

Chapitre 2

Composites à Matrice Métallique

Limite des métaux classiques

Freinage des dislocations par

- formation structure granulaire
- écrouissage
- formation d'une s.s.
- précipitation de particules de seconde phase

Cependant, la résistance des alliages métalliques ne peut être augmentée sans limite et il est donc indispensable de trouver d'autres voies d'amélioration des propriétés physiques et mécaniques. Une solution est offerte par les MMCs. Alors que l'histoire des composites à matrice organique a commencé dans les années 30, ce n'est qu'en 1968 que General Dynamics a entamé le premier programme de recherche connu dans les matrices métalliques renforcées par fibres.

II.1 LES composites particulaires O D S

Obtention d'une dispersion dense et homogène de très fines particules d'oxyde ayant une faible solubilité dans la matrice

2,5 à 3 % en volume

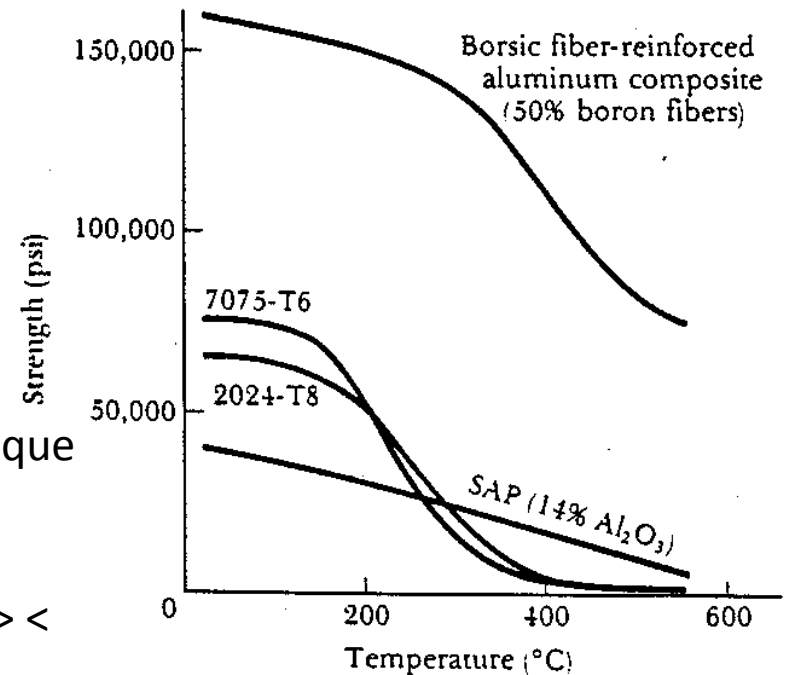
Particules quasi-sphériques d'environ 300 Angstroms séparées de 1000 Angstroms de distance moyenne

Divers procédés:

- oxydation interne
- réduction sélective d'oxydes
- précipitation
- co-précipitation
- techniques dérivées de la métallurgie des poudres: Ex: alliage mécanique

Dispersoïde choisi: Y_2O_3 car grande stabilité chimique et thermique

Mécanisme de renforcement: $\Delta\alpha \rightarrow$ contraintes $>$ $<$ dislocations



II.1 LES composites particulières O D S

SYSTEME	APPLICATIONS
Ag-CdO	Contacts électriques
Al-Al ₂ O ₃	Réacteurs nucléaires
Be -BeO	Réacteurs nucléaires, aérospatial
Co- ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Matériaux magnétiques
Ni-20%Cr – ThO ₂	Composants de turbine
Pb - PbO	Batterie
Pt-ThO ₂	Filaments, composants électriques
W- ThO ₂ , ZrO ₂	Filaments

