

Master I

Module : Elaboration et caractérisation des matériaux céramiques

Chapitre I : Généralités (1s)

Chapitre II : Céramiques structurales et fonctionnelles. (2s)

Chapitre III : Propriétés des céramiques techniques. (1s)

Chapitre IV : Grandes classes de matériaux céramiques: alumines, aluminosilicates, oxydes, carbures de silicium, nitrures de silicium, autres céramiques, vitro-céramiques et fibres. (1s)

Chapitre V : Méthodes d'élaboration et Modification de la microstructure (2s)

Chapitre VI : Évaluation des propriétés et méthodes d'essais non destructifs. (1s)

Objectifs de l'enseignement:

Cet enseignement permet à l'étudiant l'assimilation des techniques d'élaboration et de caractérisation mécaniques et physiques céramiques techniques utilisés dans l'industrie. Il lui permet également la compréhension des techniques d'élaboration des bimatériaux de types céramique-métal et de leurs mécanismes d'adhésion. Il donne les connaissances nécessaires sur l'importance des ces matériaux dans les performances économiques et techniques et de lui permettre être en mesure d'analyser et de comprendre les différents choix de céramiques en fonction de leurs mise en service.

I. Généralités : matériau

DEFINITION DES CERAMIQUES PARMIS LES MATERIAUX

Il existe trois grandes classes de matériaux :

- Les métaux et leurs alliages;
- Les polymères organiques;
- Les céramiques.

À ces trois classes, il convient d'en ajouter une quatrième :

► Les matériaux composites : qui sont des « mélanges hétérogènes » de matériaux des trois classes précédentes.

- Le terme céramique vient du grec « keramikos » qui signifie terre cuite ou terre à potier.
- Depuis des millénaires, les potiers ont choisi des matières premières argileuses qui ont la propriété de donner avec l'eau une pâte plastique qui se modèle aisément et qui devient dure, solide et inaltérable après cuisson.
- Une céramique est un matériau de synthèse, ni organique ni métallique, dont l'élaboration fait appel à des traitements thermiques. (La définition la mieux adaptée pour les céramiques d'aujourd'hui).

Ainsi le terme « céramique », s'est étendu à toute une gamme de produits. Les oxydes purs, les carbures, les borures, les nitrures, les siliciures, les sulfures ont été successivement inclus dans la catégorie des céramiques.

CHOIX DE LA CERAMIQUE

Le choix d'un matériau céramique face aux métaux ou aux plastiques s'impose lors de conditions d'utilisation extrêmes : température, pression, corrosion, et ce d'autant plus si ces conditions sont simultanées ou prolongées dans le temps.

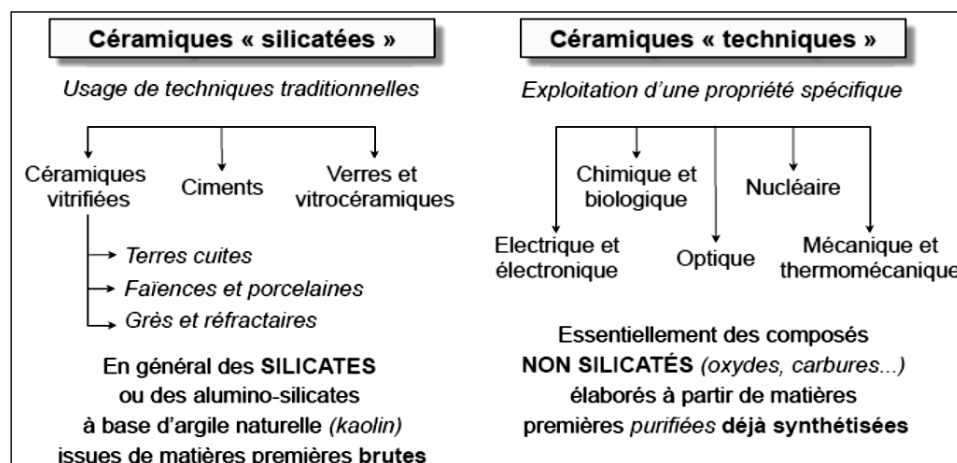
Les propriétés typiques d'un matériau céramique présentent les avantages suivants :

- Haute résistance à l'usure, à la chaleur, à la pression et aux attaques chimiques (gaz et liquides).
- Dureté et rigidité élevée.
- Très bon isolant électrique et thermique.
- Matériau relativement léger.
- Température de fusion élevée et faible dilatation thermique.

