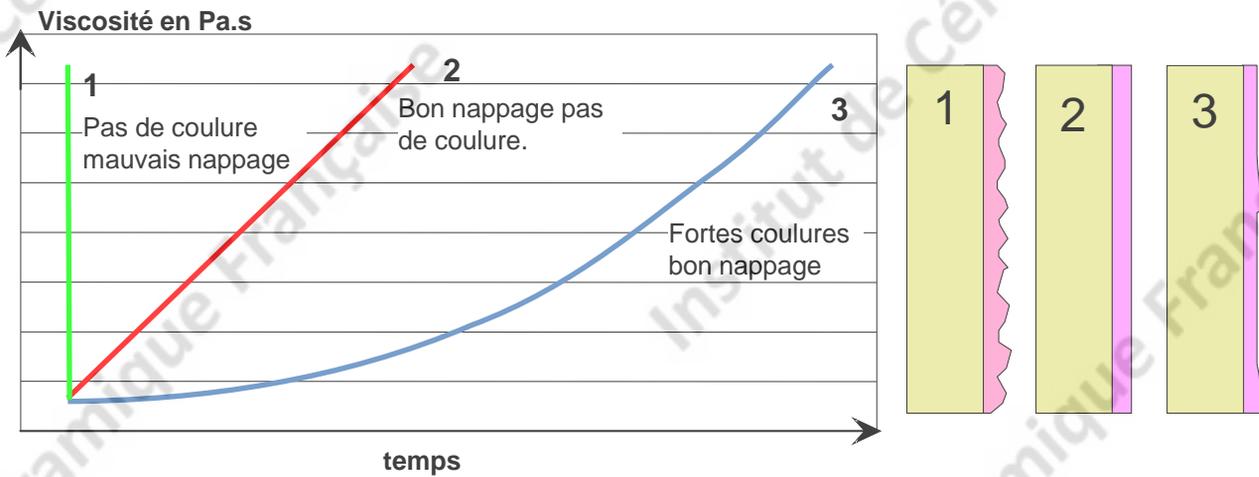
$$a = \frac{\tau}{d \cdot g} \quad (\text{sur support non poreux}).$$

Les valeurs de τ peuvent être déterminées à l'aide d'un rhéomètre, en faisant varier les caractéristiques rhéologiques de la barbotine d'émail et optimiser l'épaisseur de la couche à déposer. En pratique, les valeurs obtenues sont plus faibles, en raison d'une application sur support poreux.

APPLICATIONS CONCRÈTES DES NOTIONS DE RHÉOLOGIE DE BASE

Influence du comportement rhéologique sur l'effet de coulure et de nappage d'un émail :

La coulure et le nappage sont des phénomènes opposés, si un émail doit présenter un état de surface uniformément lisse, la viscosité doit, pour assurer un écoulement satisfaisant, être maintenue suffisamment longtemps à bas niveau, d'où un risque de coulure sur les surfaces verticales. Par contre, l'empêchement absolu de l'effet de coulure de l'émail exige, après contrainte de cisaillement (par exemple, au passage de la buse du pistolet en cas de pulvérisation) le rétablissement rapide de la viscosité de telle sorte que l'on atténue l'effet de coulure ce qui a l'inconvénient d'altérer le nappage. Les produits Peptapon sont des combinaisons optimisées d'adjuvants rhéologiques avec liants nappant qui permettent à la fois un nappage de bonne qualité et l'absence d'effet de coulure.



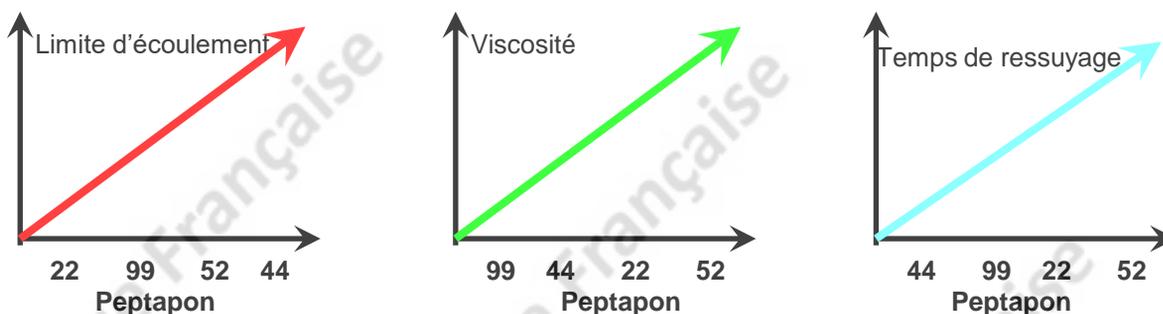
ADJUVANTS RHÉOLOGIQUES : afin de permettre un ajustage précis des caractéristiques rhéologiques quant à la vitesse d'écoulement, l'élasticité et la cohésion d'un émail déterminé, les produits auxiliaires Produkt KG 1205 et Produkt KG 1265 peuvent être utilisés en combinaison avec des adjuvants rhéologiques. Produkt KG 1205 permet de réguler la limite de l'écoulement de l'émail sans intervenir sur le temps de ressuyage et Produkt KG 1265 régule quant à lui la cohésion et l'élasticité de l'émail. Un ajout de 0,1 à 0,2 % en combinaison au Peptapon s'avère généralement suffisant.

Élévation de la viscosité après contrainte de cisaillement : la courbe 3 représente un émail avec une très lente élévation de la viscosité après une importante contrainte de cisaillement, on obtient un bon nappage de l'émail, mais aussi un effet de coulure important.

La courbe 1 représente un émail ayant une très rapide élévation de la viscosité de telle sorte que toutes coulures sont impossibles, et bien sûr tout nappage également. La courbe 2 présente une élévation régulière et équilibrée de la viscosité, permettant un nappage suffisant et une surface sans coulure.

Produits	Emplois	Procédés d'application	Pourcentages
Peptapon 9	Carreaux	Cloche	0,1 à 0,3%
	Carreaux grès étirés doubles	Turbine	
	Carreaux de faïence	Pulvérisation	
		Turbine	
Peptapon 74	Céramique sanitaire	Application manuelle	0,3 à 0,6%
Peptapon 74	Carreaux	Cloche / rideau	0,2 à 0,4%
Peptapon 22	Céramique sanitaire	Robot et manuelle	0,4 à 0,7%
Peptapon 44	Céramique sanitaire	Robot et manuelle	0,4 à 0,7%
Peptapon 52	Céramique sanitaire	Robot et manuelle	0,3 à 0,6%
	Carreaux	Cloche	
Peptapon 99	Céramique sanitaire	Robot et manuelle	0,4 à 0,7%
	Objet en grès cérame	Pulvérisation	0,2 à 0,4%
		Trempe	

ACTION PAR ORDRE CROISSANT DES ADJUVANTS SUR LES CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES



PULVÉRISATION

PRINCIPE : Un flux d'émail est propulsé à travers une buse de petit diamètre de 0,8 mm à 3 mm, sous l'effet d'une arrivée d'air sous pression conjointe, le jet d'émail est atomisé (transformé en fines gouttelettes) et propulsé par la vitesse de l'air en direction de la pièce à émailler sur laquelle il vient s'écraser, la quantité d'eau contenue dans la barbotine d'émail suffit alors pour fixer les grains entre eux. L'arrivée de l'émail peut se faire par gravité ou sous pression à l'aide d'une pompe.

Ce matériel nécessitant un grand débit d'air, il est impératif de l'utiliser dans un espace restreint équipé en aspiration. En effet, avec ce système de pulvérisation plus de 50% de l'émail n'atteint pas la pièce à émailler, aussi il s'est développé depuis plusieurs années des systèmes de pulvérisation pneumatique utilisant peu d'air (en débit) ou peu de pression d'air voire dans certain cas pas d'air du tout.

Ces systèmes présentant, outre le fait d'économiser de l'émail ou de ne pas avoir à le recycler, sont garants d'une meilleure hygiène pour l'utilisateur, et d'une facilité de mise en œuvre.

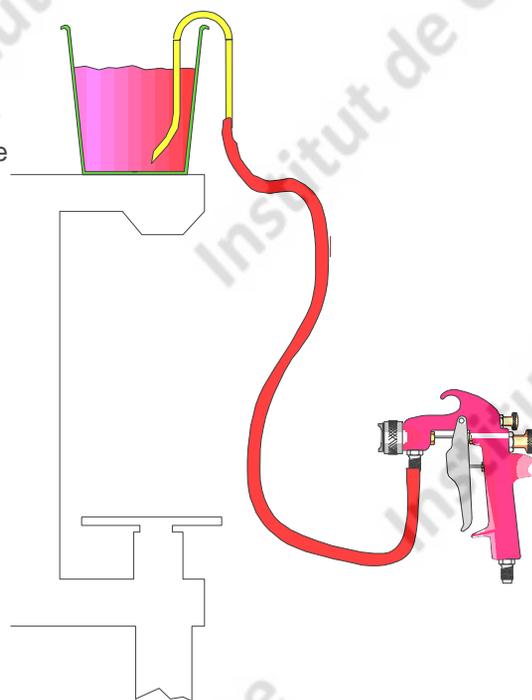


ÉMAILLAGE PAR GRAVITÉ

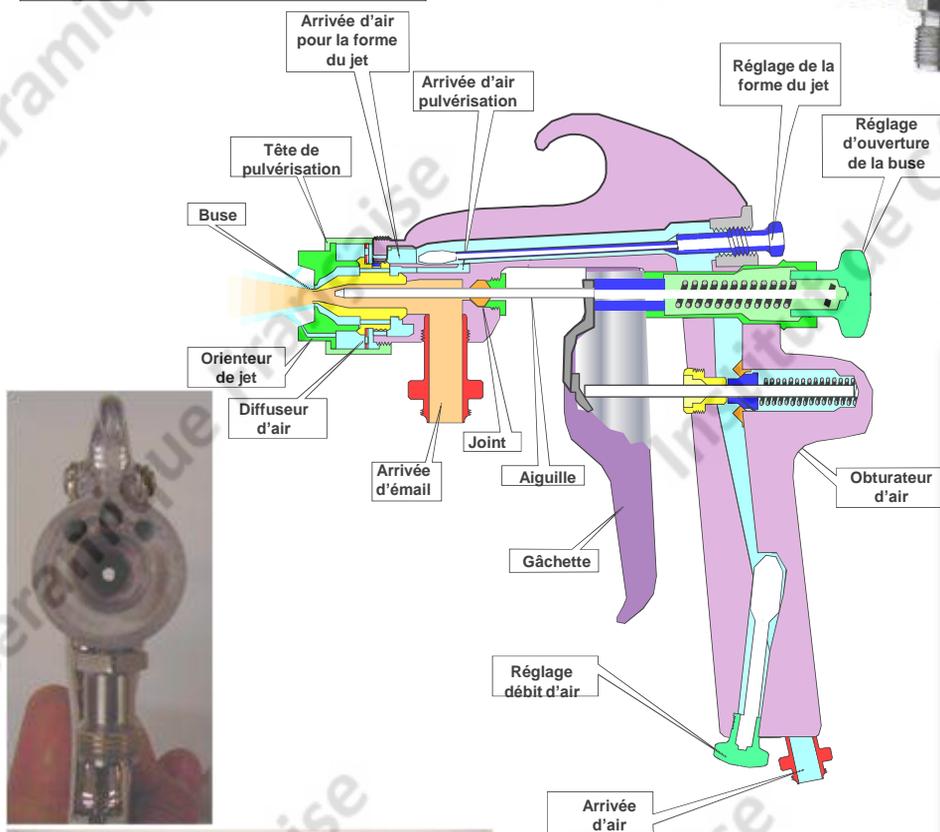
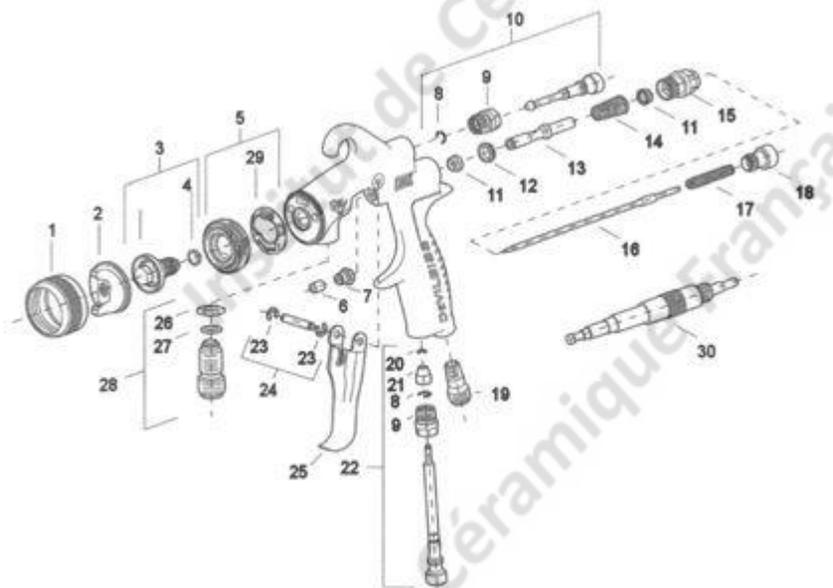
PRINCIPE : L'émail n'est plus stocké dans un petit réservoir ou godet, mais dans un seau ou dans un récipient de grande capacité, celui-ci est relié au pistolet par un flexible et par l'intermédiaire d'une canne ou col de cygne qui jouera le rôle de siphon permanent une fois que le pistolet aura été alimenté une première fois.

MODE OPÉRATOIRE :

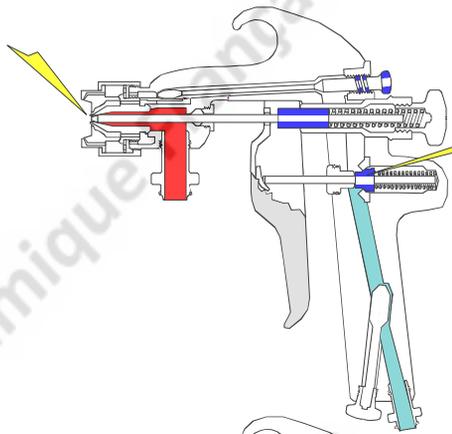
- placer le récipient en hauteur (au-dessus de la cabine d'émaillage par exemple),
- introduire la canne dans le seau d'émail,
- couvrir le seau afin d'éviter les pollutions,
- alimenter le pistolet en air,
- appuyer sur la gâchette pour faire sortir l'air (le vide créé par effet de venturi au passage de la buse aspirera l'émail dans le tuyau, une fois que le pistolet sera alimenté, l'émail descendra seul par gravité).



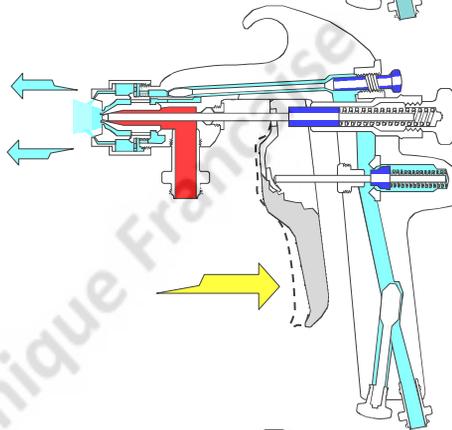
1	Bague de retenue
2	Chapeau d'air
3	Buse
4	Joint
5	Kit tête de pulvérisation
6	Presse-étoupe
7	Écrou de presse-étoupe
8	Circlips
9	Douille de réglage jet
10	Valve de réglage jet
11	Joint creux en U
12	Siège de soupape d'air
13	Tige de soupape d'air
14	Ressort de soupape d'air
15	Bague de soupape d'air
16	Aiguille
17	Ressort d'aiguille de buse
18	Molette de réglage buse
19	Raccord
20	Circlips
21	Tête de soupape d'air
22	Ensemble de soupape d'air
23	Circlips
24	Ensemble axe de gâchette
25	Gâchette
26	Écrou
27	Rondelle
28	Ensemble raccord de buse
29	Joint



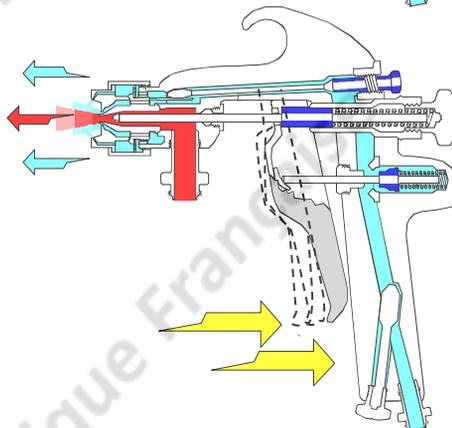
Circuit d'émail et d'air d'un pistolet



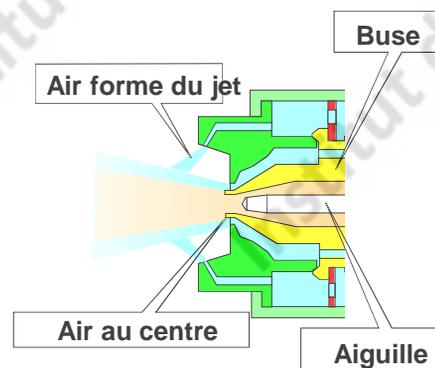
1°) Pistolet mis sous pression d'air et d'émail, l'écoulement d'émail est bloqué par l'aiguille en position fermée, l'air est bloqué par le joint B.



2°) Par appui sur la gâchette, le joint B est libéré et l'air peut passer (pour le soufflage de la pièce à émailler par exemple), à ce moment, la gâchette n'est pas, encore assez reculée pour déclencher le mouvement horizontal de l'aiguille.



3°) L'appui sur la gâchette continu, celle-ci vient en butée, contre l'épaule de l'aiguille et repousse celle-ci vers l'arrière du pistolet. L'aiguille libère alors l'orifice de sortie de l'émail qui sera pulvérisé par l'air déjà sorti.



La finesse de pulvérisation est réalisée par l'air arrivant au centre, le réglage de cet air se fait sur le détendeur du réseau d'air comprimé alimentant le pistolet ou plus finement par la molette de réglage en bas de la crosse du pistolet.

Le réglage de la forme du jet se fait par deux petits jets d'air symétriques repartis de part et d'autre de la sortie du jet principal, en augmentant l'arrivée d'air par ces orifices, on arrive à "écraser" le jet principal originellement rond au point d'obtenir un jet plat.

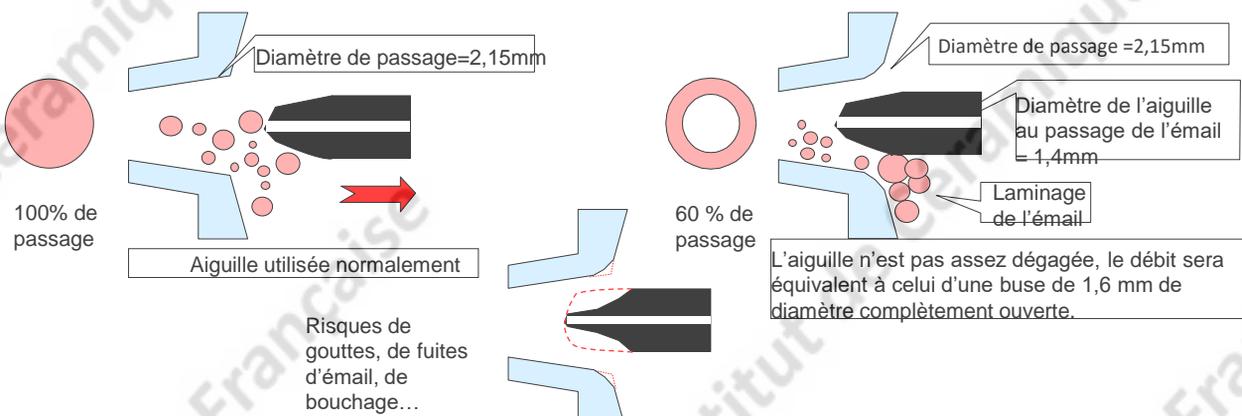
Le débit est réglé finement après choix du projecteur et de la pression d'arrivée d'émail par le bouton situé à l'arrière du pistolet dans le prolongement de l'aiguille.

ATTENTION : il s'agit d'un réglage fin, si l'on tente de compenser un diamètre de buse trop important par un serrage de la molette arrière, le passage de l'émail se fera à la sortie de la buse par un orifice ayant la forme d'une couronne et non plus de la forme d'un disque.

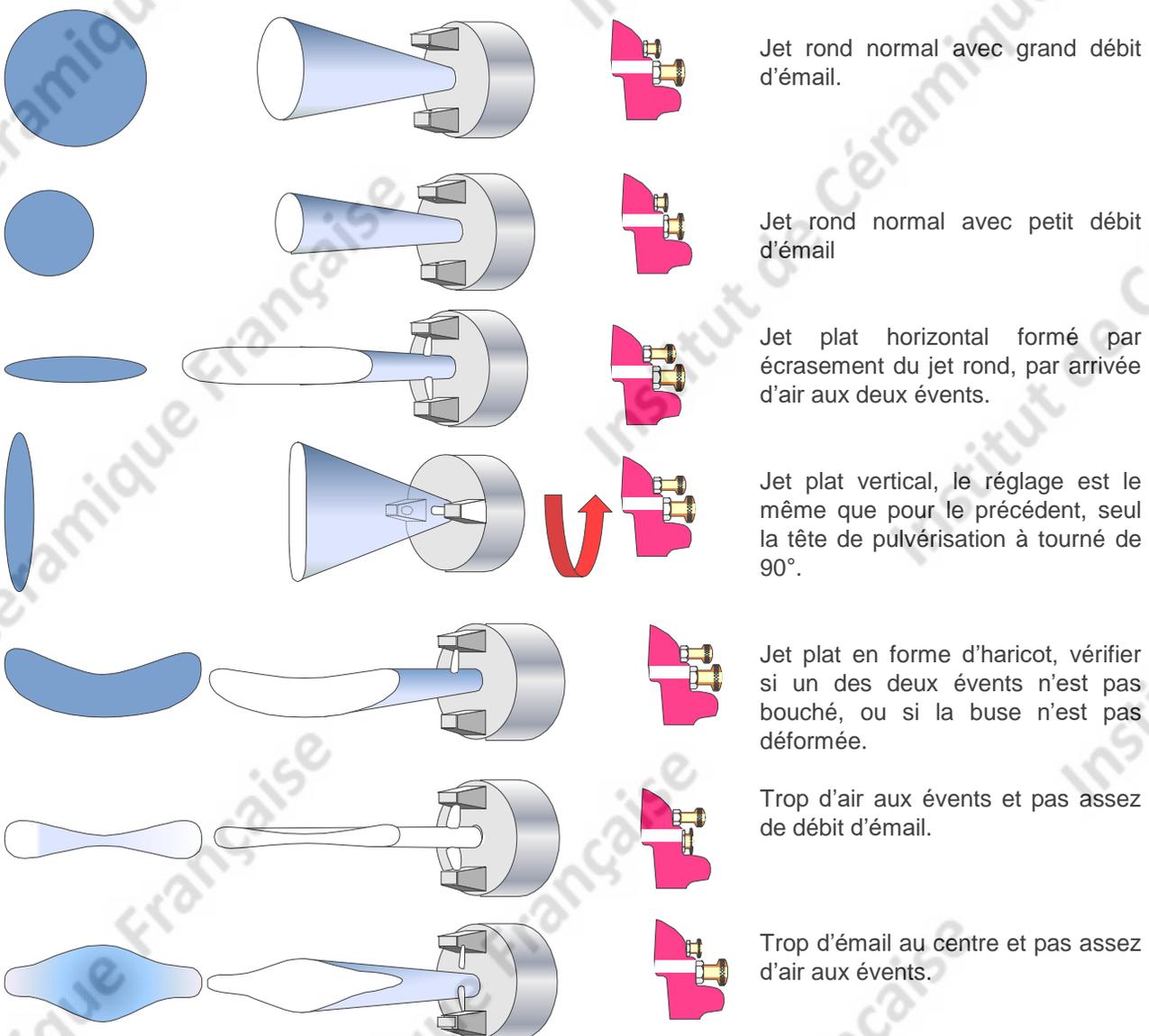
Ainsi la dimension de passage des grains pour une section ou un débit émail équivalent sera diminuée, on risque alors outre une obturation fréquente du pistolet, un laminage de l'émail où seuls les grains les plus petits passeront.

La réduction de la dimension de passage provoquera également une usure anormalement rapide de la buse et de l'aiguille.

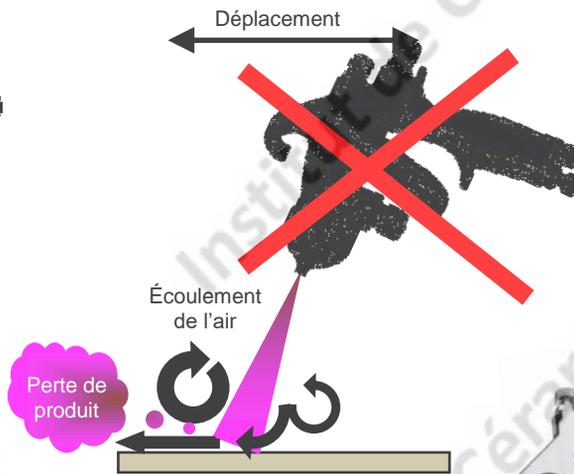
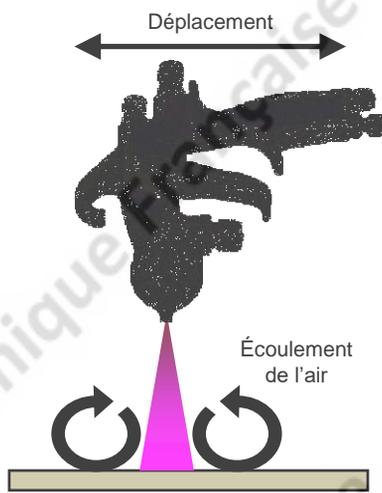
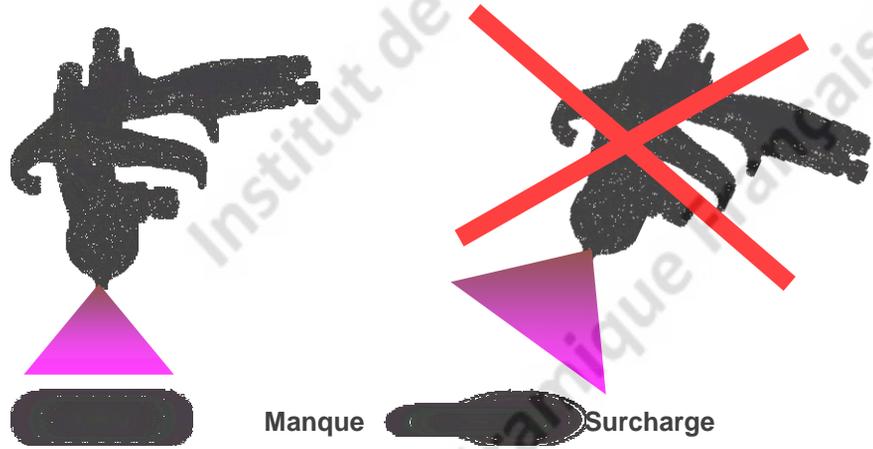
On choisit le diamètre de la buse permettant de régler l'aiguille le plus ouvert possible afin de ne pas freiner l'émail.



Forme du jet

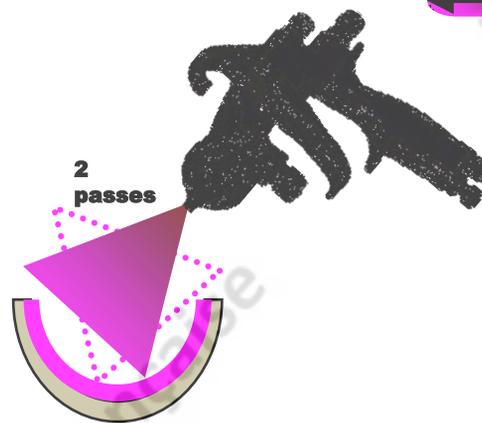


Dans le but de conserver un impact homogène, il est important que le pistolet soit toujours perpendiculaire à la surface à émailler.



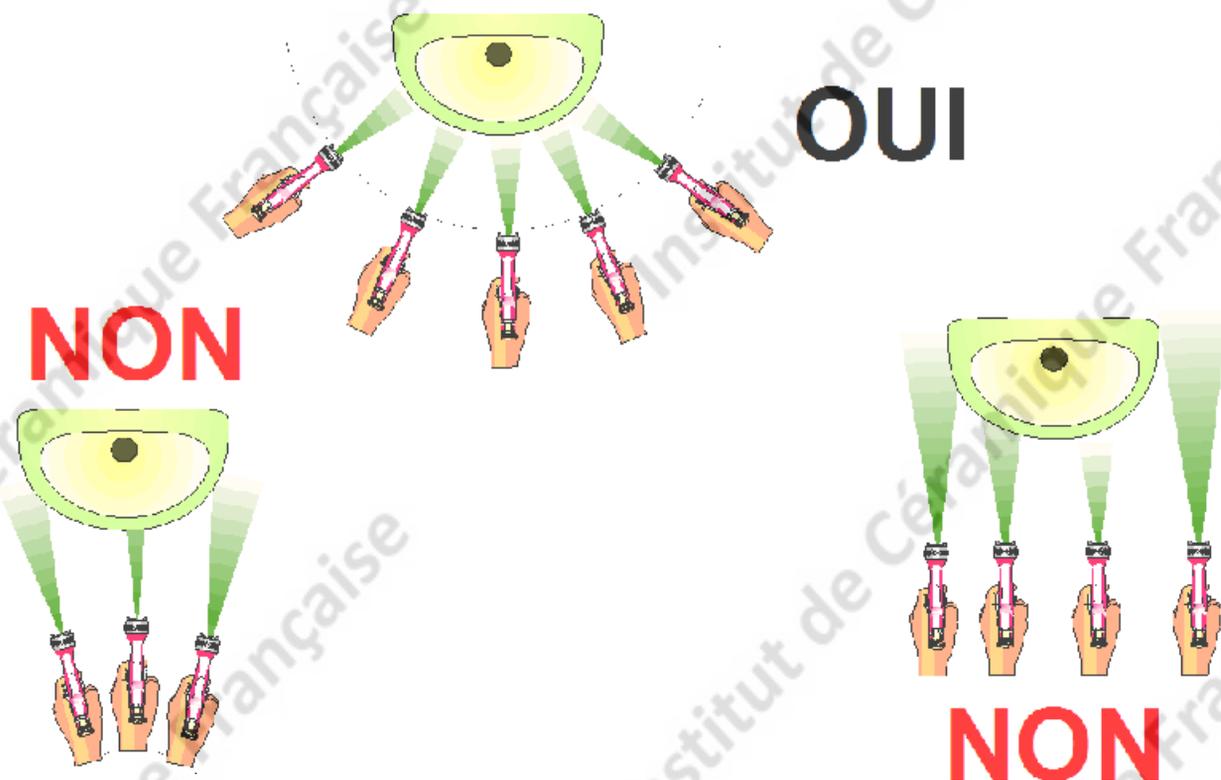
Dans le but d'améliorer le taux de transfert, il est important que le pistolet soit toujours perpendiculaire à la surface à peindre.

Dans le cas du développement de trajectoire, la largeur de jet dont il faut tenir compte est la largeur dynamique (robot en mouvement) et non pas la largeur de jet statique.



Dans le cas de corps « creux », il est préférable de multiplier les passes plutôt que d'en effectuer qu'une.

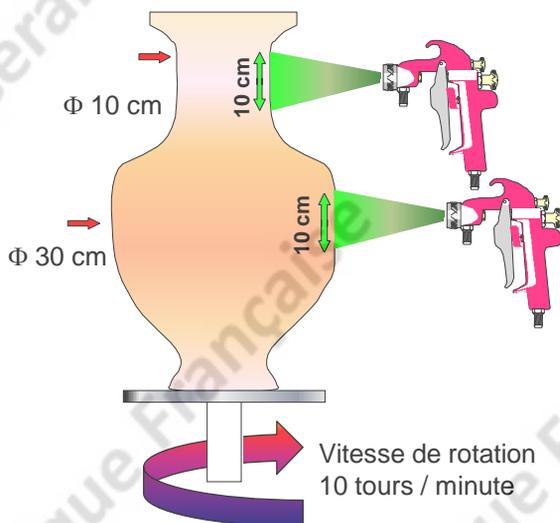
Position du pistolet par rapport à la pièce à émailler



L'application d'un émail par pulvérisation doit se faire de telle sorte que l'épaisseur de la couche déposée soit la plus régulière possible (sauf pour certains émaux à effets dont les couleurs changent suivant l'épaisseur déposée) notamment pour les émaux transparents colorés dont l'intensité de la couleur augmente avec l'épaisseur.

Lorsque l'on a à émailler une pièce dont les diamètres varient suivant la hauteur (vase) ou selon la largeur (assiette). Il sera impératif de calculer la vitesse de déplacement du pistolet de telle sorte que chaque centimètre carré reçoive la même quantité d'émail.

Considérons sur l'exemple ci-contre que la tournette a une vitesse de rotation de 10 tours par minute, que le pistolet est maintenu à une distance régulière de la pièce de telle sorte que la largeur de son jet soit de 10 cm. Lorsqu'il frappe la pièce et enfin, que le diamètre minimum de la pièce (le col) mesure 10 cm et que le diamètre maximum (la panse) mesure 30 cm. Le débit du pistolet est considéré comme constant à 0,1 litre d'émail par minute, pour un émail d'une densité de 1,5 kg / dm³.



La surface à émailler en 1 tour sur le col sera de :

Périmètre du col * largeur du jet
 Diamètre du col * 3,14 * largeur du jet
 (10 cm * 3,14 * 10 cm = **314 cm²**)

Le temps d'émaillage sera de :

10 tours par minute soit
 1 tour en 6 secondes

Temps d'émaillage en 1 tour = 6 secondes.

La quantité d'émail déposé en 6 s sera de :

Temps d'émaillage * débit du pistolet.
 Le débit du pistolet = 0,1 litre / minute.
 = 1,67 cm³ / seconde

Le temps d'émaillage pour 1 tour est de 6 secondes,
 la quantité d'émail déposé sera de :
 6 * 1,67 = **10 cm³**

L'épaisseur d'émail déposé sur le col sera de :

Les 10 cm³ d'émail seront donc déposés sur une surface de 314 cm².

Le volume d'émail déposé est égal à :

Surface émaillée * épaisseur d'émail.

10 cm³ = 314 cm² * épaisseur

L'épaisseur est égale à 10 cm³ / 314 cm² = 0,032 cm

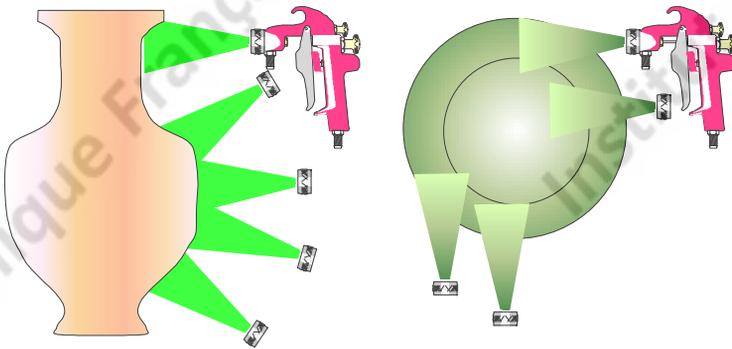
Ou **3,2 dixièmes de mm.**

TECHNIQUE D'ÉMAILLAGE

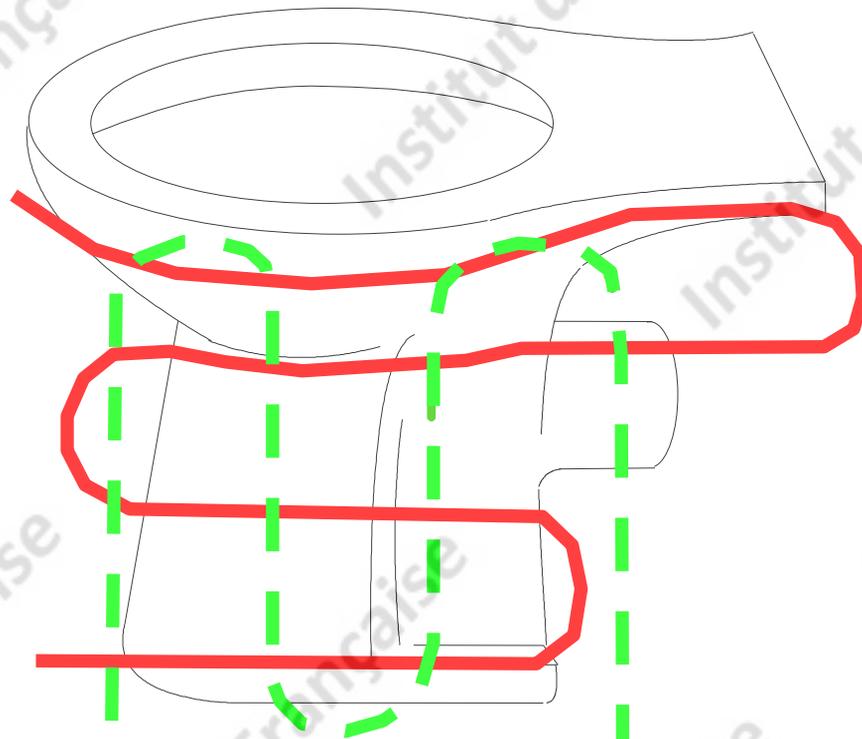


Si ces différences de vitesse ne sont pas prises en compte, le vase sera émaillé de façon irrégulière comme le montre le croquis. Ce défaut existe encore plus couramment sur les assiettes où l'opérateur doit augmenter la vitesse de déplacement de son pistolet au fur et à mesure qu'il se rapproche du centre de l'assiette, si cela n'est pas réalisé, un défaut de surépaisseur d'émail en forme de spirale (plus communément appelé escargot) apparaîtra dans le fond de l'assiette.

Afin de minimiser ces inconvénients, on sera souvent amené à croiser des couches d'émail très fines, en augmentant le nombre de couches au fur et à mesure que les diamètres augmentent.



Il est également recommandé de contre croiser les couches comme le montre le croquis concernant l'assiette afin d'éliminer toutes traces de nuances. ATTENTION, malgré cela, il convient de noter que chaque type de produit à émailler aura un choix de pistolet, un réglage de débit et des caractéristiques de bains d'émaux particulières, le matériel de pulvérisation ayant un réglage universel pouvant convenir au sanitaire comme à la vaisselle n'existe pas.

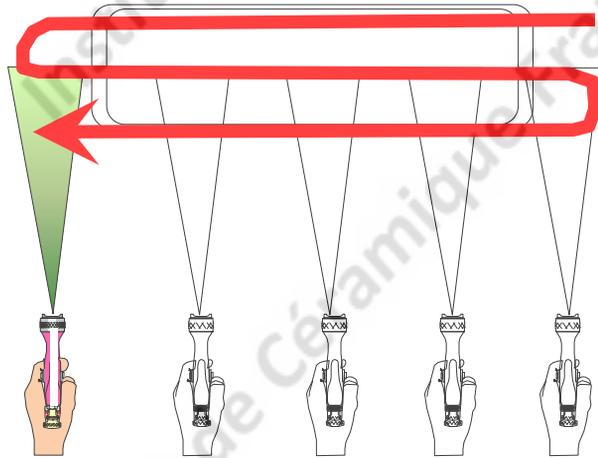


- Premier passage
- - - Deuxième passage

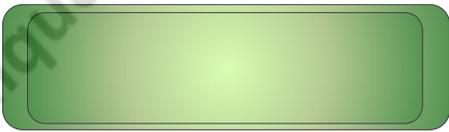
Entrée et sortie du jet sur une pièce

Lors du démarrage de l'émaillage d'une pièce, le premier jet ne devra pas attaquer la pièce de façon frontale mais démarrer à l'extérieur de celle-ci puis s'en rapprocher tangentiellement. De même pour l'émaillage de pièces de platerie qui seront émaillées par couches superposées, voire croisées. Il sera indispensable que le déplacement du pistolet entraîne le jet jusqu'à l'extérieur de la pièce afin de ne pas provoquer de surépaisseurs.

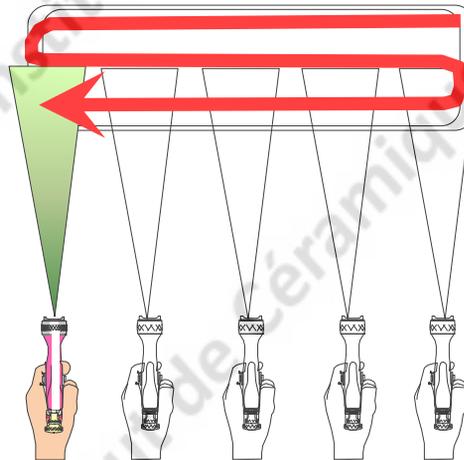
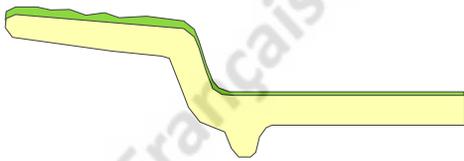
OUI



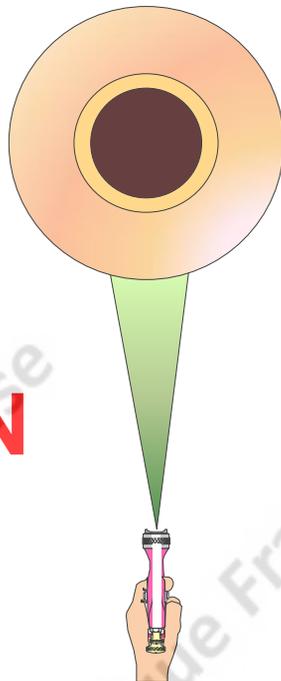
NON



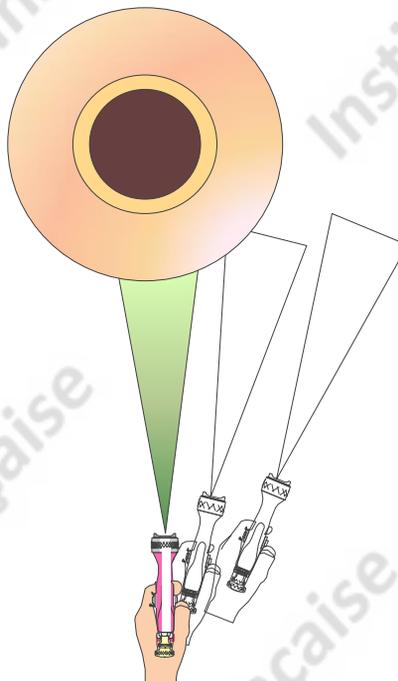
Surplus d'émail sur les extrémités et moutonnage du au passage de la seconde couche sans que la première soit sèche.



NON

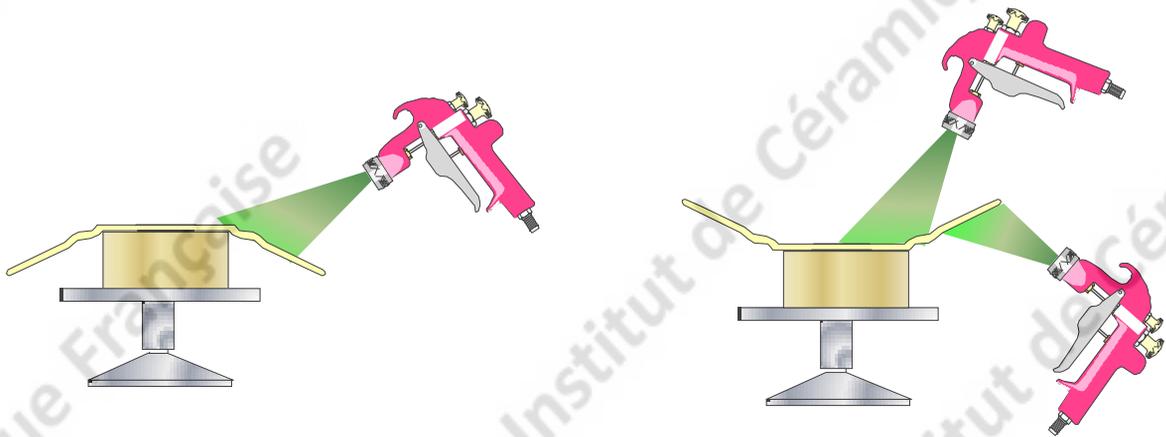
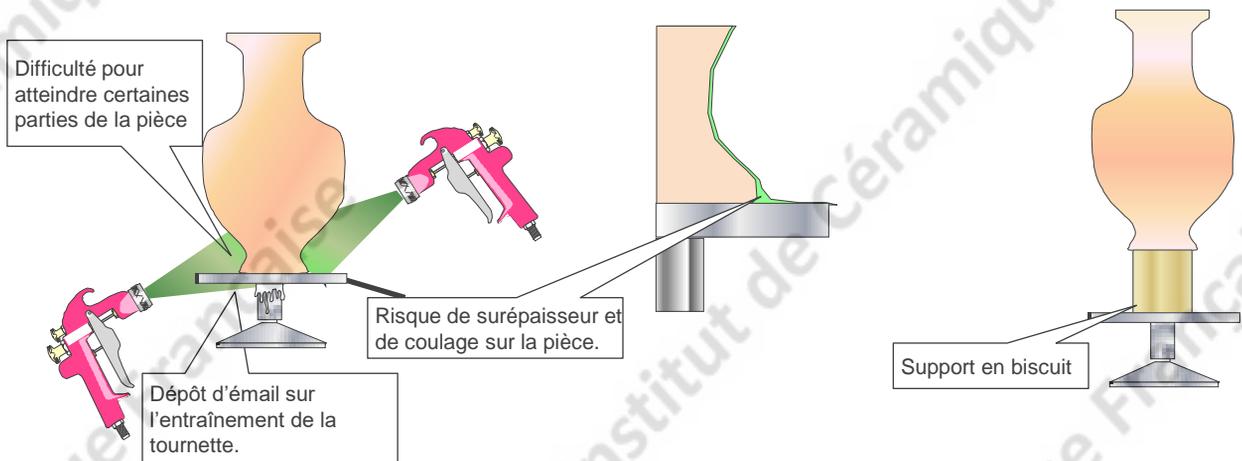


OUI



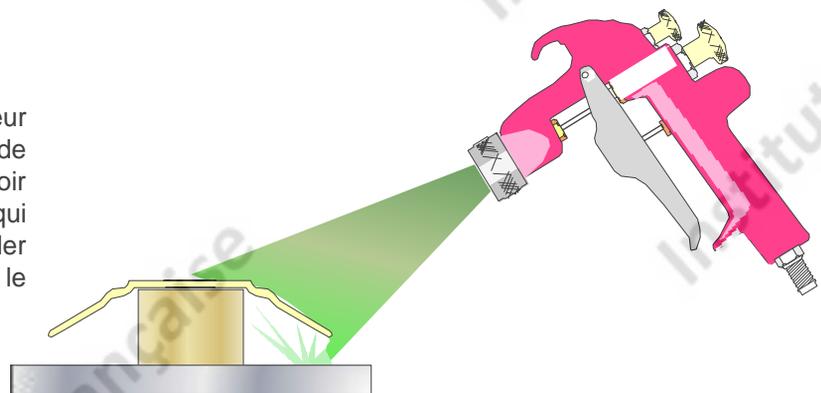
Beaucoup de pièces sont encore émaillées manuellement sur des tournettes mises en rotation, soit manuellement, soit motorisées avec une commande extérieure (pédale pneumatique par exemple).

Les dimensions et la conception des tournettes d'émaillage sont relativement standards et n'offrent pas toujours une mise en place idéale de la pièce à émailler. En effet pour les pièces comme les vases, pied de lampe, pichet etc, la pièce ne doit pas être en contact direct avec la tournette, car les éventuels surplus d'émail qui se formeront au pied de la pièce risquent de lier celle-ci avec la tournette et provoquer des arrachements d'émail lors de la préhension. De même pour les assiettes qui sont manuellement émaillées en deux fois : une fois le dessous, puis retournées et émaillées à l'intérieur où le contact métallique entre la pâte et la tournette risque de provoquer après cuisson des marques brunes ou noires dues à l'oxyde de fer.