II.2 LES CERMETS



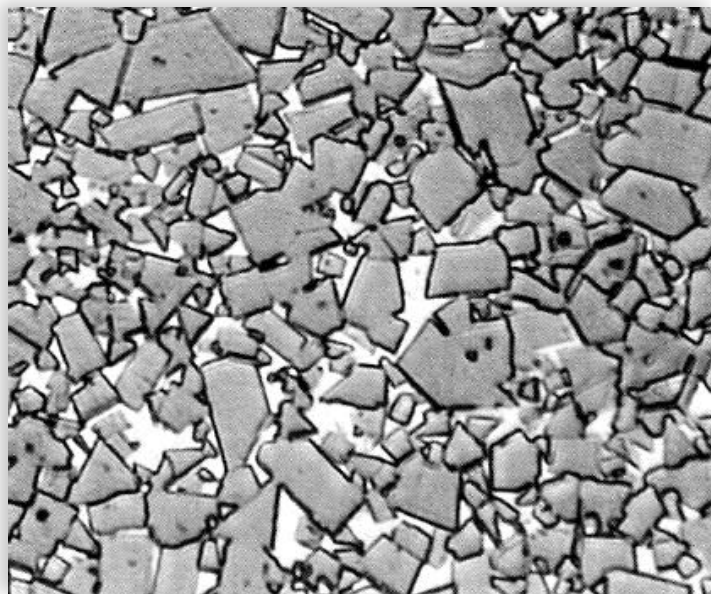
Composites à base d'oxydes (Al_2O_3 , CrO_2 , TiO_2), de carbures (WC, TiC), de nitrure (TiN), de borures ((Ti, Cr) B_2)... avec **liants métalliques** (Cr, Ni, Co, Mo, W, V...)

Type de renfort

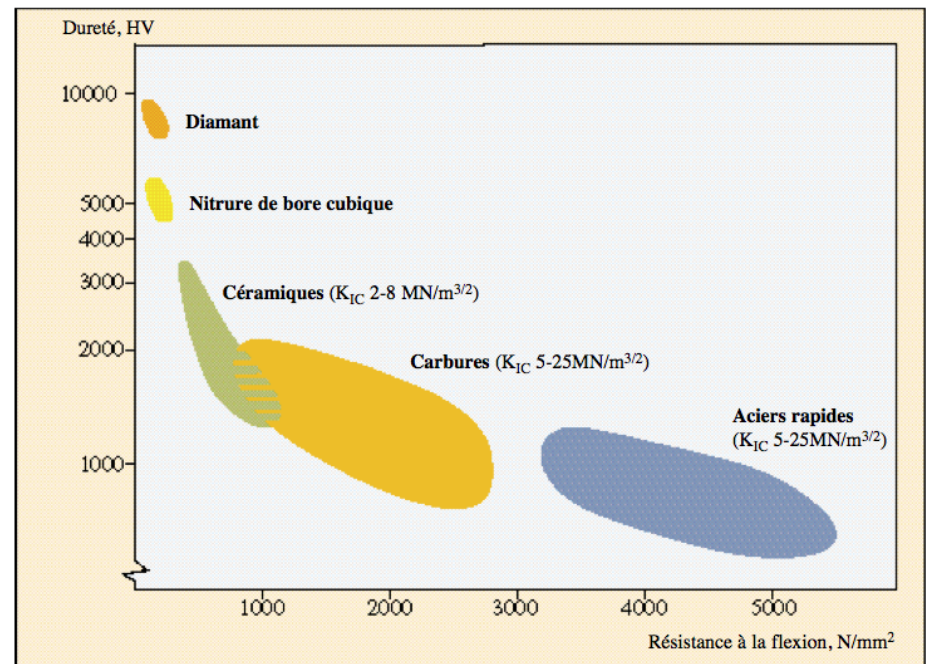
Joint de grains métalliques

Carbures cémentés

Dureté élevée + Ténacité accrue (*déformation plastique locale possible*)