CLASSIFICATION DES CERAMIQUES

Le terme de céramique étant très large, il englobe une vaste gamme de matériaux :

- **Les céramiques traditionnelles**, tels, la porcelaine, les appareils sanitaires, les briques, les tuiles et tous les produits constitués essentiellement de silicates (verres et vitrocéramiques).
- **Les céramiques silicatées** sont élaborées essentiellement à partir d'alumino-silicates naturels plus ou moins complexes que sont les argiles et qui présentent cette particularité, après mélange avec de l'eau, de devenir une pâte plastique permettant une mise en forme facile d'objets (Ex. ciment).
- Puis, progressivement, ont été inclus des matériaux non silicatés comme les oxydes, les carbures, les nitrures, les borures... appelés **céramiques techniques**.



II. Céramiques structurales et fonctionnelles

LES CÉRAMIQUES STRUCTURALES

Les céramiques structurales, interviennent dans la construction d'appareils ou de machines dont certaines pièces nécessitent une haute dureté, rigidité et résistance à l'abrasion.

Leur emploi intervient parfois dans des conditions sévères nécessitant, non seulement de bonnes propriétés mécaniques, mais également une tenue convenable en température.

PROPRIETES DES CERAMIQUES STRUCTURALES

1. Réfractarité et propriétés thermiques

Les céramiques sont connues pour leur bon comportement aux températures élevées. Pour commenter leur comportement thermique, il faut introduire les notions de conductivité thermique, dilatation thermique et résistance aux chocs thermiques.

Les éléments ayant une température de fusion supérieure à **1580°C**, sont appelés « **Réfractaires** ». Le tableau ci-dessous, représente des valeurs de température de fusion pour quelques céramiques.

Céramiques	Aluminate de baryum	Aluminate de cobalt	Aluminate de zinc	Carbure de calcium	Chrome magnésie
Température de fusion (°C)	2000	1955	1950	2160	2000
Densité (Kg/dm ³)	3,99	4,37	4,58	3,22	4,39

Il y a deux possibilités d'utilisation des céramiques pour les applications thermiques :

a) Dans le cas de **chocs thermique**.

- Le matériau à utiliser doit avoir un coefficient de dilatation thermique le plus faible possible et une conductivité thermique élevée.
- Le choc thermique est dû aux contraintes thermiques qui interviennent quand le matériau est soumis à des différences de températures entre la surface de la pièce et l'intérieur.
- La **résistance** aux chocs thermiques est d'autant **meilleure** que le coefficient de **dilatation** est **faible**.
- Afin de quantifier la résistance aux chocs thermiques des matériaux, on laisse tomber des échantillons chauffés à des températures croissantes dans de l'eau. L'écart maximum de température auquel **survivent** les échantillons sans se **rompre** donne une valeur de résistance aux chocs thermiques.
- Le tableau ci-dessous représente la différence de température critique Dt_c pour plusieurs céramiques.

Matériaux	SSN	SiALON	RBSN	SiC	PSZ	Al ₂ O ₃	AlN
Dt_c (°C)	650	540	480	340	300	220	225

Dans ce tableau :

SSN : nitrure de silicium obtenu par **frittage naturel**
 RBSN : nitrure de silicium obtenu par **frittage réactif**
 PSZ : zircone partiellement stabilisée.

b) En tant qu'**isolant thermique**.

- Le matériau à utiliser doit avoir une faible conductivité thermique autrement-dit, une grande capacité à limiter la transmission de flux de chaleur. Ce phénomène est caractérisé par la résistance thermique notée R (unité : $m^2.K/W$).

	Coef dilatation ther 25-1000°C ($10^{-6}.K^{-1}$)	Conductivité thermique (W/m.K)	Temp max d'utilisation (°C)	R aux chocs thermiques	Isolation thermique
Alumine	7,5 à 9,5	18 à 30	1500 à 1700	+	++
AlN	5,5	140 à 180	800	++	+

2. Propriétés mécaniques

a) Module d'élasticité

- Le comportement mécanique des céramiques à température ambiante est de type linéaire élastique. Elles présentent un module d'élasticité très élevé et des déformations élastiques extrêmement restreintes.

$$E_{\text{céramiques}} > E_{\text{métaux}} > E_{\text{polymères}}$$

- En outre, les céramiques sont constituées d'atomes légers (C, O, Si, Al) et présente une structure cristalline souvent non compacte (poreuse) : $\rho_{\text{métaux}} > \rho_{\text{céramiques}} > \rho_{\text{polymères}}$
- Comme les masses volumiques ρ des céramiques sont faibles, leurs modules spécifiques E/ρ (raideurs spécifiques) très élevés les rendent très attractives. On constate ceci dans le tableau ci-après :

Matériaux	Alumine	Nitrure d'aluminium	Nitrure de silicium	Carbure de silicium	Fer	Cuivre	Fibre de carbone
E/p (en GPa)	86,85	90,91	98,44	132,26	26,68	12,30	2,42

$$(E/p)_{\text{céramiques}} \gg (E/p)_{\text{métaux}}$$

- La dimension des grains est un autre facteur très important pour la résistance mécanique. Une diminution entraîne une augmentation de la résistance à la rupture.
- Cette propriété fait que les céramiques constituent un matériau de choix comme charge **renforçante** dans les composites.

b) Dureté

- Les céramiques présentent la plus grande dureté de tous les matériaux. Elles sont utilisées comme abrasifs pour couper, meuler ou polir tous les matériaux, y compris le verre.

$$H_{\text{céramiques}} > H_{\text{alliages métalliques}} > H_{\text{métaux purs}} \gg H_{\text{polymères}}$$

- Les mesures de dureté se font par lecture directe de la diagonale d'une empreinte laissée par une charge. Les céramiques sont des matériaux très durs, mais aussi très fragiles.