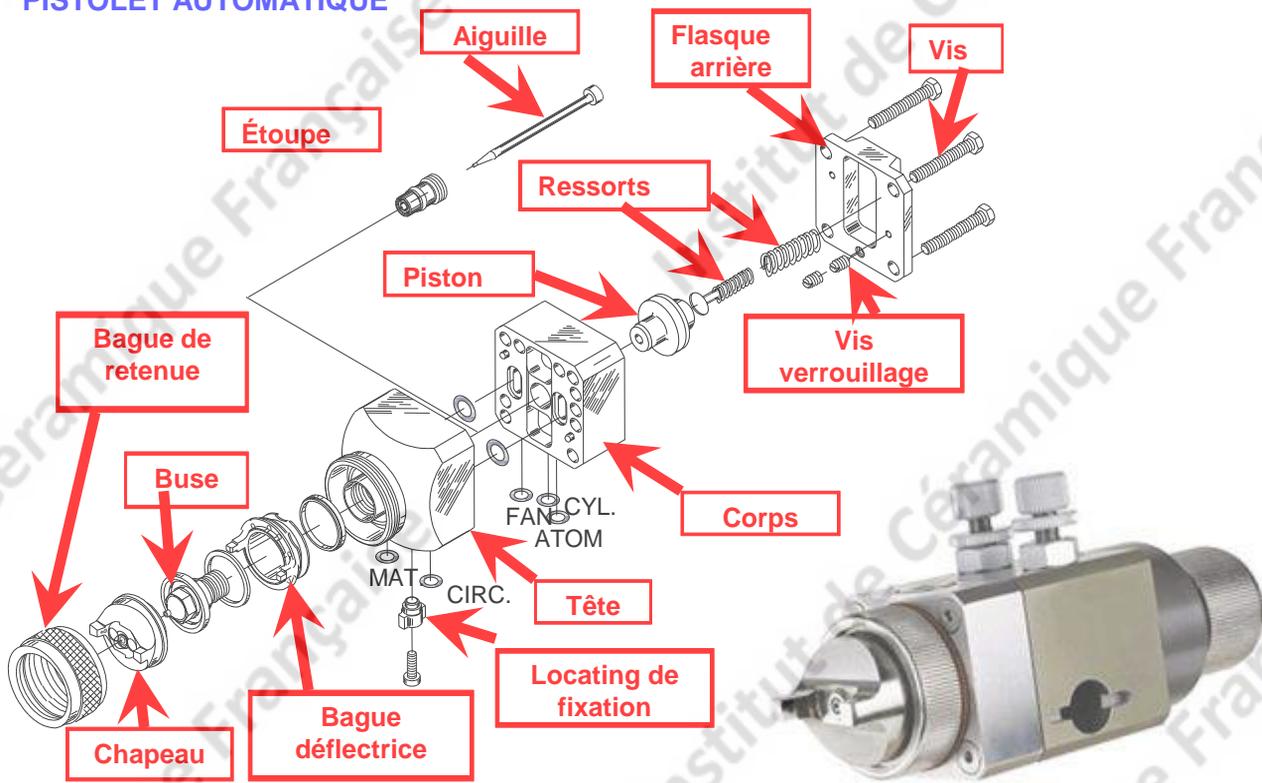


ATTENTION

Sur des pièces d'un diamètre inférieur à celui de la tournette, selon le type de support (hauteur forme), il peut y avoir des projections d'émail qui parviennent sous la pièce à émailler par rebond sur la tournette ou sur le support.

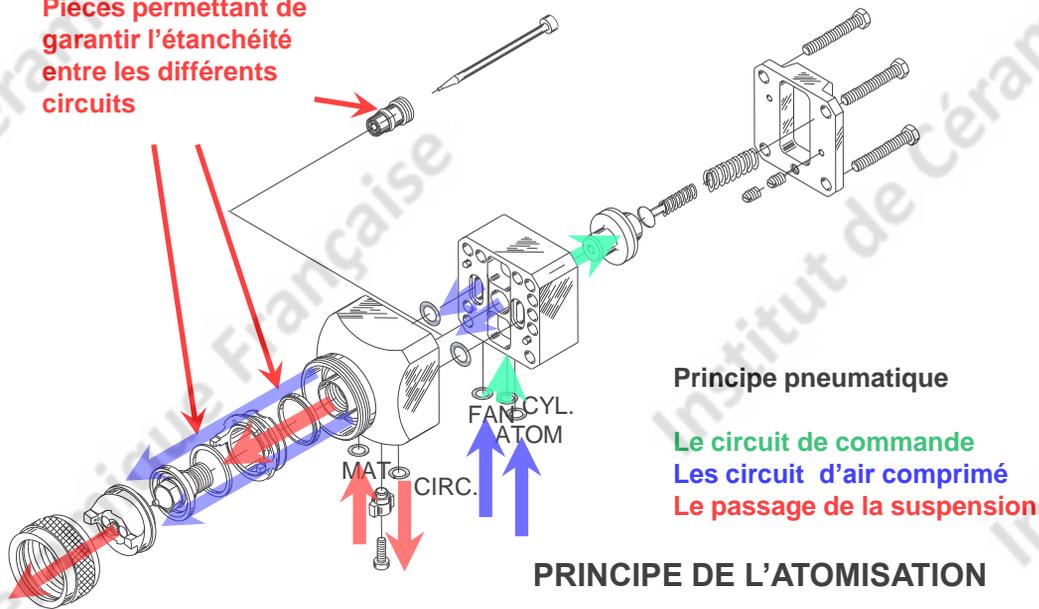


PISTOLET AUTOMATIQUE

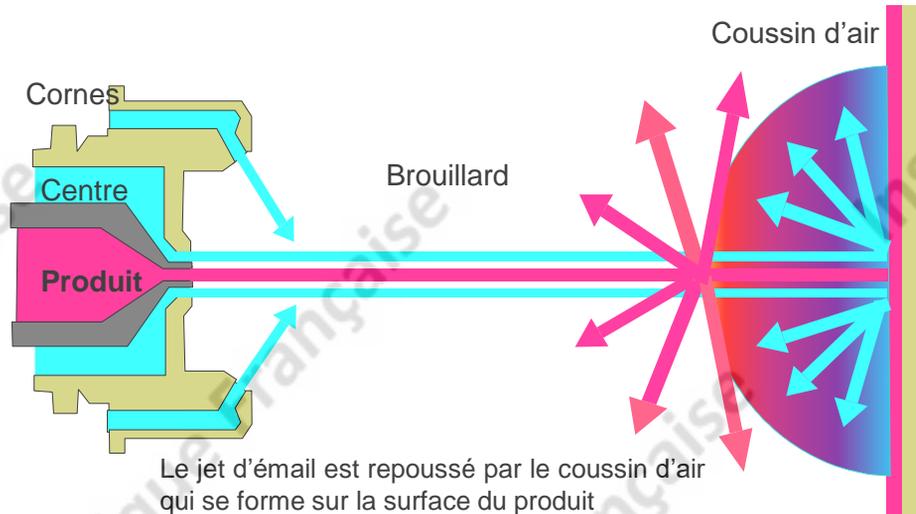


PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT PNEUMATIQUE

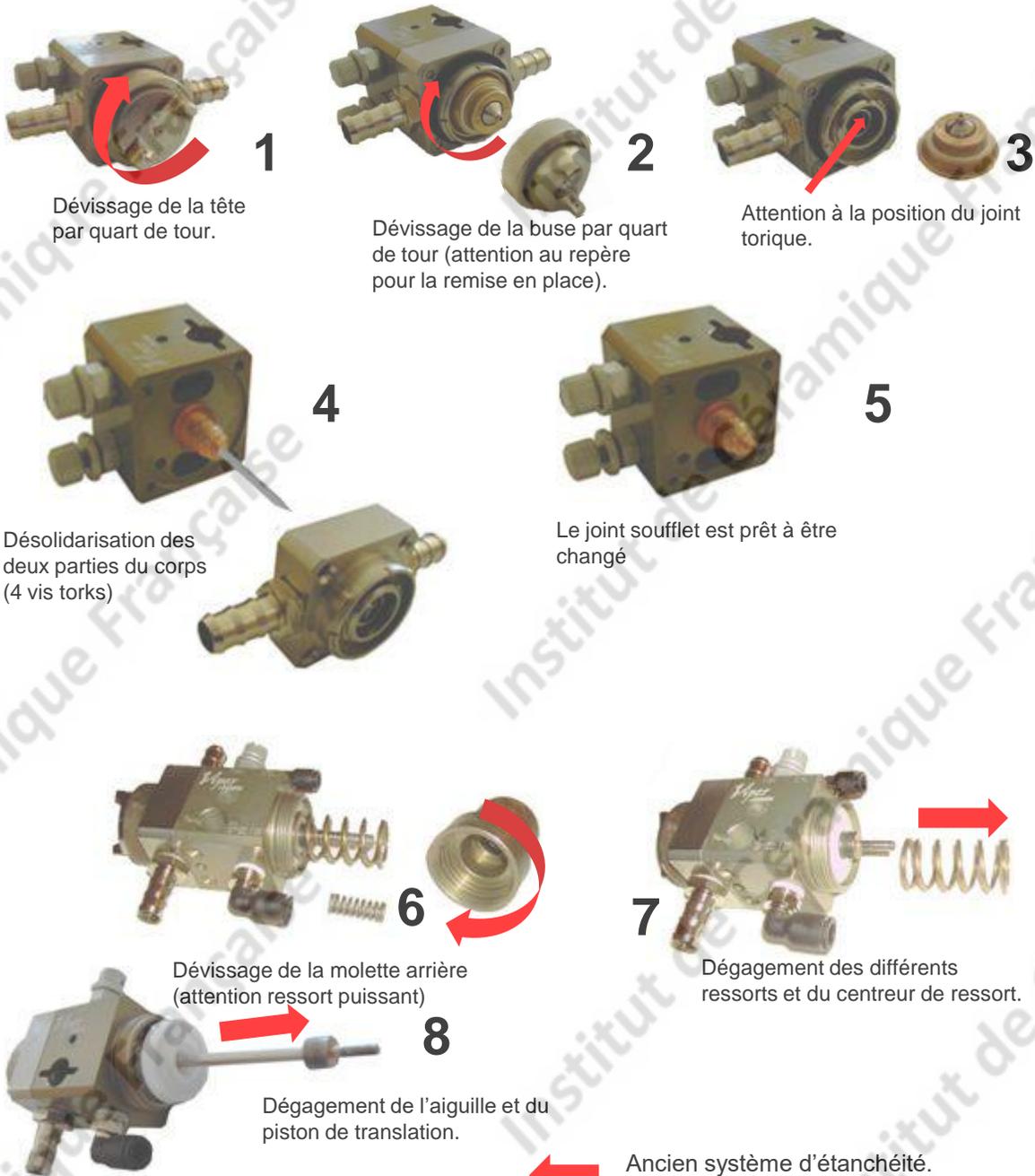
Pièces permettant de garantir l'étanchéité entre les différents circuits



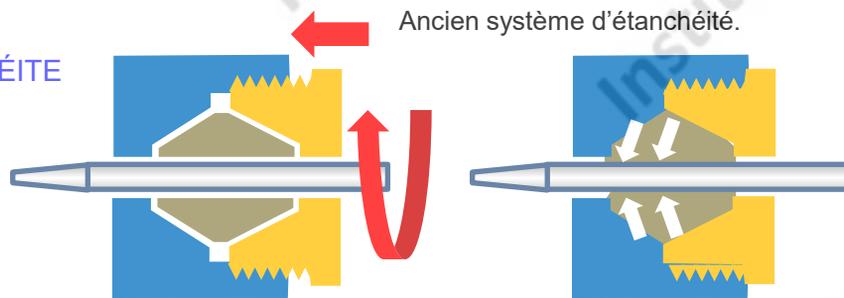
PRINCIPE DE L'ATOMISATION



Principe de démontage



PRINCIPE D'ÉTANCHÉITE



Dans le système classique le presse-étoupe (orange) vient écraser le joint (brun) à l'intérieur du corps du pistolet (bleu) sous l'effet de la pression le joint se déforme et vient se serrer autour de l'aiguille assurant ainsi l'étanchéité (un serrage trop prononcé bloquera l'aiguille en translation et empêchera la fermeture de la buse).

Du fait de cette forte pression, l'usure du joint et de l'aiguille sera importante et nécessitera donc un resserrage du presse-étoupe pour empêcher les fuites.

La force de serrage peut être définie de la façon suivante : sur un joint et une aiguille non usée, ne pas serrer le joint, faire passer de l'eau dans le pistolet, une fuite apparaîtra à hauteur du presse-étoupe, serrer celui-ci jusqu'à disparition de la fuite, si un serrage doux peut empêcher la fuite d'eau, la viscosité de l'émail ne permettra pas à celui-ci de s'échapper.

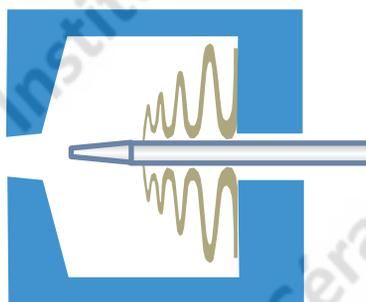
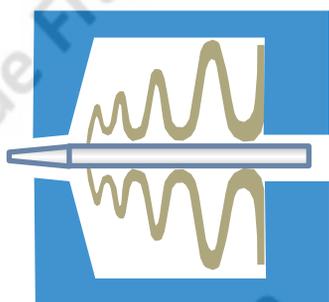


Dégagement du joint soufflet et accès à la pièce laiton assurant l'étanchéité d'air entre le piston et le soufflet.



La pièce laiton est dégagée, il est possible de distinguer le joint torique d'étanchéité.

NOUVEAU SYSTÈME D'ÉTANCHÉITÉ



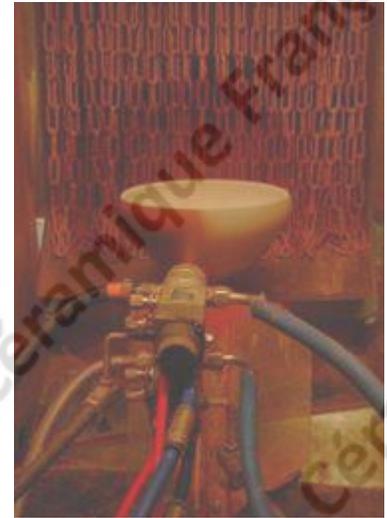
Le joint soufflet assure l'étanchéité par serrage sur l'extrémité de l'aiguille, le déplacement de l'aiguille est suivi par le joint lors de la translation de celle-ci, il n'existe pas de frottement donc pas d'usure sur le milieu de l'aiguille.

PULVÉRISATION

Pulvérisation au pistolet avec buse de 2.2 mm et pompe à membrane, le fan ou forme du pinceau du jet est élargi au maximum pour couvrir toute la hauteur de la pièce. La pression de la pulvérisation est de 2.6 bars, le débit d'émail de 3 litres/ minutes.



Appareil pour mesurer les angles d'inclinaison des pistolets automatiques.



Pulvérisation sur carrousel d'émaillage automatique pour pièce bicolore (les chaînes visibles dans le fond permettent l'arrêt d'une grande partie de l'émail aspiré par la cabine).



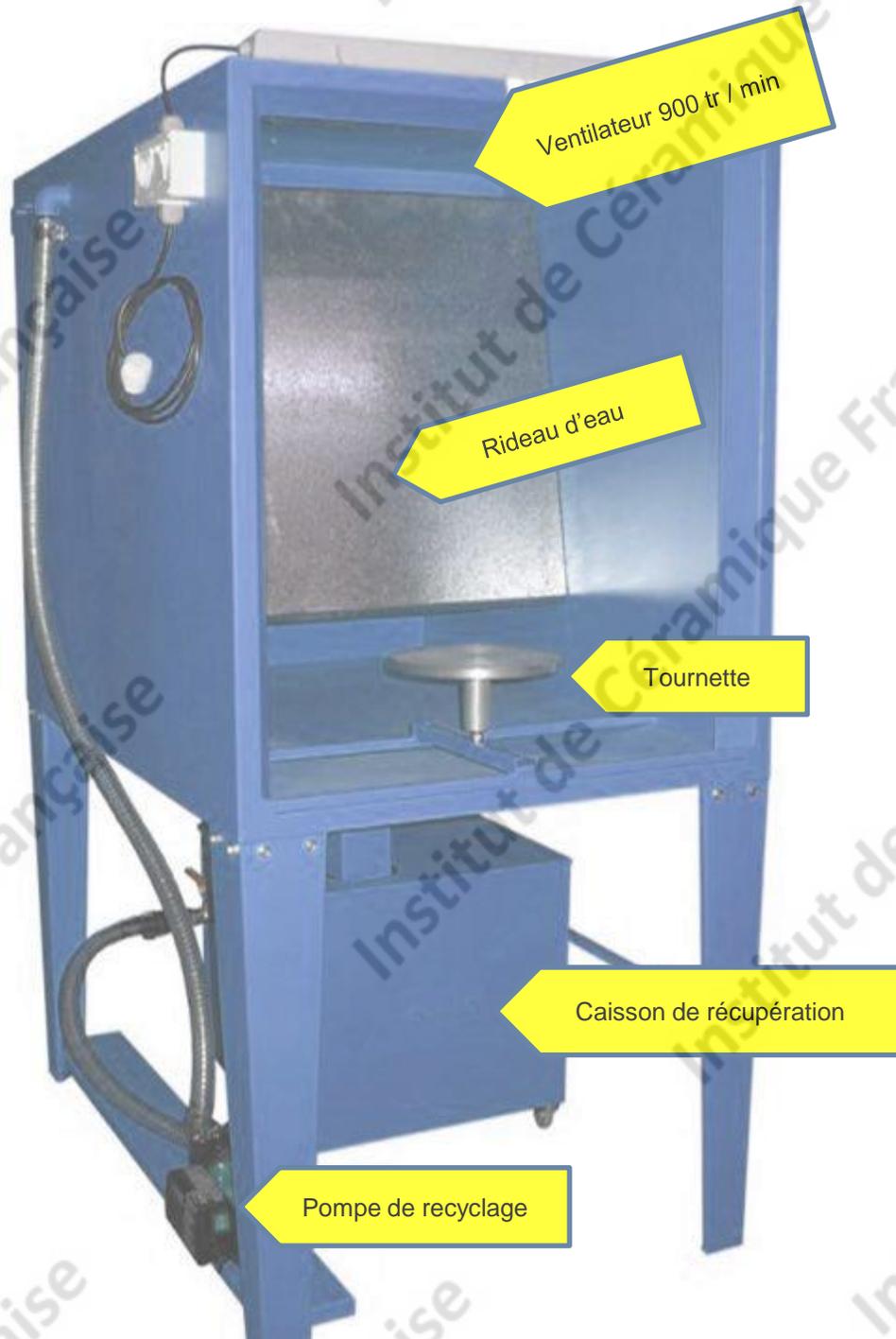
Pulvérisation sur carrousel d'émaillage automatique avec séchage infrarouge.



Pulvérisation sur carrousel d'émaillage automatique pour pièces vitrifiées avec chauffage préalable et séchage par brûleur.

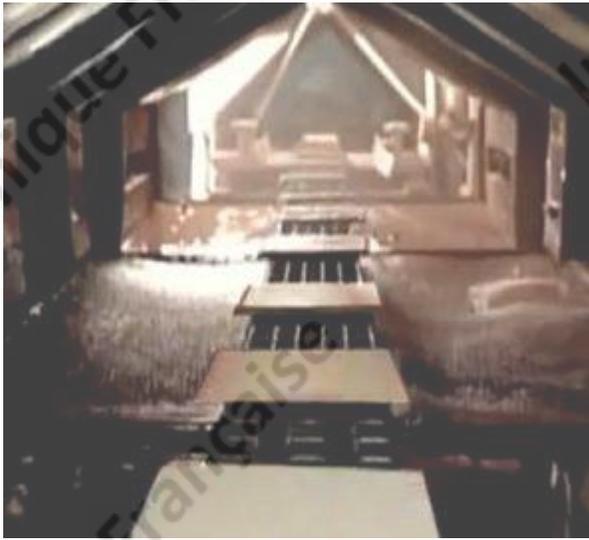
CABINE D'ÉMAILLAGE

Les cabines d'émaillage sont de plusieurs types, mais la configuration la plus courante est celle qui est présentée, alliant l'aspiration à travers un rideau d'eau, l'eau récupérée dans un bassin décanteur inférieur est ensuite réinjectée dans une tuyauterie permettant le déversement d'une lame d'eau sur la paroi du fond de la cabine, ces cabines sont souvent munies d'un filtre en fibre ou papier positionné derrière la plaque de fond.

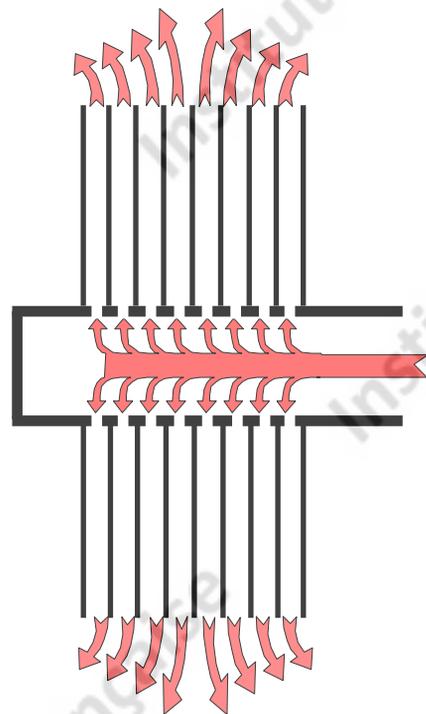
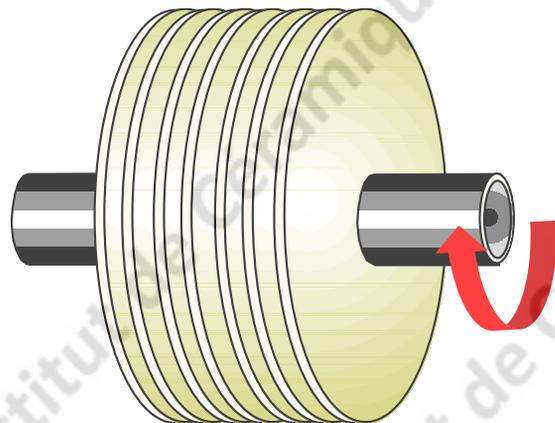


ÉMAILLAGE PAR PULVÉRISATION À LA TURBINE.

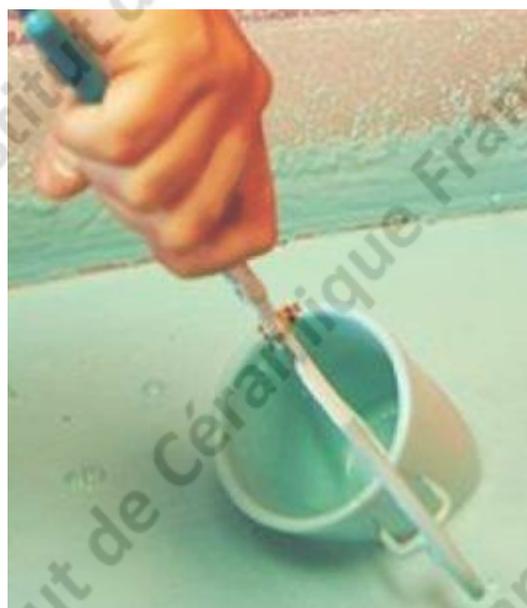
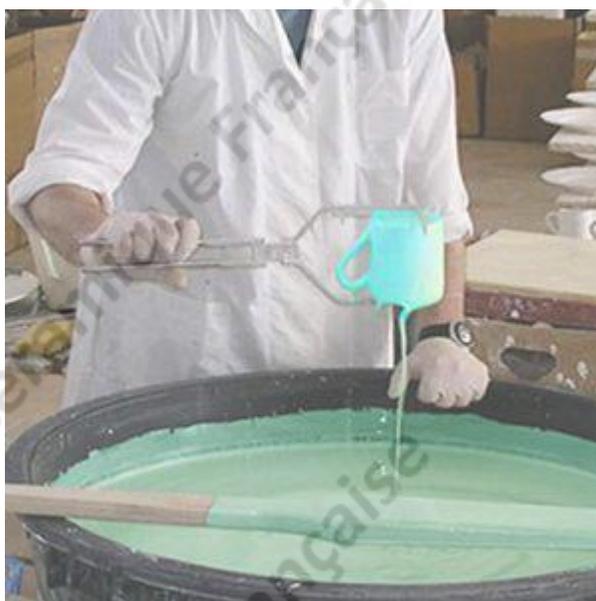
La vaporisation de l'émail n'est pas réalisée avec un pistolet à air classique, mais par une turbine multidisque, au centre duquel l'émail est injecté, sous l'effet de la très haute vitesse de rotation, l'émail est pulvérisé sous l'effet de la vitesse centrifuge et est projeté sur les carreaux circulant sous la turbine sur des courroies en translation.



Le gros avantage de cette technique est, d'une part, l'économie de l'air comprimé, d'autre part, l'économie d'émail réalisée par suppression des pertes dans les cheminées et enfin, dernier avantage et non des moindres : pas de rejet à l'extérieur. L'inconvénient principal étant que ce procédé ne peut s'appliquer qu'à des formes simples, des productions ont cependant été réalisées sur des assiettes plates avec des passages croisés pour assurer l'émaillage intégral de la pièce.



ÉMAILLAGE AU TREMPÉ



La pièce est immergée dans un bain d'émail, la préhension se fait, soit à la pince, soit directement à la main. Notamment pour la porcelaine où la porosité du dégourdi permet un « collage » temporaire par capillarité si l'émailleur a préalablement trempé sa main dans le bain d'émail. La pièce est ensuite tournée pour étaler les gouttes et gourmes avant d'être déposée sur un support permettant le ressuyage. Les retouches et points de contact seront faits au doigt, au pinceau ou à la planche. Dans le cas de la faïence, les pièces sont souvent manutentionnées à l'aide de pinces spéciales, fabriquées sur mesure.



**DIFFÉRENTES
PINCES DE
TREMPAGE**

TREMPAGE ASSISTÉ



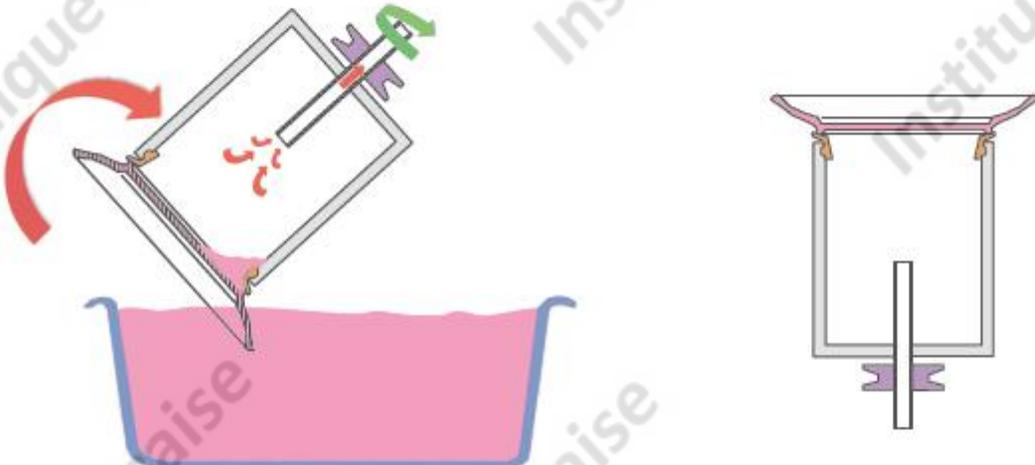
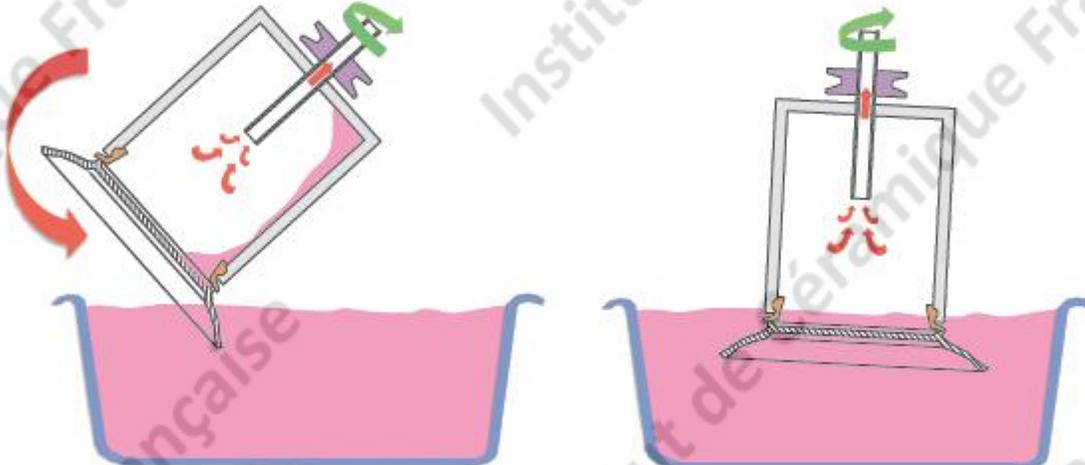
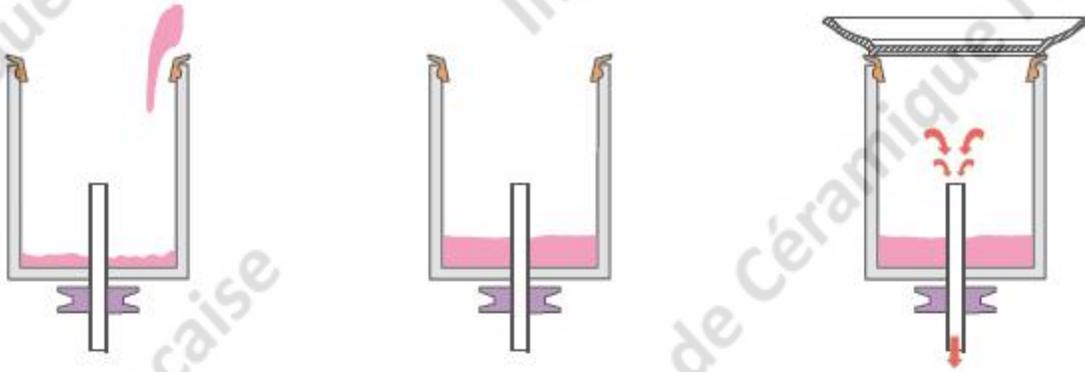
L'émaillage par trempage peut être assisté par une machine, celle-ci est composée d'un poste d'arrivée des pièces sur tapis (à gauche) et d'un système de préhension des pièces par ventouses qui viendront les déposer sur un carrousel de godets, lui-même muni de ventouses de maintien. Le carrousel après rotation positionnera les 3 ou 4 godets au-dessus du bain d'émail, l'ensemble des godets fixés sur un axe pivotera (à droite sur la photo) pour venir immerger les pièces dans le bain d'émail. Pendant leur immersion, les pièces seront mises en rotation afin d'assurer une répartition uniforme de la couche d'émail.



Les pièces sortiront du bain d'émail en conservant le mouvement de rotation qui permettra de résorber ou d'étaler les gouttes et gourmes. Les pièces seront alors reprises par des ventouses pour être déposées sur des tapis de désémaillage parallèles, à vitesses différentes, ce qui permettra la rotation et l'avancée des pièces pendant leur désémaillage.



TREMPAGE ASSISTÉ



ÉMAILLAGE PAR TREMPAGE ROBOTISÉ

La pièce est immergée par un positionnement horizontal toujours identique, car réalisé par un robot, le niveau d'émail est maintenu constant à ras de la cuve blanche par remplissage entre deux phases d'émaillage, le trop-plein provoqué par le trempage est récupéré dans la cuve périphérique.



Immersion complète.

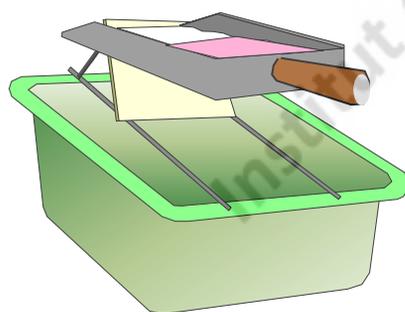
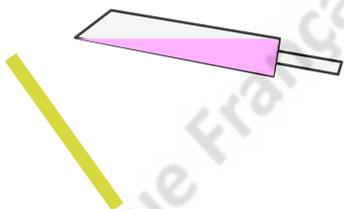


Égouttage rotatif

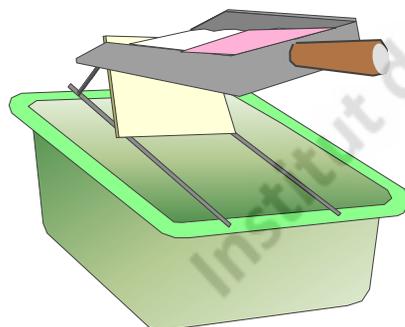
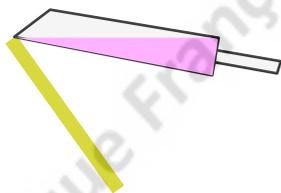
ÉMAILAGE PAR ASPERSION DES CARREAUX



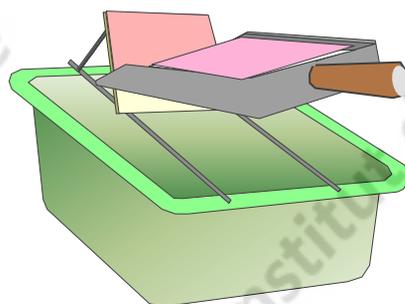
ÉMAILLAGE A LA PELLE



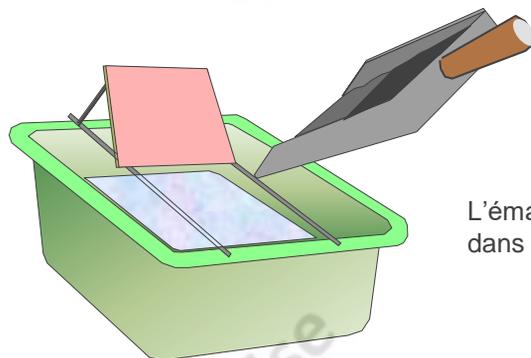
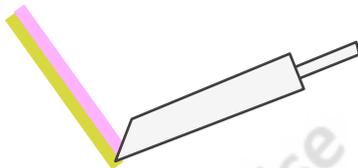
Technique uniquement utilisée pour les carreaux de petites dimensions max 30 x 30. Une pelle en métal inoxydable ou mieux, en plastique, est remplie d'émail, le carreau est positionné sur un support permettant de le maintenir incliné à 30° au-dessus d'une bassine destinée à récupérer l'émail.



La pelle est approchée du carreau en prenant la précaution de maintenir la quantité d'émail en arrière de la pelle en inclinant l'arrière de celle-ci vers le bas, positionner le bord de la pelle sur le haut du carreau tout en restant penchée vers l'arrière.



Pencher rapidement la pelle, pour que l'émail coule sur le carreau tout en faisant glisser rapidement la pelle en descendant.



L'émail en surplus se retrouve dans le fond de la bassine.

ASPERSION AU JET

Les pièces sont aspergées à l'aide d'un tuyau souple alimenté par une pompe à membrane, le tuyau doit être suffisamment souple pour être coudé et pincé. Cette technique est essentiellement utilisée pour l'émaillage des intérieurs de cuvettes sanitaires. Il est parfois utile d'humidifier l'intégralité des surfaces à émailler afin que l'émail ne ressuie pas trop rapidement et puisse napper convenablement.

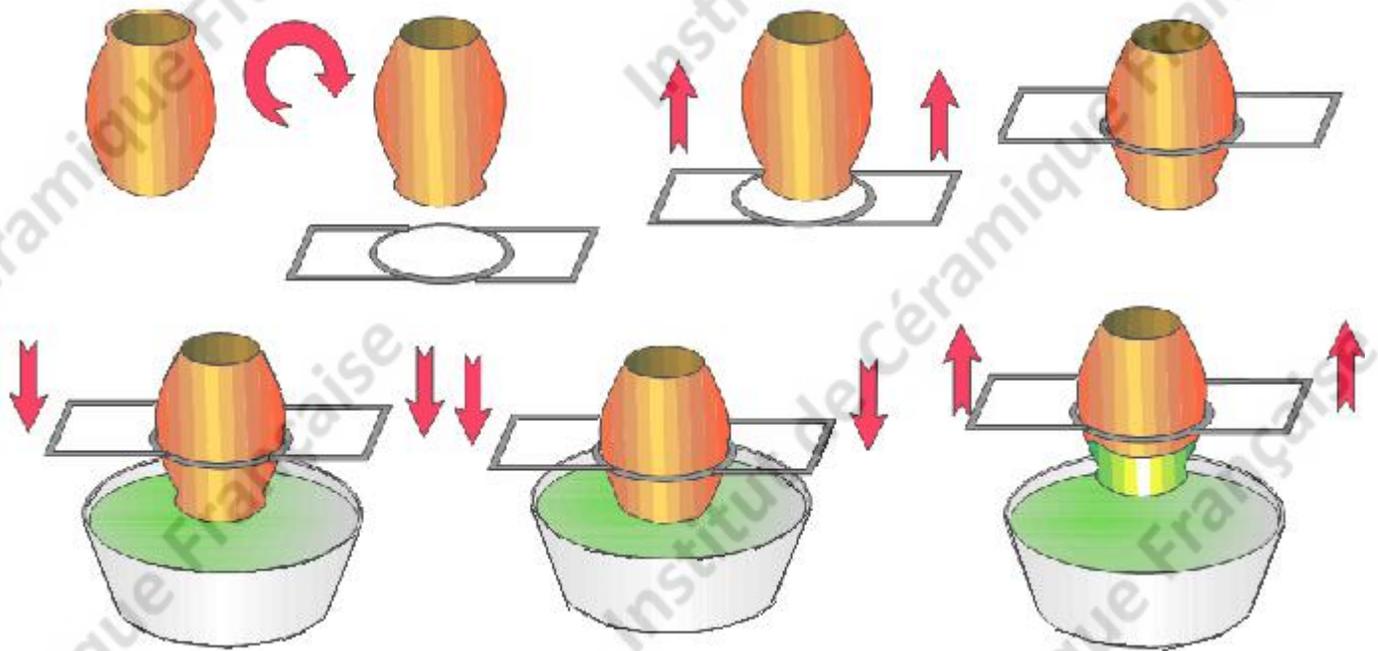


L'intérieur des siphons peut être émaillé en totalité par cette technique, le revêtement de l'émail excédentaire est évacué en inclinant la pièce en arrière.



TREMPAGE DE GROSSE PIECE

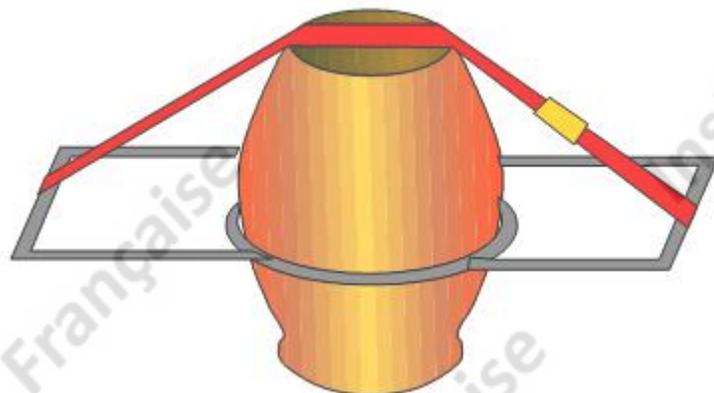
La détermination du diamètre de la cerce doit tenir compte de sa forme, mais surtout de son centre de gravité, celui-ci devra être le plus près du niveau de calage de la cerce afin d'éviter les déséquilibres pendant les phases d'émaillage, mais surtout de retournement.



Attention, lors du trempage le niveau d'émail augmentera avec des risques de débordement, mais également d'ondulation de la ligne d'arrêt de l'émail. Il convient donc de ne pas utiliser un récipient trop petit, si l'on veut travailler avec un calage vertical afin d'obtenir une hauteur d'émaillage constante. Il faut installer un système de mise à niveau constant de l'émail.



Pour éviter les éventuelles marques de métal dues à la cerce, on peut gagner celle-ci avec un morceau de tuyau d'arrosage fendu sur la longueur.



Pour les grosses pièces, ne pas hésiter à sangler la pièce pour faciliter le retournement.

CUISSON

Objectifs de la cuisson

La cuisson est un processus clé de la fabrication des produits céramiques, car c'est d'elle que vont dépendre un certain nombre de propriétés importantes du produit fini, entre autres la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la stabilité dimensionnelle, la résistance à l'eau et aux produits chimiques, et la tenue au feu.

Modifications physico-chimiques lors de la cuisson

Les matières premières utilisées dans les pâtes céramiques sont généralement des mélanges complexes de minéraux argileux avec d'autres matières minérales comme le quartz, les feldspaths, les carbonates, le gypse, les oxydes de fer et parfois des matières organiques. Les produits réfractaires sont également fabriqués à partir de minéraux non argileux extrêmement variés, conjugués avec des additifs et liants spécialisés (qui peuvent inclure certaines argiles).

Lorsque des produits céramiques à base d'argile cuisent dans un four, l'humidité résiduelle éventuelle est évacuée à des températures comprises entre 80 et 150 °C.

Lorsque le produit contient de la silice sous forme de quartz, une partie de celui-ci se transformera en cristobalite et au refroidissement, un retrait d'environ 0.25% s'effectuera de 220°C à 270 °C.

Si des matières organiques et des pyrites de fer sont présentes, une oxydation se produit à des températures comprises entre environ 300 et 500 °C.

Un produit contenant de la silice sous forme de quartz fait apparaître le phénomène dit « Point Quartz » qui correspond à un brusque gonflement de 0,8% à 573°C. Pour la 1^{re} cuisson, le gonflement lors de l'échauffement est négligeable par rapport au retrait de la pièce. Mais lors du refroidissement et des recuissons futures, l'allure de la courbe à la montée et au refroidissement devra être ralentie. Ce phénomène correspond à un changement de variété cristalline du Quartz.

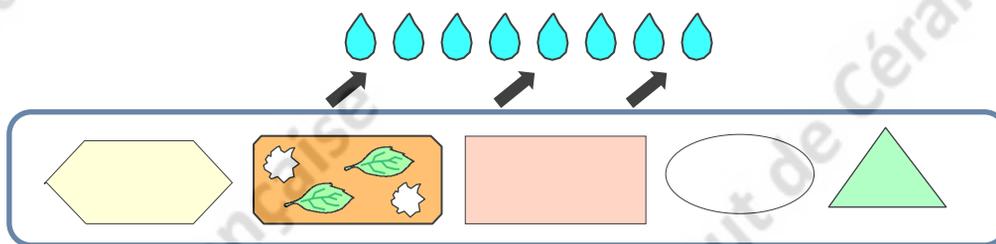
L'eau constituant la structure d'un minéral argileux («groupements hydroxyles ») se libère à des températures comprises entre 500 et 650 °C, tandis que les carbonates comme la calcite et la dolomite se dissocient en libérant du dioxyde de carbone dans une plage de températures de 750 à 950 °C.

En ce qui concerne le développement des propriétés céramiques, les principales modifications sont la décomposition de la structure réticulée des minéraux argileux d'origine, suivie de la formation de nouveaux composés cristallins et de phases vitreuses. La température à laquelle se produit la vitrification (formation de phase vitreuse) varie selon la structure minéralogique de l'argile. Cette vitrification commence généralement à environ 900 °C et se termine à environ 1050 °C (pour de nombreuses argiles de briqueterie) ou à environ 1100 °C dans le cas des argiles plus réfractaires.

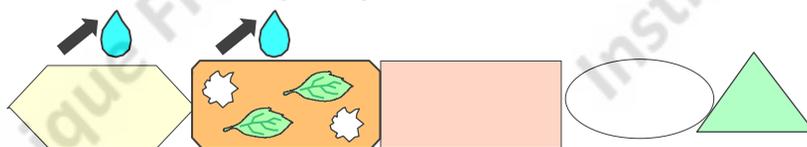
Lors de la phase de vitrification de la cuisson des céramiques, de nombreux minéraux non argileux tels que le quartz, les oxydes de fer, les composés à base de chaux et les bases (oxydes de sodium et de potassium) sont enfermés dans la pâte cuite. On assiste à un certain degré de frittage et de solution solide, ainsi qu'à des réactions eutectiques au niveau de la jonction entre les grains minéraux et les phases de fusion.

Les produits non argileux tels que certains produits réfractaires dépendent également des phases de frittage, de vitrification ou de recristallisation, mais dans la plupart des cas, il faut des températures beaucoup plus élevées pour obtenir les propriétés souhaitées.

Les températures nécessaires à la cuisson sont atteintes principalement par combustion de gaz naturel et de fioul. Des combustibles solides ou de l'énergie électrique peuvent être utilisés pour produire de la chaleur.



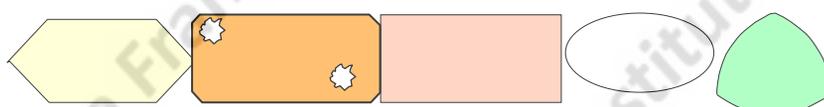
Départ de l'eau de façonnage 60 à 100°C



Départ de l'eau de constitution 450°C A 700°C



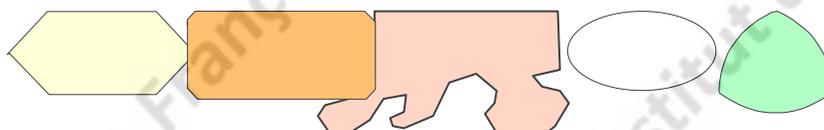
Combustion des matières organiques 200°C à 500°C



Point quartz 573°C



700°C à 950°C. Fin de combustion du carbone libre et dissociation des carbonates, action des impuretés minérales, début de vitrification.



À partir de 1000°C à 1100°C, action des fondants, début de vitrification.

Exemples de Programmes

BISCUIT FAÏENCE

20 - 560 °C : 5 heures
 560 - 760 °C : 1 heure
 760 - 980 °C : 2 heures
 980 - 980 °C : 15 minutes de palier
 Ou 1050 °C pour certaines faïences.