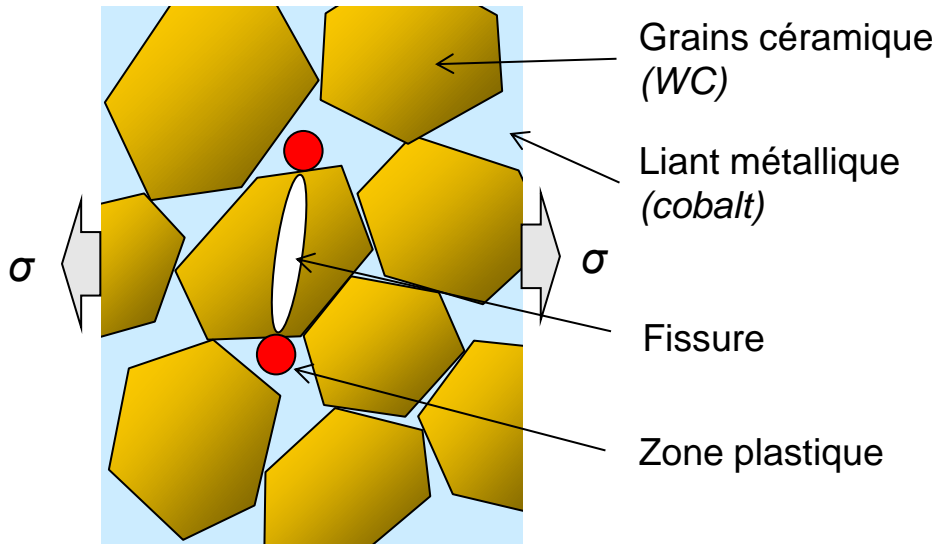
WC (gris) – 20% Co (blanc) en pds 5 μm



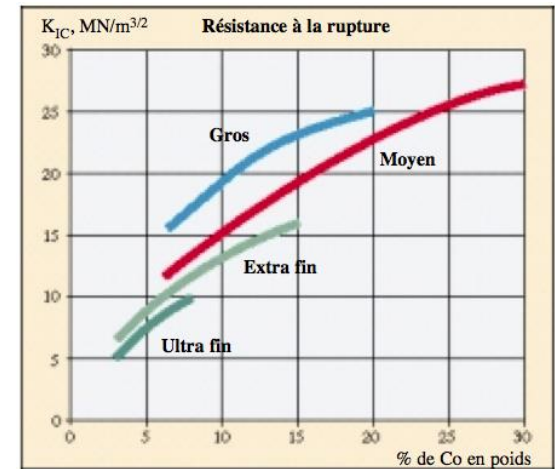
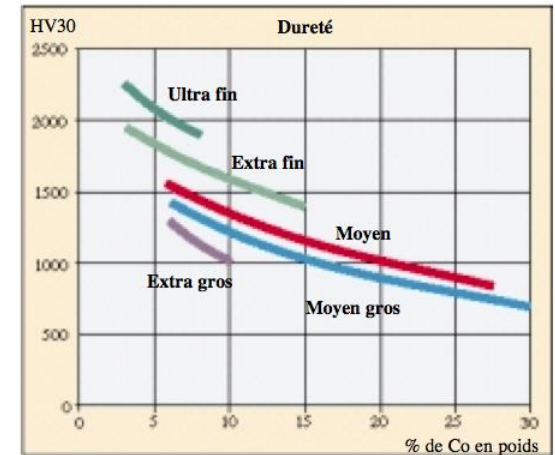
Renforcement par écrantage de la fissure

Obstacle à la fissuration :

fissuration du grain céramique arrêtée par la relaxation plastique dans le liant métallique



Rôle prépondérant de la **teneur en phase liante** et de la **taille des grains**