Matériaux	Vitrocéramiques 9606	Verre 7900	Alumine frittée	Acier
Duretés Knoop (500g)	619	477	1530	180-300

3. Propriétés thermomécaniques

- La variation des propriétés mécaniques avec la température est le principal obstacle limitant l'utilisation des céramiques. Dans le cas de chocs thermiques, des contraintes sont générées au sein de la céramique.
- A température élevée, c'est à dire supérieure à la moitié de la température absolue de fusion, les céramiques peuvent présenter des endommagements de type viscoélastique (fluage).
- Les paramètres de résistance mécanique varient en fonction de la température. Une élévation de la température diminue la rigidité des liaisons atomiques à cause de la dilatation thermique.
- Les céramiques présentant une phase vitreuse ségrégée aux joints des grains, voient leur contrainte à la rupture et leur ténacité décroître rapidement à partir de 800°C, effet renforcé par l'augmentation de la taille des défauts et la taille des grains.
- Au contraire, les céramiques sans phase vitreuse voient leurs caractéristiques mécaniques se maintenir jusqu'à 1200 voire 1400°C. La chute des propriétés mécaniques est alors liée à la constitution d'une phase amorphe par oxydation des impuretés métalliques contenues dans les joints de grains.
- L'état de surface des pièces a une importance sur la résistance mécanique. Tout dommage en surface abaisse la résistance mécanique et la résistance due au choc thermique.

4. Propriétés chimiques et environnementales

- Les céramiques présentent généralement une très grande inertie chimique et résistent bien aux attaques de substances agressives, à l'oxydation et aux agressions climatiques. Ce caractère de matériaux neutres et inertes fait qu'elles ne présentent pas de danger pour l'homme et pour la nature. On les utilise d'ailleurs largement pour les équipements sanitaires, médicaux ou alimentaires.

5. Propriétés tribologique

- Les propriétés particulières des céramiques peuvent également être utilisées pour réduire les frottements entre les pièces mécaniques et lutter contre l'usure. On les trouve à l'état massif ou sous forme de revêtements pour des éléments de moteurs, des éléments de guidage, des outils de coupe et de nombreuses pièces qui doivent résister à l'usure.

6. Propriétés de bioréactivité / bio-inertie

- Les céramiques peuvent offrir les avantages d'une composition chimique ne conduisant pas au dégagement de composés toxiques. Exemple : La réactivité entre l'implant en polyéthylène et les tissus mène à des conséquences néfastes, provoquer par la production de poussières. Pour cela, on recouvre les parties en contact à l'aide d'aluminates à haute dureté qui assurent une faible production de corps étrangers.
- La **bio-inertie** est l'absence de réaction du milieu physiologique. Les céramiques bio-inertes sont essentiellement des céramiques à base d'oxydes, de carbones ou de nitrures.
- L'alumine, mis à part le carbone, est la principale céramique bioinerte. Elle est parfaitement biocompatible, c'est à dire qu'elle est chimiquement inerte et électriquement neutre. Son coefficient de friction est très bas, son taux d'usure presque nul et son coefficient de résistance à la compression excellent.
- La zircone a des caractéristiques intéressantes car elle présente une élasticité identique à celle des métaux et une ductilité élevée. Elle apparaît comme une biocéramique d'avenir.

LES CÉRAMIQUES FONCTIONNELLES

Les céramiques fonctionnelles dites « électroniques », sont employées pour leurs propriétés électriques ou magnétiques particulières. Elles servent pour faire des composants passifs (R, L, C).

DIFFERENTS TYPES DES CERAMIQUES FONCTIONNELLES

1. Céramiques diélectriques

- Les céramiques diélectriques, c'est-à-dire isolantes, sont utilisées comme support de circuits (substrat, plaques de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur) ou comme boîtier. Elles sont concurrencées par les plastiques. Du fait de leur prix, les céramiques diélectriques sont réservées aux applications de pointe, lorsque la puissance dissipée est très élevée (résistance au claquage) ou que les conditions environnementales sont agressives (température, humidité).