ÉMAIL FAÏENCE

20 - 300 °C : 2 heures 30 minutes
 300 - 600 °C : 1 heure 30 minutes
 600 - 800 °C : 1 heure 30 minutes
 800 - 980 °C : 2 heures
 980 - 980 °C : 15 minutes de palier

DÉCOR PORCELAINE

20 - 160 °C : 1 heure
 160 - 400 °C : 1 heure 30 minutes
 400 - 810 °C : 3 heures
 810 - 810 °C : 10 minutes de palier

BISCUIT LENT FAÏENCE

20 - 250 °C : 3 heures
 250 - 560 °C : 3 heures
 560 - 760 °C : 1 heure
 760 - 980 °C : 1 heure 30 minutes
 980 - 980 °C : 15 minutes de palier

SÉCHAGE

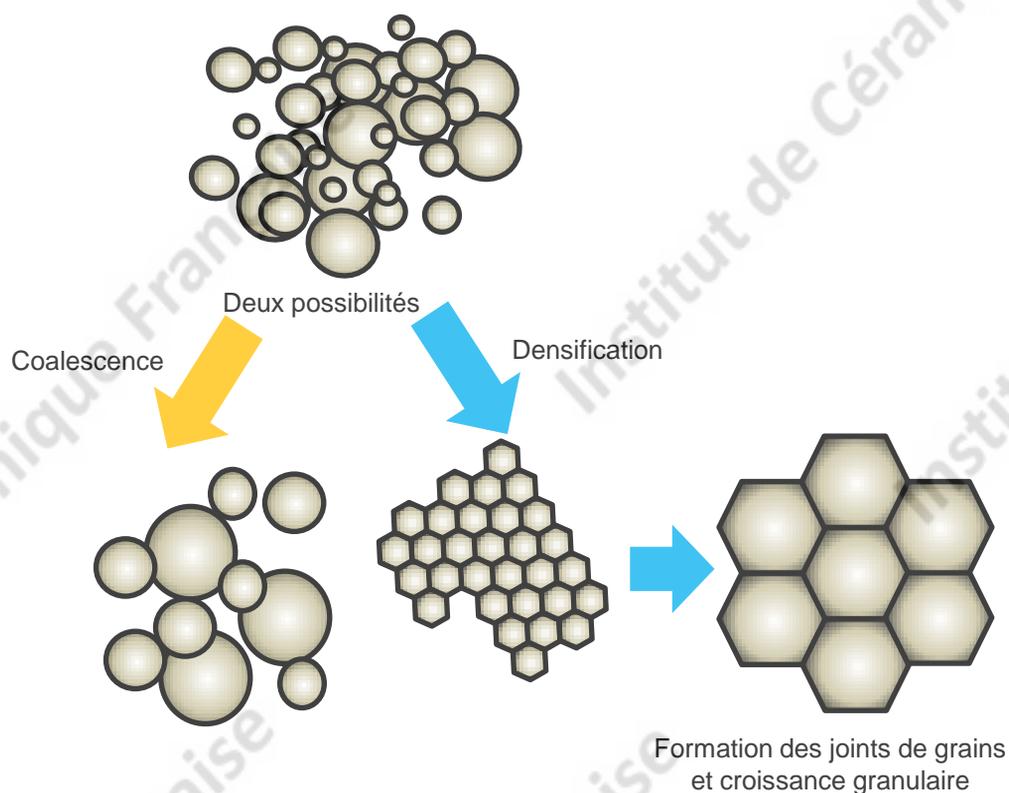
20 - 120 °C : 3 heures
 120 - 120 °C : 2 heures de palier

LE FRITTAGE

Le frittage peut être décrit comme le passage d'un compact pulvérulent à un matériau cohérent sous l'action de la chaleur. Au cours de cette transformation, la forme de la pièce est conservée, son volume en général diminue (phénomène de retrait). La consolidation du compact s'effectue par la formation de liaisons entre les grains ; s'il y a fusion au cours du frittage, celle-ci ne peut être que très localisée afin de conserver une cohérence à l'ensemble de la pièce. Pour les matériaux réfractaires, ou ceux qui se décomposent avant de fondre, le frittage est un moyen incontournable pour produire des pièces à des températures inférieures aux températures de fusion ou de décomposition ; en contrepartie, dès que l'on chauffe une poudre à des températures élevées, le frittage qui se produit a tendance à souder les grains, diminuer la surface réactive avec l'extérieur et souvent s'opposer à la réactivité de la poudre (baisse d'activité d'un catalyseur, par exemple).

Avant l'étape de frittage, la pièce est mise en forme par des techniques qui dépendent de ses dimensions et de sa complexité : le pressage uniaxial pour les formes simples cylindriques, le coulage pour les pièces creuses, l'injection pour des pièces de précision. La pièce ainsi préparée dite pièce en cru (ou vert) est ensuite consolidée et densifiée par le traitement thermique de frittage. D'un point de vue technologique on distingue le frittage naturel effectué sans contrainte mécanique (chauffage sous air ou sous atmosphère contrôlée), du frittage sous charge effectué en appliquant une pression extérieure simultanément au chauffage. Ce dernier est particulièrement utilisé pour les matériaux difficiles à fritter ou pour obtenir des densités proches de la densité maximale théorique.

LE FRITTAGE EN PHASE SOLIDE, au cours duquel tous les constituants restent solides. La densification est produite par la soudure et le changement de forme des grains. Ce frittage peut être monophasé ou polyphasé. De façon ponctuelle, des additifs permettent, sans créer de phase liquide, d'accélérer la densification. Ce mode de frittage est particulièrement utilisé pour les céramiques techniques dont la pureté des joints de grains est importante pour les propriétés d'usage : thermomécaniques (outils de coupe, barrières thermiques, combustible nucléaire), électriques ou magnétiques (diélectriques, varistances, supraconducteurs), optiques, voire biologiques.



Transformation thermiquement activée essentiellement à l'état solide (pas de fusion).

LE FRITTAGE EN PHASE LIQUIDE

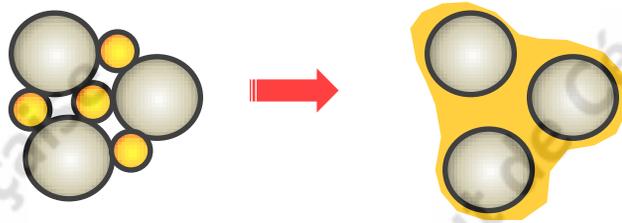
La **vitrification** correspond à l'apparition d'une phase vitreuse importante lors du chauffage, la quantité est alors suffisante pour combler la porosité. Ce procédé est largement utilisé pour densifier les céramiques dites traditionnelles telles que les porcelaines... L'obtention d'une phase liquide en plus de la phase solide nécessite la réaction entre plusieurs constituants ou la fusion de l'un d'eux à l'exclusion des autres ; **c'est donc un frittage polyphasé** à plusieurs constituants.

Fusion d'éléments peu réfractaires.

Écoulement visqueux du liquide entre les grains restés solides.

Solidification du liquide au refroidissement.

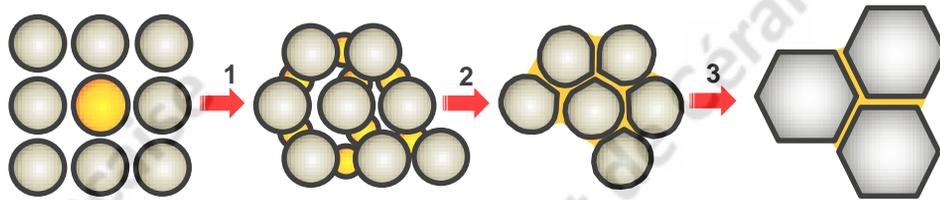
Produit final constitué d'un mélange de cristaux enrobés par un verre.



Céramiques silicatées traditionnelles (porcelaines, grès, etc.)
Contrôle dimensionnel difficile.

FRITTAGE EN PHASE LIQUIDE

Quantité de liquide insuffisante pour combler tout l'espace entre les grains solides (concentration aux points de contact des grains).



1. Infiltration et mouillage.
2. Dissolution et recristallisation.
3. Coalescence et grossissement des grains.

MODIFICATION DE LA FORME DES GRAINS PAR RÉACTION AVEC LE LIQUIDE

Dissolution des petits grains/Transfert de matière par diffusion à travers la phase liquide/Recristallisation de la matière dissoute sur les plus gros grains.

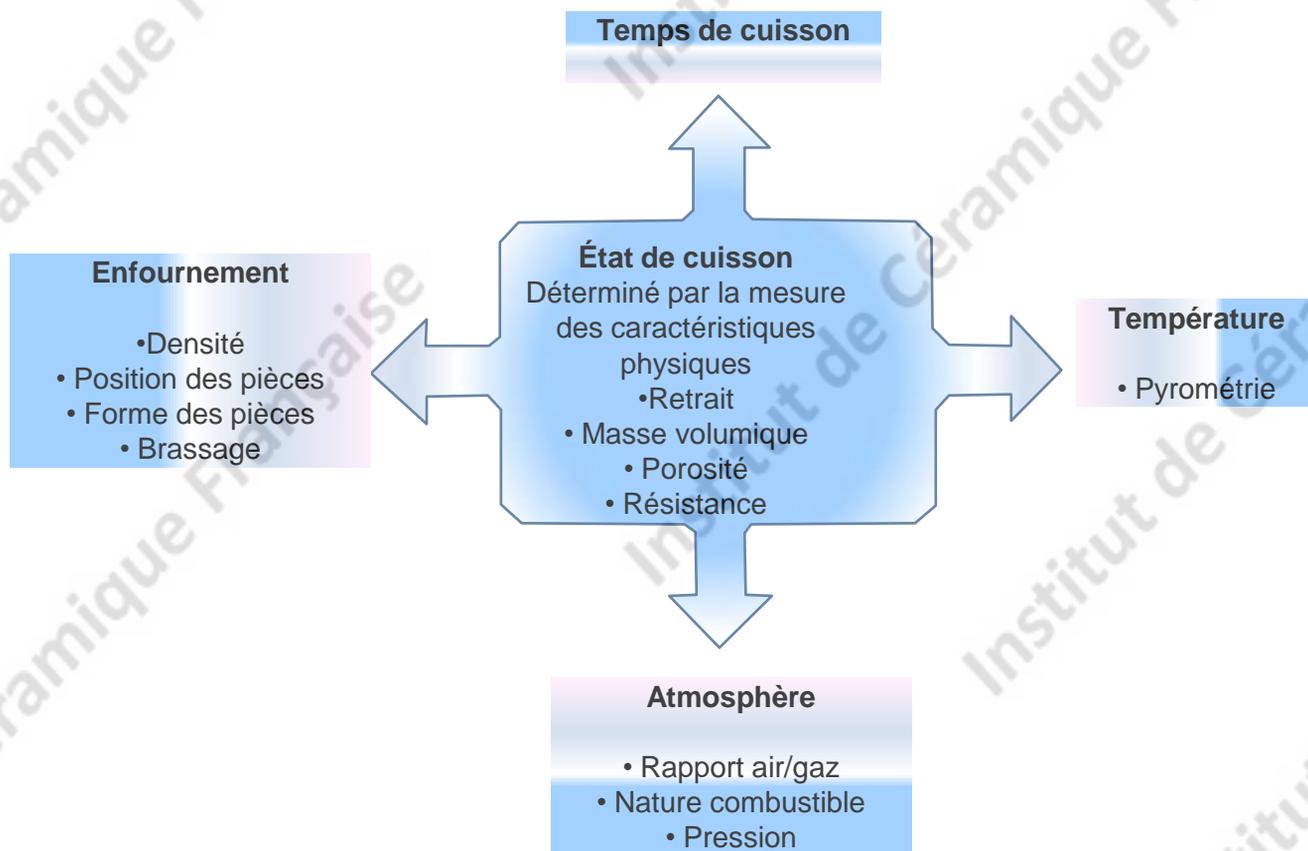


Les principales transformations (recherchées ou non) seront :

- Une diminution de volume.
- Une diminution de poids.
- Une densification de la matière.
- Des changements de teintes.
- Une augmentation des caractéristiques mécaniques.
- Une meilleure résistance à l'attaque de produits chimiques (et notamment à l'eau).

Toutes ces transformations nécessitent une quantité d'énergie (chaleur) pour pouvoir être initiées et que cette quantité de chaleur soit maintenue un temps suffisant pour que la transformation puisse être complète (dans l'ensemble de la masse de la pièce à cuire). Ainsi, les paramètres de cuisson seront fonction de :

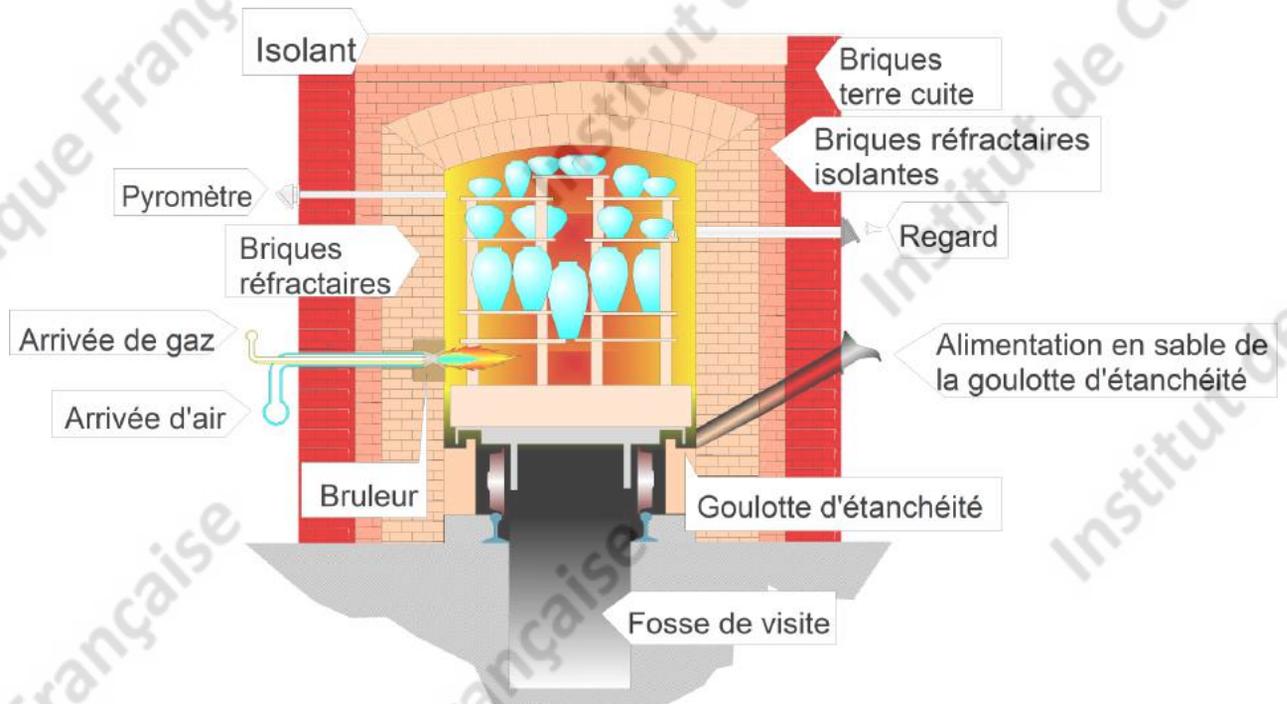
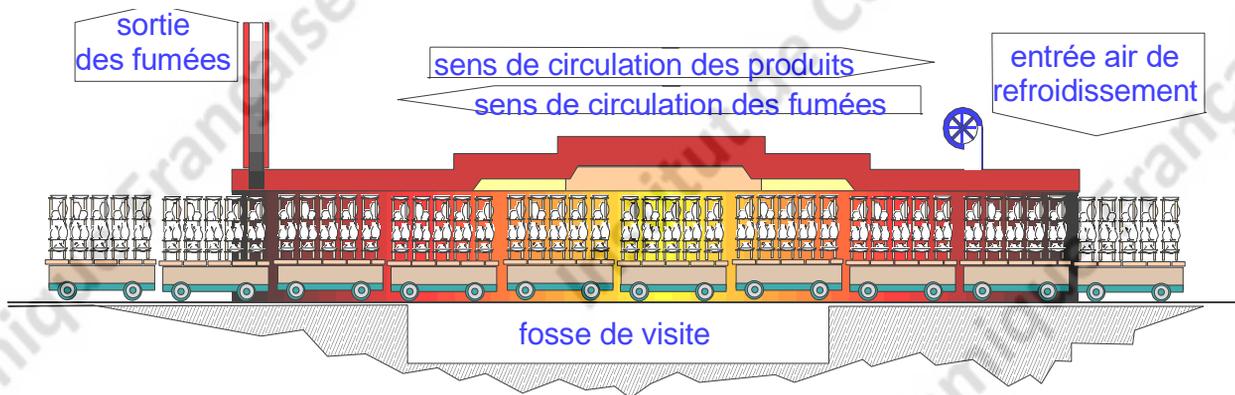
- La température à atteindre pour provoquer les réactions.
- De la quantité de chaleur pour maintenir ces réactions.
- Du temps de cuisson.
- De la nature du produit à cuire (composants).
- De la forme et/ou de l'épaisseur de la pièce.



Les différents types de fours

Fours tunnels

Ce sont essentiellement des tunnels réfractaires desservis par des rails transportant des wagonnets de four. Ces derniers comportent des supports réfractaires sur lesquels on dépose les produits séchés. Les wagonnets sont poussés à travers les fours à intervalles prédéfinis, à contre-courant d'un flux d'air aspiré par un ou plusieurs ventilateurs vers un conduit d'évacuation situé à proximité de la zone d'entrée des wagonnets. La plupart des fours tunnels fonctionnent aujourd'hui au gaz, la température étant maximale dans la zone de cuisson située vers le centre du four. Les produits entrants sont préchauffés par les gaz chauds en provenance de la zone de cuisson, tandis que l'air entrant refroidit les produits cuits et est lui-même préchauffé pour assurer sa fonction de combustion. Une fraction de cet air en provenance de la zone de refroidissement s'évacue généralement vers les séchoirs adjacents, ce qui permet des économies significatives en combustible. Les chambres de cuisson et les wagonnets de four sont rendus étanches à l'air secondaire grâce à un joint de sable. Dans le domaine de la terre cuite, les fours de construction récente sont rendus étanches avec de l'eau ou d'autres solutions mécaniques améliorées. L'objectif de ces opérations est de réduire les temps de cuisson et la consommation énergétique en ayant une chambre de cuisson étanche au gaz.



Fours à rouleaux

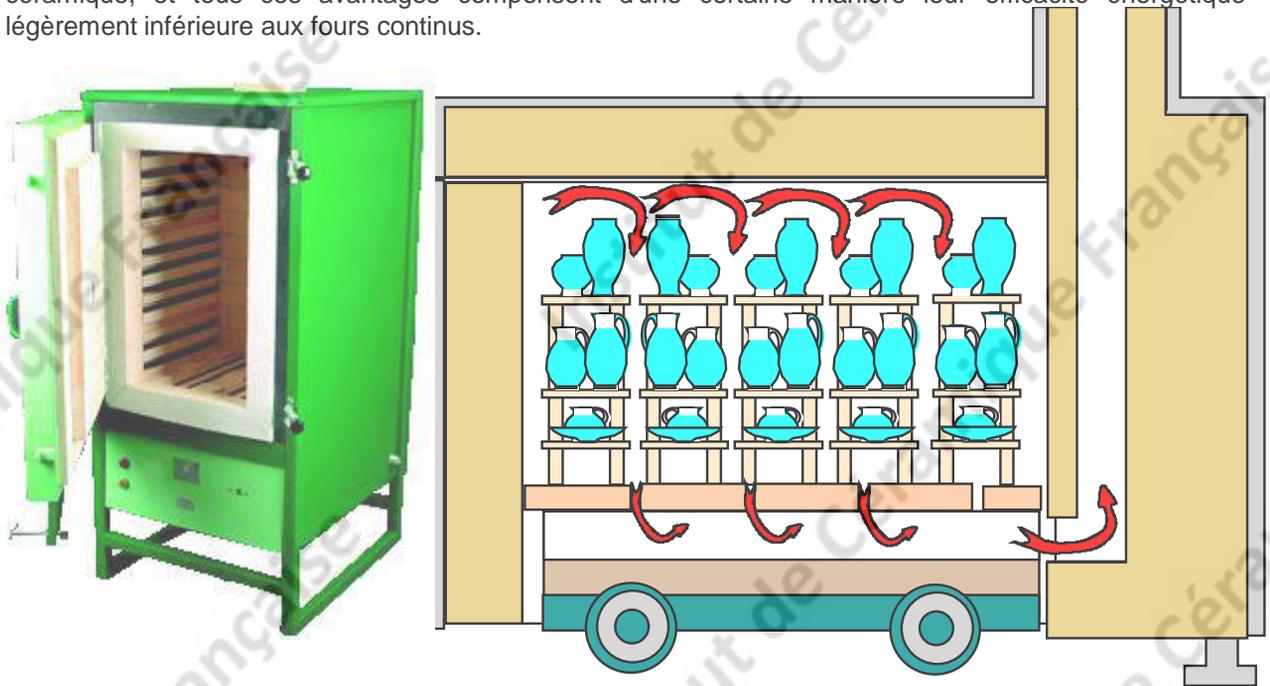
Aujourd'hui, les fours à rouleaux à un étage s'utilisent de façon quasi universelle pour la fabrication des carreaux pour sols et murs, et les programmes de cuisson ont été réduits à moins de 40 minutes. Les carreaux sont transportés par des rouleaux d'entraînement, et la chaleur de cuisson est fournie par des brûleurs à gaz naturel et air qui sont situés sur les côtés du four. Les principaux mécanismes de transmission de la chaleur sont la convection et le rayonnement, et comme les fours ne sont pas pourvus d'un moufle, les coefficients de transmission de la chaleur sont plus élevés, ce qui permet de réduire le cycle de cuisson et la consommation d'énergie. Les fours à rouleaux s'utilisent parfois également pour la fabrication de tuiles en argile, de tuyaux en grès, d'appareils sanitaires et de vaisselle de table.



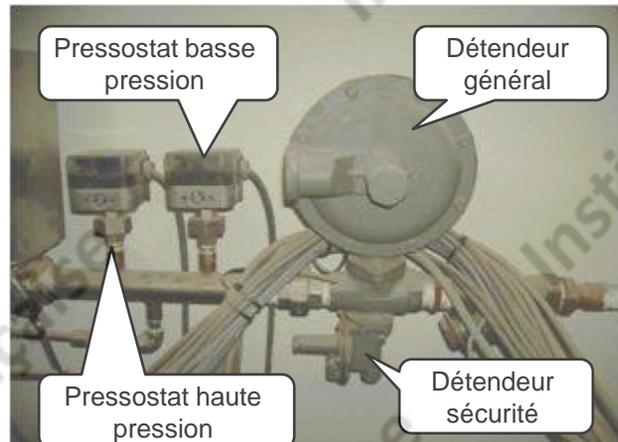
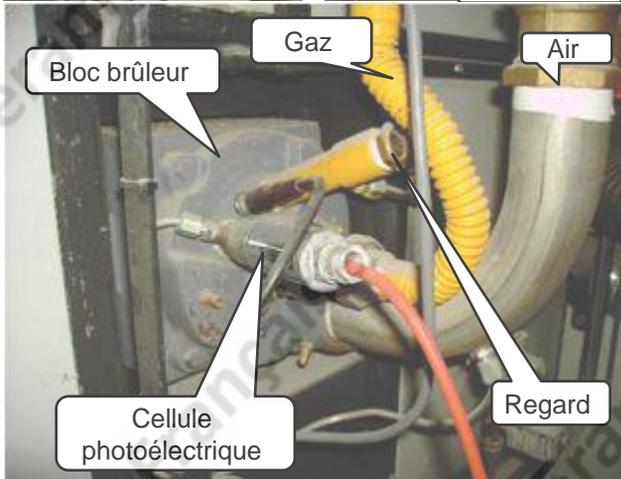
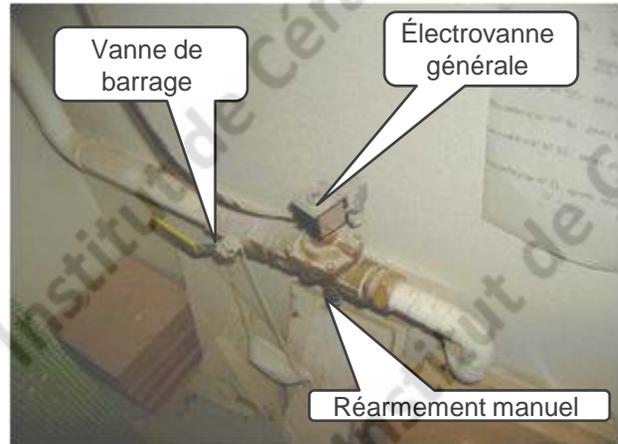
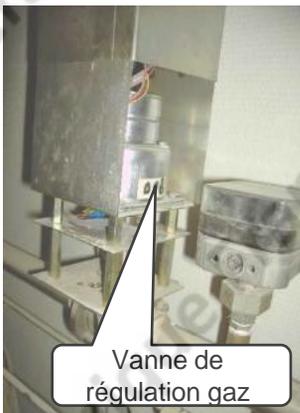
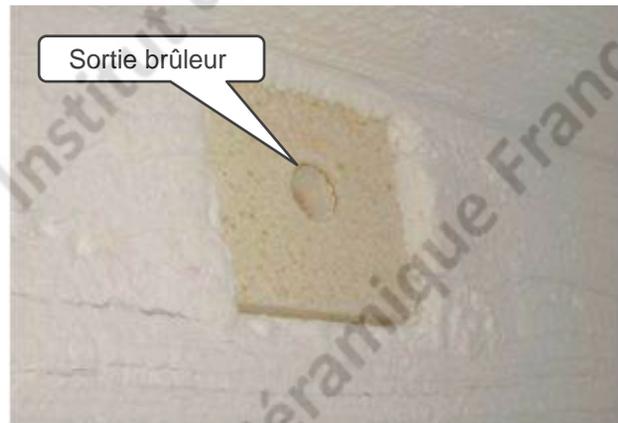
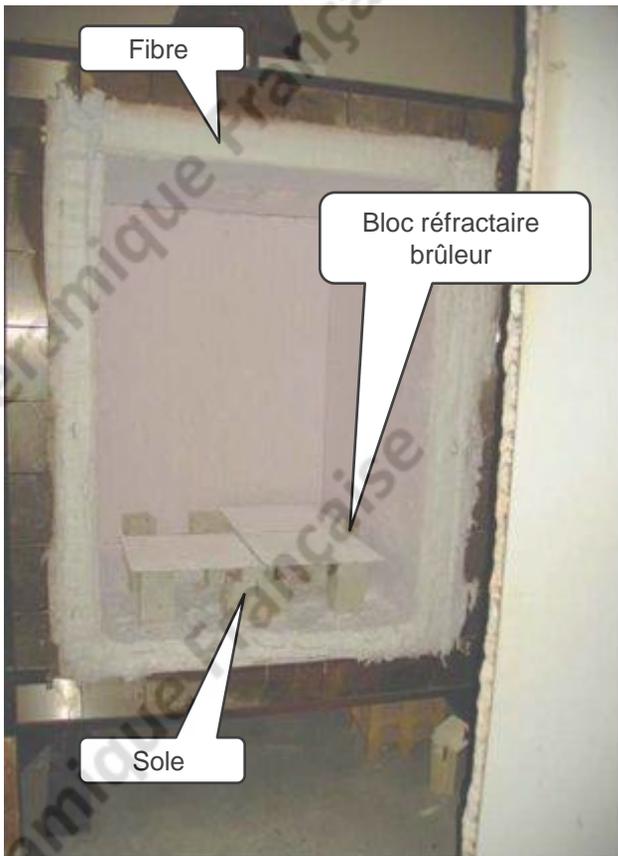
Fours intermittents (périodiques)

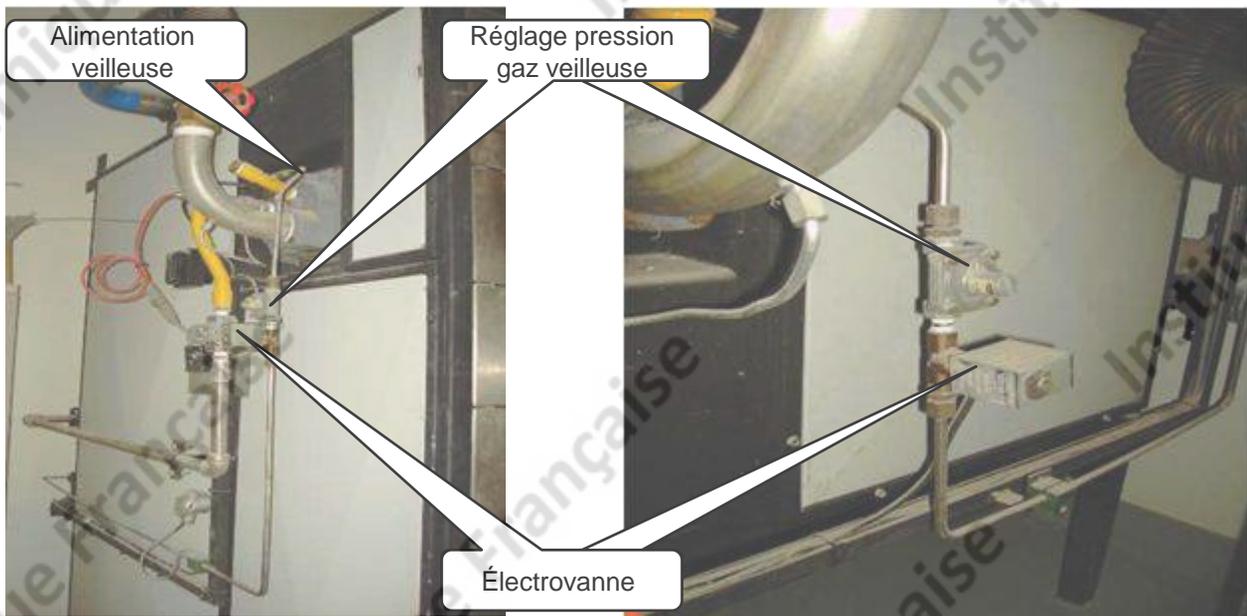
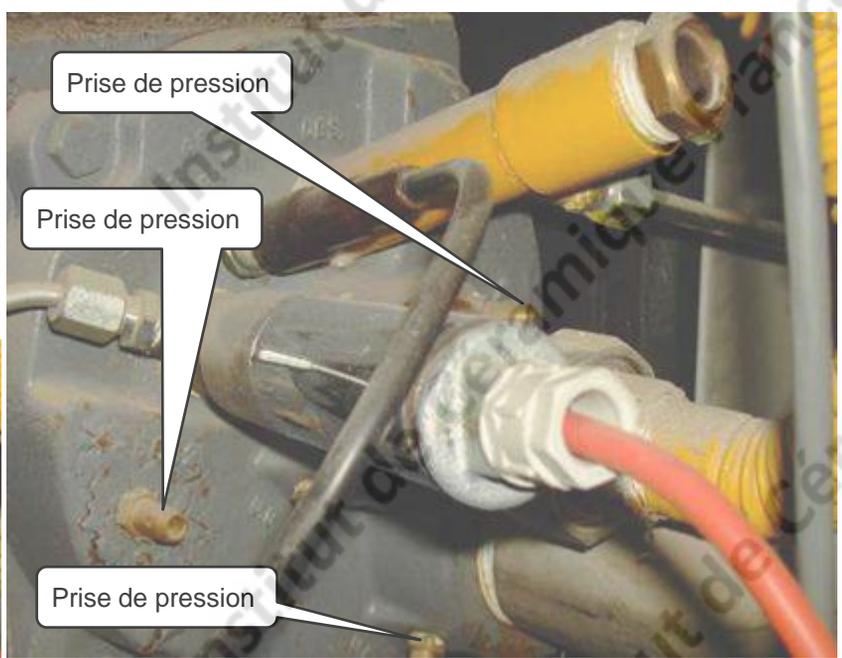
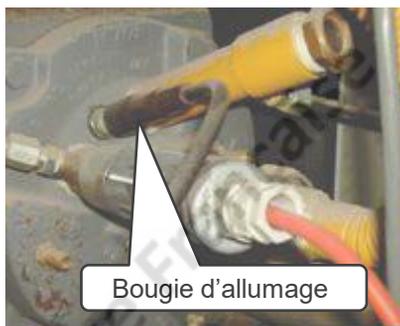
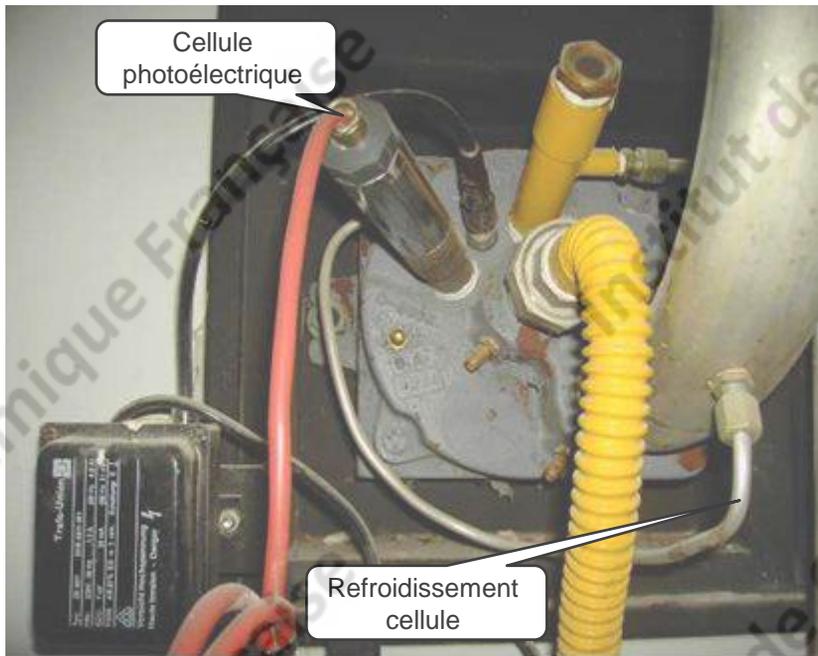
Ils comprennent les fours à chambre et les fours à cloche, qui reposent sur une chambre unique et qui sont chargés avec les produits céramiques pré-séchés (dans un four à cloche, la cloche équipée de l'élément chauffant est placée sur le fond par un système de levage ; dans les fours à chambre, les produits à cuire sont amenés sur la sole à l'aide d'une navette), fermés hermétiquement puis soumis à un cycle de cuisson prédéfini. On emploie généralement des brûleurs à gaz, ce qui permet de commander correctement la température et l'atmosphère du four (oxydation ou réduction). On utilise également l'électricité pour chauffer les fours intermittents, notamment dans la fabrication des céramiques techniques. Les fours spéciaux destinés aux céramiques techniques sont, par exemple, les fours de type HIP (pressage isostatique à chaud), les fours à haute température et les fours à atmosphère protectrice.

Les fours intermittents servent principalement à la fabrication à petite échelle de produits spécialisés tels que les briques spéciales et les raccords de canalisation, les raccords pour tuiles, les produits réfractaires, etc. Ils procurent une certaine flexibilité en cas de modification fréquente de la composition de la pâte céramique, et tous ces avantages compensent d'une certaine manière leur efficacité énergétique légèrement inférieure aux fours continus.



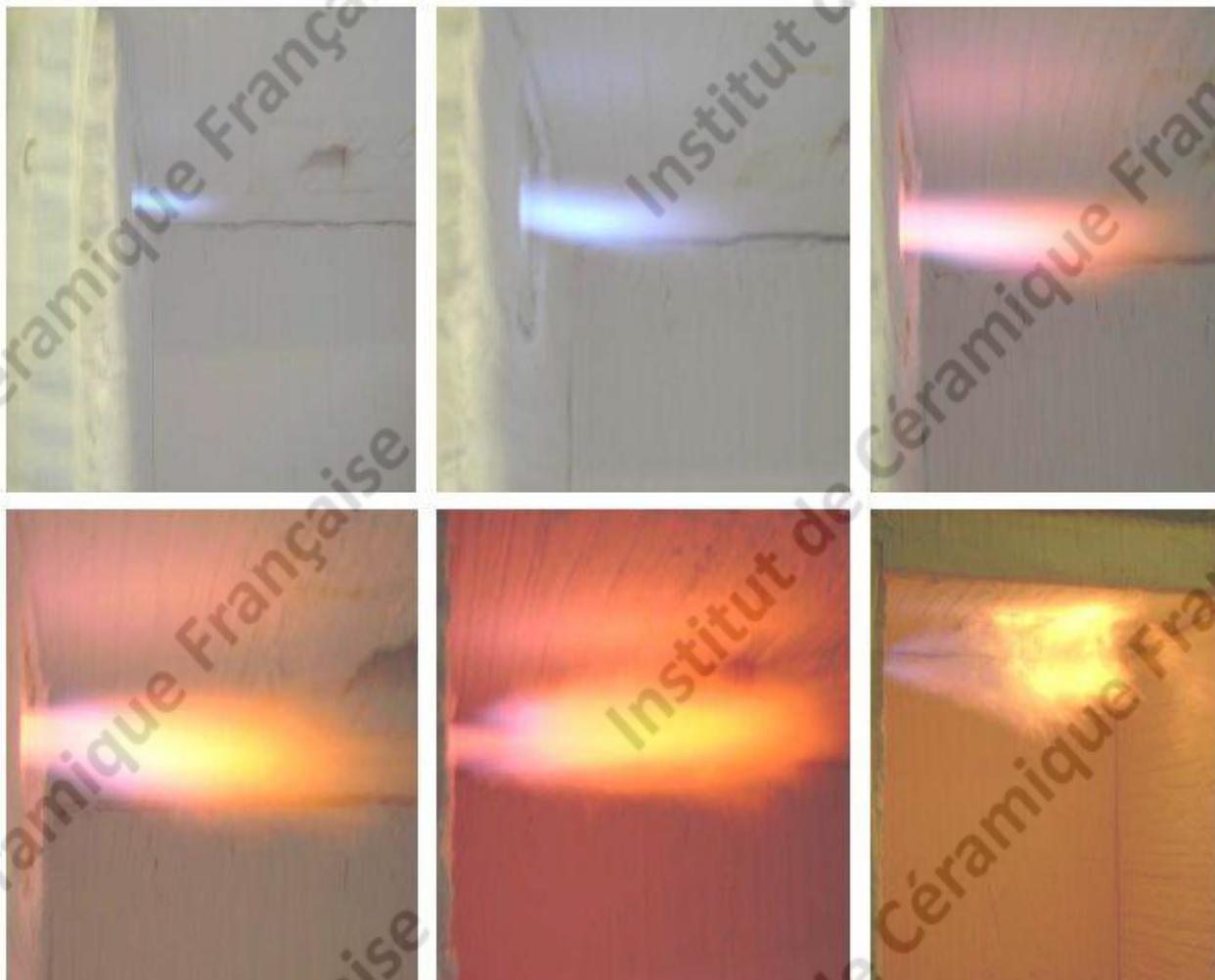
LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS D'UN FOUR INTERMITTENT AU GAZ ET A BRÛLEURS JET





COMBUSTION ET CONTRÔLES

Variation d'aspect de flamme de brûleur jet par diminution de l'air.



LES DIFFÉRENTS TYPES DE COMBUSTION

Quatre types de combustion :

COMBUSTION COMPLÈTE SANS EXCÈS D'AIR (théorie)

C'est la combustion donnée par un m^3 de gaz associé à son volume d'air théorique, dans ce cas on considère que tout le carbone et l'hydrogène sont oxydés, les produits de combustion contiendront alors seulement : CO_2 , H_2O et N_2 .

Ce type de combustion est difficile à réaliser, car il faut fournir les proportions exactes d'air et de gaz au brûleur, et cela de façon continue au cours de la cuisson, tout manque d'homogénéité du mélange entraînant une combustion incomplète.

COMBUSTION COMPLÈTE AVEC EXCÈS D'AIR (oxydante)

C'est celle qui est réalisée dans la pratique afin d'être certaine de ne pas passer en phase réductrice qui pour la plupart des cuissons de produits céramiques ne serait pas souhaitable.

Elle représente la combustion d'un m^3 de gaz associé à un volume d'air supérieur à l'air théorique. Pour chaque m^3 de gaz une partie de l'air sert à la combustion théorique du gaz le reste, l'air en excès, ne participe pas à la combustion et se retrouve intégralement dans les fumées qui comprendront alors : CO_2 , H_2O , N_2 et O_2 .

COMBUSTION INCOMPLÈTE PAR DÉFAUT D'AIR (réductrice)

C'est la combustion donnée par un m^3 de gaz associé à un volume d'air inférieur à l'air théorique.

L'air est en quantité insuffisante pour assurer l'oxydation complète des éléments carbone et hydrogène et dans les fumées, il y aura la présence de : CO_2 , H_2O , N_2 et CO , éventuellement des produits de dissociation et des imbrûlés : hydrogène et pour les défauts d'air important méthane et carbone sous forme de suie.

Ce type de combustion est parfois recherché dans les cuissons céramiques, car elle permet de transformer certains éléments des matières premières, c'est le cas pour la cuisson de la porcelaine ou la transformation des composés ferriques en fer ferreux évite le développement de coloration jaune.

COMBUSTION INCOMPLÈTE, CAS GÉNÉRAL

1 m³ de gaz est associé à un volume d'air quelconque et, en raison de conditions défavorables, une partie du gaz ne participe pas à la combustion, cette combustion se caractérise par la présence simultanée d'oxygène et de produits de combustion incomplète et d'imbrûlés dans les fumées, ce type de combustion se rencontre lorsque la combustion est effectuée avec un défaut d'air et que les produits de combustion sont ultérieurement mélangés avec un volume d'air complémentaire.

Des diagrammes de combustion peuvent d'après les relevés réalisés à la sortie des fumées situer rapidement le type de combustion auquel on a à faire.

En résumé, lors des combustions théoriques, on trouve dans les fumées, de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de l'azote, lors des combustions avec défaut d'air (dites réductrices) on trouve, en plus, du monoxyde de carbone (CO) et du carbone (C) et lors des combustions avec excès d'air, on trouve en plus de l'oxygène (O₂).

ÉTABLISSEMENT D'UNE COURBE DE CUISSON

L'établissement d'une courbe de cuisson est fait pour assurer la transformation complète des produits céramiques, les amener à une certaine température, mais la masse à chauffer et les précautions nécessaires, pour ne pas endommager les produits, contraignent à réguler la température en fonction du temps.

En effet, les réactions du produit céramique se produisent à tous les stades de la montée et de la descente en température. Certaines, délicates, doivent se faire à une vitesse ou un temps déterminé pour être complètes. Il faut déterminer dans un premier temps qu'elles sont les réactions de la pâte en fonction d'une élévation de température.

Trois essais peuvent aider à la détermination d'une courbe de cuisson :

L'ATG (Analyse thermogravimétrique) qui met en relation les pertes de masse de la pâte et l'élévation de la température.

L'ATD (Analyse thermodifférentielle) qui met en relation les pertes ou les gains de chaleur de la pâte et la température. En effet, certaines réactions physico-chimiques, comme la transformation de l'eau en vapeur, absorbent de la chaleur alors que d'autres, comme la décarburation, en créent.

L'AD (Analyse dilatométrique) qui met en relation les gonflements et les retraites de la pâte avec l'élévation de la température.

Cette détermination sera purement théorique et demandera une validation par des cuissons industrielles.

Si une forte dilatation apparaît à l'AD à une température donnée, la montée en température sera ralentie afin que le gonflement s'effectue sans dommage pour le produit.

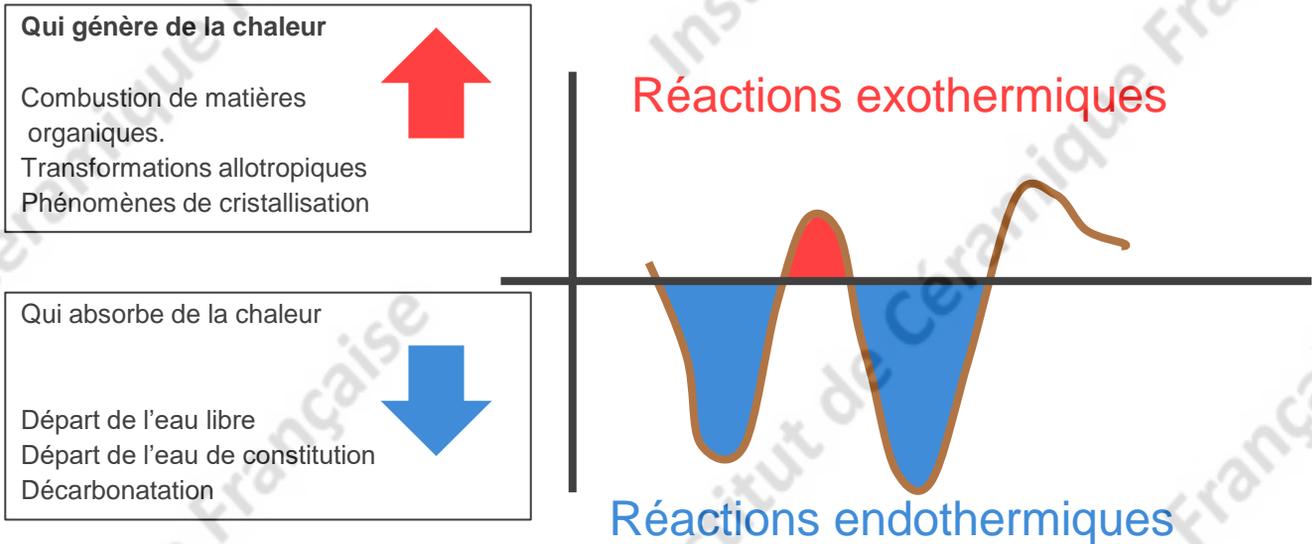
Si l'ATG montre une perte de masse importante vers 800°C, c'est que du calcaire commence à dégager du gaz carbonique et que cette réaction est assez longue ; donc dans le cas de pâtes très calcaires, des paliers seront présents sur la courbe de montée en température vers 800°C afin que tout le gaz carbonique soit évacué.

En exploitant l'ensemble de ces renseignements, une courbe de cuisson théorique pourra être déterminée et elle sera ensuite rectifiée selon le matériel de cuisson (puissance, possibilités de régulation, précision) ainsi que de la disposition des produits à cuire. En effet, plus la densité d'empilage est importante, plus les produits sont serrés, plus la cuisson devra être longue.

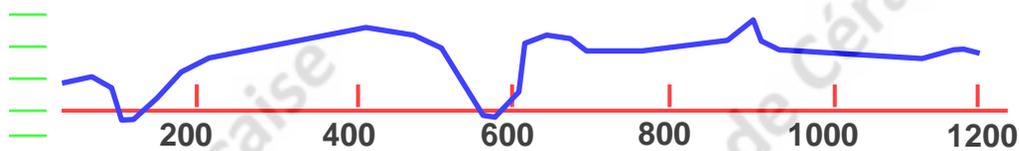
L'ANALYSE THERMIQUE DIFFÉRENTIELLE

Cette technique est basée sur l'étude de la chaleur absorbée ou dégagée par un matériau lorsqu'il subit des transformations physiques lors de la cuisson.

Il existe deux types de réactions :



Ces réactions permettent de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes physico-chimiques s'établissant lors du traitement thermique : les réactions seront matérialisées sur un graphique comportant la température en abscisses et l'énergie absorbée ou générée en ordonnées.



Argile contenant des produits organiques



95% de kaolin 5% de carbonate de calcium



40% de kaolin 60% de carbonate de calcium

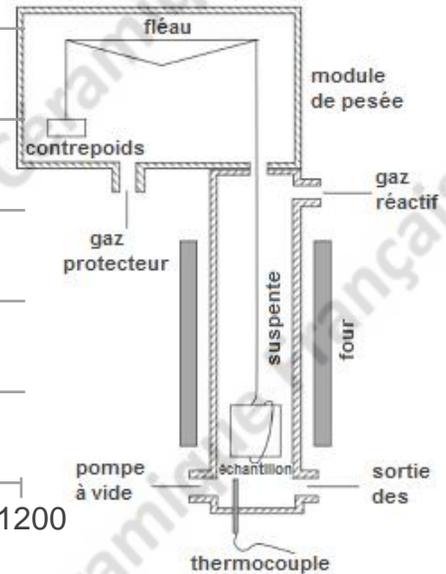
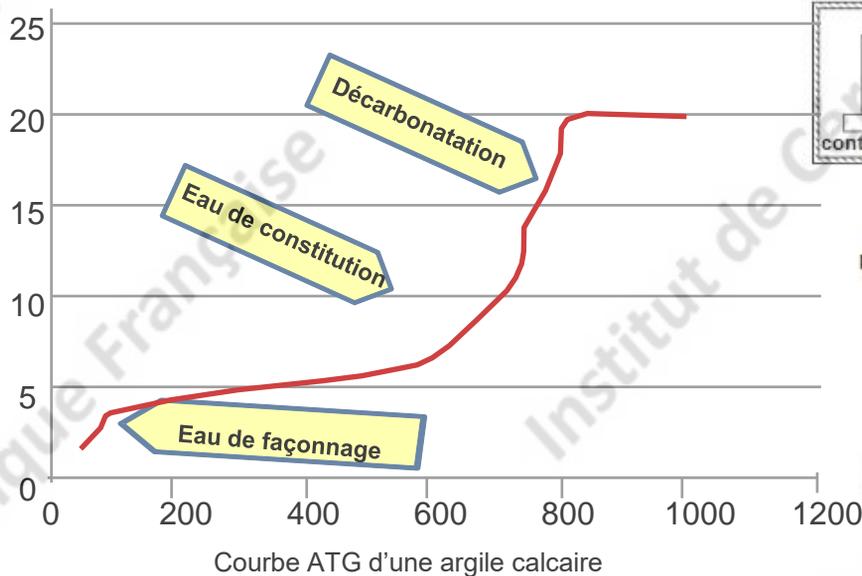
L'ANALYSE THERMOGRAVIMÉTRIQUE, cette technique d'analyse permet de déterminer les pertes de masse subies par un matériau lors de son traitement thermique.