Ultra fin
< 0,5 μm

Extra fin
0,5 - 0,9 μm

Fin
1,0 - 1,3 μm

Moyen
1,4 - 2,0 μm

Moyen gros
2,1 - 3,4 μm

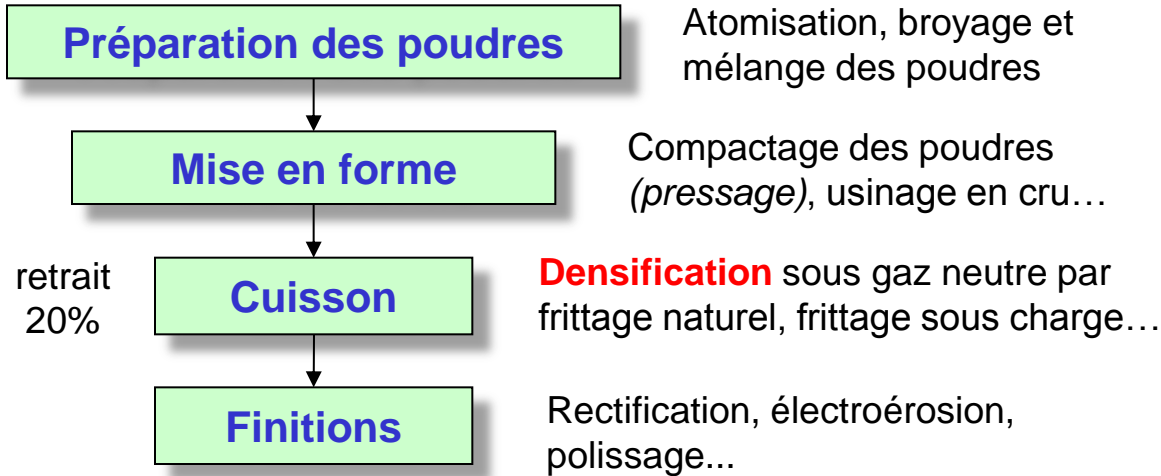
Gros
3,5 - 5,0 μm

Extra gros
> 5,0 μm

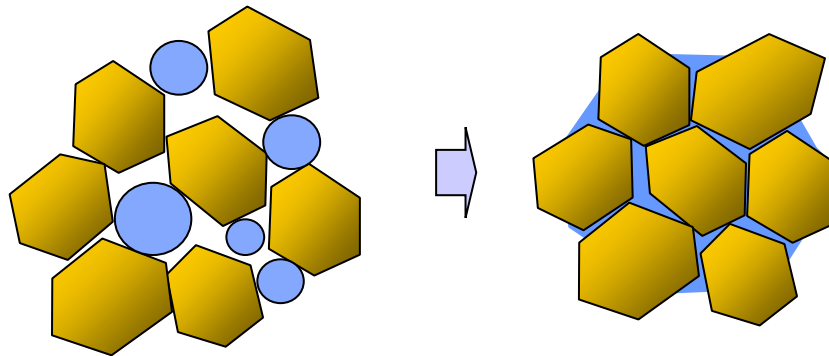


Élaboration des cermets par frittage en phase liquide

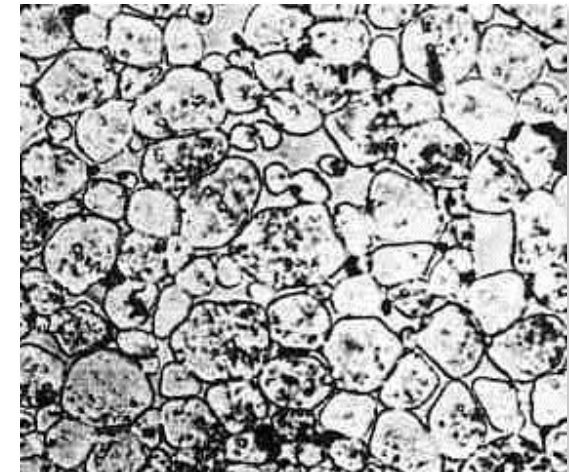
Consolidation à haute température d'un agglomérat de poudres céramique et métallique **avec fusion** des particules métalliques



WC.Co : frittage 2 h à 1450° C



Infiltration et mouillage par le métal liquide
(*phénomènes de diffusion dans le liquide*)