2. Céramiques piézoélectriques

- La piézoélectricité, c'est lorsqu'une tension électrique crée une déformation d'un objet, ou à l'inverse lorsque la déformation crée une tension électrique.
- Les cristaux piézoélectriques sont donc utilisés comme :
 - Actionneurs** : ils permettent de faire des mouvements de faible amplitude mais très précis ;
 - Capteur** : on peut détecter un mouvement, un effort.
- Les applications sont multiples : Sonars de sous-marins ; Cuves à ultrason ; Hauts-parleurs et Microphones compact (pour appareils mobiles) ; Micro-moteurs ; ...

3. Céramiques conductrices

- Certaines céramiques sont semi-conductrices. On peut ainsi exploiter cette propriété dans ces céramiques, en les utilisant comme :
 - Fusible** : la céramique utilisée est totalement isolante à faible tension et conductrice lorsque l'on dépasse une « tension de claquage », par exemple pour protéger des circuits contre une surtension ;
 - Thermomètre** : en employant une céramique dont la résistance varie avec la température, ce qui permet de mesurer celle-ci.
- Mentionnons ici les **céramiques supraconductrices** qui sont caractérisées par l'absence de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique, lorsqu'elles sont refroidies (à -196°C) ; au-delà d'une certaine température, elles retrouvent une résistance électrique.

4. Céramiques magnétiques

- Un matériau **ferromagnétique** est une substance dont la **perméabilité magnétique** est très grande et qui conserve une aimantation rémanente en l'absence de champ magnétique.
- Le **ferrite** est une céramique ferromagnétique caractérisée par sa haute perméabilité en même temps que par sa résistance électrique élevée.
- Les **ferrites doux** sont susceptibles de réagir à un faible champ magnétique et qui sont employés comme antennes de réception, inductances, noyaux de transformateurs, bandes magnétiques,
- Les **ferrites durs** peuvent conserver une aimantation permanente forte. Ils sont utilisés pour la construction de moteurs, de haut-parleurs, d'enceintes acoustiques...
- Certains oxydes sont **magnétiques** et isolants (à la différence des métaux magnétiques). Donc ils peuvent être soumis à des champs électromagnétiques de haute fréquence sans produire l'apparition de courants induits.

5. Céramiques à fonctions optiques (électro-optiques)

- Un matériau est dit électro-optique s'il est susceptible de transformer un signal optique en une information électrique et vice versa.
- Les céramiques transparentes suscitent un vif intérêt pour des applications en tant que milieux amplificateurs de lasers de haute puissance
- Au delà des propriétés optiques, les céramiques optiques vont de l'opaque au transparent, avec des luminosités variables, des effets de fluorescence, d'opalescence, avec des couleurs et des saturations différentes.
- Les céramiques électro-optiques permettent de faire des fenêtres transparentes dans de larges domaines, (des infrarouges aux micro-ondes), et utilisées pour les écrans de télévision à cristaux liquides, des diodes électroluminescentes et les plaques vitrocéramiques transparentes aux infrarouges (plaques de cuisson).

III. Propriétés des céramiques techniques

La céramique apparue bien avant la métallurgie et le travail du verre, son développement a été dédié principalement aux ustensiles de cuisine et à l'art. L'évolution de la chimie au début du XX^{ème} siècle et l'étude des matériaux, a initié le développement de nouvelles céramiques pour des applications industrielles : la céramique industrielle est née. Depuis les 30 dernières années, les céramiques ont connu un grand essor technologique et regroupent actuellement tous les produits obtenus le plus souvent par frittage ou électrofusion.

CLASSIFICATION DES CERAMIQUES

Les céramiques sont classées selon les qualités suivantes (de la plus artisanale aux plus avancées) :

- **Terre cuite** (Briques, tuiles, poteries, conduits de fumée, tuyau de drainage, etc.) ;
- **Faïence** (Équipement sanitaire, vaisselle, carreaux, etc.) ;
- **Grès** (Carreaux de sol, pierre murale, etc.) ;
- **Porcelaine** (Vaisselle, appareil de chimie, isolateur électrique, etc.);
- **Produits réfractaires** (application dans l'industrie thermique, etc.);
- **Céramiques techniques** (composant semi-conducteur, outils de coupe, pièces chaudes de moteurs, etc.).

LES CÉRAMIQUES TECHNIQUES

La céramique technique ou industrielle est une branche de la céramique qui traite des produits conçus pour des applications industrielles particulièrement exigeantes. L'objectif de cette industrie est la création et l'optimisation de céramiques aux propriétés physiques spécifiques.

Les céramiques techniques se distinguent des céramiques traditionnelles par une température de mise en forme plus élevée (1250° à 2600 °C), un contrôle plus précis des éléments constitutifs et des procédés de mise en forme particuliers et plus rigoureux.

Elles sont classées dans trois catégories différentes :

- Les **oxydes** : oxyde d'aluminium, oxyde de zirconium ;
- Les **non-oxydes** : carbures, borures, nitrures, céramiques composées de silicium et d'atomes tels que tungstène, magnésium, platine, ou encore titane ;
- les céramiques **composites** : combinaison des oxydes et des non-oxydes.