Les changements de pente de la courbe, des variations pondérales permettent de repérer les débuts et fins de réactions ou de transformation. Les variations pondérales du système entre ces repères donnent des informations quantitatives et permettent certains dosages.

Cette technique permet relativement simplement de quantifier certains composés présents dans les matériaux; dosage des sulfates hydratés par déshydratation, à titre d'exemple, aux environs de 125°C pour le gypse selon la réaction suivante :



Dosage des carbonates par décarbonatation à environ 800°C pour CaCO_3 selon la réaction suivante : ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$) mais également des matières organiques et des différents dépôts d'eau.



L'ANALYSE DILATOMÉTRIQUE des matières premières céramiques et des émaux fournit des indications intéressantes sur leur comportement au feu en précisant les variations de leur dimension en fonction de la température, et la vitesse avec laquelle elle se produit. Elle permet ainsi dans la plupart des cas :

De réaliser une identification facile des espèces minérales.

De déceler les transformations allotropiques et les réactions à l'état solide qui ont lieu au cours de la chauffe, phénomènes souvent accompagnés d'une nette augmentation de volume.

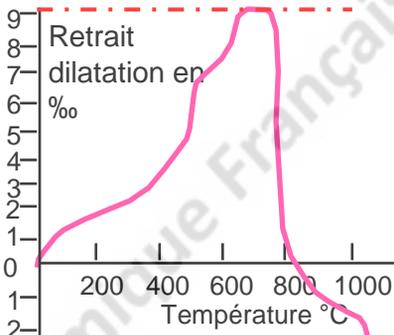
D'obtenir des renseignements pour la conduite optimum de la cuisson d'une composition céramique.

De connaître la possibilité d'accord entre une pâte et un émail .

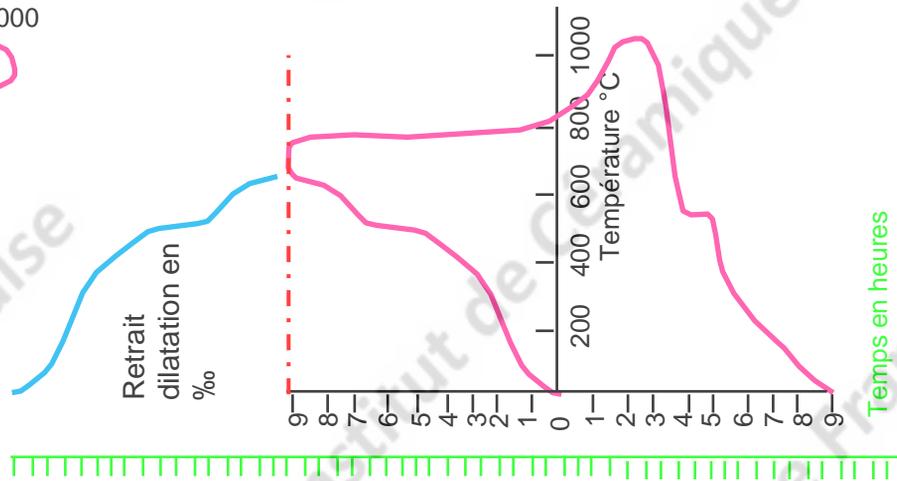
De définir les températures de ramollissement et de transformation d'un émail.



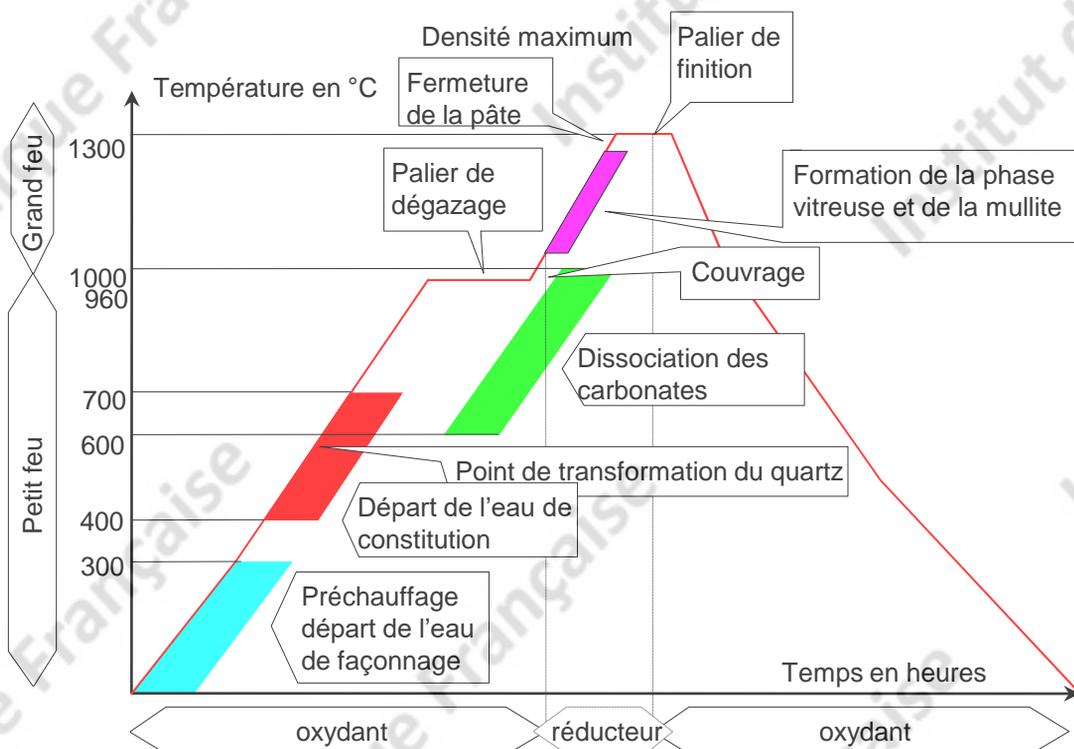
COURBE DILATOMETRIQUE



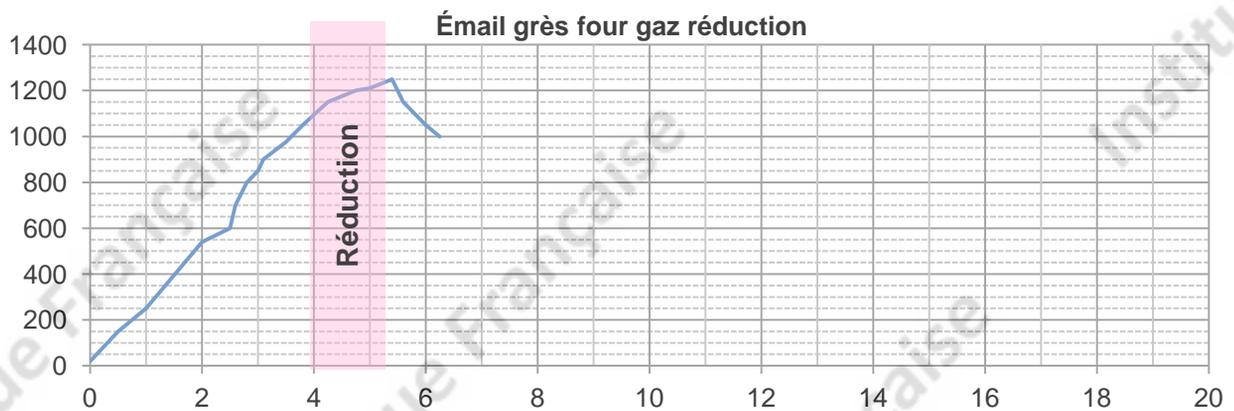
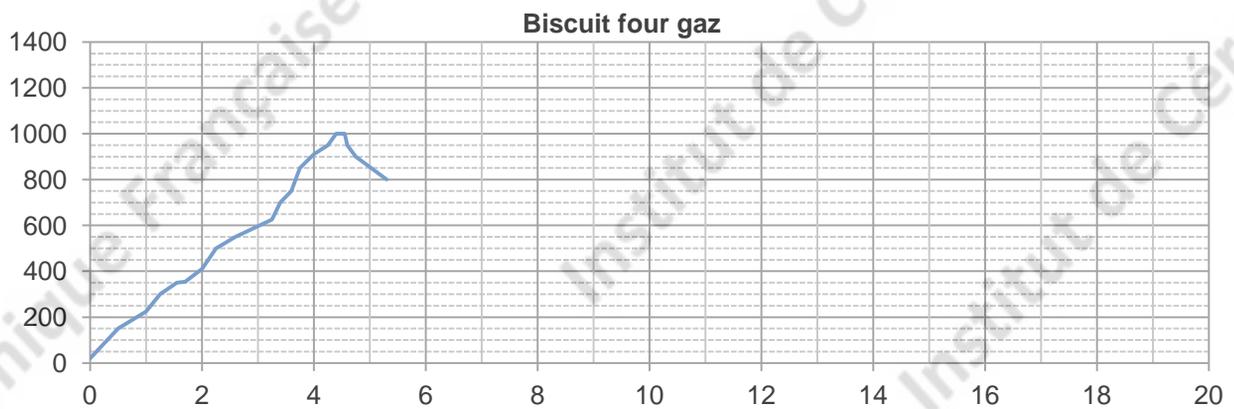
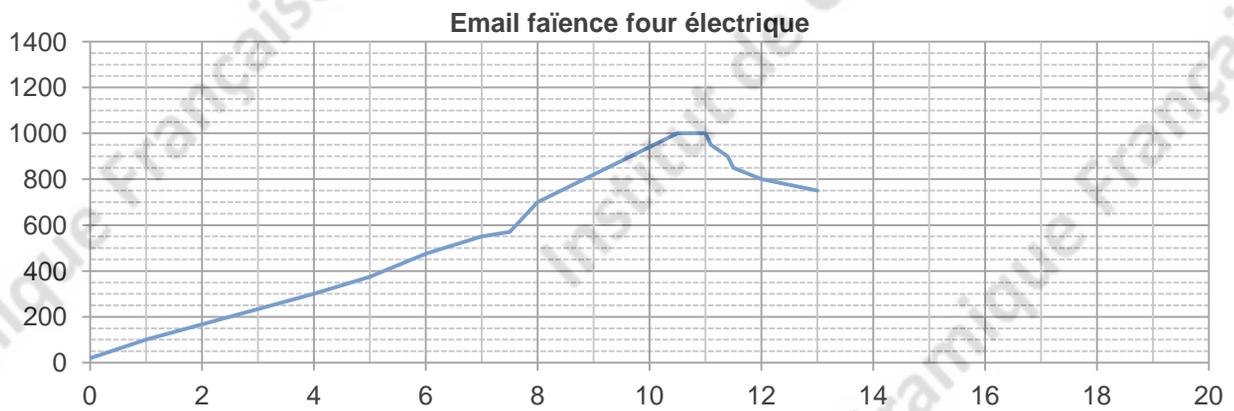
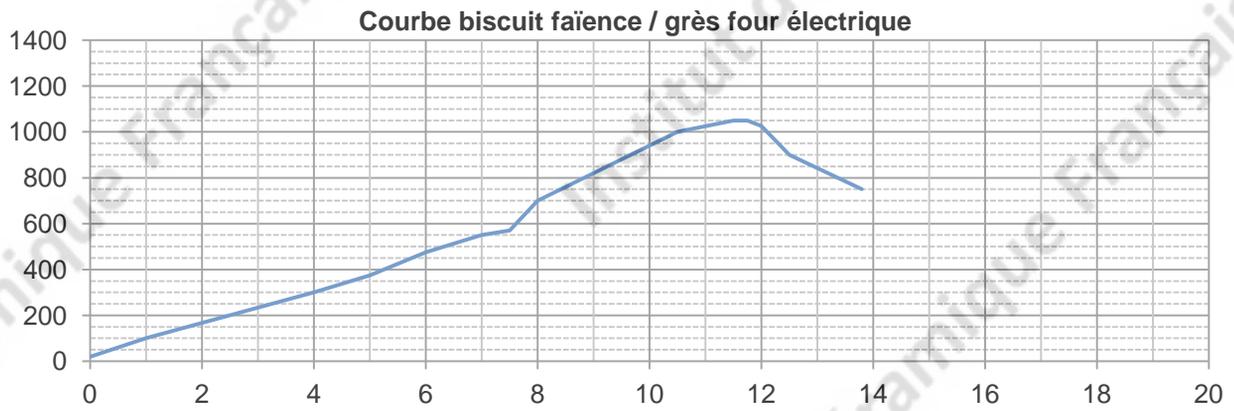
Établissement d'une courbe de cuisson



A l'aide des différents éléments et réactions découvertes dans les courbes ATG, ATD et dilatométriques, et en connaissance des quantités de matériaux entrant dans la composition de la pâte, le céramiste pourra établir une courbe de cuisson prenant en compte le moment et la durée des différentes réactions afin de fournir aux produits la quantité d'énergie et le temps nécessaire à la réaction. Les courbes d'expérimentation étant réalisées sur de petits échantillons de matière première, devront être rectifiées (souvent ralenties) pour prendre en compte la morphologie souvent complexe des pièces céramiques, leurs différences d'épaisseur, et leurs modalités d'enfournement, bien entendu les courbes de cuisson seront également modifiées en fonction des capacités et de la technologie du four en présence.

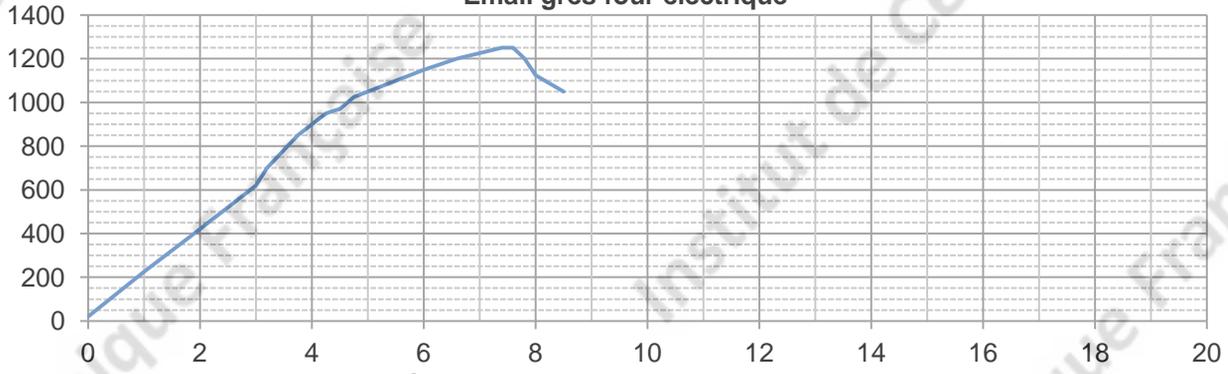


COURBES DE CUISSON (les courbes ne sont données qu'à titre d'indication elles sont graduées en degrés Celsius et en heures) l'échelle est identique pour l'ensemble des courbes

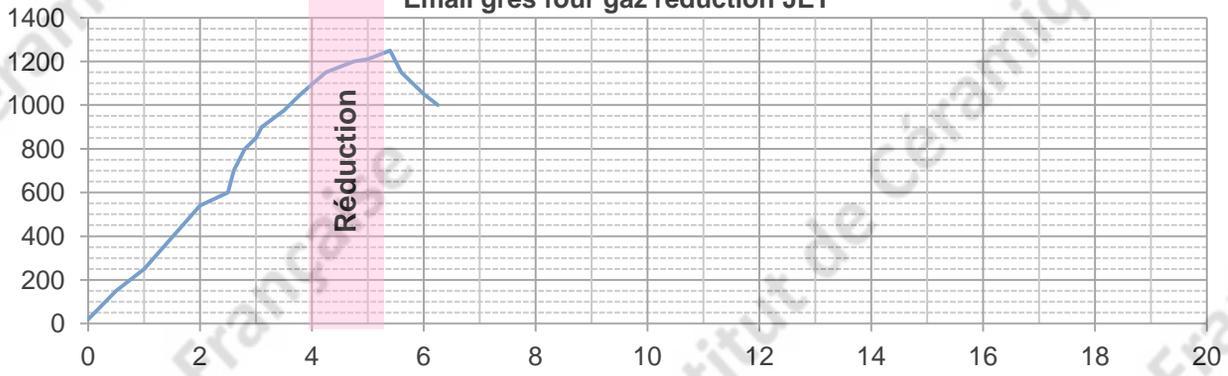


Institut de Céramique Française

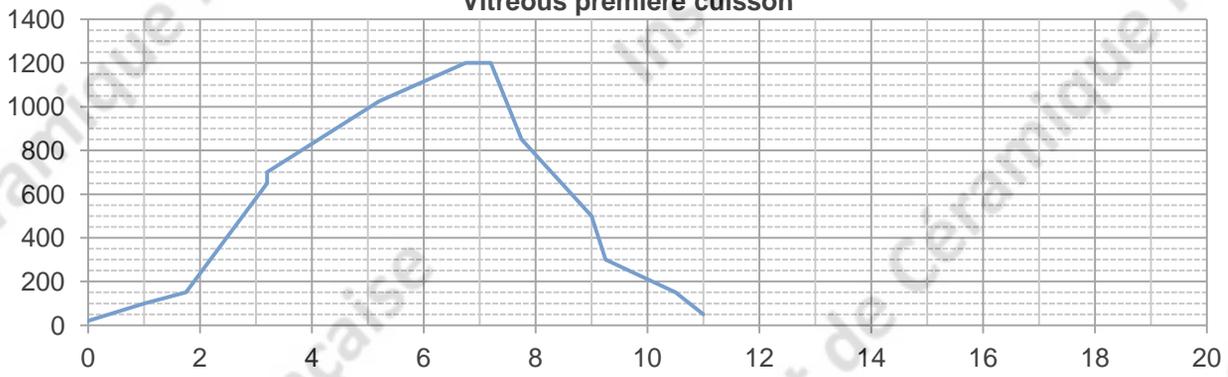
Émail grès four électrique



Émail grès four gaz réduction JET



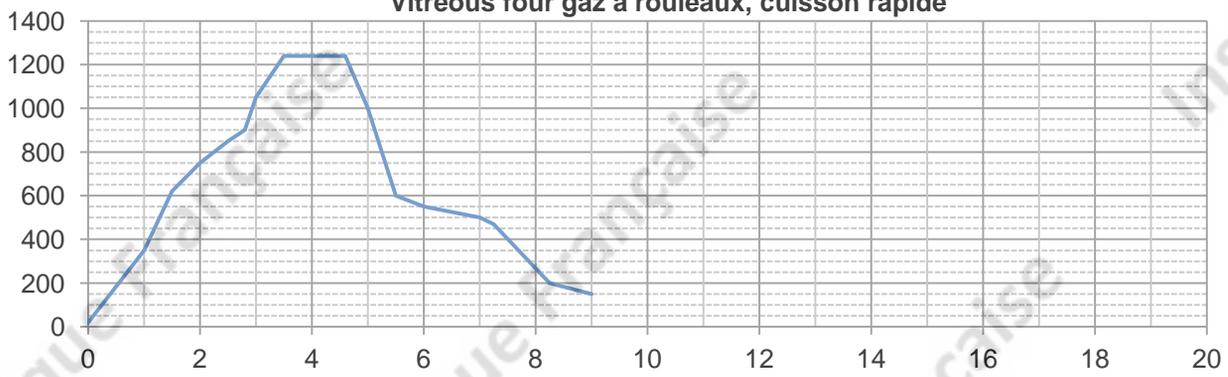
Vitreous première cuisson



Vitreous recuisson



Vitreous four gaz à rouleaux, cuisson rapide



CONTRÔLES DE CUISSON

Les différents contrôles nécessaires au suivi d'une cuisson sont :

Contrôle de la température.

Contrôle de l'élévation de la température en fonction du temps.

Contrôle de l'atmosphère du four.

Contrôle des différentes pressions des combustibles, comburants et fumées.

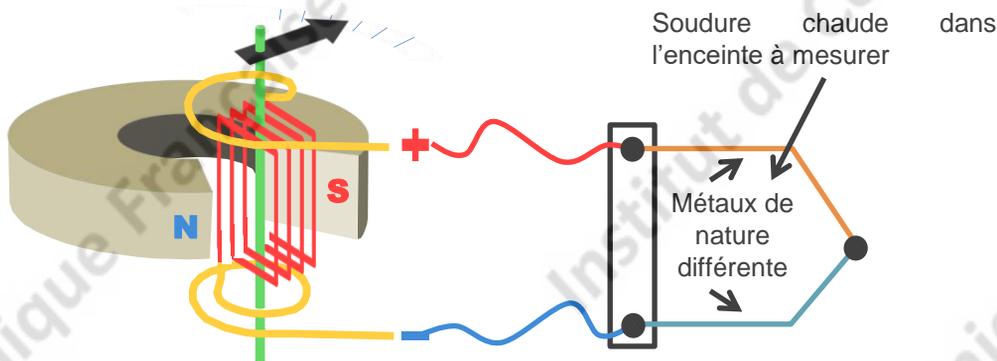
Contrôle de l'état de cuisson pendant et après la cuisson.

MESURE DES TEMPÉRATURES

Différentes méthodes permettent de mesurer les températures avec plus ou moins de précision. Elles sont classées en deux groupes :

Une partie de l'appareillage est placée en contact direct dans le milieu à étudier, c'est-à-dire le four. La précision des mesures nécessite que la température du détecteur sensible appelé «sonde» soit à la température mesurée du milieu. Les thermocouples appartiennent à ce groupe.

Il n'y a aucun contact ni liaison mécanique avec le four. Les pyromètres optiques appartiennent à ce groupe.



Une bobine (rouge) est soutenue sur un axe rotatif (vert), sur cet axe est fixée une aiguille parcourant le cadran gradué (blanc). L'ensemble est positionné dans l'entrefer d'un aimant, au passage de l'électricité la bobine fera entrer en rotation l'axe et donc de l'aiguille proportionnellement à l'intensité du courant envoyé.

Thermocouples industriels

Ils sont constitués de deux fils métalliques ou alliages métalliques différents. Nous trouvons par exemple les couples suivants :

Cuivre-constantan.

Fer-constantan (700°C maximum).

Chromel-Alumel (de 500°C à 1100°C maximum).

Platine-platine rhodié (10% de rhodium) (1600°C environ).

J
K
S

À titre indicatif, voici la composition de ces divers alliages :

Constantan : alliage de cuivre (55 %) et de nickel (45 %).

Chromel : nom commercial d'un alliage de nickel contenant 10 à 20 % de chrome.

Le cordon compensateur ne supprime pas la soudure froide, mais ne fait que la déplacer d'une de ces extrémités à l'autre. Il existe de nombreuses variétés de cordons compensateurs, mais chacune est destinée à une nature de thermocouple bien déterminée.

Vieillessement des thermocouples:

Un thermocouple convenablement utilisé conserve très longtemps ses caractéristiques. Cependant, une mauvaise utilisation le fait vieillir prématurément à cause de :

- L'utilisation de températures trop élevées. En effet, par exemple, pour qu'un thermocouple platine-platine rhodié conserve ses caractéristiques thermoélectriques d'origine, il ne doit pas être porté à une température supérieure à 1600 °C durant un temps prolongé.

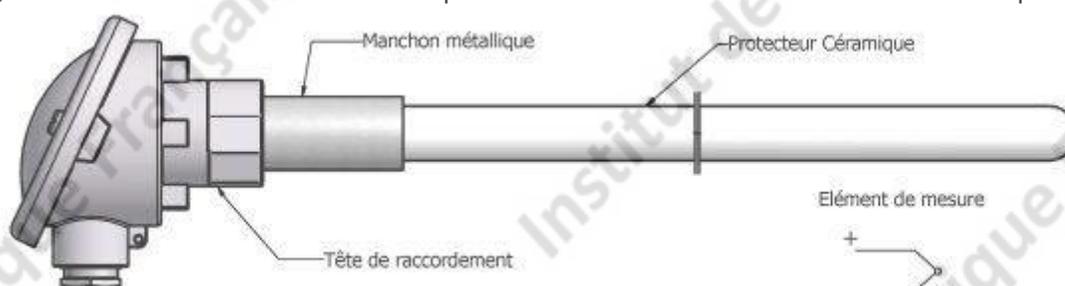
- D'une atmosphère trop réductrice, sans que soit utilisée une gaine protectrice réfractaire adaptée.

- De perles isolantes et de gaines protectrices réfractaires contenant des agents chimiques susceptibles de contaminer et de détériorer les fils du thermocouple, et plus spécialement le fil de platine pur qui est le plus vulnérable.

LES CÂBLES D'EXTENSION

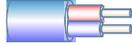
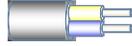
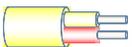
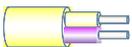
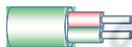
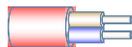
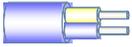
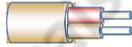
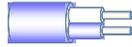
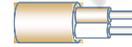
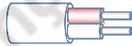
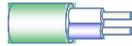
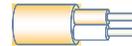
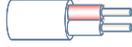
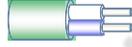
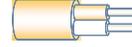
Les câbles d'extension permettent de prolonger les circuits de thermocouple jusqu'à l'appareil de mesure. Ils se présentent sous forme de câble électrique dont les conducteurs sont réalisés dans les mêmes matériaux que ceux de la sonde. Ils peuvent également être réalisés en matériaux complètement différents, mais de mêmes caractéristiques thermoélectriques dans une plage réduite de température (0 +80 °C). Dans ce cas, ils sont appelés câbles de compensation. Un exemple classique d'utilisation de câbles de compensation. Pour les thermocouples au platine dont le coût est élevé, il est nécessaire par souci d'économie, de prendre des câbles de compensation. Il faut cependant savoir que si on laisse la température du point de connexion augmenter, la mesure sera erronée. Autre exemple : les caractéristiques de sortie d'un thermocouple de type K peuvent être reproduites à basse température par l'association de conducteurs Cu et Cu-Ni. Etant donné que l'un des conducteurs est déjà en cuivre, le nombre des jonctions de référence est diminué de moitié, ce qui peut être un avantage dans le cas d'installations intégrant plusieurs thermocouples. De plus la résistance de boucle du câble de compensation est inférieure à celle de conducteurs de type K.

Faciles à mettre en place, même sur de longues distances, les câbles d'extension sont disponibles sous plusieurs formes. Lorsque le point de connexion à la sonde se situe à une température élevée (supérieure à 80°C), on évitera des erreurs de mesure en préférant un câble d'extension à un câble de compensation.



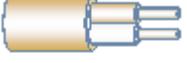
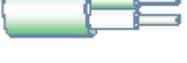
Avantages et inconvénients des thermocouple

Thermo-couple	Plage de température en °C		Ponts faibles	Points forts	Matériaux
J	-180	750	Fragile à basse température, dégradé en milieu oxydant en dessous de 400°C et sensible à l'humidité.	Très bonne tenue en milieu réducteur.	Fer (+) Constantan (-)
K	-180	1300	F.é.m. instable dans le temps. Dérive très rapide au-delà de 800°C	Bon en milieu oxydant, bonne plage de température, bon marché.	Chromel (+) Alumel (-)
T	-250	400	Limité en haute température. Fuite thermique due au cuivre.	Bien adapté aux basses températures. Très bonne précision.	Cuivre (+) Constantan (-)
E	-40	900		F.é.m. élevée.	Fer (+) Constantan (-) 55% nickel 45% cuivre
N	-270	1300	Peu connu	Bonne stabilité à haute température. Bon en milieu oxydant, bonne tenue.	Nicrosil (+) Nisil (-)
S	0	1700	Facilement contaminé, nécessite une protection.	Résiste bien à l'oxydation, bonne précision, tenue à haute température.	Platine 10% Rhodium (+) Platine (-)
R	0	1700	Identique au S	Identique au S avec une f.é.m. plus élevée et une stabilité plus forte.	Platine 13% Rhodium (+) Platine (-)
B	0	1800	Identique au S, mais une f.é.m. plus basse.	Identique au S avec une possibilité de pointe à 1800°C	Platine 30% Rhodium (+) Platine 6% Rhodium (-)

Thermo-couple					
J					
K					
T					
S					
R					



Tolérance des câbles d'extension et de compensation

Repérage	Type	Classe 1	Classe 2	Plage de température du câble en °C		T Max Jonction °C
	J JX (extension)	± 1,5°C	± 2,5°C	- 25	200	500
	K KX (extension)	± 1,5°C	± 2,5°C	- 25	200	900
	T TX (extension)	± 0,5°C	± 1°C	- 25	100	300
	E EX (extension)	± 1,5°C	± 2,5°C	- 25	200	500
	N NX (extension)	± 1,5°C	± 2,5°C	- 25	200	900
	K KCA (compensation)		± 2,5°C	0	150	900
	K KCB(compensation)		± 2,5°C	0	100	900
	N NC(compensation)		± 2,5°C	0	150	900
	S SCA (compensation)		± 2,5°C	0	100	1000
	S SCB (compensation)		± 5°C	0	200	1000
	R RCA (compensation)		± 2,5°C	0	100	1000
	R RCB (compensation)		± 2,5°C	0	200	
	B BC (compensation)					

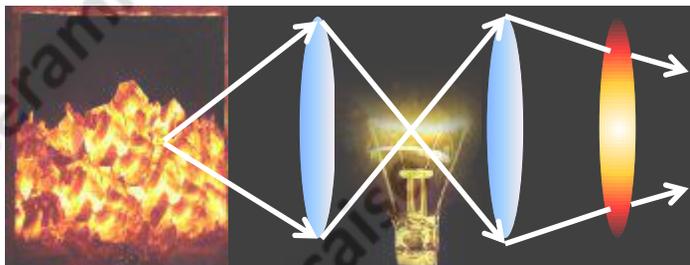
PYROMÈTRES OPTIQUES

Suivant les appareils, le principe de mesure diffère. Les lunettes à radiation totale mesurent l'énergie rayonnée dans son ensemble, tandis que les pyromètres monochromatiques mesurent la brillance dans une longueur d'onde ($0,65 \mu\text{m}$, soit le domaine du rouge).

Dans le dernier cas, ces appareils existent en deux versions :

Le filament est alimenté par un courant I maintenu constant. L'égalité des brillances est obtenue par la variation de celle de l'image de la source visée, au moyen d'un dispositif à absorption réglable.

Dans les deux cas, c'est l'œil de l'opérateur qui apprécie l'égalité des brillances. Lorsque celle-ci est obtenue, le filament semble avoir « disparu » de l'image visée, d'où le nom de pyromètre à disparition de filament.



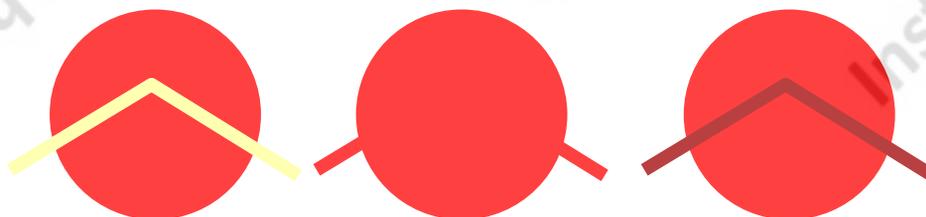
Pyromètre Infrarouge Portable pour Haute Température



Pyromètre à disparition de filament

•L'émittance monochromatique de l'image de la source est comparée à celle d'un filament qui a été étalonné à l'aide d'un corps noir. Le filament est alimenté en intensité variable et "à l'œil nu", l'égalité des émittances est recherchée, pour une longueur d'onde précise que laisse passer un filtre.

•Trois cas sont repérables par l'observateur (T_F et T_S températures du filament et de la source respectivement).



Le filament apparaît en plus clair.

Le filament disparaît sur la couleur de fond de la source.

Le filament apparaît en plus sombre

CONTRÔLE DES PRESSIONS

Différents moyens de mesurer les pressions

Le contrôle des pressions peut être de deux sortes :



Contrôle des pressions dans l'enceinte du four, qui intéresse principalement les utilisateurs de fours tunnel où les différentes zones de cuisson ne doivent pas se déplacer. En effet, les variations de charges des wagonnets ou les variations de cadences peuvent emporter la zone de feu en aval de sa position normale et, de ce fait, perturber la courbe initiale de montée en température. Un des moyens simples de recaler celle-ci sera de jouer sur les registres d'évacuation des fumées.



Contrôle des pressions des différents flux gazeux, qui intéresse l'ensemble des utilisateurs de gaz, comburants ou combustibles. En effet, afin de maîtriser les quantités injectées dans les organes de cuisson, la mesure de pression, transformée mathématiquement, permet de connaître les proportions exactes de chaque constituant afin d'obtenir un mélange brûlant dans les meilleures conditions économiques et qualitatives. De plus, avec les nouveaux types de brûleurs à haute vitesse, les effets de vitesse de la flamme sont liés au débit de gaz et d'air, donc également à leur pression.

Les déprimomètres

Le type le plus simple consiste en un tube coudé en U, contenant un liquide coloré. Entre les deux branches du U se trouve une réglette graduée mobile, la mobilité permettant la mise à 0 rapide. L'une des deux extrémités reste à l'air libre, c'est-à-dire à la pression atmosphérique, tandis que l'autre est reliée soit à l'intérieur du four, soit à la conduite où la pression doit être mesurée. La pression ou dépression sera donnée par la différence de niveau dans les deux tubes. Compte tenu du peu de précision de ce genre d'appareil pour la mesure de basses pressions, il a été mis au point un appareil avec un tube gradué incliné. En effet, si la pression, elle, ne varie pas entre l'appareil en U et celui-ci, par contre la précision est augmentée. La différence de hauteur entre les deux tubes dépend de la densité du liquide utilisé (mercure, eau, etc.) ceci explique pourquoi la pression peut être indiquée en [mm d'Hg](#) (mercure) ou de [mm de CE](#) (colonne d'eau).



CONTRÔLE DE L'ATMOSPHERE DU FOUR

On a pu constater que l'atmosphère de cuisson était un des facteurs à maîtriser afin de pouvoir reproduire une cuisson dans les meilleures conditions possible. De plus, le réglage optimal de l'atmosphère d'un four représente un facteur économique non négligeable.

En déterminant de façon théorique, ce que devait être la cuisson idéale pour la combustion, les différentes proportions, des produits de combustion contenus dans les fumées sont alors connus.

Par simple contrôle de ces proportions, il sera possible de déterminer si les réglages du mélange air/gaz sont constants ou qu'ils ont été bien définis.

Afin de pouvoir contrôler les proportions, il sera procédé à un prélèvement dans l'enceinte du four ou dans les conduits de cheminée, en notant avec précision les températures. Une fois le prélèvement effectué, l'échantillon doit réagir chimiquement ou électroniquement.



Principe de fonctionnement du fyrite

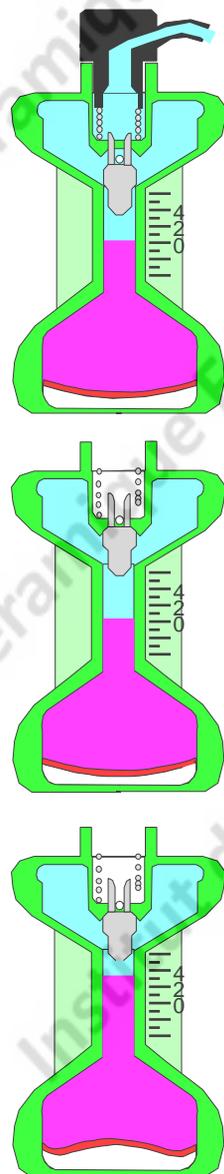
Pour effectuer un contrôle avec le fyrite, le gaz à tester est introduit le tube métallique de prise d'échantillon, fixé à l'une des extrémités du tube de néoprène. Le bouchon de raccordement est ensuite appuyé, se trouvant à l'autre extrémité, sur la soupape à ressort en haut de l'instrument. Ceci ouvre le passage dans le réservoir supérieur et obture en même temps le tube central. La poire est pressée dix-huit fois pour envoyer l'échantillon dans le réservoir supérieur. À la dernière pression sur la poire, on enlève le doigt du bouchon de raccordement qui automatiquement, fait retourner à sa position, contre son siège supérieur, la soupape à plongeur.

Les 60 cm³ du gaz échantillon se trouvent alors enfermés dans le fyrite et, le réservoir supérieur étant ouvert, le gaz échantillon peut aller par le tube central vers le liquide absorbant. Le fyrite est retourné deux fois à 45°, ce qui oblige l'échantillon de gaz à barboter à travers le liquide, lequel absorbe le dioxyde de carbone (CO₂) ou l'oxygène (O₂). L'instrument est remis à la verticale.

L'absorption du gaz à tester par le liquide absorbant crée une aspiration, obligeant le diaphragme de la partie inférieure à se soulever et permettant au liquide de s'élever dans le tube central en quantité égale au gaz absorbé.

La lecture de l'échelle au sommet de la colonne de liquide représente le pourcentage en gaz recherché dans l'échantillon testé.

Après deux à trois prises d'échantillons, les mesures risquent d'être faussées, le liquide absorbant étant saturé en gaz. Il convient alors de le laisser reposer pendant plusieurs heures avant de réitérer l'opération.



ENFOURNEMENT

L'enfournement consiste à disposer dans un four le plus grand nombre possible de pièces.

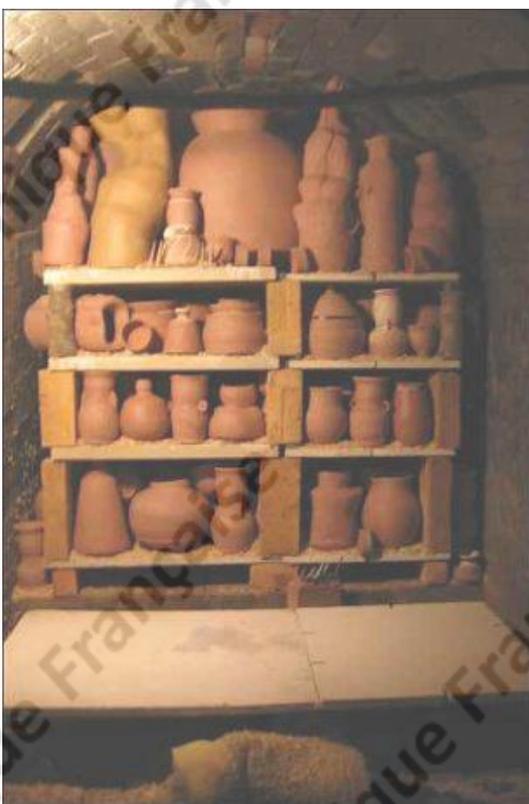
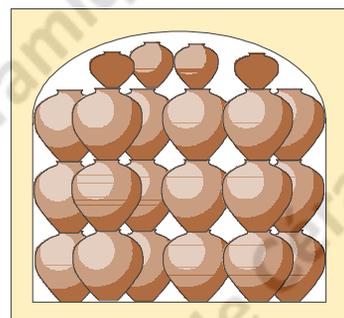
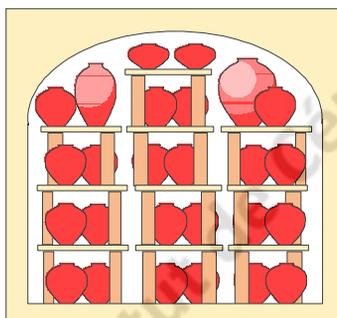
Il faut cependant différencier par la densité d'enfournement les produits à biscuiter ou à dégourdir des produits à émailler. Dans le premier cas, les pièces peuvent être disposées les unes sur les autres pour former des piles réduites compatibles avec la cohésion en cru de la pâte. Dans le second cas, les pièces émaillées sont disposées les unes à côté des autres en laissant un espace suffisant pour éviter le collage dû à leur dilatation pendant la cuisson et à l'ébullition des émaux.

Une trop forte densité de chargement génèrerait le tirage, ralentirait la vitesse de montée en température, et l'homogénéité des températures dans le four serait plus longue à réaliser.

Il existe trois types d'enfournements :

ENFOURNEMENT EN CHARGE

Ce genre d'enfournement est employé lorsque la solidité des produits permet de supporter la charge sans risque d'écrasement. Les pièces sont donc empilées les unes sur les autres. Ce type d'enfournement est très utilisé pour la cuisson des briques de terre cuite ou réfractaire, des tuiles, des poteries horticoles, du carrelage rustique... (surtout pour les produits à faible valeur ajoutée où le coût de la cuisson rentre pour une forte proportion dans le prix de revient). Pour faciliter le tirage lors de ce genre d'enfournement assez dense, on ménage dans la charge à cuire des canaux ou passages permettant à l'air et aux produits de la combustion de circuler.



ENFOURNEMENT EN PLANCHER

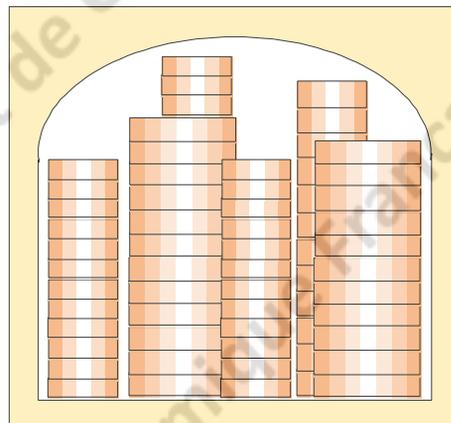
Certainement le plus employé dans l'industrie céramique, ce mode d'enfournement est imposé par trois facteurs qui sont

- Les risques de collage des pièces.
- La faible résistance mécanique de la pâte.
- La forme des pièces, qui ne permet pas toujours l'empilage.

Le four est composé d'une série de plaques ou planchers rigides, supportés par des piliers ou colonnes. Les pièces sont disposées les unes à côté des autres ou en piles pour la cuisson biscuit. Les plaques sont généralement engobées (recouvertes d'un enduit réfractaire friable) ce qui permet le décollage d'une pièce émaillée même si sa glaçure a coulé sur le plancher. On trouve maintenant des plaques et des piliers de toutes formes et de toutes dimensions grâce aux réfractaires tels que le carbure de silicium.

ENFOURNEMENT EN GAZETTES

Les gazettes sont des boîtes en matières réfractaires dans lesquelles on dispose les pièces à cuire. Elles sont enfournées en charge. Généralement de forme circulaire, elles sont parfois adaptées à la forme des produits. Utilisées jadis contre les cendres et les fumées des combustibles liquides ou solides, elles permettent aujourd'hui de cuire les pièces en toute protection des produits de combustion ainsi que des pollutions minérales venant des réfractaires du four, mais elles permettent également un enfournement plus dense en pièces par rapport à une cuisson en plancher.



Récupération de la chaleur lors du refroidissement

Lorsque cela est possible, le refroidissement des produits céramiques cuits est accéléré en forçant l'air à circuler à travers ces produits dès la fin de la zone de cuisson. Cette opération produit d'importants volumes d'un air propre et chaud, dont une majeure partie provient du four grâce à l'action d'un ventilateur et est utilisée pour le séchage. Cette méthode de récupération de la chaleur est particulièrement efficace pour un four tunnel.

Triage, conditionnement et stockage

Le triage et le conditionnement peuvent encore être des opérations manuelles, comme c'est le cas pour certains types de briques en argile, de tuiles et de produits réfractaires profilés, ainsi que pour la vaisselle de table et les objets décoratifs. Toutefois, un contrôle plus strict de la cuisson a permis de réduire considérablement le nombre de déchets de casse ces dernières années, et la tendance est aujourd'hui de s'orienter vers des systèmes plus automatisés. Même la couleur peut désormais être mesurée au moyen d'instruments, ce qui est important dans le cas des carreaux céramiques. Puisque leur enfournement présente très peu de déchets, les briques et blocs en argile sont consolidés mécaniquement sous forme de paquets prêts à être emballés sous film rétractable - le client acceptant la possibilité qu'il y ait 1 à 2 % d'articles imparfaits.

Les produits céramiques de forme régulière, tels que les briques, les blocs, les tuyaux et les systèmes réfractaires sont généralement liés sous forme de paquets de formats standards qui sont ensuite souvent emballés dans du polystyrène et peuvent être palettisés.

Les produits céramiques qui ont le plus de valeur, telle que la vaisselle de table et les objets décoratifs, exigent un examen et un tri rigoureux suivis d'un emballage de protection perfectionné. Les produits réfractaires non profilés, au contraire, sont généralement simplement pesés et ensachés puis palettisés.

DIFFÉRENTS RÉFRACTAIRES

Gazette à carreaux



Plaque en carbure de silicium



Boîte gazette



Trépied pour assiette

Institut de Céramique Française



DÉCORATION

BUT DE LA DÉCORATION

Au-delà de toutes considérations techniques, un objet en céramique a un côté esthétique, décoratif ressenti par la vue ou le toucher. Un objet céramique est porteur d'une certaine expression du « créateur », que ce soit l'expression forte de l'artiste, celle de l'artisan ou, celle plus diluée, de l'industriel pour qui le côté pratique, résistance mécanique, résistance à l'usure a beaucoup d'importance. Un objet céramique doit aussi toucher la sensibilité esthétique de l'acheteur, de l'utilisateur. La décoration s'intéresse à la forme de l'objet, à l'épaisseur, à la texture, au relief, mais aussi à la couleur de l'objet, uniforme ou non, et à son « décor », c'est-à-dire un dessin, un motif coloré apporté à un moment ou à un autre au cours de l'élaboration de l'objet.



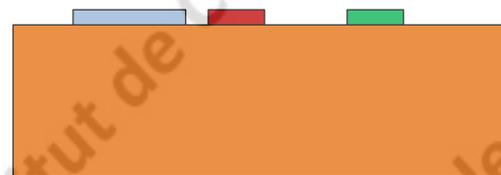
La décoration par la forme

La forme est donnée quand la pâte est plastique, au moment du **façonnage** et au début du séchage. Au cours du façonnage, il est possible de modifier la forme de l'objet en le déformant à la main ou à l'aide d'outils divers, en y faisant des empreintes, des incisions, des découpages à l'aide d'objets divers (**peignes, poinçons, couteaux, emporte-pièce, mirettes, ébauchoirs...**). Des éléments décoratifs peuvent être collés à la barbotine ou être garni d'anses, becs... Sur une pâte humide ou sèche, l'aspect de surface peut être modifié, par exemple gratter la surface d'une **argile chamottée** pour en faire ressortir le grain, ou bien, dans la technique de la **terre polie**, lisser la surface, lui donner un peu de brillance, avec un galet, une cuillère, un couteau...

Les différentes techniques de décoration sur céramique.

La décoration par la couleur

La couleur et l'aspect d'un objet dépendent du jeu de la lumière sur sa surface. Un objet éclairé reçoit une lumière à peu près blanche, c'est à dire formée de l'addition de toutes les lumières colorées du spectre. Au contact de la surface de l'objet, la lumière peut être réfléchiée, et cela donne un aspect brillant, ou diffusé et cela donne un aspect mat. La lumière peut traverser la surface, et cela donne de la transparence, ou ne pas la traverser et cela donne de l'opacité. La lumière peut être absorbée en totalité, et un objet noir est obtenu, ou pas du tout et cela donne un objet blanc, ou sélectivement, et cela donne un objet coloré (la couleur étant celle qu'il n'absorbe pas). D'une façon générale, une pâte céramique est plutôt mate et opaque, et un émail plutôt brillant et transparent, mais il est possible de modifier ces caractéristiques et facile de jouer avec la couleur.



Pose des engobes sur pâte crue.



Pose de la glaçure
pâte crue + engobe.



Cuisson pâte engobe ou pâte +
engobe + glaçure.