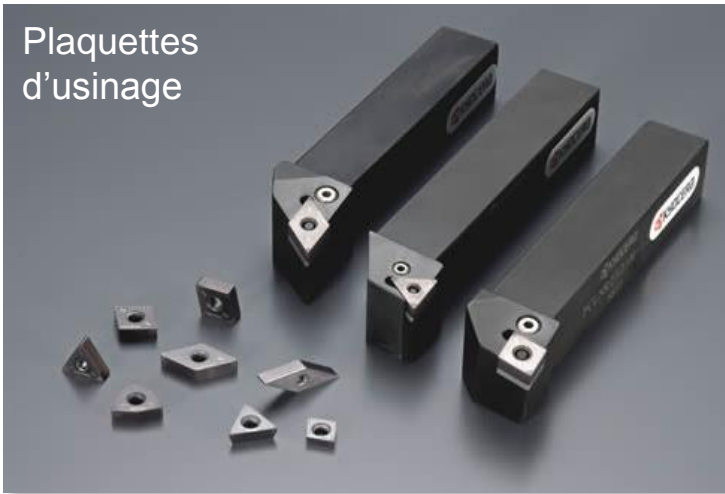
TiC.Ni

10 µm

Application des cermets

Résistance à l'usure abrasive
Tenue aux chocs

Plaquettes
d'usinage



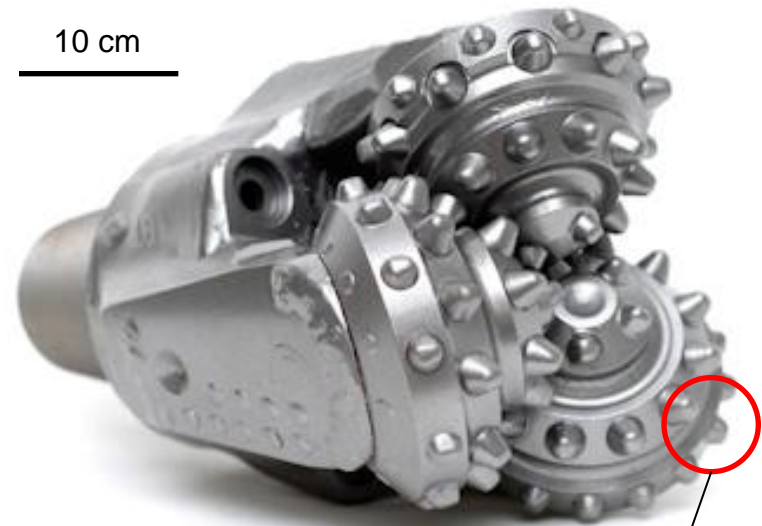
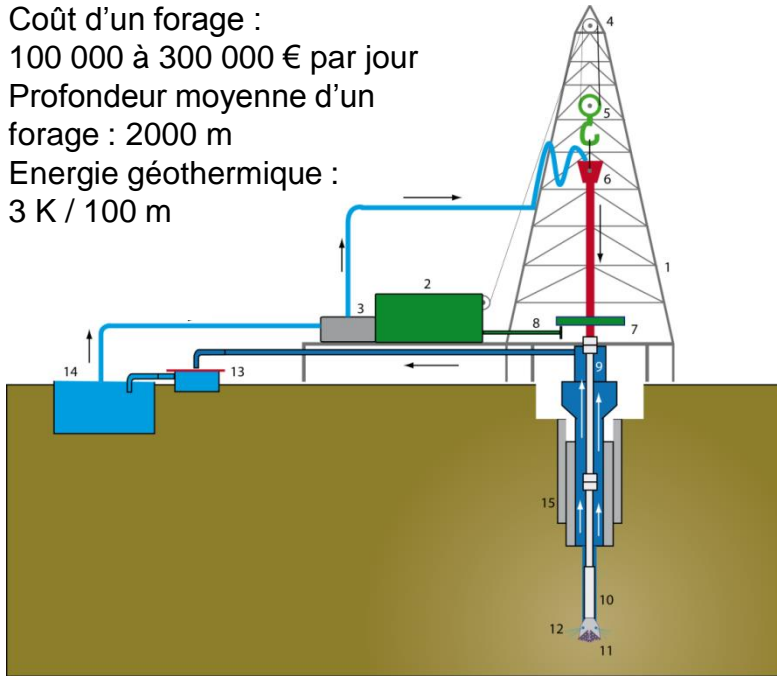
- Outils et plaquettes d'usinage
- Outils de formage à froid
- Rouleaux de laminoir à chaud
- Filières, poinçons, matrices
- Billes de stylo à bille
- Poids de pêche, équilibrage de golf
- Sceaux...



Laminage à chaud

Application au forage : outils de forage par poinçonnement

Coût d'un forage :
100 000 à 300 000 € par jour
Profondeur moyenne d'un
forage : 2000 m
Energie géothermique :
3 K / 100 m