PROPRIETES DES CÉRAMIQUES TECHNIQUES

Les céramiques techniques sont utilisées dans une variété d'applications industrielles (automobile, électronique, technologie médicale, énergie et environnement...), car elles combinent des propriétés uniques :

- Mécaniques : résistance à l'usure, à l'abrasion, et à la compression, grâce à leur dureté extrême.
- Thermique : résistance aux très hautes températures (jusqu'à 2000°C).
- Électrique : excellents isolants électriques, matériaux amagnétiques.
- Chimique : inertie chimique, biocompatibilité, étanchéité au vide et ultra-vide.
- Optique : certaines céramiques transparentes possèdent des propriétés optiques exceptionnelles (dans le visible, l'IR, ou l'UV).

MATIERES PREMIERES

Les céramiques techniques, qui ne comportent qu'une faible quantité d'argile, voire pas du tout, reposent toutes sur les matières suivantes : oxydes, carbures, nitrures et borures de Al, Mg, Mn, Ni, Si, Ti, W, Zr et autres ions métalliques. Comme exemples types, on peut citer Al₂O₃ (l'alumine), MgO (la périclase ou magnésie calcinée à mort), SiC (le carbure de silicium), TiN (le nitrure de titane) et WB₂ (le borure de tungstène). Néanmoins, les argiles plastiques (par exemple le kaolin), le feldspath et le quartz peuvent également servir de matière première pour les céramiques techniques, notamment pour la fabrication des isolants électriques. On utilise en outre des additifs (agents auxiliaires) tels que les auxiliaires de frittage (inorganiques) et les auxiliaires de formage (généralement organiques), qui sont aussi importants que les matières premières elles-mêmes.

PRINCIPALES CERAMIQUES TECHNIQUES UTILISEES

Les céramiques techniques s'utilisent dans de nombreuses industries et concernent à la fois les produits établis, comme les isolants, et les nouvelles applications. Elles fournissent des éléments pour les industries aérospace et automobile (pièces de moteur, supports de catalyseurs), électronique (condensateurs, piézoélectriques), pour les produits

biomédicaux (remplacement osseux), pour la protection de l'environnement (filtres) et pour beaucoup d'autres domaines.



Bougie d'allumage



Douille pour ampoule



Ferrites utilisées pour réduire les parasites électromagnétiques



Résistances



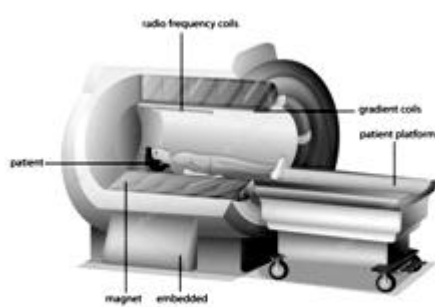
Condensateurs



Thermistance



Parafoudre



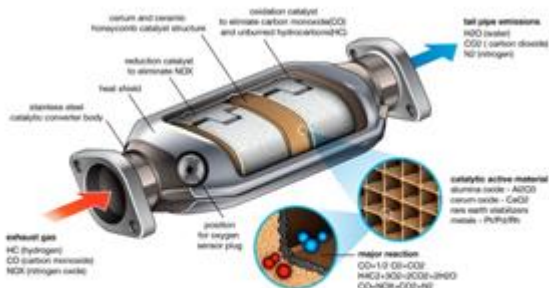
Imagerie par résonance magnétique (IRM)



Panneau photovoltaïque



Soupapes d'admission en céramique



Catalyseur (dans un pot d'échappement d'un véhicule)



Plaquette d'usinage



Prothèse de hanche en Alumine



Roulement à billes en céramique

V. Méthodes d'élaboration et Modification de la microstructure

Les céramiques connus par leur grande dureté, non ductiles et de haute température de fusion. Les méthodes de fabrication conventionnelles par usinage, déformation plastique ou par fonderie sont donc peu appropriées ou impossibles pour ces matériaux. C'est pourquoi, les procédés d'élaboration céramique consistent en la mise en forme d'une poudre préalablement à l'étape de consolidation de l'objet à haute température. Celle-ci se fait soit par **frittage** soit par **fusion**, à relativement haute température, ou soit par **prise**, à la température ambiante, pour les liants minéraux. Le tableau ci-après expose les trois principaux modes d'élaboration mettant en œuvre quasiment les mêmes opérations mais intervenant dans un ordre différent.