Les engobes

Un engobe est une **barbotine** argileuse. C'est pendant le séchage que peut se réaliser l'engobage des pièces céramiques. Le plus souvent, on le réalise lorsque la pièce est à « consistance cuir ». On applique l'**engobe** sur la surface d'un objet pour en cacher la couleur. Un objet en pâte céramique rouge recouvert d'un engobe blanc aura le même aspect qu'un objet en pâte céramique blanche. La pose de l'engobe se fait par trempage, aspersion, pistolet, pinceau ou poire. On peut y mélanger des oxydes ou des **colorants de masses** pour obtenir des engobes colorés.

Après sa pose, l'engobe peut être gravé avec une pointe et on réalise un décor, utilisant la technique dite « sgraffite ».

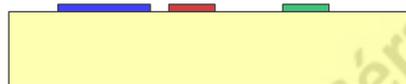


Les céramiques en «**terre vernissée**» traditionnelles sont constituées d'un support rougeâtre, d'un engobe clair, d'un décor aux engobes colorés et d'un émail au plomb.

Dans la technique de la «**terre sigillée**», on utilise des engobes débarrassées des grains les plus gros par décantation. L'extrême finesse des grains restants permet d'obtenir un aspect satiné.

Le décor sous couverte (sous émail)

Une fois la pièce biscuitée, on peut venir poser le décor en utilisant des **oxydes colorants** purs ou les nombreux colorants sous émail (mais aussi des couleurs sous couverte ou couleurs de grand feu ou couleurs à peindre) que proposent les fournisseurs. Ces colorants seront recouverts d'une couche d'émail transparent (couverte), qui donnera au décor une certaine profondeur.

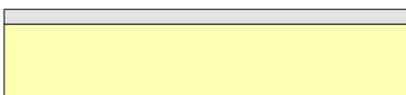


Pose de la couleur vitrifiable sur le biscuit



Émaillage de l'ensemble biscuit + couleurs

Cuisson émail et couleur à la même température



Émaillage du biscuit



Pose des couleurs sur l'émail cru



Cuisson simultanée de l'émail et de la couleur

Le décor sur émail cru

La pièce biscuitée est émaillée (le plus souvent avec un émail opaque). Le décor est posé sur cet **émail** cru, donc assez fragile, en utilisant des oxydes colorants purs ou des colorants industriels. Les couleurs sont généralement un peu plus vives que lorsque posées sous couverte.



La décoration sur émail cru permet tous les dégradés et les aplats de couleur et elle devient inaltérable en pénétrant dans l'émail à la cuisson.

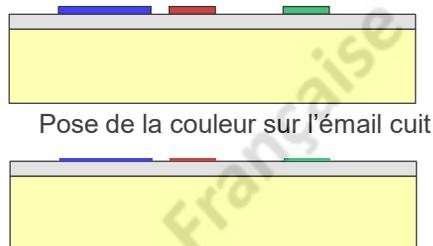
Le décor sur émail cuit

Un **émail cuit** peut recevoir différents types de décor, mais du fait de sa non-porosité, des liquides colorants visqueux sont souvent appliqués.

Un décor de petit feu peut être réalisé en utilisant des couleurs vitrifiables, qui sont en fait des **émaux colorés** fondant à basse température. Ces couleurs sont révélées et fixées dans une troisième cuisson en oxydation (entre 700 et 800°C), au cours de laquelle l'émail de fond n'est pas modifié.

Un décor de grand feu peut être réalisé en utilisant des émaux colorés qui seront cuits à une température égale ou un peu inférieure à celle à laquelle a cuit l'émail de fond. Des décors d'**émail cloisonné** seront réalisés sur des carreaux, en remplissant d'émaux colorés des zones délimitées par un trait de cloison (gutta), éventuellement coloré.

Un décor de **lustre** peut être réalisé à base de métaux précieux (or, platine, argent). Des liquides «résinates» sont utilisés et ils contiennent environ 10% de poudre de métal. Après cuisson en oxydation entre 700 et 800°C, une fine couche métallique est obtenue accrochée à l'émail de fond. Quelques teintes à reflets métallisés et des aspects métalliques d'or ou de platine sont également réalisés. Il existe des produits permettant d'obtenir des effets irisés, nacrés, craquelés ou marbrés. Certains reflets lustrés peuvent s'obtenir par réduction (lustres persans ou mauresques, lustres de raku).



Cuisson décor à plus basse température que celle de l'émail. Suivant la température de cuisson décor, la couleur est plus ou moins incrustée dans l'émail et donc plus ou moins inaltérable.



Petit feu

Grand feu

Techniques de pose

Le mélange de colorant et de liquide porteur est appliqué sur une surface et les techniques de pose sont très variées, simples ou complexes, artisanales ou industrielles, anciennes ou très récentes, essentiellement manuelles ou très mécanisées.



Techniques artisanales

Le décor peut être réalisé de façon très libre, à **main levée**.

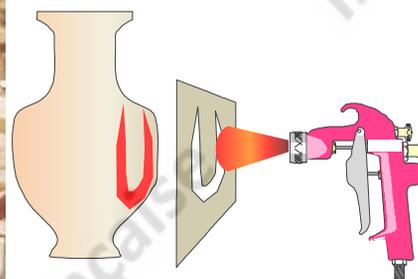
Le décor peut être plus géométrique : des **filets** et des bandes colorées, faisant tout le tour des pièces rondes, peuvent être réalisés après avoir centré et calé la pièce sur une tournette.

Les « diviseurs » permettent de séparer rapidement les pièces en quartiers égaux.

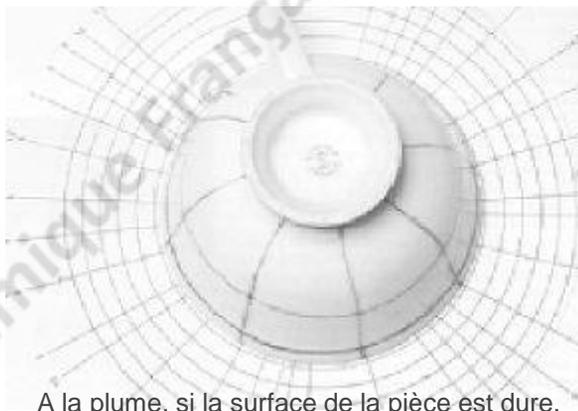


Le **décor** peut être plus «cadré», pour être réalisé rapidement et de façon exacte, et reproduit à l'identique sur plusieurs pièces. Pour cela un «poncif» piqueté selon les traits du décor, peut être utilisé et qui sera reporté sur la pièce à l'aide de poudre de carbone (ou amidon pour les pièces sombres).

Un pochoir ajouré peut être utilisé selon le décor désiré. Le **pochoir** peut être en carton, plastique ou en métal, il peut être plat ou avoir la même forme que la pièce à décorer.



Le liquide coloré peut être posé sur la pièce de plusieurs façons. Au **pinceau**, en martre, petit gris ou synthétique, à poils durs ou souples et de formes très diverses (pinceaux à peindre, traceurs, à filet, pinceaux pour fond, à putoiser...)



A la plume, si la surface de la pièce est dure.

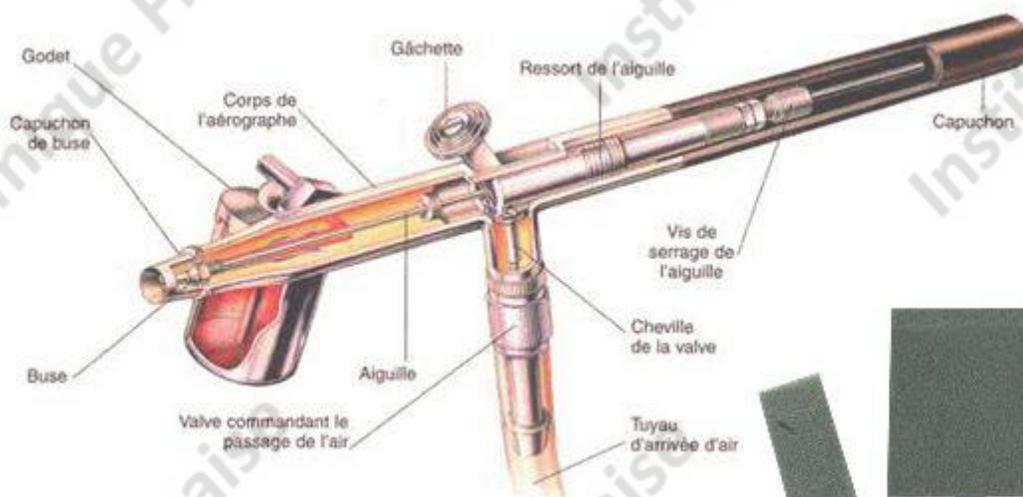


À la brosse dure, comme une brosse à dents, pour obtenir des effets mouchetés.

Au pistolet, aérographe ou chromographe, pour lesquels le liquide est propulsé vers la pièce en un brouillard de gouttelettes obtenu par de l'air comprimé. Selon les réglages (distance, pression d'air, débit de liquide, ouverture du jet), des effets variés peuvent être obtenus.



À la poire (ou au barolet) qui permet par pression des doigts de régler l'écoulement de la couleur. Technique utilisée avec des **engobes**.



Un décor d'éléments répétés peut être rapidement exécuté à l'aide d'éponges convenablement découpées ou de tampons portant en relief le décor voulu. Soit en venant tamponner, soit à l'inverse en enlevant de la couleur avec l'éponge ou le tampon propre, ou encore en travaillant avec une pointe, qui peut donner un décor en creux si le support est encore tendre.



Il est possible de faire un «**décor en réserve**», en dessinant sur la pièce avec un liquide chaud à base de paraffine et huile de paraffine, ou une matière plastique liquide contenant du latex. Par la suite, la couleur est étalée sur la pièce, qui ne s'accrochera pas sur les «réserves» et donne un «décor en négatif».

À l'inverse, un décor peut être réalisé sur la pièce avec un liquide collant, puis en saupoudrant du colorant en poudre, qui ne s'accrochera que sur les parties collantes.

Il est possible de réaliser un décor ayant un léger relief quand les colorants sont disposés dans des pâtes céramiques ou des émaux (technique de l'engobe, de l'émail cloisonné), mais un colorant posé pur et trop épais ne peut que provoquer des défauts, par manque d'adhérence.

Techniques industrielles

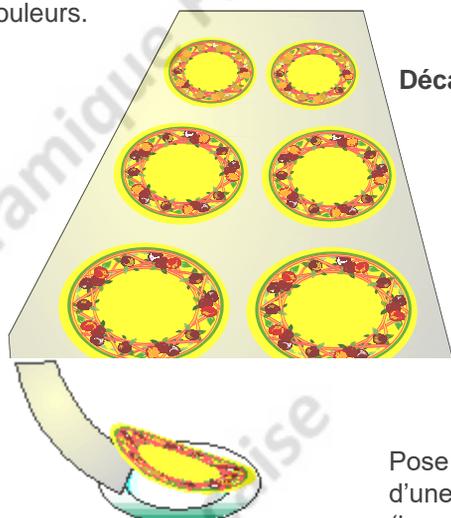
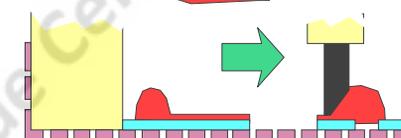
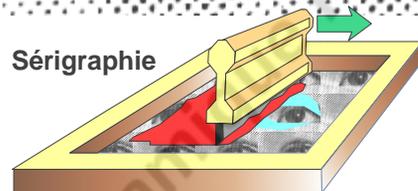
Il existe différentes techniques industrielles de décoration céramique.

Les **décalcomanies** ou «**chromos**» sont très largement utilisés pour les **décors céramiques**. Ils permettent de décorer rapidement de grandes séries de pièces. Ils sont obtenus en déposant sur des papiers spéciaux plusieurs couleurs céramiques, à l'aide d'écrans sérigraphiques ou de plaques offset. Les chromos utilisés sont (glissants) sur papier «simplex» recouvert de vernis «slide off». La décalcomanie est humidifiée dans l'eau pour que le papier et le vernis puissent se séparer facilement. Le chromo est appliqué sur la pièce céramique, après avoir éliminé la couche de papier et il faut ensuite chasser l'eau et les bulles d'air qui peuvent se trouver entre la pièce céramique et le décor, puis laisser sécher.

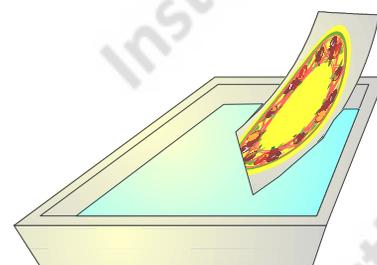
L'impression à la plaque gravée est également utilisée, la couleur céramique est déposée puis raclée sur une plaque ou préalablement a été gravé un dessin ou un texte. Sur la plaque est posé un papier de soie humide et l'ensemble est passé sous presse. Le papier qui porte sur lui le décor coloré est décollé. Le papier est posé sur la pièce céramique et la couleur est transférée sous la pression d'une roulette, ensuite le papier est retiré. Le décor obtenu est monochrome. Il est possible d'obtenir des tons plus ou moins foncés en faisant varier la quantité de couleur par la profondeur du creux de la plaque. Le décor obtenu peut être «rehaussé» par poudrage, ou enluminé au pinceau avec d'autres couleurs.



Sérigraphie



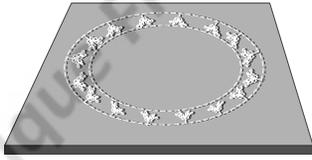
Décalcomanies Vitrifiables



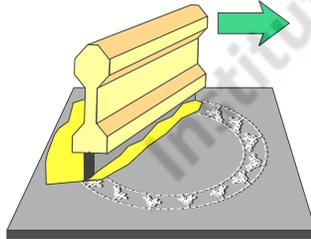
Pose de la décalcomanie à l'aide d'une raclette en élastomère (langue de chat).



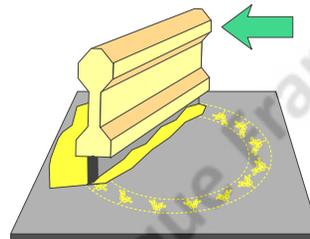
Transfert de décors par tampographie



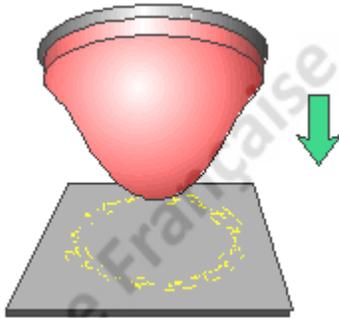
Gravure d'une plaque métallique selon le décor souhaité



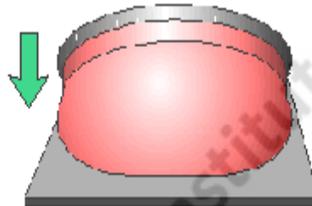
Remplissage de la gravure avec la couleur vitrifiable



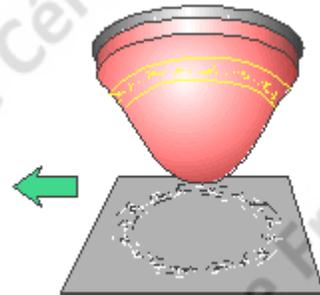
Suppression de l'excédent de couleur



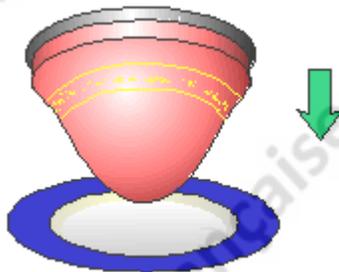
Descente de la bombe silicone



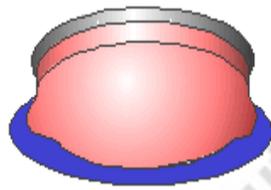
Écrasement de la bombe silicone sur la gravure



Relevage de la bombe silicone la couleur restant accrochée à celle-ci



Mise en place de la pièce à décorer et descente de la bombe silicone



Écrasement de la bombe silicone, la souplesse du silicone permet d'épouser la forme des pièces



Après relevage la couleur est restée accrochée à l'assiette, la bombe silicone est prête pour une nouvelle impression.

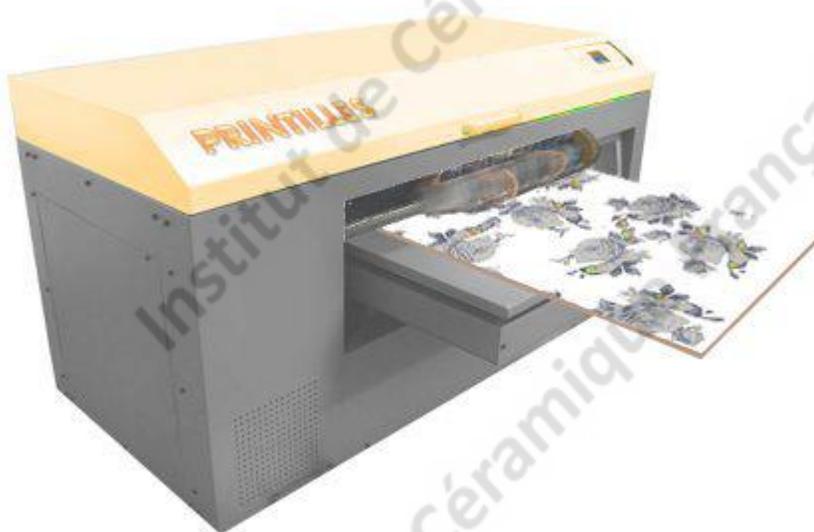
Techniques industrielles

Technique d'impression en ligne pour décoration des carreaux du type Rotocolor ou un rouleau en élastomère gravé selon le dessin choisi sera enduit de couleur. Ce rouleau viendra déposer le décor de façon aléatoire lors du passage du carreau.



Impression directe

Les techniques de décoration des carreaux s'apparentent aujourd'hui aux imprimantes domestiques, elles utilisent des pigments céramiques en lieu et place des encres organiques, selon le nombre de couleurs (minimum 4) et (jusqu'à 12), le rendu peut être après cuisson d'une qualité photographique, l'avantage est la rapidité d'exécution et surtout l'absence d'outillage spécifique à chaque décor comme dans les technologies précédentes.



Techniques industrielles

Frittage laser : après avoir déposé une couche de couleur sur un émail cuit, un laser viendra « balayer » la surface de cette couleur, la puissance du laser permet d'obtenir une température suffisante pour incruster la couleur thermiquement sur quelques microns dans l'émail. Cette technologie de cuisson peut également être adjointe à un robot qui permettra le déplacement du faisceau laser pendant la cuisson, permettant ainsi la création d'un dessin préenregistré de plus grandes dimensions. Cette technologie est essentiellement utilisée pour assurer le marquage des pièces céramiques, ou de verrerie.



Marquage direct sur acier



Le laser balaye la pièce de façon parallèle jusqu'à obtention du dessin complet.



DÉFAUTS

CŒUR NOIR

Ce défaut provient de la mauvaise combustion des matières organiques contenues dans les matières premières et notamment dans les argiles, ces matières organiques sont plus ou moins anciennes, certaines sont encore à l'état de végétaux alors que d'autres, plus anciennes sont déjà à l'état de charbon. Cette différence induira un début de combustion décalé, alors que les premières amorcent leur combustion à partir de 250 °C jusqu'à 450 °C ; le charbon lui commencera sa combustion vers 450°C, sa compacité rendant sa combustion plus difficile.



Cœur noir apparaissant dans des pots horticoles cuits en piles.



Apparition de bulles dans un carreau de terre cuite.

La combustion de ces matières organiques sera provoquée par l'élévation de la température durant le cycle de cuisson, mais sera rendue possible que par une grande proportion d'oxygène dans les gaz de combustion (création de CO₂) habituellement la proportion d'oxygène est suffisante pour brûler ces matières organiques, à condition que les gaz puissent pénétrer au cœur de la matière, cette pénétration peut être ralentie pour les raisons suivantes:

- La surface de la pâte a commencé sa vitrification avant que l'oxygène puisse pénétrer.
- La pâte est trop épaisse.
- Pas assez d'aération entre le produit et la plaque réfractaire.
- Densité d'enfournement trop importante (mauvaise circulation des gaz).
- Retard de combustion dû à l'augmentation de l'absorption de chaleur pour évaporer un surplus d'eau de façonnage.
- Cycle de cuisson trop rapide.



Fond d'un réservoir en vitreous enfourné avec trop d'humidité.



Gonflement et éclatement d'un carreau de terre cuite sous l'effet de l'emprisonnement des gaz

Le défaut se traduira par l'apparition d'une couleur noire dans l'épaisseur ou sur l'extérieur dans le cas où les pièces étaient empilées très serrées (briques par exemple), cette couleur n'est que la trace de carbone non transformé en CO₂, celui-ci en se combinant aux autres matériaux pourra créer du carbure de silicium rendant les pièces très difficiles à couper, la réoxygénation par une deuxième cuisson ne donne pas toujours d'excellents effets, le carbone contenu dans le cœur du matériau pourra se réoxygéner se transformer en CO₂ et ressortir à travers la couche d'émail (faisant donc buller celui-ci) sans toutefois disparaître complètement.

Dans les cas extrêmes, le gaz sous pression pourra faire gonfler la pièce

Ce phénomène a été utilisé et amplifié pour aboutir à la technologie d'obtention de l'argile expansée, argile dans laquelle il a été ajouté des matières organiques et qui sera jetée sous forme de granulés dans un four porté à haute température.



Argile expansée

FENTES

Les fentes rendent pratiquement impropre à son usage n'importe quel produit céramique, leurs origines sont extrêmement diverses, mais sont toujours provoquées par un changement d'état physique mis en œuvre de façon hétérogène. Les trois grands changements d'état sont provoqués par des différences de retrait pendant la phase de séchage (parfois dans le cas contraire de gonflement par une humidification, émaillage sur cru par exemple) ; les retraits et dilatations provoqués pendant la cuisson et les phénomènes de désaccord de dilatation pendant leur usage (chocs thermiques) (chocs mécaniques). Couramment, les fentes sont de plus en plus nettes et franches au fur et à mesure qu'elles apparaissent tard dans le processus. Pour arriver à déterminer l'origine d'une fente, il convient donc de bien observer son apparence et de connaître «l'histoire» de la pièce et de tout ce qui a pu provoquer des hétérogénéités dans sa production (positionnement décalé dans le four, courant d'air sur les chariots ...)

Dans les pages qui suivent, vous trouverez quelques exemples classiques de fentes et de leurs causes, mais cette liste n'est ni exclusive ni exhaustive.

Fente pendant la cuisson biscuit, les piles d'assiettes dépassaient de la charge du four, l'apparition des fentes se fait à cause du brûleur dont la flamme lèche les produits pendant la montée en température, les fentes se poursuivent pendant le refroidissement lorsque l'air froid pulsé par le brûleur vient également lécher les produits.



Fente de séchage apparue très tôt dans la phase de séchage d'une assiette calibrée, origine de la fente, décalage du moule de façon excentrée par rapport à la buse de séchage.



Fente provoquée par un choc thermique à la descente en température, amplifié par l'utilisation d'un émail tressaillant (des pièces bicolores ayant un émail écaillant à l'intérieur et un émail tressaillant à l'extérieur, ou plus simplement émaillées uniquement à l'extérieur (pied de lampe) peuvent être victimes de fentes dues à la tension de l'émail). Les fentes dont le positionnement et/ou la morphologie semblent aléatoires sont souvent provoquées par un choc thermique ou par la tension du revêtement.



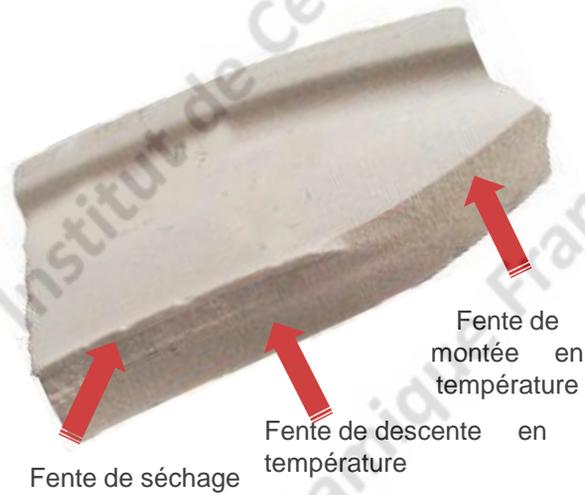
Les fentes peuvent prendre plusieurs noms selon le moment de leur apparition ou plus simplement selon le type d'entreprises dans lesquelles elles apparaissent, les mots les plus courants sont, fentes, fissures, gerces, criques, filage... (fentes et fissures sont des termes génériques, gerces et criques sont des termes utilisés dans le domaine du sanitaire et qualifient de petites fentes naissant au début du processus dans les premiers temps du démoulage ou du raffermissement.

Jamais une fente n'aura tendance à se refermer, les transformations physico-chimiques aval ne feront qu'accentuer le défaut, beaucoup de fentes sont cependant réparables (d'autant plus facilement qu'elles sont détectées tôt).

Si les fentes ne font que s'amplifier au fur et à mesure du processus, il n'est donc pas rare de voir des fentes se prolonger selon des structures et des effets de surface différents au fur et à mesure de leur évolution dans le processus.

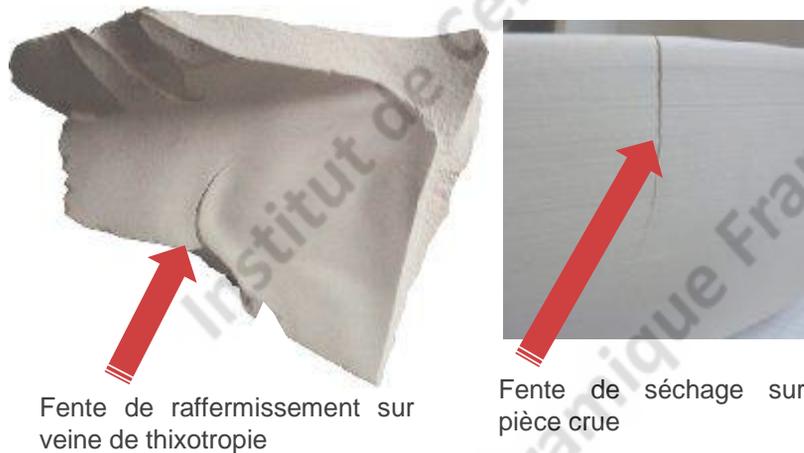
Habituellement, les fentes provoquées avant que la pièce soit sèche sont très déchirées et s'ouvriront au fur et à mesure du séchage. Une fente provoquée mécaniquement sur une pièce sèche laissera apparaître un état de surface granuleux sans ouverture. Mais, ces premières causes pourront donner naissance à des fentes s'ouvrant pendant la montée en température du cycle de cuisson en gardant un aspect très granuleux, mais devenant d'apparence plus lisse jusqu'aux fentes de filage dont l'aspect sera celui d'une casse provoquée mécaniquement.

Après cuisson, ce filage n'est pas toujours visible à l'œil nu et est souvent révélé par une sonorité plus grave de la pièce.



Fente provoquée entre la phase de raffermissement et la phase de démoulage d'une pièce coulée, la fente s'est produite sur un raccord de flux de barbotine qui a dans un premier temps provoqué une veine de coulage liée à une déclassification granulométrique de la barbotine engendrant ainsi des différences de retrait.

Ce phénomène a été provoqué par l'utilisation unique de déchets crus pour la composition de la barbotine.



Fente provoquée pendant la phase de coulage d'une barbotine insuffisamment dense, le retournement après revidage est intervenu trop tôt laissant une couche de barbotine et d'eau dans le fond de la pièce, les différences d'humidité sont à l'origine des différences de retraits provoquant la fente.

Fente provoquée pendant la phase de coulage, le remplissage de cette pièce entre deux plâtres a été effectué par une nourrice située au centre du moule, le pied plus épais n'a pas pu être suffisamment nourri ni revidé, la barbotine emprisonnée dans la gourme du pied a pris plus de retrait que le gâteau provoquant ainsi de petites fentes très déchirées.



Fente en «S» provoqué par un mauvais resserrage de l'ébauche lors de sa sortie de l'extrudeuse, peut être accentué par une inversion du sens de dépose de l'ébauche sur le moule, ce défaut sera également provoqué par un calibrage défectueux au centre de la pièce et par une pâte trop dure.





Fentes provoquées par une réhumidification trop importante lors de la finition et du tamponnage à l'éponge, la pâte crue à regonfler ponctuellement suite cette à l'absorption d'eau. Ce gonflement hétérogène a provoqué les fentes, celles-ci ont été rendues visibles grâce à l'émail blanc qui est entré dans la fissure pendant la cuisson.

Il est possible de remarquer après avoir cassé la pièce sur une fente, un léger changement de structure à l'endroit de la fente, c'est la preuve du déchirement provoqué par le gonflement.



Lorsqu'une fente apparaît avant la phase de fusion de l'émail, celui-ci lorsqu'il entre en fusion entrera dans la fente laissant des bords très arrondis et parfois d'une couleur moins soutenue ou différente, ce sera là une façon simple de reconnaître le moment d'apparition d'une fente pendant la cuisson d'une pièce émaillée.



Fentes provoquées par un séchage trop rapide.



DÉFAUTS DE COLORATIONS



Différences de coloration provoquées par un changement de la formule de base de l'émail transparent. En effet, la qualité et la quantité de colorant restaient identiques, seuls les composés de la base changeaient, les rendus les plus bleus étaient obtenus avec des émaux contenant beaucoup de soude, au fur et à mesure où le transparent de base s'enrichissait en silice la couleur virait au vert dans d'autres formulations de base, l'effet du colorant était pratiquement inexistant.

Un effet pratiquement identique en apparence, cet émail blanc a subi une coloration à base jaune et bleu de vanadium, la couleur originelle est celle de gauche, c'est un vert clair, couleur amande, à la suite d'un dérèglement de brûleur, une zone d'environ 1m^3 du four voyait son atmosphère devenir réductrice, ce qui avait pour effet de détruire le colorant jaune au profit du bleu qui restait seul (échantillon de droite) les différents échantillons représentent la dégradation graduelle de l'atmosphère par perte d'air sur un brûleur au fur et à mesure du déchirement du tuyau d'air à chaque ouverture et fermeture de la porte du four.



Défaut de jaune ou jaune de four, essentiellement concentré sur les pièces en porcelaine, la blancheur de la porcelaine est due à la blancheur de sa pâte, l'émail est lui transparent, mais la blancheur de la porcelaine ne peut être obtenue qu'à travers une cuisson réductrice seule capable de réduire l'oxyde Fe_2O_3 de couleur brun jaune en Fe_3O_4 de couleur bleu vert, cette modification permettra à la porcelaine d'avoir des nuances plutôt bleutées que jaunies.



Défaut de coloration rose sur pièces émaillées avec un blanc à l'étain, ici le blanc à l'étain est pollué avec une partie des composants d'oxyde de chrome volatilisé sous l'effet de la température, souvent les émaux foncés comme les noirs contiennent de fortes proportions de chrome dont une partie est gazéifiée et vient se déposer sur les pièces émaillées et sur les réfractaires, le chrome peut alors avec l'étain créer une coloration à base de chromate d'étain de couleur rose, ce défaut peut se produire pendant la cuisson mixte de chrome et d'étain, mais il peut également apparaître sur une cuisson de blanc après une cuisson de noir, les gaz de chrome ayant percolé dans les réfractaires lors de la première cuisson seront de nouveau gazéifiés lors de la deuxième cuisson de blanc, une cuisson fantôme avec du biscuit peut résoudre ce problème.



Dans ce cas, il s'agit de colorations parasites liées à la migration de sels vers la surface de la pâte, ici le cas d'une faïence très riche en sel de vanadium qui ont migré en surface pendant la phase de séchage, ils se sont ensuite mélangés à l'émail transparent et ont donné un effet jaune sur le pourtour de la pièce, là où la sortie des sels avait été la plus concentrée, ce défaut est assez régulier dans les pâtes fortement colorées, pâtes noires notamment.



Dans le cas de recuissons, après une retouche d'émail, il est souvent constaté une différence de couleur entre l'original et la retouche, la plupart du temps la différence n'est pas aussi marquée que sur l'échantillon, mais la retouche paraît souvent la plus foncée (perte du pouvoir colorant au fur et à mesure de l'élévation de température ou de la durée de la cuisson).

La majorité des défauts de coloration se révèle sous forme de petites taches provoquées par de petites impuretés métalliques disséminées la plupart du temps dans la masse des matières premières de la pâte, dans un deuxième cas, ce seront des impuretés qui seront générées par des éléments de l'environnement extérieur (limaille de fer de meulage, oxyde de cuivre des canalisations d'eau), mais qui peuvent également être générés par certaines bactéries capables d'emmagasiner des traces d'oxyde de cobalt dans les conduites de barbotine et de relâcher par à-coup des quantités suffisantes pour polluer des batchs entiers de matières premières. Il est possible également de trouver des traces de métal, tels le magnésium ou le calcium qui restent prisonniers des filtres des stations d'épuration et qui peuvent libérer de grandes quantités de métal lors de leur remplacement.



Limaille de meuleuse dans la couche d'émail



Trace d'oxyde de cobalt pistolet mal nettoyé



Point de fer récupéré sur le déferreur du tamis émail.



Morceaux de fil de cuivre dans la masse d'émail



Trace de magnésium métal dans filtre à eau



Concentration de trace de cobalt originaire de la chamotte (battoir des broyeurs en acier au cobalt)



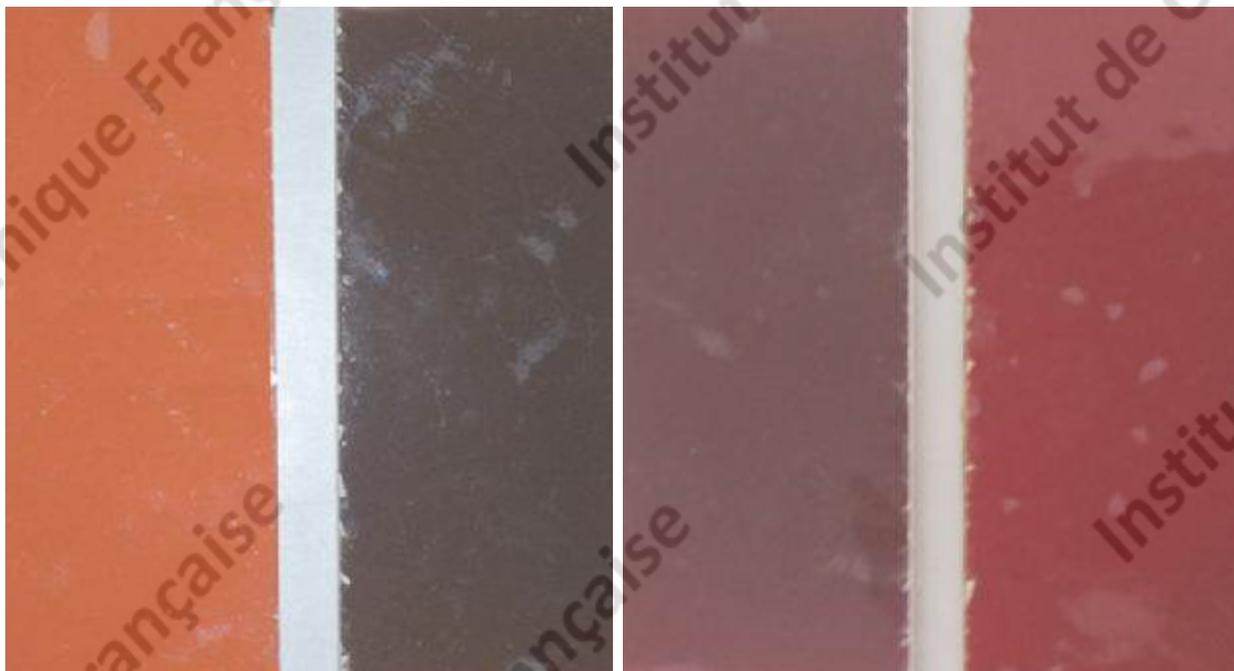
Traces métalliques dans émail rouge



Trace de cobalt dans une pâte de vitreous

Apparition de taches marron clair de façon aléatoire, sur des pièces émaillées en transparent en faïence calcaire, en fait il s'agit, la plupart du temps, non pas d'une apparition de taches brunes, mais plutôt d'un éclaircissement de l'émail autour ce qui a été repéré comme une tache, en effet sous l'effet d'un refroidissement lent certains émaux de faïence à base de calcium sont susceptibles de générer des cristallisations de wollastonite qui auront pour effet d'opacifier par endroit l'émail. Le contraste provoqué par l'apparition de ces zones plus claires donnera l'illusion que la coloration normale de l'émail transparent s'est assombrie.

Reconstitution du défaut sur une faïence noire, les échantillons 1 et 2 sont tous les deux émaillés avec le même émail transparent incolore, leurs montées en température sont identiques, seul le refroidissement diffère, sur l'échantillon 2, le refroidissement à duré environ 2h00 contre plus de 12h00 pour l'échantillon 1 laissant ainsi le temps à des cristaux de wollastonite de se reformer et venir occulter la transparence et donner un effet d'opacité de couleur beige.



Il est possible de constater ce genre de dérives de coloration sur les rouges et les oranges cadmium sélénium, qui dans certains cas de saturation ou de manque d'oxygénation, ne peuvent développer des couleurs vives, il est possible de considérer qu'il s'agit d'une espèce d'auto pollution. L'apparition de points plus foncés dans le rouge ou l'orange est souvent due à des particules de cadmium ou de sélénium mal broyées.

DÉFORMATIONS

Elles sont de nombreuses natures et trouvent leur naissance dans chaque transformation morphologique et chimique du produit, au même titre que les fentes, elles naîtront des hétérogénéités de la matière ou de la transformation, parfois comme en témoignent ces photos le simple fait de dépasser la température maximale de cuisson aboutit à des déformations pouvant aller jusqu'à la disparition complète du produit.

Dans le domaine du façonnage en pâte plastique, c'est les différences de contraintes mécaniques qui pourront faire naître des déformations. Dans le cas de la poterie, la pâte est malaxée plusieurs fois avant de commencer à donner naissance à une forme, ce malaxage a pour but d'assurer l'alignement des particules afin qu'elles puissent se déplacer les unes par rapport aux autres le plus facilement possible et se comporter de façon homogène face aux contraintes.



Dans une extrudeuse, le décentrage de la bouche d'extrudeuse par rapport à l'axe de l'hélice aura pour conséquence une flexion vers la droite ou la gauche de la forme extrudée.

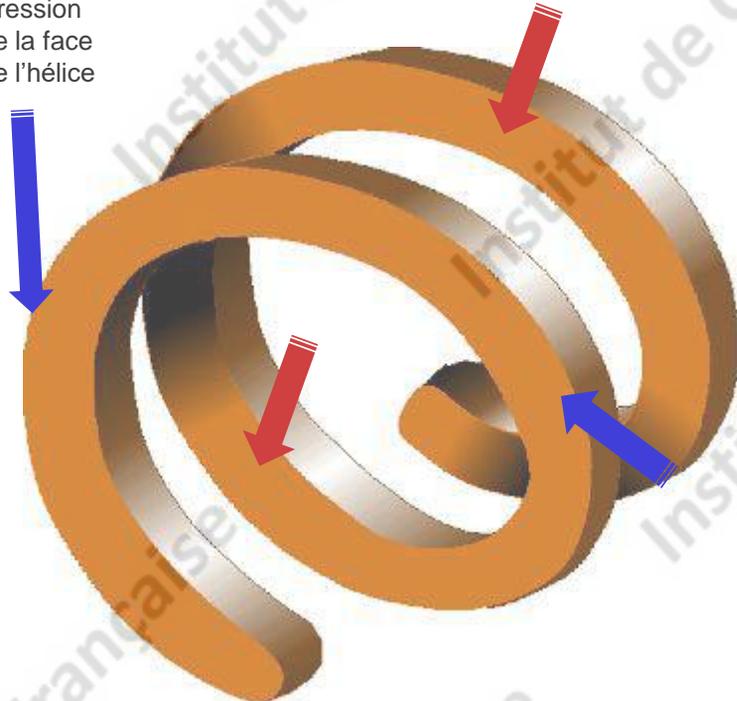


Défauts d'extrusion

Bien que les extrudeuses à vis soient le seul moyen connu de transformer des matières d'œuvre de formes diverses en pain de forme standard ou directement en brique, il n'en reste pas moins que c'est un moyen mécanique qui est à la base de nombreuses hétérogénéités dans le matériau final. Dans un premier temps, le frottement, provoqué par la périphérie du fût, ralentit énormément la vitesse de sortie du périmètre extérieur par rapport à l'axe de l'extrudeuse, le centre du pain est rempli de matière d'œuvre que dans les derniers centimètres donc beaucoup moins compressé que l'extérieur. En fait, si l'intégralité du métal d'une extrudeuse pouvait disparaître, il ne resterait que la matière première sous la forme d'un gros ressort.

Pression de la face de l'hélice

Pression du corps de l'extrudeuse

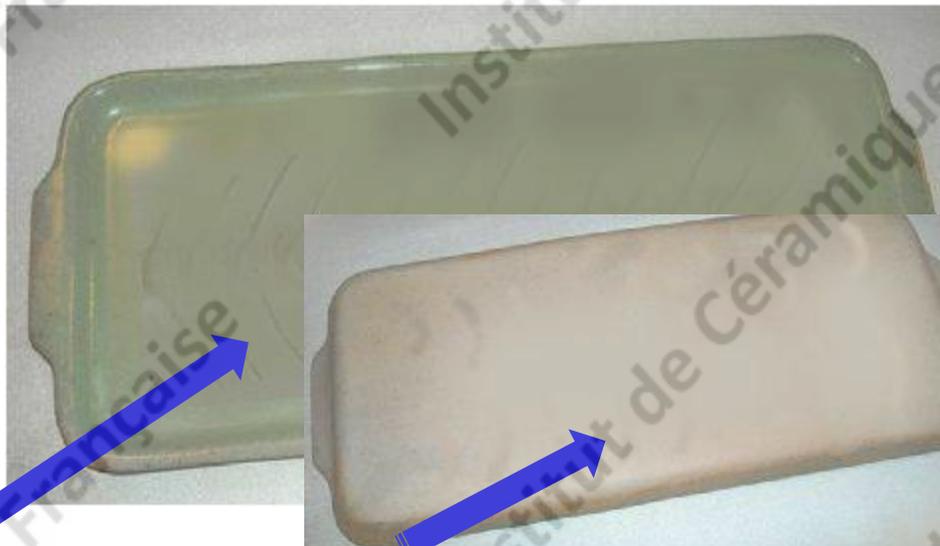


Ce «ressort» qui représente la forme «négative» de la vis de l'extrudeuse aura des différences de consistance très importantes, en effet, ces parois auront toutes été confrontées à un très important frottement au fur et à mesure de l'avancement de la matière dans la filière.

Si un pain de grès ou de porcelaine est coupé dans le sens longitudinal, en soumettant une «tranche» à des torsions successives, des marques apparaîtront telles des arêtes de poisson. Si cette ébauche est coupée perpendiculairement à l'axe, les déformations prendront la forme de spirale (correspondant à l'écrasement du ressort dans le cône de sortie), ces déformations se retrouveront sur toutes pièces confectionnées et elles seront plus marquées pour des pâtes vitrifiées, notamment émaillées avec des émaux blancs translucides ou colorés transparents.



Traces en spirales



Traces «arêtes de poisson» dues au frottement sur l'aile de l'hélice.



Boudin extrudé avec de la terre trop ferme.



Traces de différentes pâtes (mauvais nettoyage de la boudineuse).

DÉFAUTS DE COULAGE

Les défauts de coulage sont nombreux, le coulage est une des technologies les plus complexes qui soit, outre les spécificités liées à la rhéologie de la barbotine, beaucoup de défauts imputés à cette technologie sont en fait générés par une mauvaise conception des moules ou un non respect des normes établies.



Feuilletage dû à une surpression de la barbotine en coulage sous pression.

Mauvais remplissage, défaut de conception.



Dépression due à un manque de pression et de débit de barbotine dans le pied.



Fente due à une dépression dans le pied.

Mauvaise conception, impossibilité de continuer à nourrir le pied de la vasque lorsque la prise du bord est effectuée.



Veines de coulée provoquées par une thixotropie trop importante

De légères variations volontaires de rhéologie sont le seul moyen pour la couleur de pallier les différences de caractéristiques de l'air ambiant (température, et humidité de l'air ambiant), du vieillissement des moules et du cadencement de la production coulée (saturation des moules). Les paramètres rhéologiques doivent être maîtrisés à quelques % près afin de pouvoir s'assurer d'une constance des épaisseurs et des vitesses de prises.



Tasse coulée avec une pâte vitrifiée dont la thixotropie était inférieure à 10 degrés Gallenkamp (impossible de sortir la pièce pas assez d'épaisseur et pâte cassante)

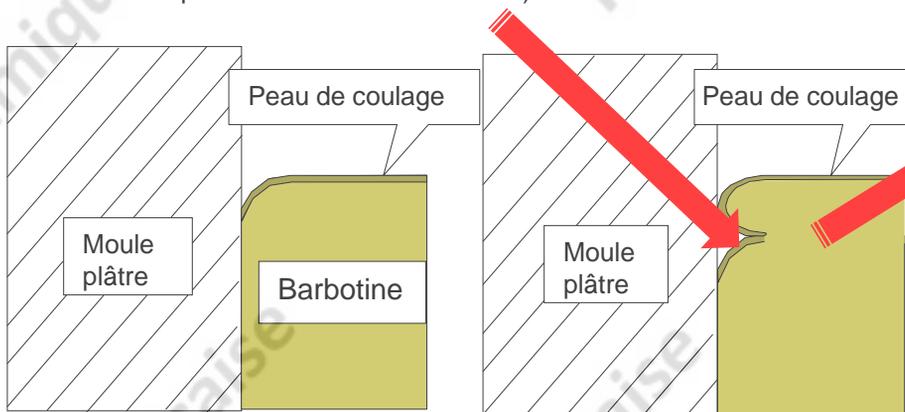


Tasse coulée avec une pâte vitrifiée dont la thixotropie supérieure à 180 degrés Gallenkamp (impossibilité de sortir la pièce faute d'un raffermissement suffisant)



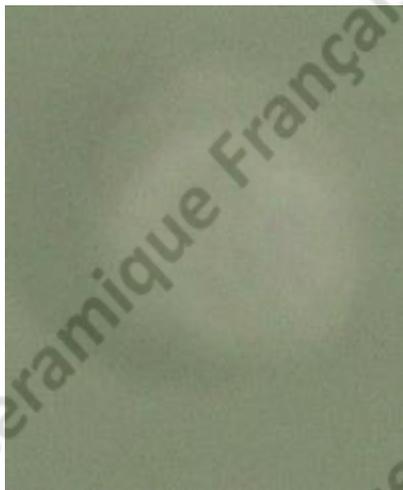
Les défauts qui vont suivre sont pratiquement impossibles à éliminer, ils sont notamment liés aux phénomènes de tension superficielle qui par ailleurs, rendent le coulage possible, il convient donc de bien connaître ce phénomène et ses limites.

Traces de stries dues au remplissage par à coup, à chaque rupture de la peau de coulage de la barbotine. Ce défaut peut être «caché» par une finition à l'éponge appropriée, la seule solution est d'augmenter autant que possible le débit, à condition que la morphologie de la pièce le permette (accélération de la vitesse d'entrée et création de bulles), par contre, il provoquera à terme à une usure du moule en escalier (remplissage et fixation de sel de sulfate de calcium dans les strates d'air laissées par la montée de la barbotine).



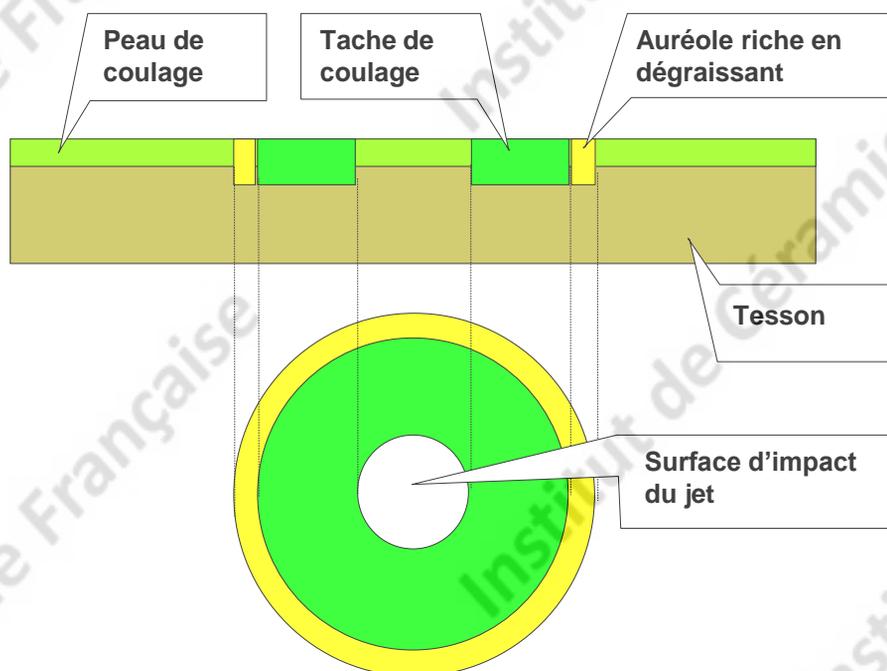
Sur cette photographie, il faut remarquer la couleur brun foncé sur toute la surface de la pièce, c'est le cas d'une barbotine trop défloculée permettant une migration de tous les sels et matières organiques vers la surface de la pièce, à ce stade si la pièce est biscuitée elle risque d'être complètement vitrifiée par la présence de sels de sodium.

TACHE DE COULAGE



Tache de coulage est une différence de porosité superficielle due à une ségrégation des particules les plus fines autour du jet de barbotine, à l'impact la périphérie est plus riche en particules fines alors que l'intérieur du jet dépourvu de particules fines devient plus riche en grosses particules, ces différences créent des variations de porosité influençant la dépose de l'épaisseur de l'émail, d'où des changements de couleur.

La composition de la couche superficielle d'une solution est différente de la masse elle-même. Il en est de même pour une suspension et que la tension superficielle de l'eau forme une membrane qui retient les particules argileuses les plus fines. Ainsi, le jet de barbotine sera comme "gainé" par un film de particules plus fines.



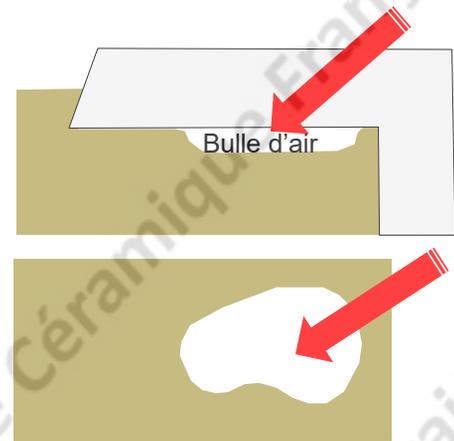
Ainsi à l'impact du jet, une tache est sous forme d'anneau circulaire riche en matière colloïdale qui apparaît serrée, dense, imperméable, ayant tendance à grésier, sur lequel l'émail ne tient pas, cette auréole est entourée d'un autre anneau plus riche en dégraissants puisque la majeure partie des particules argileuses ont été drainées à la surface du jet.

Afin de remédier à ce problème, il faut augmenter la densité de la barbotine (ce qui ralentira le mouvement de migration des particules fines vers l'extérieur du jet). Le défaut est accentué par une forte force d'impact du jet et par une grande porosité du moule. Les défloculants à base de sodium sont déconseillés ; en effet en migrant à la surface de la tache de coulage, ceux-ci vitrifient la pâte la rendant impossible à émailler.

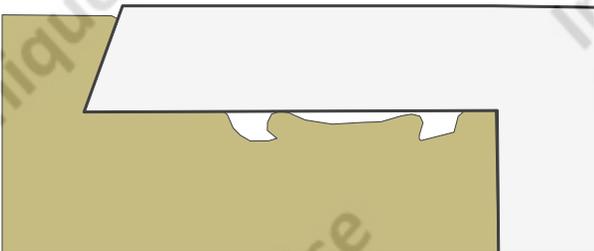
La tache de coulage peut être de forme très circulaire ou plus diffuse si la direction du jet est perturbée par la morphologie de la pièce, ATTENTION la tache de coulage peut tout à fait apparaître derrière la première peau de coulage constituée sur le moule, si la vitesse de remplissage est augmentée après avoir déjà rempli une partie du moule.

BULLES DE COULAGE

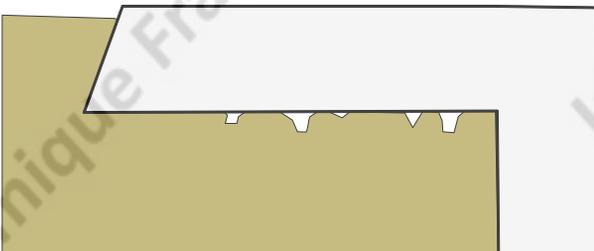
La trace d'arrêt de coulage est ici provoquée par l'emprisonnement d'une bulle d'air ralentissant la progression verticale dans le moule, plus l'arrêt est important plus le sillon sera profond et difficile à combler, ce phénomène peut être accompagné de bulles



La barbotine se trouve dans l'impossibilité de venir se plaquer contre la paroi supérieure du moule par l'emprisonnement d'une bulle d'air (coulage trop rapide, porosité du moule trop fermée, conception du moule...) Il faut remarquer que les angles de raccordement de la barbotine sur le moule sont arrondis par la tension superficielle.



Sous l'effet de la pression de remplissage, la barbotine finira par percer la peau de coulage pour tenter de remplir le vide laissé par la bulle d'air.

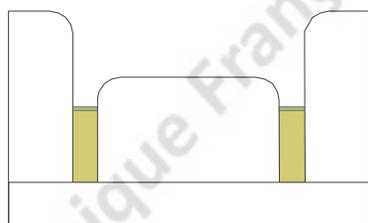


Mais la pression d'air empêchera la barbotine de remplir complètement le vide, le remplissage final se fera en plusieurs fois, mais à chaque tentative la tension superficielle de la barbotine ne permettra pas le raccord complet des différentes vagues d'où la présence de stries parallèles.

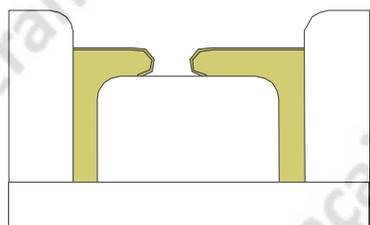
Le défaut apparaîtra sous forme de veines en creux ressemblant à un nœud dans du bois, ces «cernes» seront très difficiles à éliminer, la solution consiste à éviter la formation de la première bulle d'air (ponçage de la peau du plâtre, perçage d'un événement...)

CORNE DE COULAGE

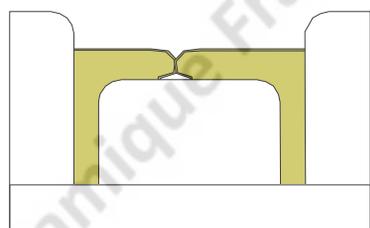
Celles-ci sont également dues au phénomène cité précédemment, mais il y est accentué, puisqu'il résulte du raccordement de deux surfaces de barbotine. Il peut outre poser des problèmes à l'émaillage de la pièce, mais il peut dans certains cas provoquer des déformations dues à des différences de retrait entre les zones riches en matières colloïdales et celles de proximité qui elles seront appauvries en ces mêmes matières.



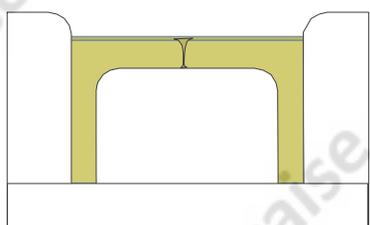
Pendant le remplissage du moule, il y a la formation de la peau de coulage à la surface de la barbotine.



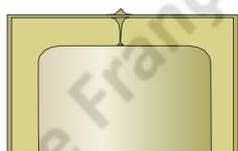
La barbotine s'étale sur la surface supérieure du noyau, chaque flux de barbotine a formé un ménisque de surface riche en particules fines



À la rencontre des deux flux de barbotine, la concentration en particules fines est multipliée par deux à cet endroit.



Le moule est rempli, la surface supérieure est plane, mais des lignes de couleurs différentes de la masse renseignent sur la présence de traces de coulage.



La pièce démoulée peut lors de la cuisson présenter des déformations ou des surfaces plus difficiles à émailler. Pour les produits cuits en monocuisson (sanitaire), il est parfois obligatoire de prévoir des contre-déformations ou des rectifications sur pièces crues.

DILATATION

ÉCAILLAGE



Avant cuisson

En théorie



Pendant la cuisson, l'émail se dilate moins que le tesson.



Après cuisson, l'émail se rétracte moins que le tesson.

En pratique



L'écaillage est un phénomène de décollement de la couche d'émail du substrat sur lequel il a été posé, la cause la plus courante est une forte différence de dilatation des deux matières et donc une impossibilité au moment du refroidissement à réagir d'une façon identique lors de variations dimensionnelles.



Ce phénomène est essentiellement dû à la différence de composition des deux matériaux. À la montée en température, l'émail se contractera plus que le support et lors du refroidissement au moment où l'émail commencera à durcir il restera plus dilaté que le support, ainsi le support en se contractant, mettra l'émail sous tension, avec une force telle que l'émail pourra arracher le biscuit voire casser la pièce (pour les pièces émaillées d'un seul côté par exemple et donc non équilibrées tension).

Comme sur la photographie ci-dessus, la différence de dilatation a eu lieu entre un engobe posé sur une terre rouge et l'émail.



Ci-dessous, l'écaillage provoqué par une surfinition de l'anse, deux causes possibles : la pièce est délavée par une surfinition à l'éponge avec des changements d'eau fréquents, les matières argileuses sont enlevées de la surface de la pièce et la composition se trouve trop enrichie en matières dégraissantes pour assurer un bon accrochage de l'émail, ou effet inverse la surfinition est toujours effective, mais le rinçage n'est pas effectué et l'anse est donc recouverte d'une pellicule uniquement argileuse très poussiéreuse en cru sec qui ne permettra pas un bon accrochage de l'émail.

Ci-dessus, la différence de dilatation est due à la pose avant émaillage d'un filet de couleur beaucoup plus réfractaire que le tesson (alors que sur la partie transparente l'émail est trésaillé).



La solution consiste à abaisser le coefficient de dilatation du biscuit, le changement de coefficient de dilatation de l'émail implique trop souvent d'autres changements d'état comme celui de la couleur, dans le cas du bord du bol ou de l'anse, l'idée consistera à rendre l'interface plus fusible, dans le cas du bol en ajoutant du fondant dans la couleur et dans le cas de l'anse en passant un peu de fondant au pinceau avant l'émaillage.

TRESSAILLAGE



Avant cuisson

En théorie



Pendant la cuisson, l'émail se dilate plus que le tesson.



Après cuisson, l'émail se rétracte plus que le tesson.

En pratique



Le tressaillage est un phénomène de craquelage de l'émail sur la couche de biscuit, ce phénomène existe surtout pour les faïences ou le coefficient de dilatation est très éloigné de celui de l'émail.



Ce phénomène peut être accentué par une mauvaise cuisson du biscuit. Plus la cuisson du biscuit sera poussée plus les éléments minéraux seront « fondus » et donc proche en dilatation du coefficient de l'émail, les reprises d'humidité du biscuit après émaillage peuvent être à l'origine de tressaillage en provoquant le gonflement de celui-ci.



La présence de tressaillage fermé qui est provoqué par une différence de dilatation lors d'un refroidissement trop rapide (sortie de four prématurée), puis lors du refroidissement à la température ambiante, le biscuit se contracte et arrive à refermer mécaniquement les fissures. Mais, elles sont toujours présentes et lors d'une troisième cuisson décor, il peut avoir des effets de tension superficielle qui soulignent la présence de l'ancien tressaillage.



Tressaillage fermé après recuisson.

Pièce tressaillée et recuite avec un émail à forte tension superficielle.



Les solutions au problème de tressaillage sont essentiellement des changements de composition, des éléments à fort coefficient de dilatation seront remplacés par des éléments à coefficient plus faible. Malheureusement, ces changements ne sont pas toujours possible, la suppression du plomb dans la plupart des émaux, oblige à l'utilisation de soude ou de potasse ayant un très fort coefficient de dilatation et, donc favorisant le tressaillage, de plus les changements de couleur sont courants lorsque des éléments fondants sont changés, aussi est il souvent préférable de transformer la composition du biscuit pour le rendre plus fusible. Attention, le coefficient d'élasticité peut, également, jouer un rôle fondamental dans la résistance au tressaillage.

CASSE DE TENSION

Les émaux tressaillant ou écaillant sont à l'origine de tensions extrêmes. En règle générale, c'est l'émail qui cède mécaniquement face à la robustesse du biscuit, mais dans des cas spéciaux, il arrive parfois que les tensions de l'émail arrivent à faire rompre le biscuit : lorsque la pièce n'est émaillée que sur une seule face, ou pire lorsque celle-ci est émaillée avec un émail tressaillant sur une face et un émail écaillant sur l'autre face (exemple de la coupe orange et pourpre).



Sous l'effet de la différence de tension et accentuée par une très forte épaisseur d'émail, le fond a «claqué». La forte épaisseur du biscuit a aussi contribué par son inertie thermique à créer une différence de températures amplifiant le phénomène de tension.



POINTS DANS L'EMAIL

Le problème apparaît plus généralement dans les émaux pulvérisés, mais les émaux trempés n'échappent pas à la règle surtout dans le cas de trempages ou aspersion successifs avec des couleurs différentes. Le problème est le suivant : l'accrochage de la couche d'émail est essentiellement dû à l'absorption d'eau, l'eau de l'émail sera absorbée par les pores les plus petits, l'air contenu dans ces pores sera chassé par l'eau et se compressera dans les plus gros jusqu'au point de sortir à travers la couche d'émail qui se constitue. Selon la vitesse de ressuyage de l'émail la couche sera plus ou moins perméable à cet air : soit la couche d'émail sera très liquide et la bulle pourra le traverser et il se refermera sans dommage, soit la couche est suffisamment sèche et l'air pourra la traverser sans dommage, le problème pourra apparaître lorsque la couche sera à l'état plastique. La bulle pourra alors percer sans que le cratère se referme, décoller l'émail sous forme d'une pastille se soulevant ou provoquer une cloque qui ne se refermera pas à la cuisson.



Les petites pustules apparaissant à la pose de la deuxième couche par pulvérisation de cet émail noir mat, l'émail assez réfractaire ne permettra pas la disparition par fusion des aspérités.



Le défaut apparu entre une couche d'émail déjà sec (vert clair) et une deuxième couche d'émail (vert foncé).



Le défaut apparu sur un émail de faïence, le cratère est grandeur réelle (environ 1mm).



Défaut constaté sur un émail bleu posé sur une sous-couche d'engobe cru déjà sec.

RETIREMENT

Souvent à tort appelé «retrait» d'émail, il ne s'agit en rien d'une notion de rétrécissement, mais bien de retraitement dans le sens où l'émail se retire de l'endroit où il était auparavant, il n'en reste pas moins que la couche d'émail déposée peut dans certaines conditions (forte épaisseur, surdosage de colle ou surbroyage de l'émail) avoir du retrait susceptible de provoquer de fines fissures dans la couche crue d'émail, fissures qui seront souvent à l'origine du départ géographique du défaut de retraitement.

Le retraitement est un phénomène lié à la tension superficielle de l'émail à chaud, en fait il s'agit d'une capacité à générer au contact avec d'autres éléments (émail, biscuit, gaz de combustion) une force de surface qui enveloppera la masse d'émail et l'empêchera de s'étaler. Tout ce qui pourra nuire au contact de la couche d'émail avec la pâte facilitera l'apparition du défaut, notamment tout ce qui pourra soit créer une couche intermédiaire (graisse, poussière) ou qui favorisera l'augmentation de la tension superficielle en multipliant la surface spécifique de la surface émaillée ou du bain d'émail (aspect granuleux du biscuit, surbroyage de l'émail). Il n'existe pratiquement aucun moyen ou produit pour pallier ce défaut. Une fois que les causes sont acquises, quelques matériaux peuvent néanmoins abaisser cette tension superficielle, mais à condition qu'ils soient présents dans la fritte dès le départ, c'est notamment le cas de l'oxyde de zinc qui change considérablement la tension superficielle entre 5 et 10 % de rajout, mais qui a l'inconvénient de faire virer les couleurs dans lequel il est rajouté.



Retraitement sur une trace de graisse laissée sur le biscuit.



Aile d'assiette émaillée avec un émail blanc au zircon très sailli et ayant subi une troisième cuisson.



Aile d'assiette émaillée sur de la poussière.



Mauvais mouillage du biscuit par l'émail, pose trop poudreuse.

Carreaux en pressage isostatique, la surface granuleuse n'a pas permis une accroche totale de l'émail sur le biscuit.



Surplus de couleur vitrifiable au croisement des deux filets.



ÉCLATEMENT

La plupart du temps, il est provoqué par une vaporisation trop rapide de l'eau de façonnage restant dans la pièce au début de la phase de cuisson. Pour un cycle de cuisson normal sans «préchauffage», la pièce ne devrait pas contenir plus de deux à trois % d'eau, les fours sont habituellement difficiles à réguler à basse température et le maintien en dessous de la température de vaporisation de l'eau (100°C) est risqué.

La pression provoquée par la vaporisation de l'eau sera supérieure à celle trouver dans une bouteille de gaz. Si l'eau se transforme trop vite en vapeur sans que celle-ci prenne le temps de s'échapper à travers les capillaires de la pièce, cela provoque une explosion. La présence de bulle d'air dans l'épaisseur de la pièce (due à un façonnage hétérogène ou à un dysfonctionnement de la pompe à vide de l'extrudeuse) accentuera le risque.



Éclatement dû à des bulles d'air emprisonnées pendant le calibrage. Une des solutions consiste à percer la pièce avec une mèche de petit diamètre pour permettre l'évacuation de l'air pendant son échauffement.



SURCUISSON

Mauvais choix dans le programme du cycle de cuisson, ou dérèglement des pyromètres, les pièces céramiques peuvent au-delà de quelques centaines de degrés au-dessus de leurs températures de cuisson habituelles, commencer à se ramollir, se déformer jusqu'à devenir complètement liquide.





Ci-dessus, détail de la coupe d'une pièce dont la matière première commence à fusionner.

Surcuisson complète d'un four de faïence calcaire avec une couverte colorée au plomb, les pièces, les plaques réfractaires et les résistances du four n'ont pu être sauvées.



Surcuisson de l'émail, qui commence à bouillonner.



Brique de sole tombée devant un brûleur jet.



Surcuisson due au positionnement de la pièce devant un brûleur.

Cendrier dont le côté gauche a pris beaucoup plus de retrait que la partie droite à la suite de son positionnement trop près des résistances.



GOUTTE D'ÉMAIL

Une mauvaise aération dans des fours tunnel électriques où les produits sont souillés par des gouttes d'émail, les vapeurs d'émail générées dans le four finissent par se condenser et s'agglomérer vers la sortie des fumées, quand l'accumulation d'émail devient trop importante des morceaux d'émaux se détachent du plafond et tombent sur les produits.

Gouttes d'émail en fusion tombées sur les pièces.



Gouttes d'eau tombées sur de l'émail cru.

Gouttes d'émail en fusion sur chromo.



TROUS DE PÂTE

Vaste défaut, selon le diamètre, il pourra avoir plusieurs noms, trous, piqûres, bulles, vents... En dehors des véritables bulles d'air de plusieurs millimètres voire centimètres, les trous de pâte ont plusieurs origines. Ils seront provoqués par la présence de gaz dans la barbotine, le plus souvent de l'air est généralement inclus mécaniquement dans la barbotine, les causes les plus courantes sont :

Le tamisage qui provoque un mélange intime de l'air ambiant et de la barbotine ; d'où la nécessité d'installer un réceptacle et une goulotte sous le tamis afin de laisser le temps à l'air de s'échapper avant de rejoindre la barbotine de la cuve.

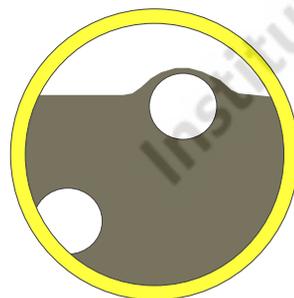
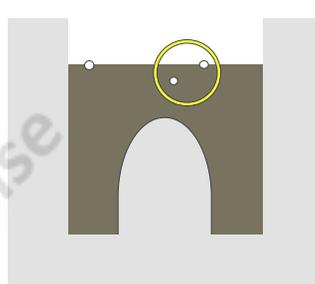
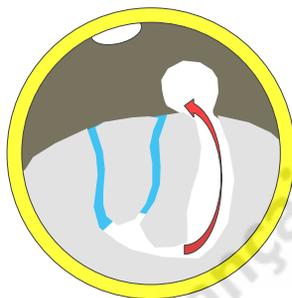
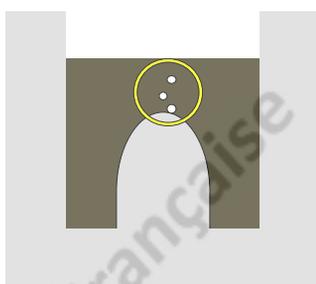
Les bulles peuvent être provoquées par la fermentation des matières organiques contenues dans les argiles de la pâte, en présence de chaleur et d'humidité, ces matières dégageront des gaz carbonés.

Les installations de circulation de barbotine sont souvent à l'origine d'aspiration d'air, par effet venturi lors des rétrécissements des sections de tuyauteries ou au passage des vannes, dans les pompes (membranes percées), ou plus simplement parce que les conduites sont régulièrement vidées de leur barbotine et que de grandes quantités d'air pourront se trouver prisonnières dans les coudes ou les méandres des tuyaux pour ensuite se libérer au coup par coup.

Les filtres électro-aimants sont souvent à l'origine de bulles, leur nettoyage imposant un vidage complet, ils se trouvent nécessairement remplis d'air lors du redémarrage du pompage, la multitude de grilles magnétiques que constitue l'aimant est un véritable mélangeur air / barbotine, il est conseillé de le remplir avant de refermer le couvercle.



Hors des problèmes de débit de remplissage des moules qui peuvent provoquer de très grosses bulles, le plâtre peut être à l'origine de bulles à cause de l'air accroché aux parois du moule notamment dans les aspérités liées à l'usure. La porosité du plâtre est à l'origine d'une grande partie des bulles emprisonnées dans la barbotine, car sous l'effet de l'aspiration de l'eau par les pores les plus fins, l'air contenu se réfugiera dans les cavités du moule et ressortira en partie par les pores les plus gros ; si ceux-ci sont à ce moment déjà recouvert de barbotine, il y aura création d'une bulle sur la surface de la pièce. Le phénomène sera moins localisable, lorsque les bulles seront générées par le noyau ou une sous-pièce de moule saillante, les bulles générées par le recouvrement complet du noyau ou de la sous-pièce apparaîtront en chapelet vertical et seront ensuite emportées par le flux de barbotine vers les parois de la pièce.



Dans le cas du noyau, l'air chassé par l'arrivée de l'eau se concentre dans les parties hautes du plâtre et sera libéré sous forme de chapelet de bulles.

Les bulles d'air sont transportées à la surface et suivent le flux de barbotine pour venir se plaquer sur les parois, si elles n'ont pas eu le loisir d'éclater, elles provoqueront un trou de pâte.

EFFLORESCENCES ET PETS DE CHAUX



Migration des sels de calcium vers le haut du vase.



Efflorescences de calcium (attention, elles peuvent être dues au mortier).



Traces de vanadium.

Les efflorescences sont liées à la migration des sels minéraux de l'intérieur de la pièce vers l'extérieur, elles sont essentiellement à base de carbonate ou de sulfate de calcium (efflorescences blanches) ou plus rarement à base de sels de vanadium (traces jaunes), les sels solubles sont drainés vers l'extérieur des pièces et se recarbonatent en présence du gaz carbonique contenu dans l'air ambiant. Si une certaine quantité de sels de sulfate de calcium peut être traitée avec du carbonate de baryum (attention aux doses sinon c'est le carbonate de baryum qui réapparaît sous forme d'efflorescences), le carbonate de calcium n'a pas de véritable moyen d'être combattu en dehors de l'injection de fondant puissant susceptible de former avec lui un eutectique insoluble.

Le défaut se présente sous la forme d'un éclatement ponctuel et partiel de la pièce, éclatement dans lequel on distingue souvent en son centre une petite partie blanche, il s'agit de grains de chaux qui sous l'effet de la réhumidification ambiante va gonfler jusqu'à faire céder la terre cuite. Il est essentiellement dû à la présence de carbonate de calcium dans les pâtes de terre cuite, où le défaut sera accentué avec la taille du grain de chaux, un broyage plus poussé de la matière diminuera beaucoup ce défaut. Il peut se trouver également dans les pâtes fines, faïences, grès où sa présence est essentiellement due à la dégradation du génie civil (souvent de l'atelier de préparation des pâtes par exemple).

Pet de chaux dans une assiette de faïence calcaire.



Pet de chaux dans une brique.



ATTAQUES ACIDES

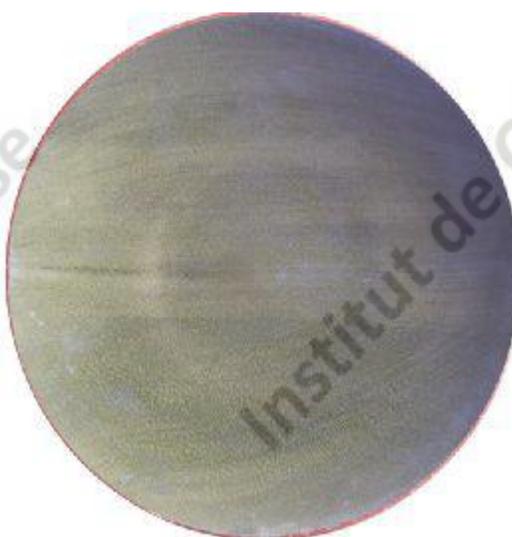


Traces provoquées sur un émail au cuivre par immersion dans l'acide acétique (vinaigre).



Traces provoquées sur un carrelage revêtu d'un émail au cuivre par du jus d'orange. (acide citrique).

TRACES



Dans le cas de l'exemple ci-contre, c'est le salpêtre généré par le séchage du moule qui a marqué l'assiette pendant son séchage, la finition à l'éponge n'a concerné que les bords sur deux ou trois centimètres, ceux-ci sont donc exempts de traces.

Les traces sont liées à un déclassement des matériaux de la pâte. La finesse des argiles et kaolin les rend vulnérables au déclassement. Facilement dilués par l'eau, ils peuvent dans le cas d'une finition trop poussée être, soit enlevés de la pâte et finir dans l'eau de rinçage, soit déplacés vers un autre endroit de la pièce sous forme de boue, cette ségrégation provoquera sur la surface de la pièce des différences de texture et/ou de porosité. Ces différences influenceront grandement la capacité de l'émail à se fixer sur la pièce. Dans le cas particulier de l'émaillage par trempage, les différences d'épaisseur provoquées par une absorption hétérogène du bain provoqueront des différences de couleur.



Traces provoquées par la glycérine contenue dans la barbotine de couleur servant au tampon de l'entreprise.

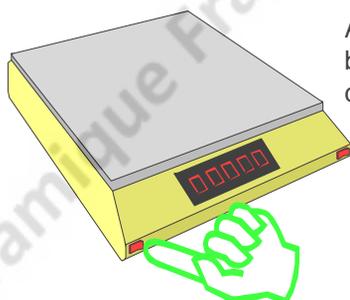
CONTRÔLES LABORATOIRE

TESTS LABORATOIRE

DENSITÉ et MASSE VOLUMIQUE

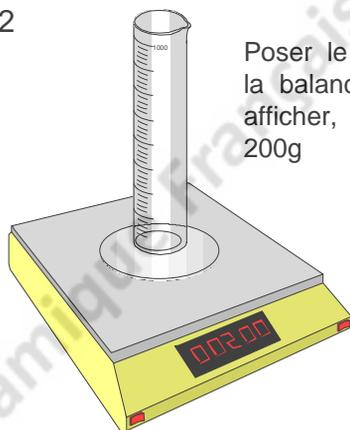
DENSITÉ AVEC ÉPROUVETTE

1



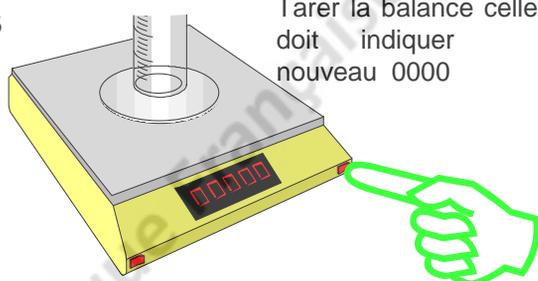
Allumer la balance celle-ci doit afficher 0000

2



Poser l'éprouvette sur la balance. Celle-ci peut afficher, par exemple 200g

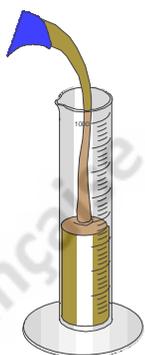
3



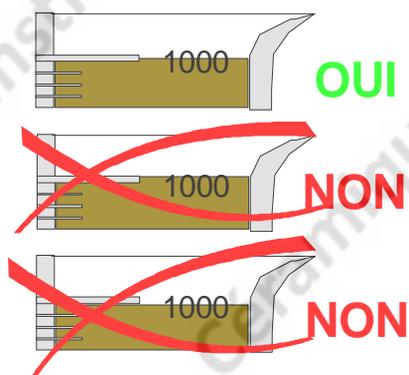
Tarer la balance celle-ci doit indiquer de nouveau 0000

4

Remplir l'éprouvette de barbotine au niveau de la marque 1000



5



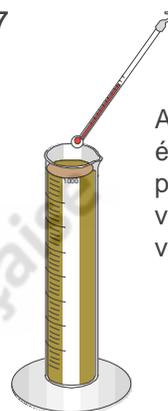
Le niveau de barbotine devra se situer sur le milieu du trait 1000

6



Poser l'éprouvette pleine de barbotine sur la balance, celle-ci indiquera une masse en grammes (par exemple 1800 g) qui donne la densité de la barbotine en g/litre.

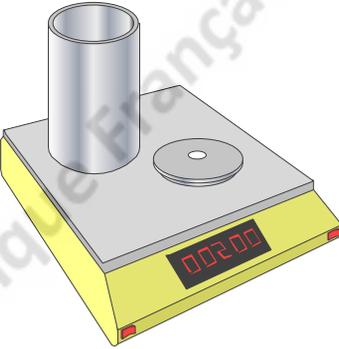
7

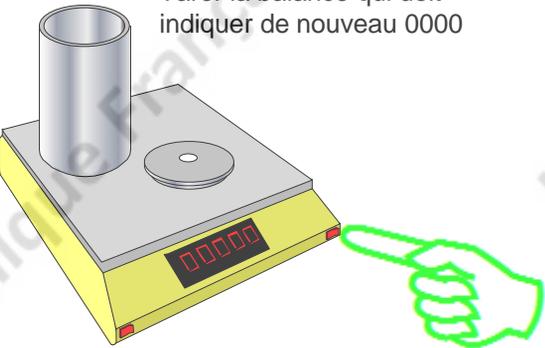


Après la mesure de la densité, un échantillon de barbotine est prélevé pour le test de la viscosité et la température sur le volume restant est mesurée.

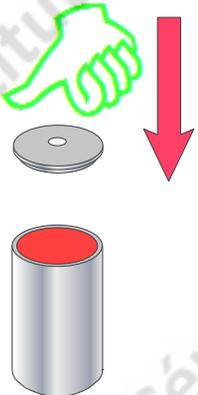
Densité avec densimètre

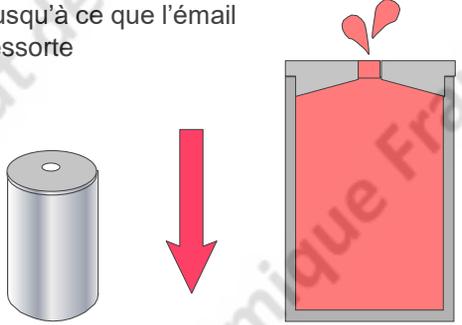
1  Allumer la balance qui doit afficher 0000

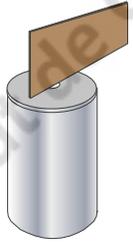
2  Poser le densimètre sur la balance qui affiche 200 g

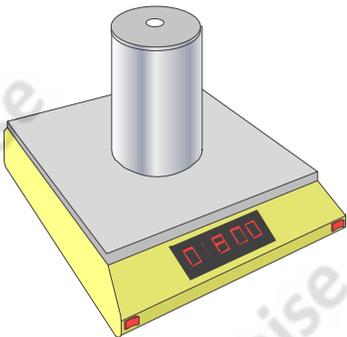
3  Tarer la balance qui doit indiquer de nouveau 0000

4  Remplir le densimètre d'émail à ras bord.

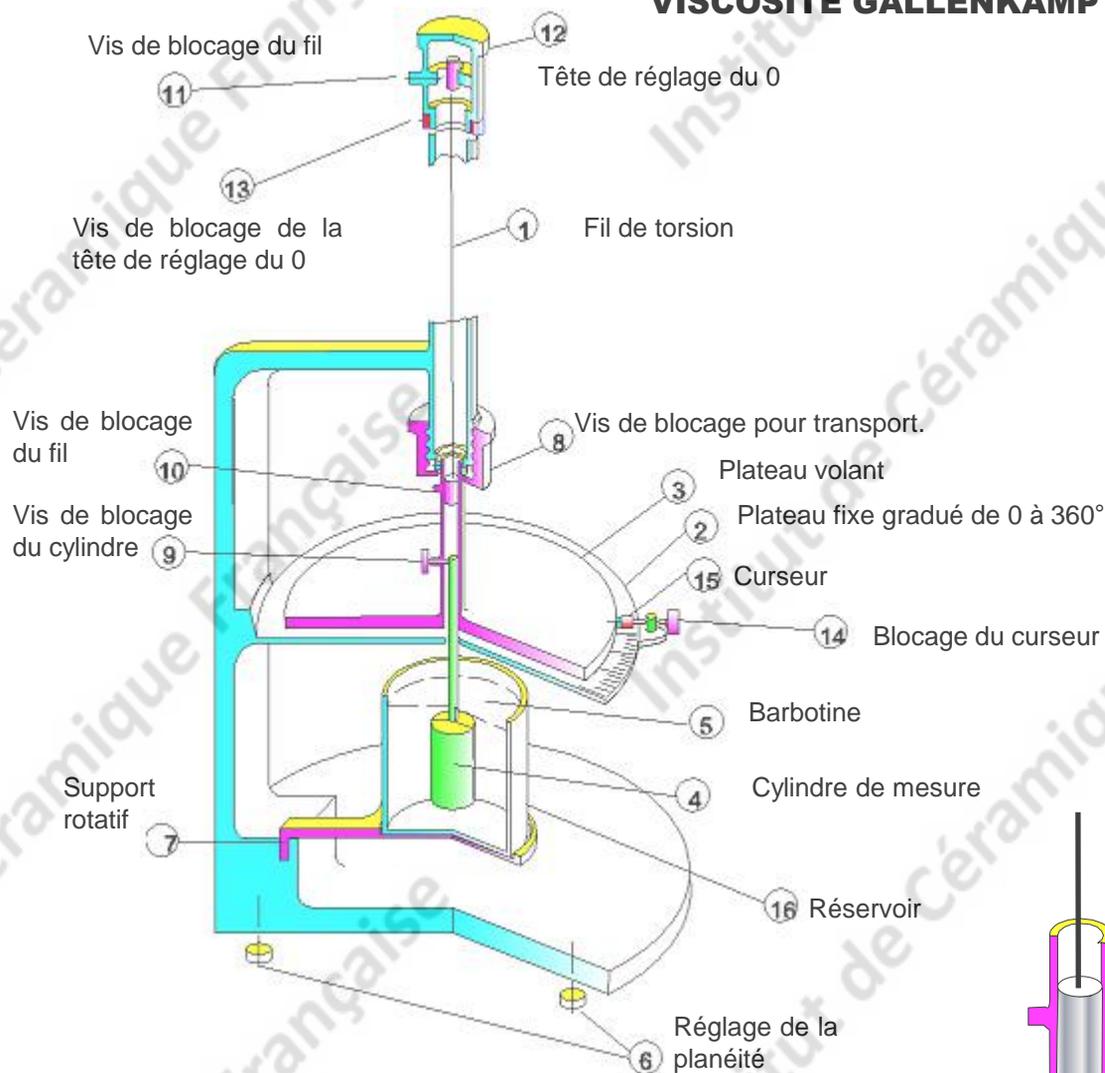
5  Enfoncer le bouchon dans le densimètre

6  Jusqu'à ce que l'émail ressorte

7  Araser la goutte à l'aide d'une raclette

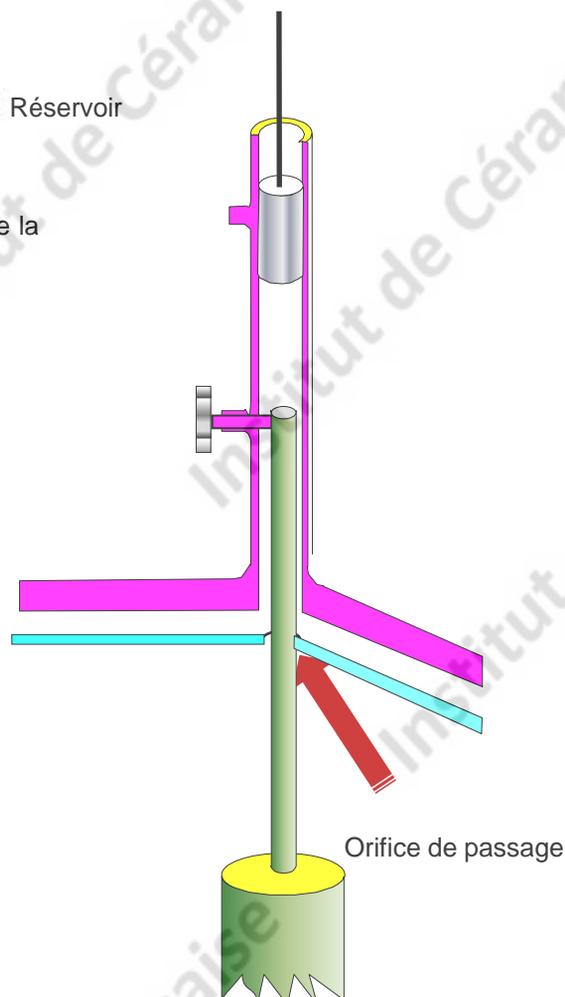
8  Repositionner le densimètre sur la balance et lire la masse en gramme : le densimètre ayant un volume de 0,1 litre, il suffit de multiplier la masse par 10 pour obtenir la densité d'un litre d'émail.

VISCOSITÉ GALLENKAMP



Le réglage de la planéité et de la verticalité s'effectue à l'aide des deux vis n° 6, ce réglage s'effectue avec le cylindre de mesure en place de telle sorte que celui-ci soit parfaitement centré par rapport à son orifice de passage dans le plateau gradué, sur certains appareils il est possible de visualiser la tête cylindrique du fil, ce qui permet une approche rapide avant le réglage final. L'orifice étant visible que sous le plateau gradué, il est recommandé de s'aider d'un miroir pour faciliter le centrage.

La mesure à effectuer étant celle de la résistance qu'oppose le liquide à la rotation du cylindre, il faut vérifier l'aplomb de l'appareil et la verticalité de toutes les parties mobiles afin qu'aucun frottement parasite ne vienne perturber la mesure.



1

Après réglage le curseur doit se maintenir sur le 0, si ce n'est pas le cas le réglage final s'obtient par la rotation de la tête de réglage n°12

5

Le plateau volant entame une rotation arrière de deux tours.

2

Faire faire un tour de contrainte au plateau volant (dans le sens des aiguilles d'une montre).

6

Après le premier tour, le plateau volant continue son deuxième tour qu'il doit achever à plus de 357°.

3

À la fin du tour de contrainte, bloquer le plateau volant à l'aide du curseur.

7

Le plateau volant reprendra sa course dans le sens inverse pour deux tours presque complets.

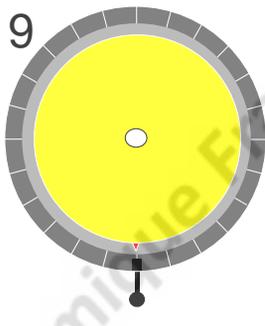
4

Débloquer le curseur, le plateau volant se mettra en rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

8

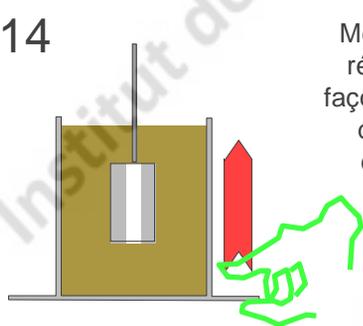
Au deuxième tour, le curseur doit revenir jusqu'à 3°, si ce n'est pas le cas, il faut vérifier, l'aplomb de l'appareil, et le centrage du cylindre l'état du fil et de la tige du cylindre.

9



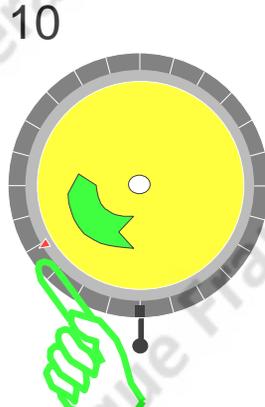
Après réglage le curseur doit se maintenir sur le 0, si ce n'est pas le cas le réglage final s'obtient par la rotation de la tête de réglage n°12

14



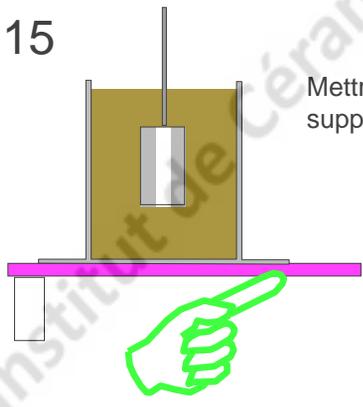
Mettre en place le réservoir de telle façon que le cylindre de mesure soit complètement immergé.

10



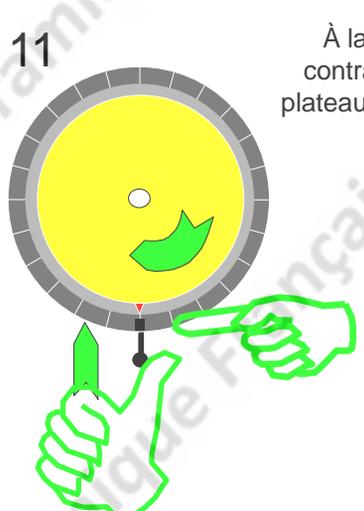
Faire faire un tour de contrainte au plateau volant (dans le sens des aiguilles d'une montre).

15



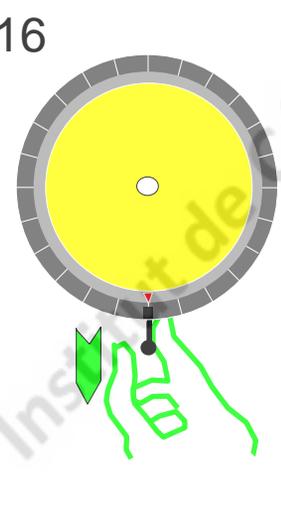
Mettre en place le support rotatif.

11



À la fin du tour de contrainte, bloquer le plateau volant à l'aide du curseur.

16



Débloquer le curseur, le plateau volant se mettra en rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

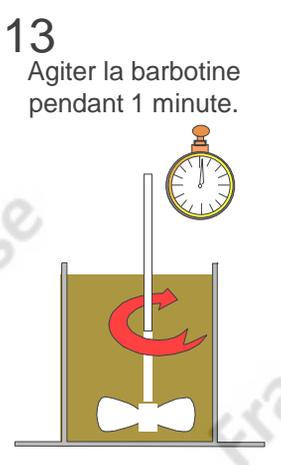
12

Remplir le réservoir de barbotine jusqu'à 3 mm du bord.



13

Agiter la barbotine pendant 1 minute.



17

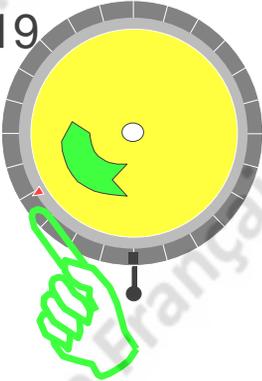


Le plateau volant entame une rotation arrière la lecture se fera au moment où le plateau s'arrêtera pour repartir en avant.

18

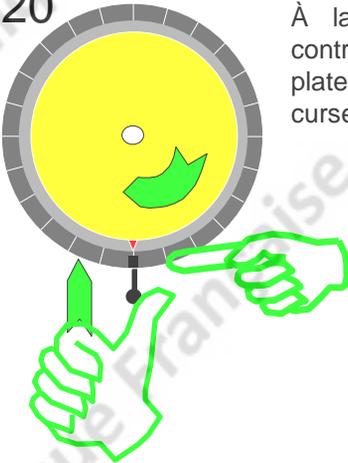
Après la mesure de la viscosité
(laisser le réservoir en place).

19



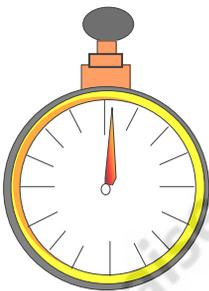
Faire faire un tour de
contrainte au plateau
volant (dans le sens des
aiguilles d'une montre).

20



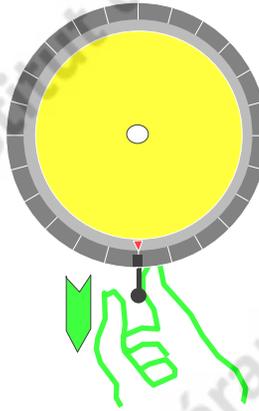
À la fin du tour de
contrainte, bloquer le
plateau volant à l'aide du
 curseur.

21



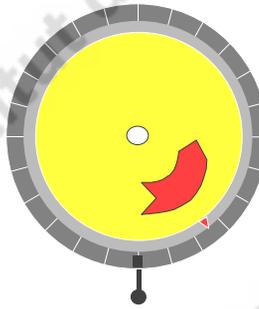
Attendre
3 ou 6 minutes.

22



Débloquer le curseur,
le plateau volant se
mettra en rotation
dans le sens inverse
des aiguilles d'une
montre.

23



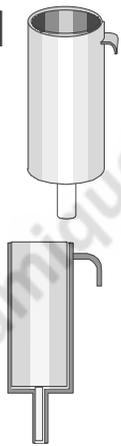
Le plateau volant
entame une rotation
arrière la lecture se
fera au moment où le
plateau s'arrêtera
pour repartir en avant.

24

La différence entre la valeur de la viscosité
prise instantanément et la valeur lue après 3
ou 6 minutes de repos se nomme la
THIXOTROPIE.

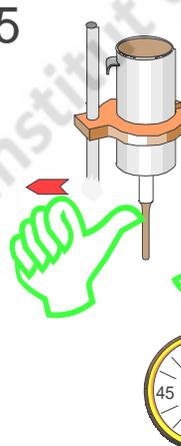
VISCOSIMÈTRE À ÉCOULEMENT

1



Attention il existe plusieurs viscosimètres à écoulement selon les produits à tester, on les différencie par le diamètre intérieur du tube de sortie, les plus utilisés sont : le diamètre 6 mm pour la barbotine et le diamètre 3 mm pour les émaux.

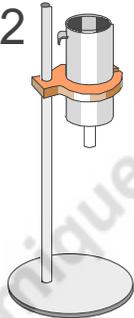
5



Déboucher rapidement le viscosimètre et déclencher simultanément le chronomètre.