Famille de céramiques	1 ^{ère} étape	2 ^{ème} étape	3 ^{ème} étape
Céramiques traditionnelles ou techniques	Poudre	Mise en forme	Traitement thermique
Verres	Poudre	Traitement thermique	Mise en forme
Liants minéraux	Traitement thermique	Poudre	Mise en forme

ÉLABORATION DES CERAMIQUES PAR FRITTAGE

La céramique traditionnelle est une industrie dont les savoirs faire sont très anciens, alors que la céramique technique qui remplace d'autres matériaux grâce à de meilleures performances, se retrouve dans des savoirs faire industriels très récents, très variés et en perpétuelle évolution. Toutefois et bien que les deux types d'industrie soient très différents, ils ont en commun le fait de mettre en œuvre le même schéma de fabrication :

Poudres → prétraitement → mise en forme → séchage → traitement thermique (frittage) → produit fini

Tout commence par la poudre qui se doit d'être sélectionnée suivant des critères précis et de subir des prétraitements facilitant sa mise en forme, avec adjonction d'adjuvants, souvent organiques. Différents processus de mise en forme peuvent être utilisés pour obtenir des pièces.

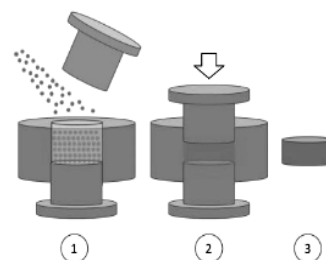
1. Mise en forme à partir d'une poudre -pressage

A. Pressage uniaxial

La technique de pressage uniaxial est plutôt limitée aux **formes simples** (cylindres), mais présente l'avantage de pouvoir réaliser un grand nombre de pièces assez **rapidement**. La poudre est compactée par matrice rigide à l'aide d'un poinçon. Le moule de pressage est métallique et les parties en contact avec la poudre peuvent être traitées pour résister à l'abrasion et la corrosion.

Pressage uniaxial

- ① Remplissage du moule
- ② Pressage
- ③ Démoulage



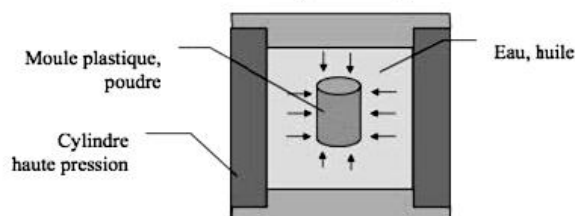
Pièces de précision en céramiques techniques

B. Pressage isostatique

La poudre est compactée dans un moule polymère déformable (silicone, polyuréthane) à la forme de la pièce, qui est maintenu par un moule support rigide. L'application de la pression se fait par l'intermédiaire d'un fluide à base d'huile et d'eau. Au cœur de l'enceinte et du liquide, le moule va subir la même pression en tout point de sa surface grâce au fluide. Cette technique conduit à la réalisation de pièces de **forme complexe** (tubes, bougies d'allumage...).

Il n'y a pas d'élévation de température lors de ce processus de mise en forme. Les poudres utilisées dans ce procédé sont spécialement élaborées pour le pressage à froid. Elles contiennent une fraction organique (<5%) qui va permettre un bon écoulement du grain dans le moule, une lubrification lors de la phase de compression, l'agglomération, la densification et la tenue mécanique du bloc pressé. Cette phase organique disparaîtra lors du frittage de la poudre.

Pressage isostatique



Céramiques high-tech compactées dans des presses isostatiques à froid

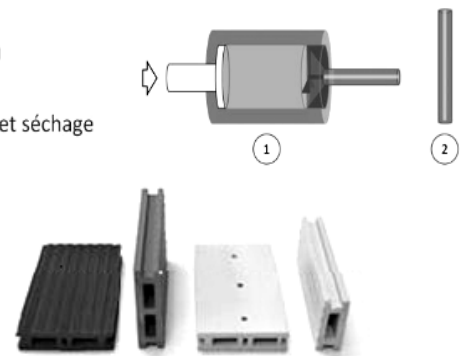
2. Mise en forme a partir d'une pate plastique- extrusion et injection

A. L'extrusion

La pâte préalablement plastifiée et désaérée, est poussée à travers une filière de géométrie donnée à l'aide d'une vis. Après extrusion, les pièces sont **coupées** à la **longueur désirée**, puis subissent les traitements appropriés. Cette technique conduit à la réalisation de pièces à forme **complexe** et de **grandes dimensions**.

Extrusion

- ① Extrusion
- ② Découpe et séchage



B. L'injection

Le mélange fluidifié est introduit dans un moule ayant la forme de la pièce à fabriquer. Le mélange **thermofusible** est **chauffé** dans une enceinte puis forcé à travers une buse dans le moule dont la température est inférieure au point de fusion du mélange. Après **solidification**, par abaissement de la température, la pièce est éjectée du moule. Cette technique conduit à la réalisation de pièces de **forme simple** ou **complexe** en **série** dont l' maximale est de 1 cm. (Implants dentaires ; guides pour jet d'eau ;...).