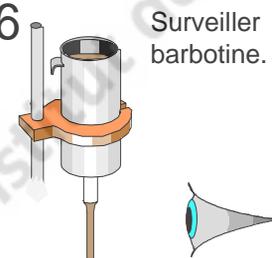
La barbotine commence à s'écouler du viscosimètre.

2



Fixer le viscosimètre sur un support stable (celui-ci doit rester vertical pendant la mesure).

6



Surveiller l'écoulement de la barbotine.



3

Prélever un échantillon représentatif de barbotine l'agiter pendant 1 minute.



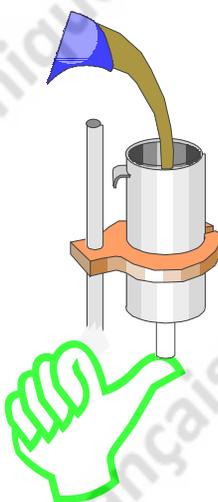
7



Lorsque le filet de barbotine se rompt, arrêter le chronomètre.



4



Boucher l'extrémité du viscosimètre avec le doigt et le remplir de barbotine à ras bord.

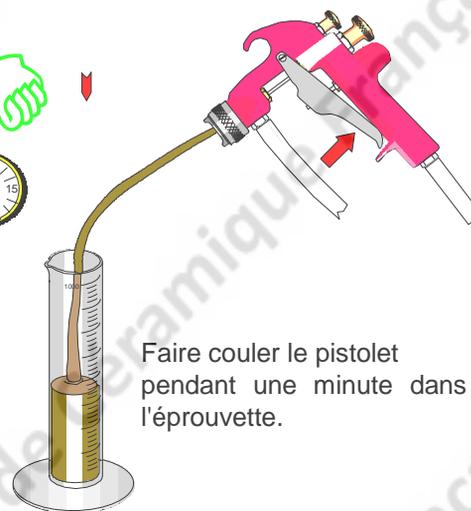
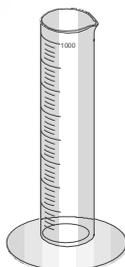
8

ATTENTION. Si vous voulez déterminer la thixotropie d'une barbotine, il est pratique d'utiliser un viscosimètre Gallenkamp.

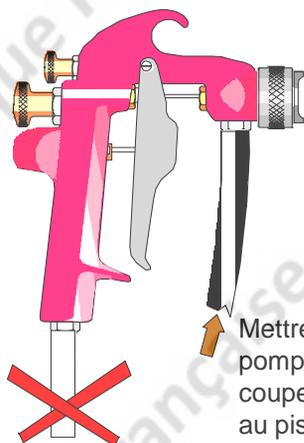
Ou, il est possible en agissant la barbotine et en laissant bouché pendant un temps fixe, puis en débouchant et mesurant le nouveau temps.

MESURE DE LA VISCOSITÉ AU PISTOLET

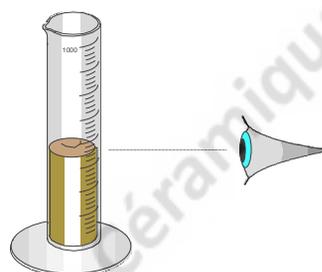
Prendre une éprouvette graduée d'une contenance d'un litre.



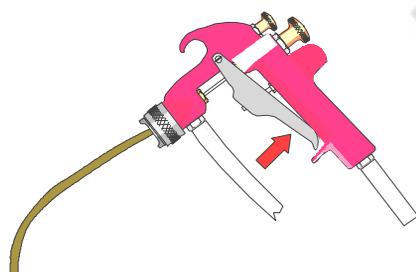
Faire couler le pistolet pendant une minute dans l'éprouvette.



Mettre en route la pompe d'émail et couper l'arrivée d'air au pistolet.

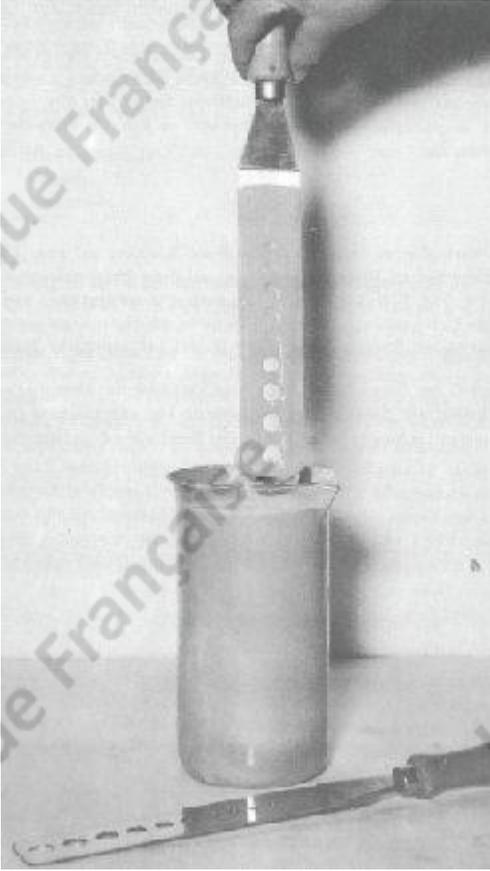


Noter le volume écoulé en 1 minute.



Faire couler le pistolet pendant une minute ou deux afin de s'assurer de la régularité du débit.

Jauge Couteau Bayer



Cette jauge en acier inoxydable est utilisée pour évaluer la viscosité d'un bain d'émail.

Principe :

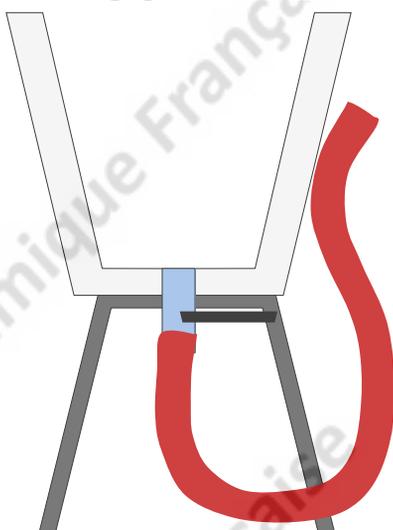
Le couteau est percé de dix trous de diamètres de 5 à 14 mm

- La lame est insérée dans le récipient rempli d'émail à tester.
- Agiter à l'aide du même couteau.
- Sortir le couteau verticalement avec une vitesse constante.
- Le nombre de trous encore couverts permet d'évaluer la viscosité.

- Diamètres des perçages en mm 5 /6/7/8/9/10/11/12/13/14

BARBOTINE

PRISOMÈTRE

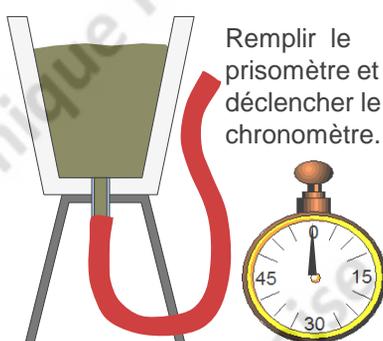


Le test de prismomètre est destiné à établir les épaisseurs de prise d'une barbotine en fonction du temps. Ce test ne distingue pas la part de l'épaisseur constituée par l'absorption du moule de celle constituée plus tardivement par la thixotropie.

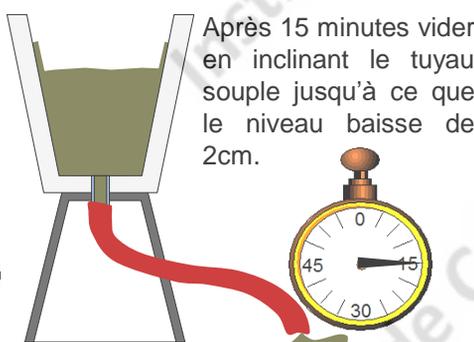
Le prismomètre est constitué par un récipient en forme de tronc de cône réalisé en plâtre, l'état du plâtre devra être identique à celui utilisé en production à défaut de référence, couramment des taux de gâchage de 1.4 kg de plâtre par litre d'eau sont utilisés.

Le prismomètre sera percé en son fond et muni d'un tube PVC d'un diamètre extérieur de 19 mm, lequel sera pourvu d'un tuyau souple permettant la vidange par étapes successives de la barbotine.

Le prismomètre sera installé sur un trépied permettant le mouvement du tuyau souple pendant les phases de vidange. Le tuyau souple restera fixé en hauteur sur le rebord du prismomètre à l'aide d'un élastique.



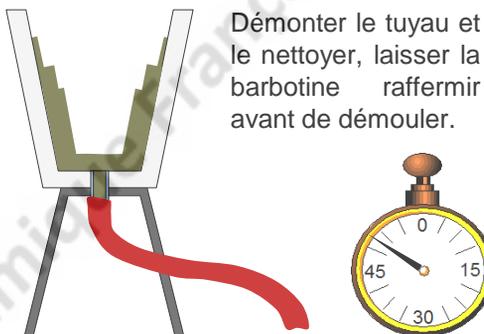
Remplir le prismomètre et déclencher le chronomètre.



Après 15 minutes vider en inclinant le tuyau souple jusqu'à ce que le niveau baisse de 2cm.

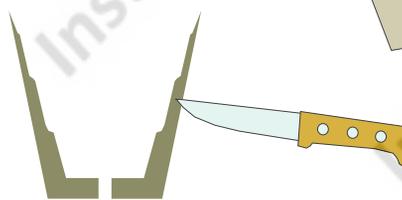


Rééditer l'opération pendant 1 heure et demie, vider complètement le prismomètre, noter les horaires de vidange.

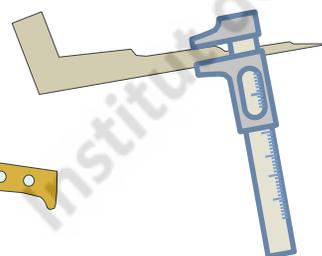


Démonter le tuyau et le nettoyer, laisser la barbotine raffermir avant de démouler.

Découper verticalement l'échantillon avant durcissement complet.

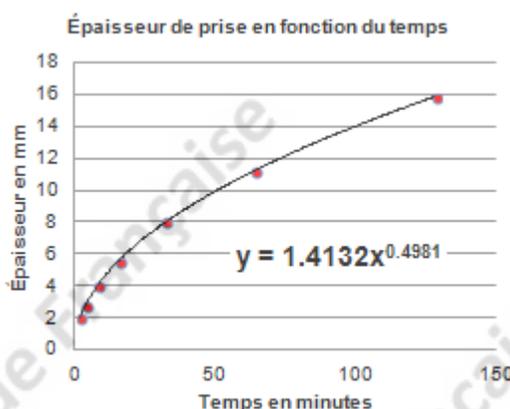


Finir le découpage vertical après séchage complet.



Mesurer les épaisseurs en évitant les erreurs liées aux bavures des coutures, remplir le tableau de données et tracer la courbe d'évolution de l'épaisseur en fonction du temps.

Temps de pris en minutes.	Épaisseur en mm
0	0
2	2
4	2.8
8	4
16	5.6
32	8
64	11.2
128	15.8



$$E_p = A \cdot \sqrt{\text{temps}}$$

L'épaisseur en fonction du temps est proche de la formule ci-dessus. Ainsi, la constante "A" caractérise la vitesse de prise. Elle dépend de la barbotine, mais également du moule en plâtre.

TEST DE PERMÉABILITÉ BAROÏD

Ce test permettra de mesurer la capacité d'une barbotine ou d'un bain d'émail à laisser passer l'eau, ce test reproduira l'effet de la prise dans un moule plâtre ou le ressuyage d'une couche d'émail.

Pour la barbotine, ce paramètre est un de ceux qui régissent la prise, il permet de s'affranchir des autres paramètres plus le résultat sera grand plus la prise sera facilitée.

Les chiffres habituellement obtenus oscillent entre 2 et 2.2 pour une barbotine, 6 pour un kaolin et 1 pour une argile.

La perméabilité dépend essentiellement des matières argileuses (argiles et kaolins) et notamment de la finesse des particules. Plus la finesse est importante et plus la perméabilité est faible.

Pour l'émail, ce paramètre régit la vitesse de ressuyage (vitesse de séchage sur la surface de la pièce). Plus le résultat sera grand, plus l'émail séchera vite. Si la perméabilité est trop basse, il y a risque de coulure, les valeurs indicatives tournent autour de 3 pour un émail cru.

Les paramètres influant sur la perméabilité de l'émail sont:

Granulométrie (broyage).

La présence et quantité de flocculant sélectif (floculation des fines particules).

La présence de colle.

PRINCIPE

La technique consiste à mettre un échantillon de barbotine ou d'émail sous pression et de mesurer la quantité d'eau restituée, pendant un temps donné.

Le baroïd est composé d'un cylindre et de deux couvercles munis pour l'un d'un tuyau d'arrivée d'air et de l'autre d'un tuyau de départ d'eau.

Le couvercle inférieur sera posé sur un support trépied, un béccher est positionné sous le tuyau de sortie d'eau.

Une grille est positionnée dans le fond du couvercle inférieur, ensuite on dispose le filtre sur la grille, le filtre devra toujours dépasser le diamètre du cylindre que l'on viendra déposer par dessus.



La quantité de barbotine sera versée dans le cylindre, il sera coiffé de son couvercle supérieur, l'ensemble sera ensuite bloqué par les deux vis verticales.

La pression sera augmentée à raison de X bars pendant X minutes, la « mesure » de la perméabilité se fera en comptabilisant la quantité d'eau extraite.

Positionnement de la grille et du filtre

La grille est réalisée dans un morceau de tamis de 200 microns (toile inox 304 L 200 microns avec de 140 microns)

et un filtre Whatman n° 42 et diamètre 90 mm

(Ne pas oublier le joint entre l'embase et le tamis.)

Remplissage de la barbotine.



Remplissage de la barbotine jusqu'au marquage interne du cylindre.



T °C	A
0	0,01706
1	0,01671
2	0,01644
3	0,01617
4	0,01591
5	0,01564
6	0,01542
7	0,01520
8	0,01497
9	0,01474
10	0,01452
11	0,01429
12	0,01409
13	0,01390
14	0,01371
15	0,01353
16	0,01338
17	0,01323
18	0,01306
19	0,01290
20	0,01276
21	0,01259
22	0,01244
23	0,01229
24	0,01215
25	0,01201
26	0,01188
27	0,01175
28	0,01162
29	0,01150
30	0,01139
31	0,01128
32	0,01116

Fermeture, positionnement du bécquet, mise sous pression d'air 3 bars.



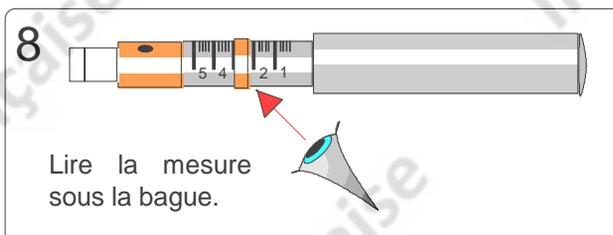
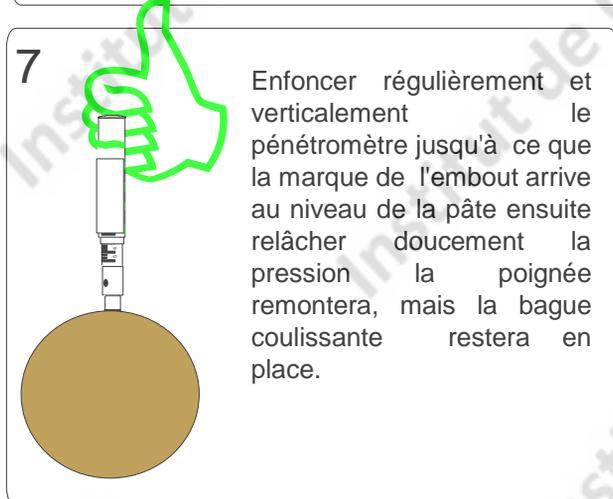
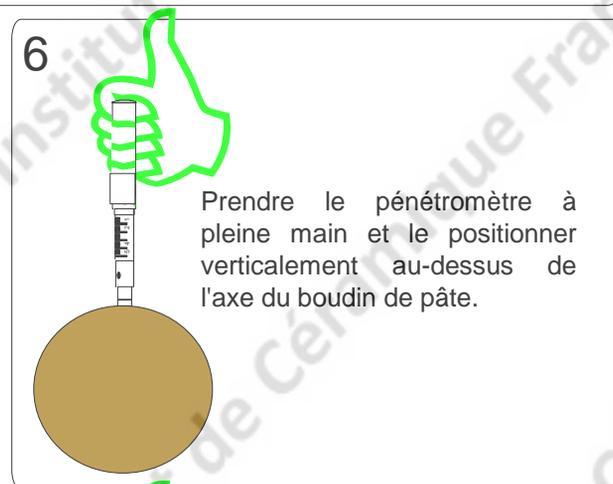
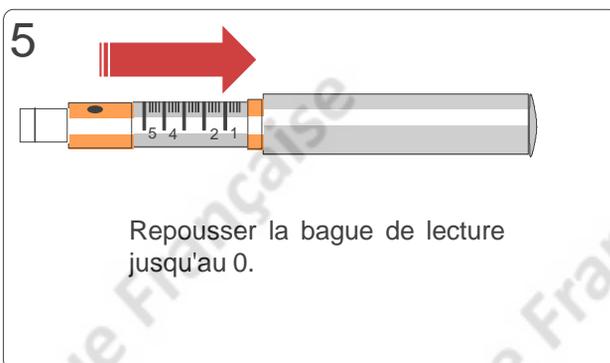
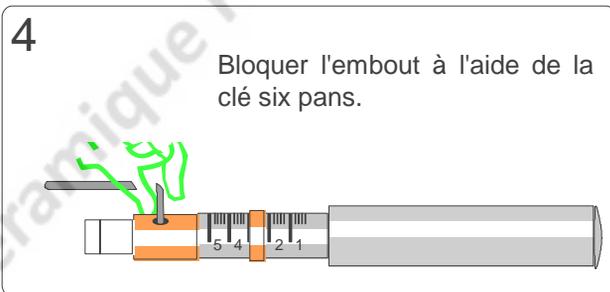
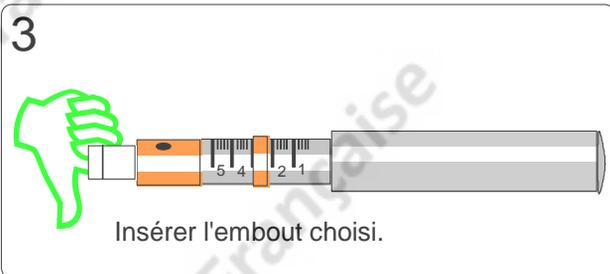
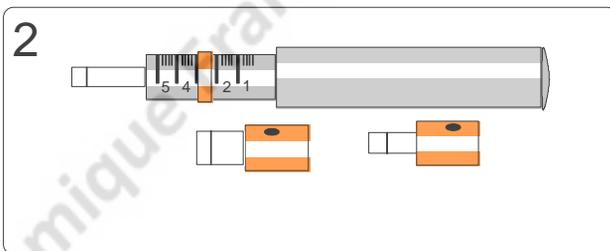
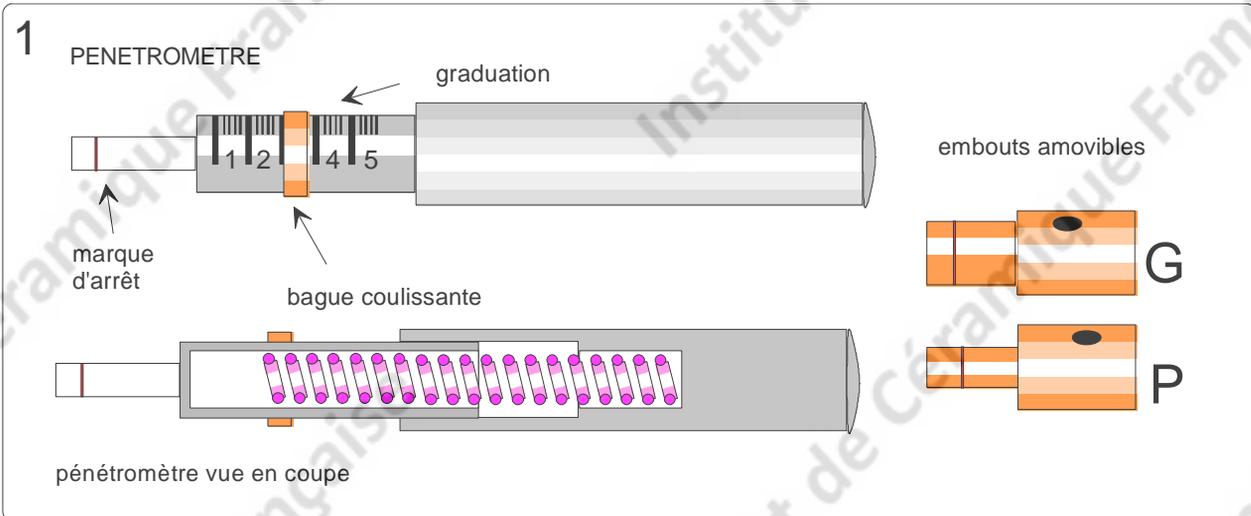
Faire un relevé du volume écoulé après 4 minutes et un deuxième relevé après 25 ou 9 minutes (le choix dépend essentiellement de la capacité de filtration après 9 minutes).

$$a = A \frac{V_2 - V_1}{\sqrt{T_2} - \sqrt{T_1}}$$

- a : coefficient de perméabilité
- V₁ : volume écoulé en cm³ au temps T₁
- V₂ : volume écoulé en cm³ au temps T₂
- T₁ : 4 minutes
- T₂ : 9 ou 25 minutes
- A : (voir tableau ci-contre)



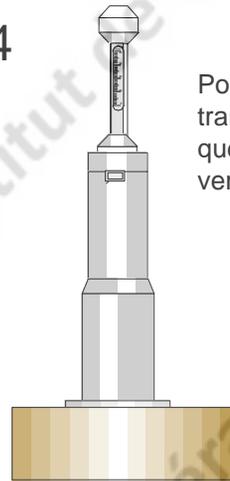
PLASTICITE PÉNÉTROMÈTRE



Le pénétromètre de «fuch tonw» se compose d'un poids cylindrique couissant dans un fourreau métallique. La partie inférieure du poids est pourvue d'une pointe de mesure destinée à s'enfoncer dans la pâte, le poids est surmonté d'un curseur gradué. Un bouton de blocage permet de maintenir l'ensemble pointe, poids et curseur en position haute, en appuyant sur le bouton de blocage, l'ensemble descendra sous l'effet du poids permettant à la pointe de s'enfoncer plus ou moins dans la pâte selon sa fermeté.

4

Poser le pénétromètre sur la tranche de pâte veiller à ce que celui-ci soit parfaitement vertical et stable.



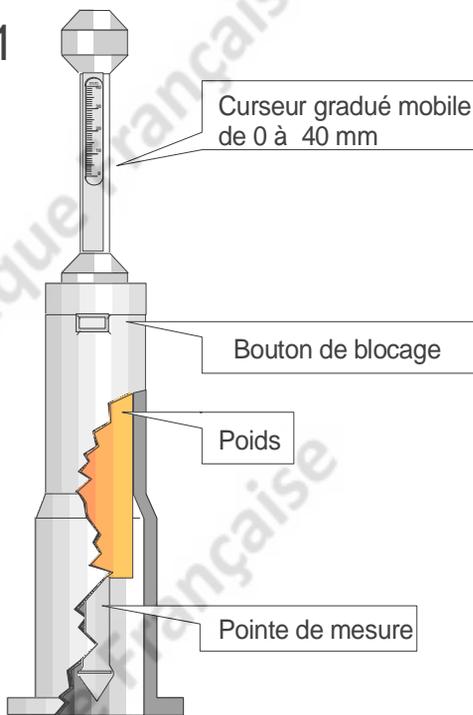
1

Curseur gradué mobile de 0 à 40 mm

Bouton de blocage

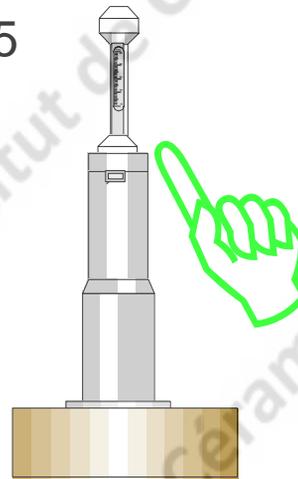
Poids

Pointe de mesure



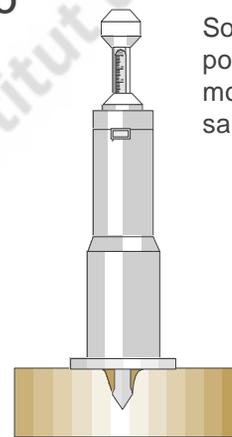
5

Appuyer sur le bouton de blocage.



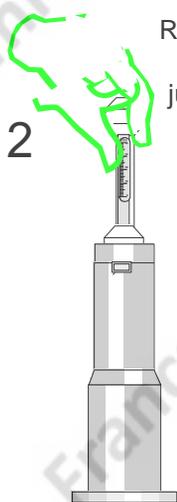
6

Sous l'effet du poids, la pointe s'enfonce plus ou moins dans la pâte suivant sa fermeté.



2

Remonter le curseur jusqu'à son blocage.

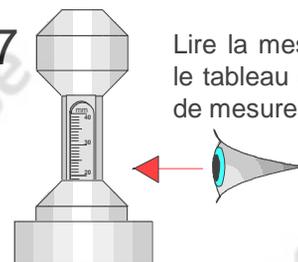


3

Découper une tranche de 5cm dans un boudin de pâte à tester. (éviter le bout du boudin qui peut être plus sec).

7

Lire la mesure, la reporter sur le tableau et nettoyer la pointe de mesure.



PLASTICITÉ CALCUL D'ANGLE

Pour mesurer ou comparer des plasticités, il est possible de procéder par la mesure de l'angle d'un boudin de pâte courbé jusqu'à apparition de fissure sur l'arrondi. À ce terme, l'angle constitué par les deux bouts du boudin est mesuré.

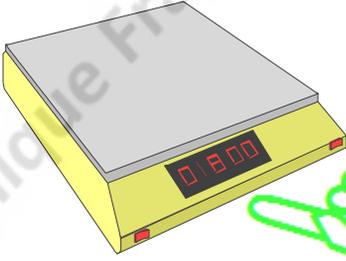


Apparition des fissures

Mesure de l'angle

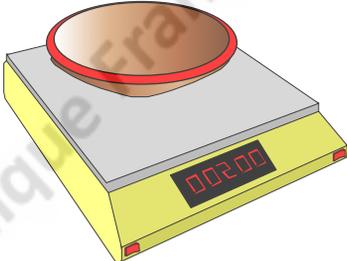
MESURE D'HUMIDITÉ DE MATÉRIAUX

1



Allumer la balance qui doit afficher 0,00.

2



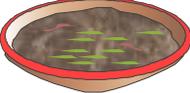
Poser le récipient vide sur la balance. Noter sa masse.

3



Remplir le récipient de matière (~500g), noter la masse totale = récipient + matière

4



Étaler la matière afin qu'elle puisse sécher plus rapidement.

5



Passer l'échantillon à l'étuve à 110°C pendant 24 heures.

6 Peser l'échantillon sec + le récipient.



7



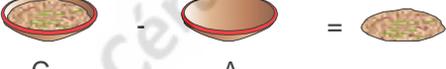
A B C

8 $B - A =$ Masse de la matière humide



B A

9 $C - A =$ Masse de la matière sèche



C A

10 $B - C =$ Masse de l'eau évaporée

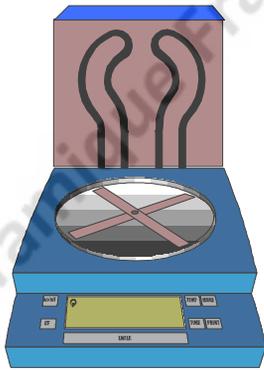


B C

11 $\frac{B - C}{C - A} \cdot 100 =$ Pourcentage d'humidité par rapport à la masse sèche



MODE OPERATOIRE THERMO BALANCE



La thermo balance est en veille, pour réactiver l'affichage, appuyer sur le bouton on/off



Après quelques seconde l'écran affiche 0,000 ainsi que les paramètres de température et de mode de calcul, vérifier si la température finale de 130°C est toujours affichée, vérifier que le mode de calcul 0-100% est affiché



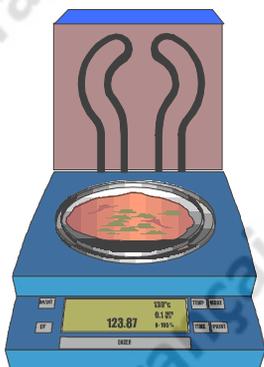
Positionner la coupelle de mesure sur le plateau de la balance:son poids s'affiche sur l'écran



Appuyer sur enter pour faire la tare du poids de la coupelle



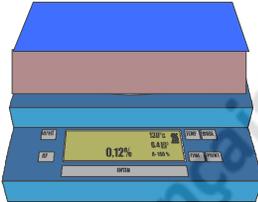
L'écran affiche alors 0,00 : préparer l'échantillon et verser environ 100g dans la coupelle



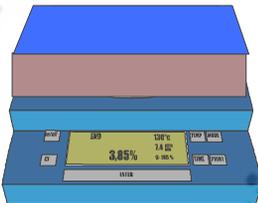
L'écran affiche le poids de l'échantillon, refermer le capot de la balance



Sur la droite de l'écran apparaît le symbole de chauffe, le temps du test commence à être compté, l'affichage se fait directement en % de perte de poids



La température continue de monter ainsi que le pourcentage de perte d'eau



En fin de test le poids reste affiché et le sigle END apparaît en haut à gauche de l'écran : la balance peut être ouverte, celle-ci doit être exempte de grains pour la prochaine pesée.



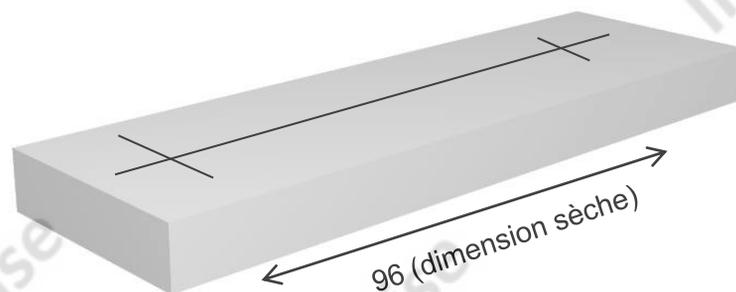
Autre type de thermo balance

RETRAIT DE SÉCHAGE

Confectionner une barrette de matière première de 120 mm de long, 30 mm de large et 10 mm d'épais, réaliser un marquage longitudinal sur l'axe, réaliser deux marques perpendiculaires espacées de 100 mm.



Faire sécher à 110 °C pendant 24h00 et mesurer à nouveau la distance entre les deux marques.



Le retrait de séchage sur humide sera $\frac{(100 - 96)}{100} = \frac{4}{100} = 4\%$

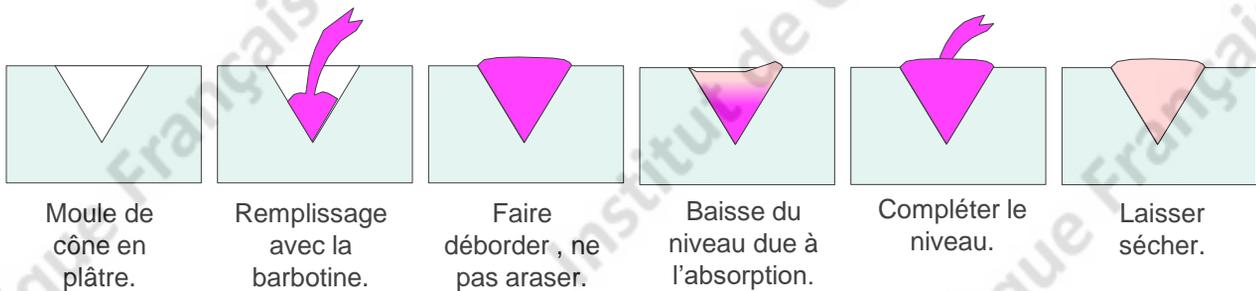
Le retrait de séchage sur sec sera $\frac{(100 - 96)}{96} = \frac{4}{96} = 4.17\%$

TEST DE FUSIBILITÉ étalement.

Il existe plusieurs types de tests de fusibilité, les informations sur le degré de fusibilité sont la plupart du temps données par la déformation plus ou moins importante d'un échantillon de la matière à tester lorsque celle-ci est soumise à haute température. Pour les entreprises devant tester très régulièrement des matières premières il existe un appareil nommé four gradient qui est capable de générer divers degrés de température à des échantillons différents.

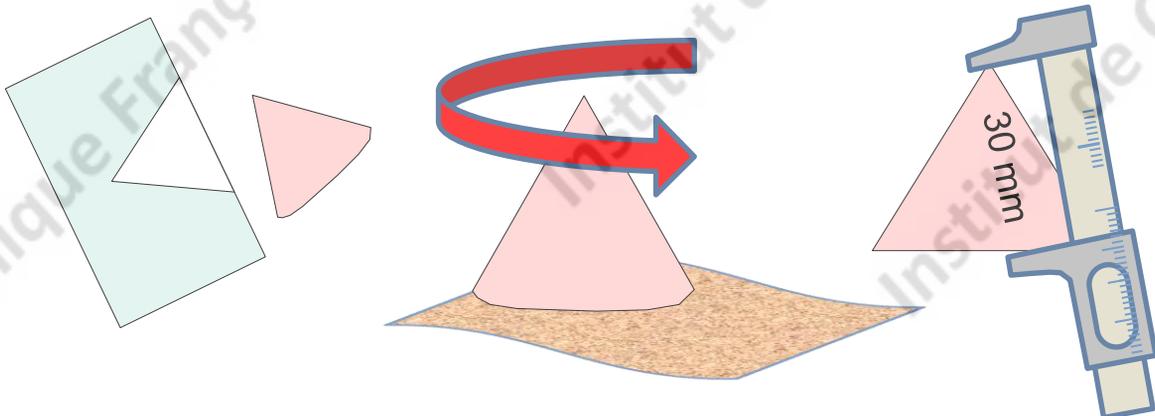
Le premier test que nous décrirons aura l'avantage de donner des informations concernant la fusibilité, mais également sur la tension superficielle des émaux. Ce test ne nécessite pas de réfractaires ou de support de cuisson spéciaux, une simple plaque de 10cm par 10 cm de la pâte habituellement utilisée suffit.

Le test consistera à réaliser un cône de 30 mm de diamètre et de hauteur dans la matière à tester. Le matériau est réduit en poudre et transformé en barbotine afin d'assurer la cohésion lorsque le cône sera sec, on peut ajouter 1/1000 sur sec de blanose dans l'eau avant de mélanger



Cette barbotine sera versée dans un moule en plâtre, pouvant recevoir plusieurs cônes de 35 mm de diamètre et 35 mm de profond. Au fur et à mesure de l'absorption d'eau, le niveau devra être complété afin qu'il ne subsiste pas de creux dans le centre du cône.

Après séchage, le cône est démoulé et arasé sur un papier de verre fin pour obtenir les dimensions finales de 30 mm de hauteur et 30 mm de diamètre.



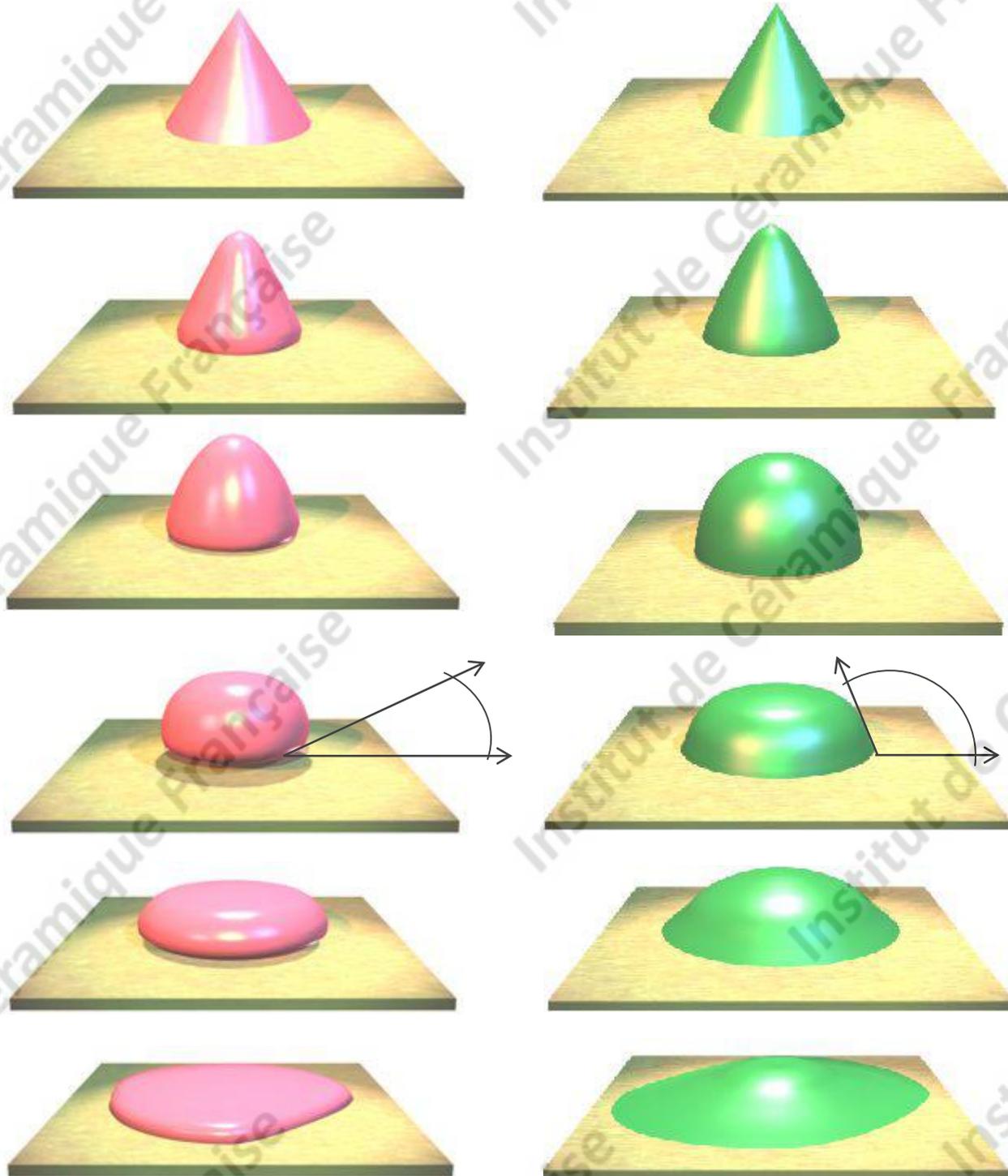
Araser à 30 mm en frottant le cône de façon circulaire, en changeant régulièrement le sens de rotation pour assurer une usure homogène.



Laisser sécher.

Évolution du diamètre du cône en fonction de la température, l'arrondi inférieur est assez court preuve d'une tension superficielle importante.

La fusibilité peut être identique, bien que la tension superficielle puisse être différente, la mesure de la tension superficielle se fera en déterminant l'angle de raccordement entre la goutte d'émail et le support horizontal.



TEST DE FUSIBILITÉ écoulement

Intérêt de cet essai :

Contrôler l'aptitude au nappage de l'émail

Trop fusible : l'émail va couler pendant la cuisson.

Pas assez : mauvais nappage.

Mode opératoire :

Si l'émail est liquide, le faire sécher 24h à 110°C.

Le mettre en poudre à l'aide d'un mortier et d'un pilon.

Peser 4.00 g de poudre d'émail sec dans une nacelle.

Humidifier la poudre avec 0.70g d'eau.

Ajuster la consistance de cette pâte en rajoutant de l'eau goutte à goutte en malaxant afin d'obtenir une boule jusqu'à ce qu'elle ne s'effrite plus (si trop d'eau, elle colle au doigt : recommencer).

Coller la boule d'émail avec une goutte de CMC (colle cellulosique) liquide sur le support de fusibilité (pour faciliter le transport de l'ensemble jusqu'au four).

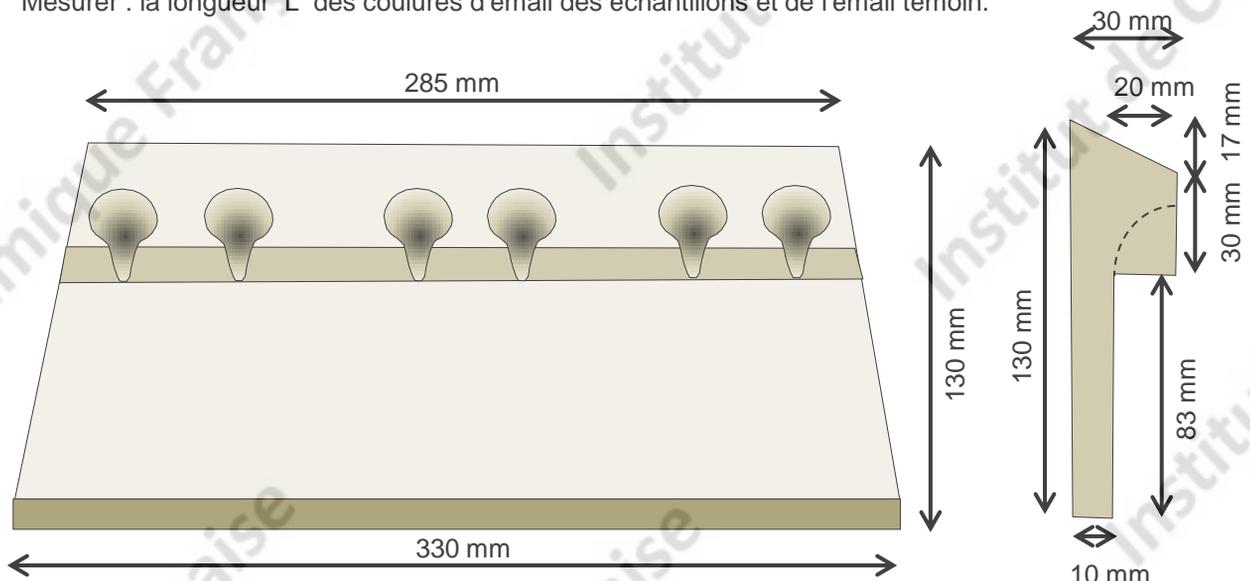
Mêmes opérations avec émail témoin.

Cuisson sur un support réfractaire permettant la bonne inclinaison dans le four industriel accompagné d'un anneau buller.



Dépouillement de l'essai :

Mesurer : la longueur L des coulures d'émail des échantillons et de l'émail témoin.



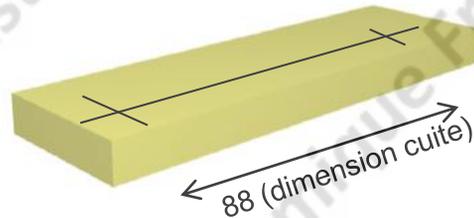
$$F / L = \frac{L \text{ échantillon}}{L \text{ témoin}} \times 100$$

RETRAIT DE CUISSON

À partir de la barrette utilisée pour le calcul de retrait de séchage, procédé à la cuisson à la température souhaitée (sans omettre de placer un témoin de cuisson à proximité de l'échantillon), mesurer à nouveau la distance entre les deux marques et la comparer à la distance de la pièce humide, ainsi le retrait total de cuisson, par rapport à la dimension initiale de la pièce, sera déterminé.

$$\text{Le retrait total sur humide} = \frac{100 - 88}{100} = \frac{12}{100} = 12\%$$

$$\text{Le retrait total sur sec} = \frac{100 - 88}{88} = \frac{12}{88} = 13,64\%$$



ATTENTION DANS CETTE DÉMONSTRATION, IL S'AGIT UNIQUEMENT LE RETRAIT LINÉAIRE ET NON LE RETRAIT VOLUMIQUE.

PERTE DE MASSE / PERTE AU FEU

Les pertes de poids peuvent donner des indications précieuses sur la composition des matériaux, en effet, nombre de réactions chimiques provoquent des pertes de poids. Les températures auxquelles ces réactions apparaissent sont connues, en déterminant quelles sont les pertes de poids aux différentes températures. Il est possible de déterminer la teneur en eau de façonnage, la teneur en eau de constitution (donc en composants argileux), la teneur en matières organiques (souvent, présente dans les argiles, ou le départ de CO_2 provoqué par la transformation du carbonate de calcium et/ou de magnésium entre 750 et 950 degrés Celsius.

La perte au feu totale sera déterminée en calculant la différence entre la masse de la pièce humide et la masse de la pièce cuite, la quantité d'eau de façonnage peut quant à elle, donner des renseignements sur la plasticité.



Masse en cru 100 grammes



Masse sèche 80 grammes

$$\text{Perte d'eau au séchage sur cru} = \frac{100 - 80}{100} = \frac{20}{100} = 20\% ; \text{ sur sec} = \frac{100 - 80}{80} = \frac{20}{80} = 25\%$$



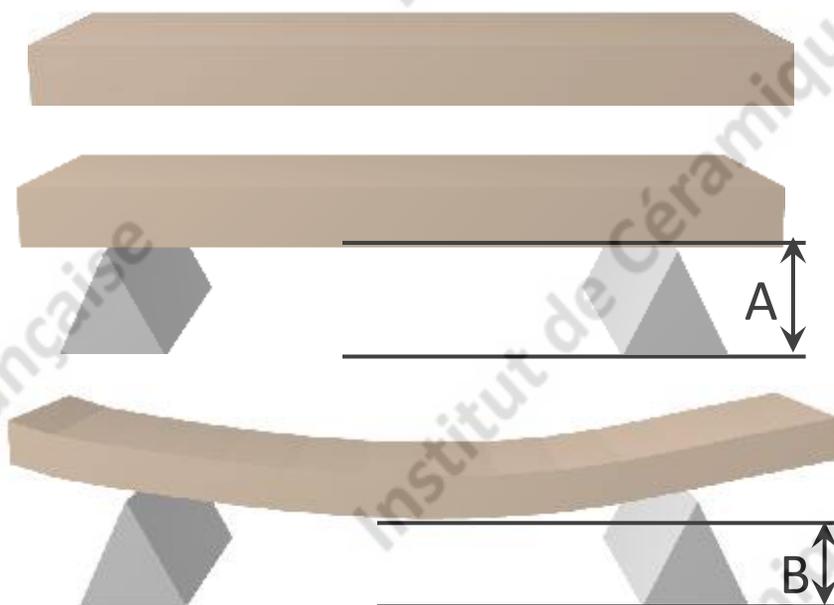
Masse cuite 66 grammes

$$\text{Perte au feu sur cru} = \frac{80 - 66}{100} = \frac{14}{100} = 14\% ; \text{ sur sec} = \frac{80 - 66}{80} = \frac{14}{80} = 17,5\%$$

$$\text{Perte au feu sur cuit} = \frac{80 - 66}{66} = \frac{14}{66} = 21,2\%$$

FLEXION À CHAUD

Le test consiste à vérifier le comportement à la déformation face à l'élévation de température, une éprouvette de 120 X 30 X 10 mm est posée sur deux supports angulaires en matériaux réfractaires, après avoir été soumise au cycle de cuisson désiré, on mesure la déformation à la flexion par rapport à la position horizontale d'origine.