Injection

- ① Alimentation de la trémie
- ② Chauffe et compression
- ③ Injection dans le moule
- ④ Refroidissement et démoulage

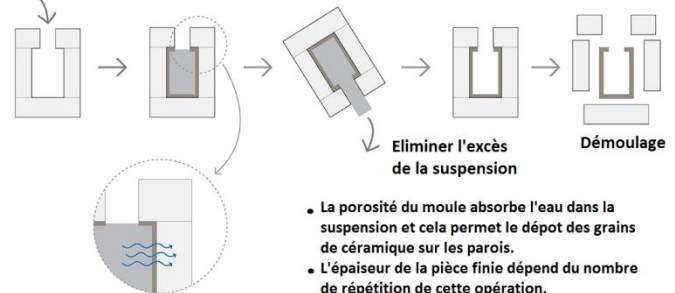


3. Mise en forme a partir d'une pate liquide - coulage

A. Coulage en barbotine

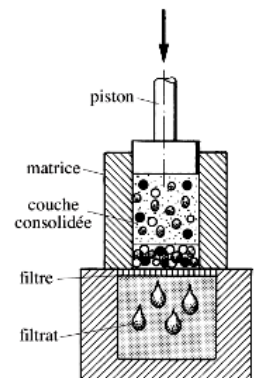
Le coulage en barbotine consiste à remplir un moule poreux avec une **suspension céramique coulable**. Le moule poreux, habituellement en plâtre, absorbe le liquide porteur provoquant la poudre à être attirée sur les **parois** du moule, formant une **couche consolidée**. Cette méthode est surtout utilisée pour la production de **céramiques traditionnelles** et est idéale pour la préparation de **grandes parois minces, pièces creuses**.

Suspension
céramique coulable



B. Coulage sous pression

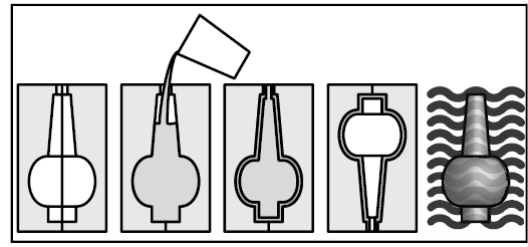
Une pression est appliquée à la **suspension de coulage** dans un **moule poreux**. Le gradient de pression force le fluide à travers le moule poreux et à travers la couche en formation, ce qui permet de **diminuer le temps de prise** de la suspension par rapport au coulage classique. Cette technique, particulièrement utilisée dans le domaine des **céramiques traditionnelles** conduit à la réalisation de **pièces volumineuses**. La **productivité** peut être **élevée**.



Coulage sous pression

4. Elaboration via une « prise » : liants hydrauliques

Les ciments, les bétons et les plâtres sont utilisés comme des matériaux de construction à une échelle gigantesque. Contrairement aux matériaux précédemment cités, ces matériaux n'acquièrent pas leur résistance mécanique par traitement thermique mais par des réactions chimiques qui permettent d'établir entre les particules constitutives des liaisons de forte intensité.



Fabrication à partir d'un moule en plâtre

5. Mise en forme de couches minces

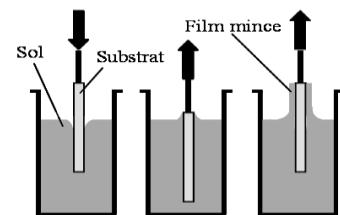
REVETEMENTS CERAMIQUES

On est amené, pour diverses raisons, à réaliser des revêtements céramiques sur un substrat (métallique, céramique, polymère) en utilisant différentes techniques de dépôt. Ces **revêtements** permettent d'obtenir des **propriétés de surface différentes** de celles du support. On peut réaliser des **couches minces** (quelques couches atomiques) par dépôt sous vide ou des couches épaisses (quelques mm) par projection plasma.

Les revêtements céramiques sont également utilisés pour les céramiques traditionnelles pour améliorer l'aspect de surface ou pour réaliser des décors.

A. Enduction par trempage

L'enduction par trempage (dip coating) est une technique de mise en forme de couches minces, elle consiste à immerger un substrat dans une cuve contenant la céramique en pâte liquide (issue du procédé sol-gel), extraire la pièce de la cuve et laisser s'écouler la couche. La pièce enrobée est ensuite séchée. Le processus enduction par trempage se fait donc généralement en trois étapes :



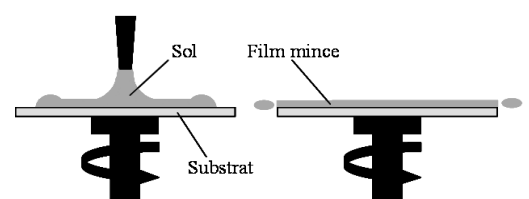
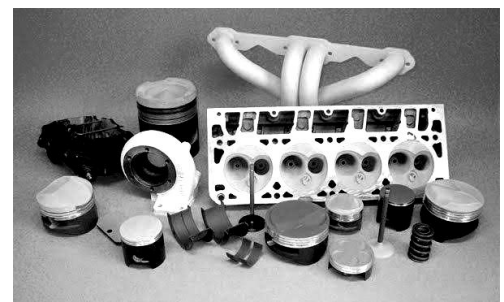
Étapes du Trempage-Retrait (Dip-coating)