CONTRÔLE DE L'ÉTAT DE CUISSON

Les montres fusibles

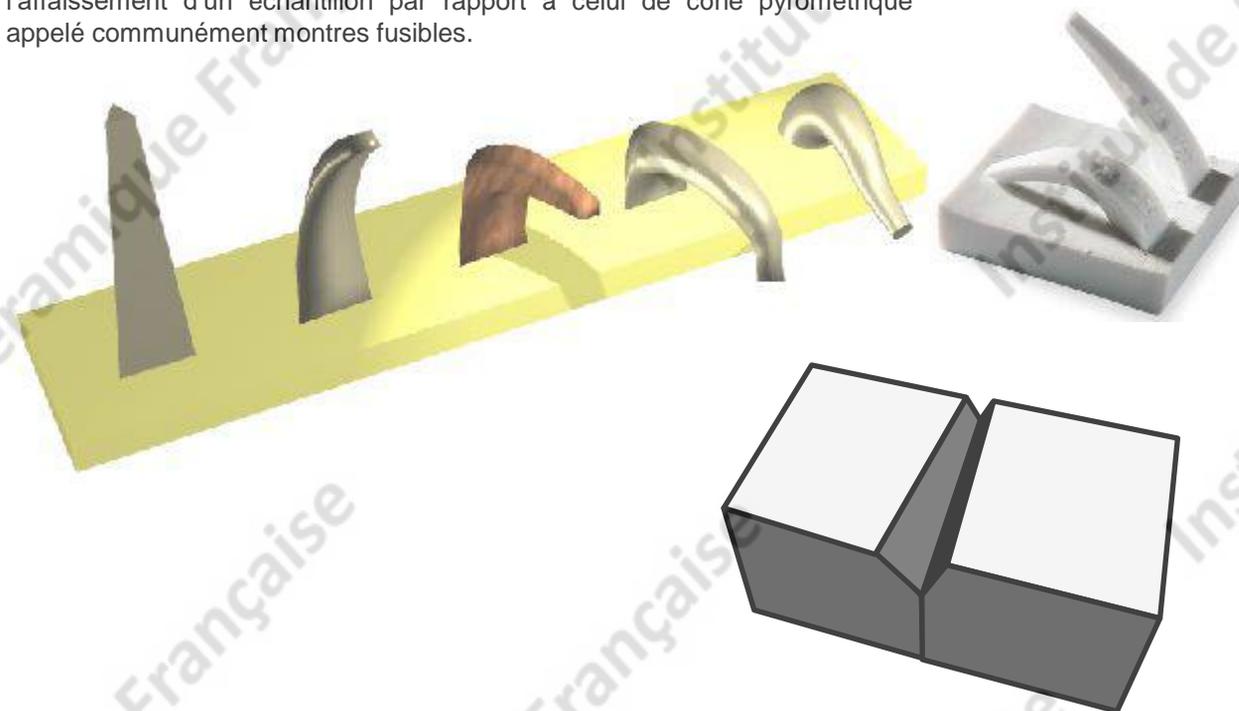
Ce sont des compositions céramiques en forme de troncs de pyramide très allongés et de sections triangulaires. À la cuisson, elles se ramollissent, fléchissent puis fondent à certaines températures. Les montres fusibles sont des compositions formées avec le mélange de matières entrant dans la composition des pâtes et émaux céramiques. Celles-ci sont, comme les produits céramiques, plus ou moins sensibles à la nature de l'atmosphère, la durée de cuisson et à la vapeur d'eau. Il existe toute une gamme de montres fusibles échelonnées de 20 en 20°C environ, de 600 à 2000°C. Les températures sont assez exactes à condition que la montée en température soit effectuée à allure identique, sinon voisine à celle utilisée pour l'étalonnage et le contrôle de l'échelle des montres.

Généralement, les montres fusibles sont utilisées pour récupérer certains moments cruciaux de la cuisson et tout particulièrement, pour juger de l'état final de la cuisson, tandis que les pyromètres et les couples thermoélectriques contrôlent les variations de température. Les montres sont groupées et disposées en divers emplacements du four afin de rendre compte, après défournement, de la répartition et de l'homogénéité des températures de ce four. La montre fusible est gravée, outre la marque du fabricant, le numéro correspondant à son point de chute. Ces montres sont de deux grandeurs : celles de 60 à 65 mm de hauteur sont souvent employées dans l'industrie et les petits modèles servent pour les essais en laboratoire (essais pyroscopiques par exemple).



RÉSISTANCE PYROSCOPIQUE

Détermination de la résistance à la température par comparaison de l'affaissement d'un échantillon par rapport à celui de cône pyrométrique appelé communément montres fusibles.



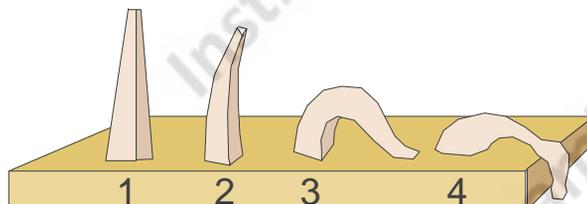
Moule de montre fusible composé de deux parties en métal, les dimensions du modèle en creux seront toujours supérieures aux modèles pour prévoir le retrait et la rectification de l'échantillon.

Les montres sont fichées presque verticalement et avec la même inclinaison, sur un support en terre réfractaire dans lequel, elles sont enfoncées d'un centimètre environ. Le support en terre réfractaire peut être préparé, auquel cas les montres seront scellées par un peu de terre fine maigre. Dans le cas où les supports de montres sont réalisés par pressage, l'inclinaison de la montre est donnée par la base de celle-ci. Il faut faire attention que le retrait du support ne soit pas inférieur à celui de la montre afin qu'elle ne se déchausse pas et ne tombe pas prématurément pendant la cuisson (le support peut être cuit avant utilisation).



Conseils pratiques :

- Éviter de détremper la base des montres fusibles en les scellant.
- Faire sécher complètement l'ensemble support-montre avant utilisation.
- Les montres cassées doivent être jetées et non recollées.
- Ménager entre les montres une distance au moins égale au quart de leur hauteur, de façon à se qu'elles puissent tomber sans entraîner les autres.
- Une atmosphère réductrice en début de cuisson empêche le liant organique des montres de brûler, il y a un risque de gonflement et d'une détérioration des montres.
- Les montres qui sont restées «figées» à la cuisson ne doivent pas être réutilisées.
- Les montres seront placées à l'abri direct des flammes et des résistances électriques.
- Utiliser les montres fusibles par trois : la première ayant le numéro au-dessous de la température à atteindre, la troisième le numéro au-dessus de la température à atteindre, et la deuxième ayant le numéro correspondant à la température finale fixée. Par exemple, pour une cuisson de grés à 1380°C, la première montre Orton n°8 :1270°C, la seconde montre n°9 à 1280°C et la troisième montre n°10 1300°C.



- 1 Droite
- 2 Pointée
- 3 Tombée (position d'arrêt)
- 4 Fondue

Remarque :

Il peut arriver que certaines montres «gèlent», c'est-à-dire que, modifiées dans leurs propriétés, elles sont rendues anormalement plus réfractaires. D'autres, au contraire, s'affaissent presque instantanément, sans présenter la déformation lente et progressive qui caractérise normalement le ramollissement d'une montre atteignant son point de chute.

Cône Orton N°	Cône grand modèle		Cône petit modèle
	60°C/heure	150°C/heure	300°C/heure
020	625	635	666
018	696	717	752
016	764	792	825
014	834	838	870
012	866	884	900
010	887	894	919
08	945	955	963
06	991	999	1023
04	1050	1060	1098
03	1086	1101	1131
02	1101	1120	1148
01	1117	1137	1178
1	1136	1154	1179
2	1142	1162	1182
3	1152	1168	1196
4	1168	1186	1209
5	1177	1196	1221
6	1201	1222	1255
7	1215	1240	1264
8	1236	1263	1300
9	1260	1280	1317
10	1285	1305	1330
11	1294	1315	1336
12	1306	1326	1355

Dans le premier cas, il semble que des montres chauffées et refroidies assez longtemps aux environs de leur vitrification puissent cristalliser et devenir rigides. Dans le second cas, il s'agit de l'action néfaste d'une quantité importante de vapeur d'eau qui se dégage en début de cuisson et qui n'a pas pu être évacuée par suite d'une insuffisance d'aération intérieure du four.

En conclusion, les montres fusibles sont des produits qui cuisent dans les mêmes conditions que tous les produits céramiques et avec les mêmes défauts de cuisson. (ATTENTION, ne jamais utiliser une montre plus d'une fois)

Tableau des montres fusibles Orton



LES ANNEAUX DE CHRONOTHERMIE

Dans la fabrication des produits céramiques, rien n'est plus critique que la précision de la cuisson, car elle a un effet direct sur la qualité et le coût des produits finis.

L'optimisation de la cuisson requiert à la fois une précision sur la température, mais également sur son homogénéité dans le four. La plupart des méthodes conventionnelles sont à ce titre limitées ; par exemple : les thermocouples utilisés dans l'industrie céramique ne mesurent pas la température du produit, mais son environnement. Ils subissent la chaleur transférée par rayonnement et ils ne prennent pas en compte la chaleur transférée par conduction du matériel d'enfournement.

Le contrôle de la cuisson à l'aide d'anneaux de température, est une méthode très précise qui permet de quantifier la chaleur réellement reçue par le produit tout au long du cycle thermique.

Les anneaux peuvent être déposés à n'importe quel endroit dans le four, soit directement sur les produits à cuire, soit sur les supports de cuisson. Cette méthode renvoie à un paramètre unique : la température d'anneau (TA), ce qui facilite l'exploitation des résultats. Les anneaux de température peuvent être utilisés aussi bien dans un four conventionnel que dans un four à passage, et sous différentes atmosphères(*).

Cinq modèles d'anneaux de température couvrent une plage allant de 850 à 1750°C. Initialement développés pour l'industrie électronique, ces produits sont aujourd'hui utilisés partout où un contrôle précis de la cuisson s'avère utile.

FONCTIONNEMENT

Lors de l'exposition à la chaleur du four, les anneaux de température se contractent et continuent de se contracter tant que la température maximale est maintenue. Ils donnent ainsi une quantité pratique de la chaleur accumulée, **dans les mêmes conditions que les produits à cuire**. Après cuisson, le retrait de l'anneau est mesuré à l'aide d'un micromètre. Ce retrait est converti à l'aide d'une table de conversion propre à chaque lot, en température d'anneau.

QUALITÉ

Les anneaux de température sont reconnus pour leur précision et leur fiabilité. Ils permettent **une mesure précise** à $\pm 3^\circ \text{TA}$. Cette fiabilité est obtenue grâce à un procédé de fabrication rigoureux. La composition des anneaux de température est ajustée de manière très précise et la production est certifiée **ISO 9002**.

L'optimisation du cycle de cuisson

En plaçant plusieurs anneaux de température dans le four, il est possible, après cuisson, d'établir une cartographie de la température. Ainsi, des zones "froides" et des zones "chaudes" sont détectées. Ces résultats permettent d'optimiser la cuisson, en ajustant les sources de chaleur et l'emplacement des thermocouples. **Ainsi, le rendement du four est amélioré**, en uniformisant la température dans le four, et également **la qualité des produits finis**.

Un contrôle qualité à faible coût

Les anneaux de température peuvent être utilisés régulièrement, pour suivre le procédé dans le temps. Ils rendent compte ainsi d'une éventuelle déviation du procédé qui peut corriger rapidement. Après avoir déterminé une température d'anneau de référence (c'est à dire pour laquelle la qualité de produits est satisfaisante), il est facile de la comparer à la température d'anneau de la charge.

Les anneaux de mesure de température, en matériau céramique sont identifiés par une couleur selon la classe de température à laquelle ils sont utilisables. Une table de conversion (Diamètre de l'anneau - Température d'anneau) établie lors de la fabrication et qui n'est valable que pour un même lot est fournie à chaque livraison. Un numéro porté sur chaque anneau permet d'identifier le lot. Les anneaux sont repartis, par groupe, suivant les températures.

- **groupe 1** - plage de mesure 850 à 1100 °C couleur verte
- **groupe 2** - " " 970 à 1200 °C, couleur rosée
- **groupe 3** - " " 1100 à 1400°C, couleur bleue
- **groupe 4** - " " 1350 à 1500°C, couleur jaune
- **groupe 5** - " " 1450 à 1750°C, couleur blanche



DÉFORMATION À LA CUISSON

Couler 3 cylindres (8mm x 150 mm)

Faire sécher 24H à l'étuve 110°C, les trois cylindres sont placés dans le support en laissant 10 cm hors encastrement, avec le côté nourrice à l'intérieur.

Enfourner le support avec un anneau pyrométrique au même niveau.

Retirer le support du four une fois le four froid.

Retirer les cylindres du support après avoir tracé dessus un trait au ras du support.

Mesurer la longueur totale (l), la longueur hors encastrement (L), c'est-à-dire la longueur qui dépassait du support à partir du trait.

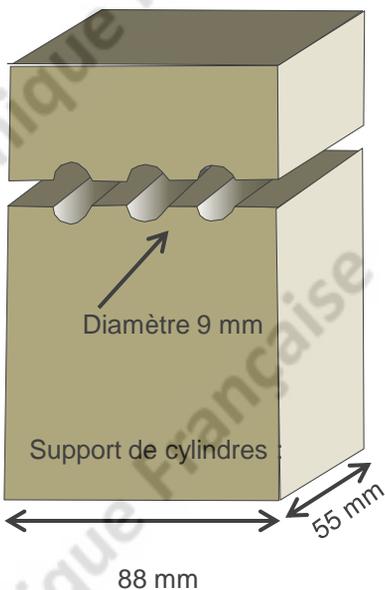
Mesurer le diamètre (d) au niveau du milieu du cylindre et la flèche (F) avec le support de mesure.



Coulage des cylindres



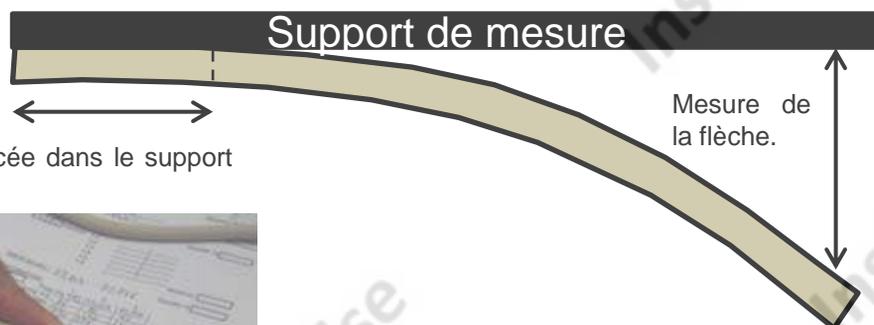
Séchage sur une plaque rainurée pour éviter les déformations.



Cylindres avant cuisson



Cylindres après cuisson



Partie horizontale coincée dans le support pendant la cuisson.

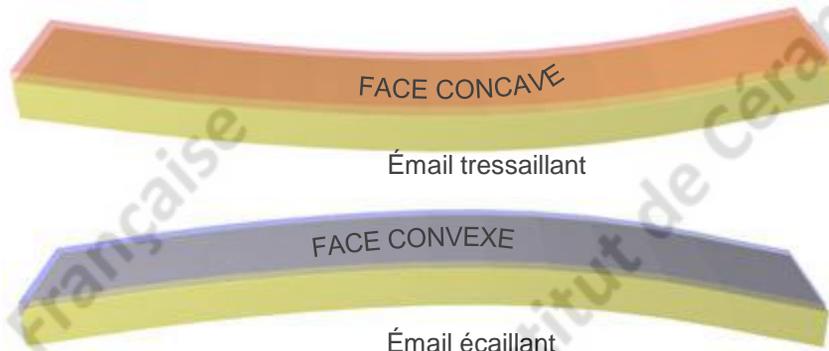


Longueur totale : 132 mm
Longueur hors encastrement (qui dépasse de la brique) 92 mm
Diamètre 8 mm

TEST DE COMPATIBILITÉ DE DILATATION

Les véritables valeurs de dilatation ne pourront être fixées que par l'établissement des courbes dilatométriques de la pâte et des émaux. Le test suivant permet simplement de connaître la compatibilité entre un biscuit et un émail. Il est réalisé une plaque de la pâte à tester de 3mm, après la cuisson des languettes de 120 mm de long sur 20 mm de large sont découpées. Elles seront émaillées avec les émaux à tester selon les épaisseurs en vigueur dans l'entreprise, cependant les tests comparatifs ne seront possibles que si les épaisseurs d'émail déposées sont identiques.

Les languettes émaillées sont disposées dans le four, avec un témoin de cuisson, selon que l'émail soit très tressaillant ou écaillant sa tension lors du refroidissement provoquera une déformation concave ou convexe de la languette, en mesurant la flèche de déformation, la tendance au tressaillage ou à l'écaillage de l'émail peut être déterminée.



TEST DE DILATATION D'UN ANNEAU

Résultats attendus : Valeur de compression ou de tension de l'émail.
Humidifier les creux et talquer les bosses du moule d'anneaux

Remplir le moule à une hauteur d'environ 1 cm dans la nourrice.

Après la prise (entre 5 et 15 min selon les mélanges) ; ouvrir le moule, attendre quelques minutes et couper les canaux d'alimentation puis laisser prendre du retrait dans le moule.

Démouler, ébavurer et sécher (à l'étuve à 110°C).

Poncer les anneaux pour avoir des basses planes.

Peser 20g d'émail, ajouter entre 1 et 1,5 g d'eau et émailler avec un pinceau la surface extérieure d'un anneau avec la totalité des 20g.

Désémailler les deux bords au papier de verre et laisser sécher.

Refaire l'opération pour les quatre anneaux.

Cuire les anneaux avec un anneau pyrométrique au centre
Placer l'anneau cuit sur l'appareil de mesure de diamètre

Rechercher une position d'équilibre en faisant tourner l'anneau, puis fixer la valeur du comparateur à zéro (faire tourner le cadrant pour que l'aiguille et le zéro soient au même endroit).

Tracer sur les bords de l'anneau les prolongements de l'horizontale (repère 3).

Couper l'anneau, avec la scie diamantée, sur un des repères 3.

Replacer l'anneau à l'aide des repères 3 et noter la valeur donnée par le comparateur.

Expression des résultats :

Faire la moyenne des quatre anneaux :

- Si la moyenne est > 0 , alors l'émail est en compression.
- Si la moyenne est < 0 , alors l'émail est en tension.

TEST DE COMPATIBILITÉ DE DILATATION



Moule de quatre anneaux entre deux plâtres.



Talcage du moule



Coulage



Démoulage



Finition



Passage de l'émail au pinceau

Désémaillage



Anneaux prêts à cuire.



Cuisson avec positionnement de témoins de cuisson.



Positionnement de l'anneau et mise en rotation jusqu'à affichage du plus petit diamètre.



Le plus petit diamètre est déterminé (flèche verte).



Le diamètre est repéré en positionnant le 0 du cadran extérieur sur la position de l'aiguille.



Repérage et marquage du futur trait de coupe.



Coupe avec une scie diamant d'un diamètre de 230 mm.



L'anneau est repositionné sur les mêmes repères et la différence entre le diamètre avant et après la coupe diamant est mesurée, si le diamètre augmente, l'émail est d'un coefficient de dilatation supérieur à celui de la pâte et il est en tension, il y a un risque de tressillage. A contrario, si le diamètre diminue cela signifie que l'émail est en compression, c'est-à-dire que son coefficient de dilatation est inférieur à celui de la pâte et il présente des risques d'écaillage.

COULABILITÉ PLÂTRE

Elle est mesurée à l'aide de l'anneau de Schmitt (Anneau cylindrique en laiton de 60 mm de diamètre intérieur et 50 mm de hauteur).

Le test consiste à mélanger 500 g d'eau avec la quantité requise de plâtre (utiliser le taux de gâchage en vigueur dans l'entreprise) à remplir l'anneau de Schmitt qui sera posé à plat sur une plaque de verre, et à soulever l'anneau 3 min 15 sec après le début du gâchage.



PRISE PLÂTRE

Le test de prise le plus courant est appelé "Temps-couteau". Il consiste à verser sur une plaque de verre un mélange d'eau et de plâtre correspondant au taux de gâchage.

Toutes les 10 secondes, une galette est tranchée avec la lame d'un couteau. Le moment où le sillon ainsi réalisé ne se referme plus est appelé temps de début de prise.

La fin de prise est atteinte lorsque la pression du pouce sur la galette ne fait plus sortir d'eau et ne laisse pas d'empreinte.



DOSAGE CARBONATE / CALCIMÈTRE

Un calcimètre permet de déterminer le volume de CO_2 dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) d'un échantillon de sol ou de roche. Il est possible de fabriquer un calcimètre avec :

- une ampoule
- un tube gradué de 100 cm^3
- un erlenmeyer de 100 cm^3
- un petit tube en verre environ deux fois moins haut que l'erlenmeyer
- deux bouchons à 1 trou adaptés au tube gradué et à l'erlenmeyer
- 1,5 m de feuille anglaise

Prévoir :

- une balance à 0,01 g pour peser l'échantillon.
- un portoir pour le petit tube
- une grosse pince à dissection
- un peu de pâte à modeler (non attaquée par l'acide)
- une pipette graduée
- HCl assez concentré

Préparation

Préparer une solution saturée de NaCl (environ 1/4 de litre) ; la verser jusqu'à mi-hauteur de l'ampoule. Remarque : en utilisant de l'eau non salée, une partie du CO_2 dégagé va se dissoudre dans l'eau et le résultat sera erroné. L'ampoule est remplie jusqu'à équilibrage du tube sur le zéro de la graduation.

Placer dans l'erlenmeyer l'échantillon. Coller une boulette de pâte à modeler sous le petit tube. À l'aide d'une pipette, verser dans le tube d'HCl assez concentré. À l'aide d'une grosse pince, mettre en place le tube dans l'erlenmeyer. Boucher l'erlenmeyer.

Attention ! Si la masse de CaCO_3 est supérieure à 0,4 g, le volume de CO_2 dégagé sera trop important pour être mesuré.

SELS MINÉRAUX



Incliner l'erlenmeyer afin de faire couler l'acide sur l'échantillon.
Reposer l'erlenmeyer et attendre la fin de l'effervescence.

Remarque : pour une mesure précise, il convient d'attendre un rééquilibrage de la température avec celle de l'air ambiant (réaction exothermique).



Modifier la hauteur de l'ampoule de manière à ce que l'eau salée soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué.
Le contenu de l'erlenmeyer sera alors à la pression atmosphérique.

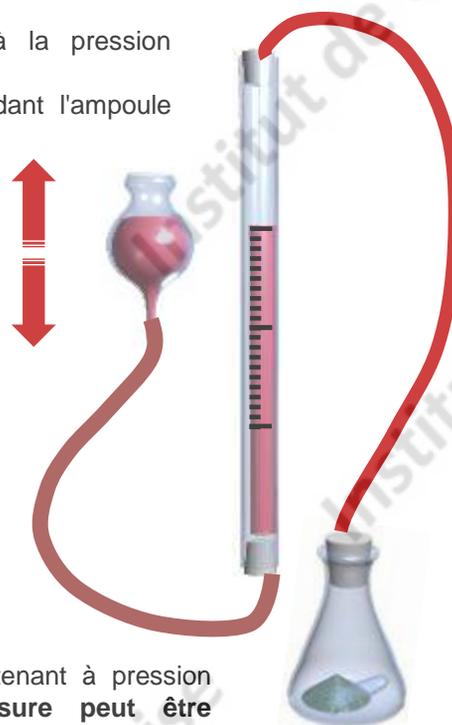
Noter le niveau.



Mesure

La pression dans le tube gradué est alors supérieure à la pression atmosphérique.

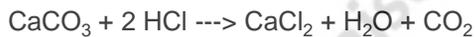
Il convient de rétablir la pression atmosphérique en descendant l'ampoule jusqu'à obtenir le même niveau dans l'ampoule et le tube.



Le CO_2 dégagé est maintenant à pression atmosphérique : la mesure peut être effectuée.

Ouvrir l'erlenmeyer ; ajouter un peu d'acide sur l'échantillon.
Vérifier que l'acide était bien en excès et que tout le CaCO_3 a été attaqué.

Le calcul de la teneur en CaCO₃



Si l'acide HCl est en excès, son action sur une mole de CaCO₃ (100g/mol) libère une mole de CO₂ (22,414 litres soit 22414 cm³).

Connaissant le volume de CO₂ dégagé (niveau final - niveau initial), faire un produit en croix pour calculer la masse de CaCO₃ attaqué.

Connaissant la masse de CaCO₃ et la masse de l'échantillon, faire un produit en croix pour calculer le pourcentage de CaCO₃ dans l'échantillon.

A.N. sur l'exemple ci-dessus (roche n° 5)

Masse de l'échantillon = 0,54 g

Niveau initial = 0 cm³

Niveau final = 44 cm³

Masse de CaCO ₃	Volume de CO ₂	
100 g	22414 cm ³	$x = (44 \times 100) / 22414$ $x = 0,196$
x g	44 cm ³	

Masse de CaCO ₃	Masse de roche	
0,196 g	0,54 g	$y = (0,196 \times 100) / 0,54$ $y = 36,35$
y g	100 g	

100 g de roche n°5 contiennent 36,35 g de CaCO₃ : cet échantillon la roche n°5 contient 36,35 % de calcaire (il faudra faire plusieurs mesures et calculer une moyenne pour avoir un résultat plus significatif).

QUANTIFICATION SELS MINÉRAUX



Les efflorescences sont liées aux quantités de sels minéraux (essentiellement sulfates et carbonates) contenus dans la pâte et non transformés lors de la cuisson, afin de déterminer empiriquement si ceux-ci sont en augmentation dans une matière première ou comparer deux matières premières entre elles, il suffit de plonger l'extrémité d'un échantillon dans une soucoupe d'eau distillée et de laisser migrer l'eau vers le haut de l'échantillon, les sels seront dissous partiellement par l'eau et transportés à l'extrémité supérieure de l'échantillon. La comparaison sera uniquement visuelle.



Après quelques heures, des traces de sels minéraux apparaissent sur la surface extérieure de l'échantillon et notamment dans la partie supérieure.

POROSITÉ

POROSITE / ABSORPTION D'EAU (technique sous vide)

Rôle de cet essai :

Déterminer le % d'eau absorbée par un échantillon de produit cuit : $\%_{\text{eau}} = \frac{\text{masse.humide} - \text{masse.sèche}}{\text{masse.sèche}} \cdot 100$

Les échantillons cuits préalablement séchés (pour éliminer une éventuelle reprise d'humidité ambiante) sont pesés (masse sèche)

Les échantillons sont mis dans une cloche à vide

Le vide est maintenu pendant 1h (environ -1bar)

La pompe à vide est arrêtée

Introduction de l'eau jusqu'à immersion des échantillons

Le vide est rompu

Essuyage avec une peau de chamois légèrement humide en tamponnant.

Peser : masse humide



Positionner l'échantillon à imprégner dans une cloche à vide, munie d'une arrivée d'eau centrale



Faire le vide à l'aide d'une pompe ou d'une trompe à eau



Quand le vide réalisé est égal à 700 mm de mercure, le maintenir pendant une heure puis ouvrir le robinet d'eau



L'eau va parfaitement imprégner l'échantillon dont les pores ne contiennent plus d'air, (attention à compléter le niveau d'eau pour éviter de casser le vide).

POROSITÉ / ABSORPTION D'EAU (technique ébullition)

Définition Absorption d'eau :

Augmentation de masse (exprimée en pourcentage de la masse du matériau sec) des tessons qui, après détermination de la masse sèche, sont placés dans l'eau portée à ébullition pendant 2 h, refroidis, toujours entièrement immergés, sortis de l'eau et pesés après avoir essuyé l'excès d'eau.

Appareillage

- Une étuve (110 ±5)°C
- Un contenant approprié dans lequel on porte l'eau à ébullition
- Une source de chaleur
- Une balance précise au 1/100^{ème} g
- De l'eau déminéralisée
- Un dessiccateur
- Une peau de chamois

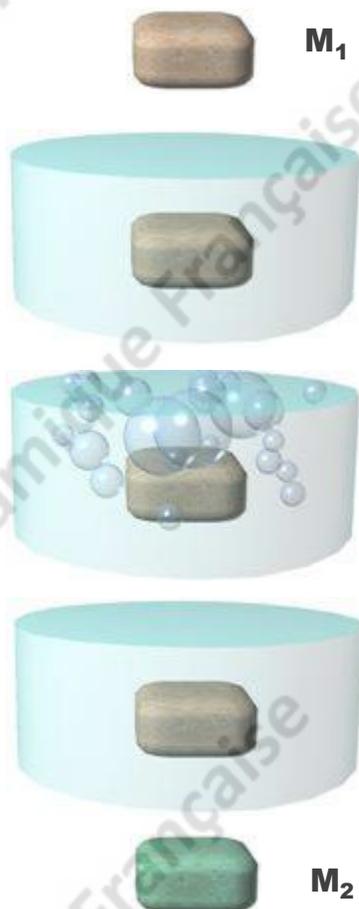
Éprouvettes :

5 tessons comportant au moins une face non émaillée

Masse minimum par tesson : 50g

Mode opératoire :

- Sécher les éprouvettes dans l'étuve (110±5)°C pendant 24h (jusqu'à masse constante).
- Refroidir les éprouvettes dans le dessiccateur avec du gel de silice jusqu'à température ambiante.
- Peser chaque éprouvette .
- Placer les éprouvettes dans l'eau déminéralisée, de telle façon qu'elles ne soient pas en contact.
- Porter l'eau à ébullition et maintenir cette ébullition pendant 2 h .
- Maintenir le niveau d'eau au-dessus des éprouvettes au cours de l'essai.
- Retirer la source de chaleur et les laisser refroidir immergées jusqu'à température ambiante.
- Préparer une peau de chamois mouillée puis essorée.
- Sécher légèrement chaque face des éprouvettes en les tamponnant avec la peau de chamois.
- Immédiatement après cette opération, peser les éprouvettes.



M₁ Masse de l'échantillon sec

Mettre l'échantillon dans un récipient d'eau froide.

Faire bouillir pendant 2 heures en prenant soin de compléter le niveau d'eau

Laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.

M₂ Masse de l'échantillon humide

M₁ - M₂ = M₃ = masse d'eau absorbée

M₃ / M₁ x 100 = % eau de la porosité ouverte

MASSE VOLUMIQUE RÉELLE



M_4

M_5

$$M_5 - M_4 = M_6$$

$M_6 / \text{Masse volumique eau} = \text{volume pycnomètre } V_1$



M_7

M_4

$$M_7 - M_4 = M_8 \text{ Masse de poudre}$$



M_9

M_7

$$M_9 - M_7 = M_{10}$$

$M_{10} / \text{Masse volumique eau} = \text{volume du complément d'eau}$



M_6

M_{10}

$$M_6 - M_{10} = M_{11}$$

$M_{11} = \text{masse d'eau représentant le volume de la poudre}$

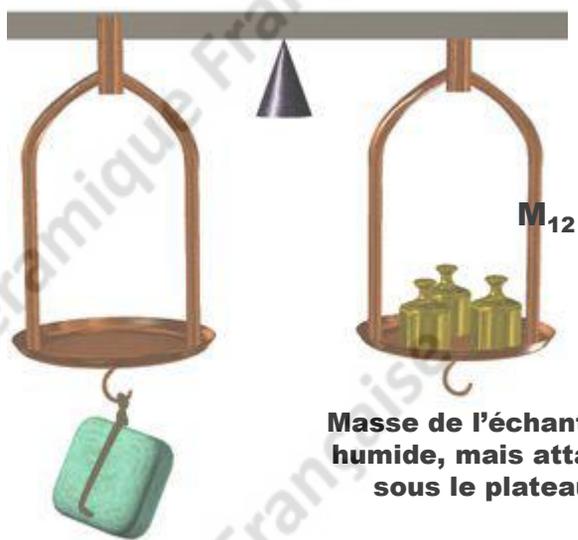
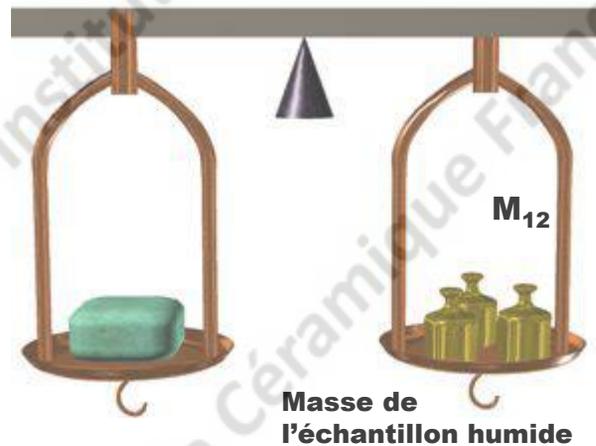
$M_{11} / \text{Masse volumique eau} = \text{volume de la poudre} = V_{11}$

$M_8 / V_{11} = \text{masse volumique poudre}$



VOLUME RÉEL D'UN ÉCHANTILLON

Balance hydrostatique



Pour rétablir l'équilibre, il faut enlever des poids sur le plateau de droite, la masse enlevée $M_{12} - M_{13} = M_{14}$ correspondra à la force de poussée d'Archimède soit l'équivalent de la masse du volume de l'eau déplacée (ou remplacée) par le liquide, en fait cela revient à mesurer le volume de l'échantillon.

POROSITÉ FERMÉE



M_1 Masse de l'échantillon sec

M_8 / V_{11} = masse volumique poudre

$M_1 / (M_8 / V_{11})$ = volume réel échantillon =

V_{12}



$M_{14} /$ masse volumique eau = volume apparent échantillon =

V_{13}

$V_{13} - V_{12}$ = volume de la porosité totale
(fermée et ouverte) = V_{14}



M_2 Masse de l'échantillon humide

$M_1 - M_2 = M_3$ = masse d'eau absorbée

$M_3 /$ masse volumique eau = volume porosité ouverte = V_{15}

$V_{14} - V_{15} = V_{16} =$ **VOLUME DE LA POROSITÉ FERMÉE**

RÉSISTANCE MÉCANIQUE



Pesée du récipient vide



Positionnement de la barrette sur les couteaux et mise en place du récipient



Remplissage du récipient avec de la grenaille de fer



La barrette cède sous l'effet de l'augmentation du poids de grenaille de fer déversée, il suffit alors de calculer la résistance mécanique en fonction de la surface de la cassure selon la formule suivante :

$$\text{Module de rupture} = \sigma = \frac{8.FL}{\pi.d^3}$$

F = charge de rupture

L = longueur de portée

d = diamètre de la barre



GRANULOMÉTRIE

Les réactions des matériaux fusibles céramiques et notamment les émaux, sont largement conditionnées par la granulométrie des poudres, pour, la fusibilité, la tension superficielle...

Les courbes granulométriques pourront être obtenues par différentes méthodes, la première consistera à empiler des tamis de différentes mailles les uns sur les autres, et ensuite de faire passer une quantité d'émail déterminée, le tamisage sera facilité par la mise en vibration de la pile de tamis et par l'arrosage permanent du tamis le plus gros (afin d'évacuer les quantités d'eau déversées le dernier tamis sera muni d'un réceptacle pourvu d'une sortie).



GRANULOMÉTRIE JAUGE HEGMAN

La jauge de finesse de broyage permet d'évaluer la finesse et la présence de grosses particules ou agglomérats dans une dispersion.

Les jauges de broyage sont utilisées au contrôle qualité dans les services de production, de stockage et d'application des dispersions dans les industries de la peinture, des pigments, des encres, du papier, des céramiques, de la pharmacie, de l'alimentaire, etc.

La jauge de finesse de broyage est un bloc plat en acier dont la surface est entaillée de deux rainures plates et uniformes. Ces rainures s'étendent d'une profondeur maximale à une extrémité de la jauge et de façon décroissante jusqu'à rejoindre le point zéro à l'autre bord du bloc acier. La profondeur des rainures peut être lue grâce aux échelles gravées sur les côtés. La plupart des jauges de finesse sont marquées d'une échelle en mils ou en microns.

1 mil = 25.4 microns

1 mil = 0.001 inch

1 micron (μm) = 0.001 mm

L'échelle Hegman ou échelle National Standard est indiquée sous l'abréviation "NS" sur la jauge. L'échelle s'étend de 0 à 8. Plus la valeur Hegman est élevée, plus les particules sont petites.

0 Hegman: taille de particule = 100 μm (4 mil)

4 Hegman: taille de particule = 50 μm (2 mil)

8 Hegman: taille de particule = 0 μm (0 mil)

Utilisation

Placer l'échantillon du produit au point le plus profond des rainures.

Étaler à l'aide de la règle de précision en position inclinée jusqu'à l'autre extrémité. Mettre le bloc à hauteur des yeux et déterminer le point de mesure pour lequel de grosses particules ou des traces sont visibles.



TEST DU TAMIS BAYER

Cet essai simplifié et accélère le contrôle de la finesse de broyage des émaux.

Avec l'aide de cet appareil, une petite quantité d'émail peut être mesurée immédiatement après le prélèvement (sans séchage) ce résultat représente un gain de temps important, le test dure 2 minutes.

Mode opératoire :

Verser une dose d'émail liquide dans l'entonnoir de tamisage

Arroser et faire osciller l'ensemble jusqu'à ce qu'il ne reste plus que les plus grosses particules et que (l'eau qui s'écoule de l'entonnoir de tamisage s'éclaircisse).

Fermer le tube de mesure avec son bouchon.

Remplir d'eau le tube de mesure.

Raccorder le tube de mesure à l'entonnoir de tamisage.

Arroser l'extérieur du tamis pour décoller et faire retomber le refus dans le tube de mesure

Retirer les bulles d'air en tapotant.

Une fois le refus sédimenté au fond du tube, la graduation permet d'évaluer la finesse du produit.

Les composants du tamis Bayer sont :

l'entonnoir de tamisage , les tamis n° 60 (3.600 mailles / cm²) et n° 130 (16.900 mailles / cm²) , la douille vissée, un entonnoir, une dosette, un tube de mesure et son bouchon.

36 µm : pâte sérigraphique (24000 mailles/cm²)

43 µm : émaux aluminium (16900 mailles/cm²)

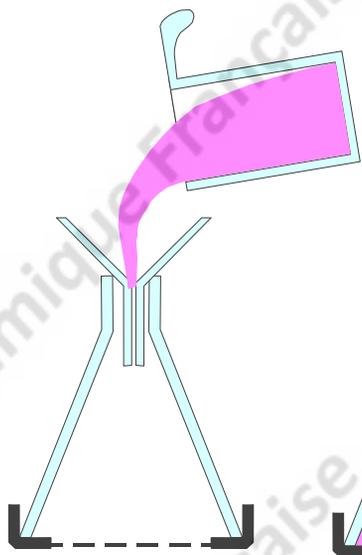
63 µm : Poudres électrostatiques (9600 mailles/cm²)

100 µm : couvertes (3600 mailles/cm²)

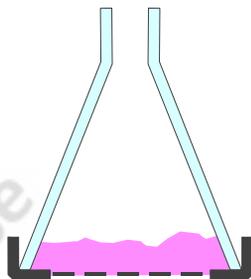


Tamis

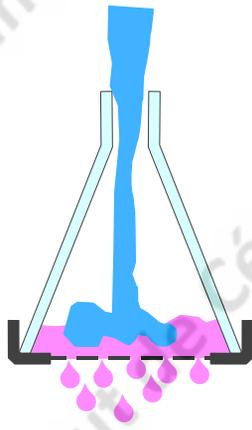




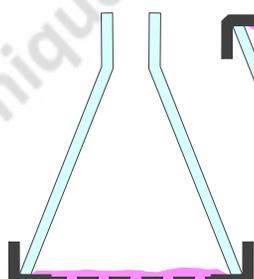
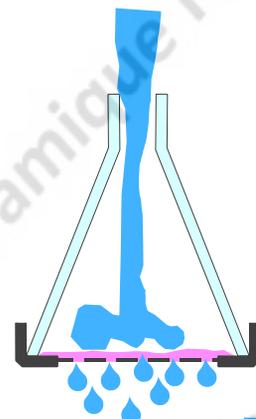
Remplissage du cône de tamisage



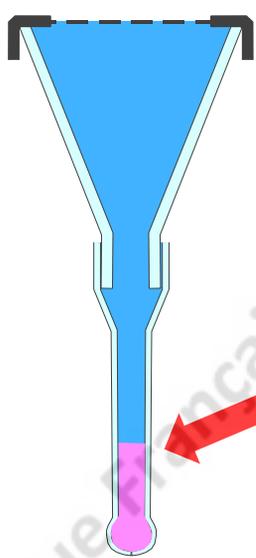
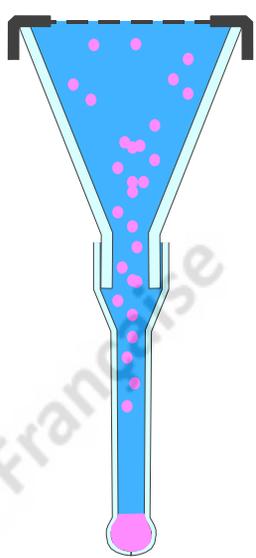
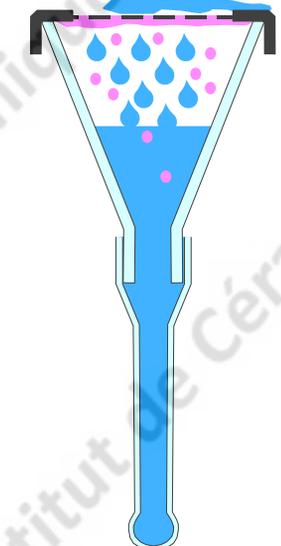
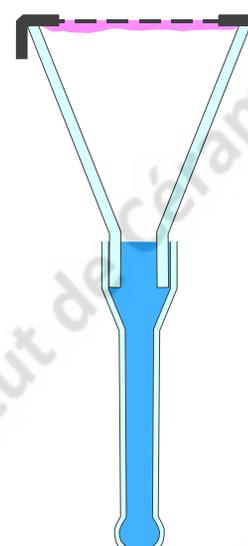
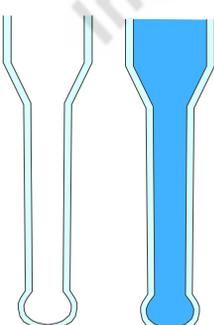
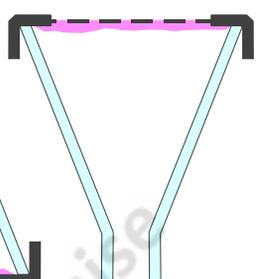
Lavage à l'eau



Lavage à l'eau jusqu'à ce que l'eau ressorte clair.



Les particules les plus grosses restent dans le cône.



Mesure comparative de la hauteur sédimentée

PROPRETÉ DES REFUS

Rôle de cet essai : vérifier l'état de propreté des matières premières de la pâte ou de l'émail.

Deux types d'essais : magnétique et non magnétique.

Impuretés métalliques magnétiques : présence de fer.

Non magnétiques : exemple : cuivre

Principe :

Sur une matière première :

Pour le refus magnétique

Prélèvement environ 1.5kg de matière première.

Carottage au hasard dans le lot de sacs sur chaque palette.

Peser le prélèvement.

1^{er} déferrage grossier (les particules magnétiques ont été séparées, mais il reste de la matière),

prélèvement de 250g de matière déférée passée.

Déferrage final en faisant passer la partie séparée précédente 5 fois sur une batterie d'aimants.

Récupération et pesée des particules magnétiques.

Émailler une plaquette avec 15 g d'émail + 1g d'eau (en supplément pour faciliter l'émaillage au pinceau) +

tout le refus magnétique

Cuisson au four industriel.

Compter le nombre de taches au cm².

Pour le refus non magnétique :

Récupérer les 250g déferrés grossièrement.

Tamiser (ouverture de maille du tamis spécifique à la matière) en voie liquide.

Faire sécher le refus sur tamis à 50°C 24h.

Peser.

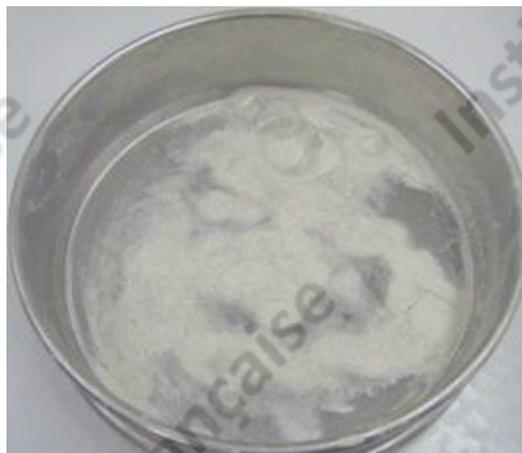
Faire une plaquette avec 15g d'émail + 1g d'eau + 1g de refus non magnétique.

Cuisson au four industriel.

Compter le nombre de taches au cm².

Le nombre de taches tolérées est propre à chaque matière première.

Une des façons de vérifier l'état de propreté des matières premières, notamment celles des émaux broyés, il suffit de prendre 100 g d'émail de les tamiser à 300 microns en rinçant abondamment pour faciliter le passage à travers le tamis.



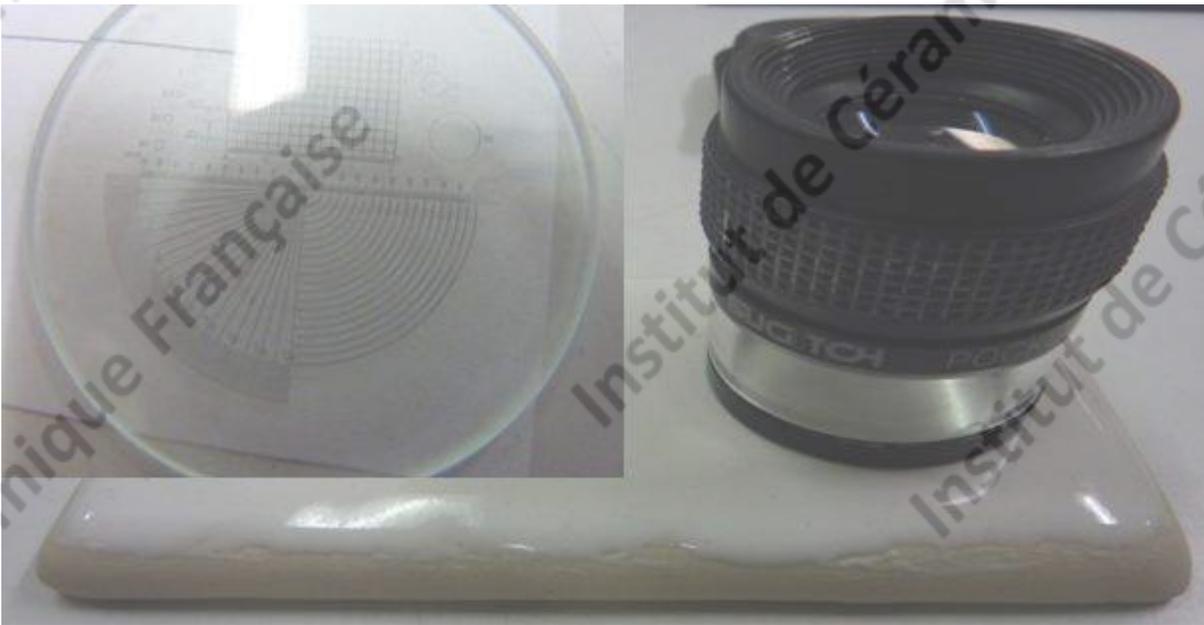
PROPRETÉ DES REFUS



Préparation de l'émail



Émaillage au pinceau d'un carreau



Comptabilité du nombre de points et de taches au cm²

Tamis pour test de propreté:	
Bain d'émail	80 microns
Matières premières pâtes et émaux	50 microns
Barbotine	50 microns
Plâtre	200 microns



Ce document est réalisé dans le cadre de la convention de coopération conclue entre le ministère de l'éducation nationale et la CICF.
2015



Remerciements à :

* L'Institut de Céramique Française : Philippe Orliac, Jean Pierre Mary, Vincent Tison, Thierry Poirier et Jean-Marie Gaillard.

* Le CFA Céramique Bourgogne : Philippe Dubois.

* LP Modelage : Michel Poisson et Rémy Lacroix.

* Le Lycée Henri Moisan : l'équipe pédagogique céramique.

* Les partenaires sociaux du groupe technique tripartite et les syndicats professionnels.



INSTITUT de CÉRAMIQUE FRANÇAISE

**PEC Ester TECHNOPOLE, 1 Avenue d'Ester
87069 LIMOGES CEDEX**

Secrétariat : 03 80 37 75 36, Direction : 06 82 69 12 47

institutdeceramiquefrancaise@gmail.com