- Immersion** : le substrat est immergé dans la solution, contenant le matériau à mettre en forme.
- Le temps de séjour** : le substrat est laissé complètement immergé et immobile pour permettre aux matériaux de bien s'y appliquer et l'enrober.
- L'extraction** : le substrat est extrait, de nouveau à vitesse constante et sans secousses. La vitesse d'extraction influe sur l'épaisseur de la couche : l'épaisseur de la couche est d'autant plus fine que la vitesse d'extraction du substrat est grande.

B. Enduction centrifuge

L'enduction centrifuge (spin coating) est une technique de mise en forme de couches minces. Elle consiste à poser un excès de matériau (en solution) à mettre en forme sur le substrat. À faire tourner ensuite le tout à haute vitesse pour étaler le fluide sur toute la surface par centrifugation.

La rotation continue pendant que le fluide dépasse les bords du substrat, jusqu'à ce que la couche ait l'épaisseur voulue. Par conséquent, l'épaisseur de la couche est d'autant plus fine que la vitesse de rotation est grande, mais elle dépend aussi de la concentration de soluté et du solvant et du temps de l'opération.



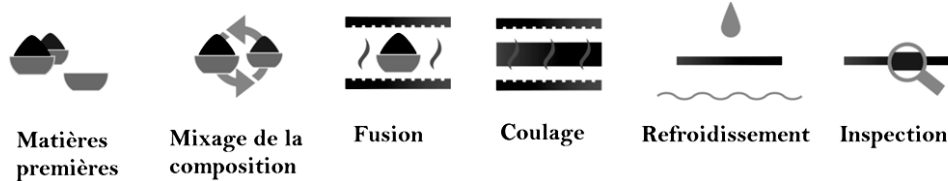
Étapes de l'induction centrifuge (Spin coating)

6. Elaboration des céramiques via une fusion

A. L'électro-fusion

Le procédé d'électro-fusion permet d'obtenir des céramiques réfractaires plus denses, par comparaison aux réfractaires frittés, appelée les **réfractaires électro-fondus**. Cette technique consiste à fondre, en four électrique, des matières premières (compositions oxydes métalliques) de grande pureté puis à couler la matière liquide dans des moules isolants. Le refroidissement est lent et contrôlé, afin de limiter le développement de contraintes internes. Il peut durer plusieurs jours ou semaines dans les blocs coulés de grandes dimensions (typiquement de 1 à 2 m de haut). La maîtrise des paramètres de composition, d'élaboration, de moulage et de refroidissement permet de contrôler ou limiter certains défauts bien connus en fonderie tels que cavités résiduelles ou fissures qui peuvent éventuellement nuire au comportement en service.

L'électro-fusion permet d'obtenir, en **grandes séries**, des pièces de **forme complexe**.



B. Les verres

Le verre est produit en chauffant les matières premières à une température au-dessous de celle de fusion. Les principaux procédés de mise en forme des verres sont les suivants :

1. **Pressage** : Le pressage est une méthode de mise en forme, qui consiste à comprimer le verre fondu dans un moule ayant la forme de l'objet à fabriquer. La pièce est laissée ensuite refroidir et se solidifier.

2. **Laminage** : Procédé de fabrication du verre plat dans des fours à bassin où le verre en fusion subit un passage entre deux rouleaux métalliques espacés suivant l'épaisseur désirée. La feuille brute n'est ni parfaitement plane, ni transparente. Elle doit obligatoirement subir après refroidissement des opérations de doucissage et de polissage.

3. **Flottation** : La flottation consiste à charger un mélange de matières premières, en continu, dans le four de fusion. À la sortie du four, le verre forme un ruban flottant à la surface de l'étain fondu (extrêmement lisse donnant au verre une planéité de surface parfaite). Le ruban de verre est ensuite lentement refroidi. Le ruban est obtenu d'une épaisseur régulière et surfaces parfaitement polies. Le ruban est ensuite découpé en plaques pour livraison.

4. **Soufflage** : Cette technique consiste à insuffler de l'air dans une boule de verre en fusion pour lui donner forme. Elle permet de produire en verre des volumes en creux.

5. **Etirage** : Un procédé de mise en forme du verre étiré, livré sous forme de cannes de verre. Le verre étiré est un produit semi fini qui servira notamment à la fabrication des ampoules pharmaceutiques, des éprouvettes, des tubes à essais et de certains flacons et de différents objets de décoration produits par des souffleurs de verre.