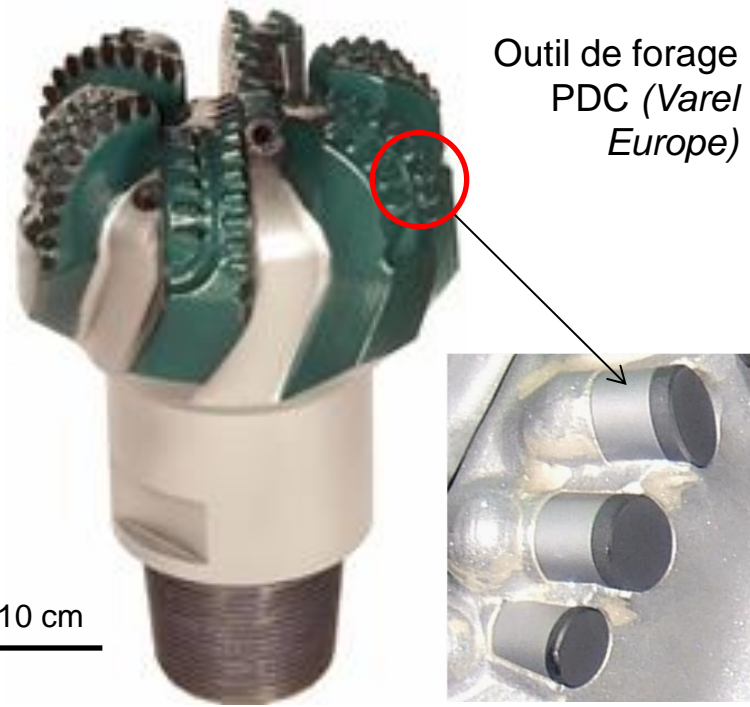
Insert WC.Co



Application au forage : outils de forage par coupe

Élaboration par frittage sous charge

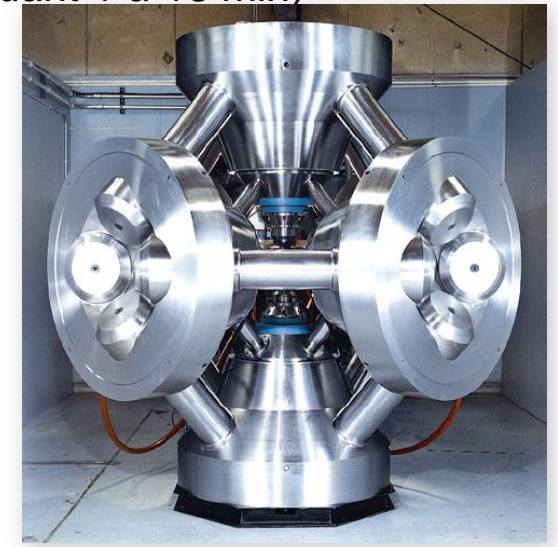
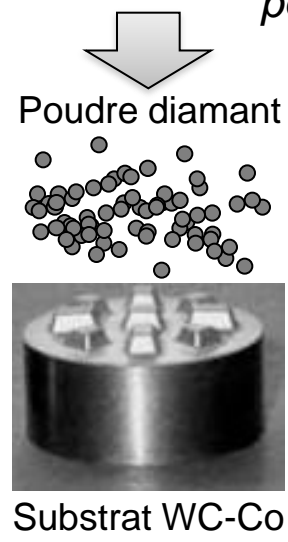
(de 1 à 6 GPa, entre 1500 et 3000° C, pendant 1 à 15 min)



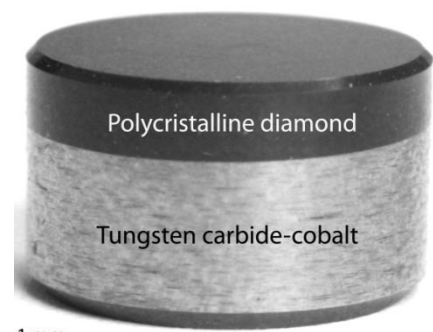
Outil de forage PDC (Varel Europe)

10 cm

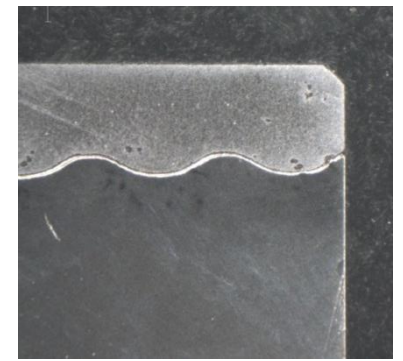
PDC « Polycrystalline Diamond Compact » sur substrat WC.Co



Hauteur de la presse : 3 m



1 mm



II.3 LES Composites à fibres

Procédés d'élaboration des MMC plus complexes que FRP

- Températures de fabrication plus élevées
- Métaux très réactifs → choix des fibres se restreint aux matériaux chimiquement inertes et thermiquement stables
→ Fibres de C, B, SiC et Al₂O₃.
- Matrices: métaux légers: Mg, Al, Ti pour applications structurales

Exemple de pièces:

- Superalliages FeCrAlY par des fils de W pour aubes de turbine
- Pb par de fibres d'Al₂O₃ pour plaques de batteries plus minces et plus résistantes,
- Composites Cu/C...

II.3 LES Composites à fibres

Procédés de mise en forme sont différents pour les composites à fibres courtes et les composites à fibres longues.

Transformation par déformation plastique est limitée aux fibres courtes. Exemple: l'extrusion

Produits fabriqués sont différents:

anisotropes pour les fibres longues

isotropes pour les fibres courtes

II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres longues

L'enrobage des fibres par la matrice peut se faire par
voie gazeuse,
voie liquide,
voie solide.

VOIE GAZEUSE

Chimique: CVD, CVI

Physique: PVD, IVP

Avantages: Basses températures → limite les risques d'endommagement des fibres par réaction chimique

Pas de Problème de mouillage (comme avec la voie liquide)

II.3 LES Composites à fibres

a) Enrobage par C.V.D.

Principe: Transport du métal par voie gazeuse suivi d'une réaction chimique de dépôt au contact du renfort.

Exemples:

Décomposition thermique à 250°C de tri-isobutyl d'aluminium

Réaction entre AlCl_3 et H_2

Méthode lente, coûteuse, et délicate

Ne s'applique pas pour des métaux à bas points de fusion

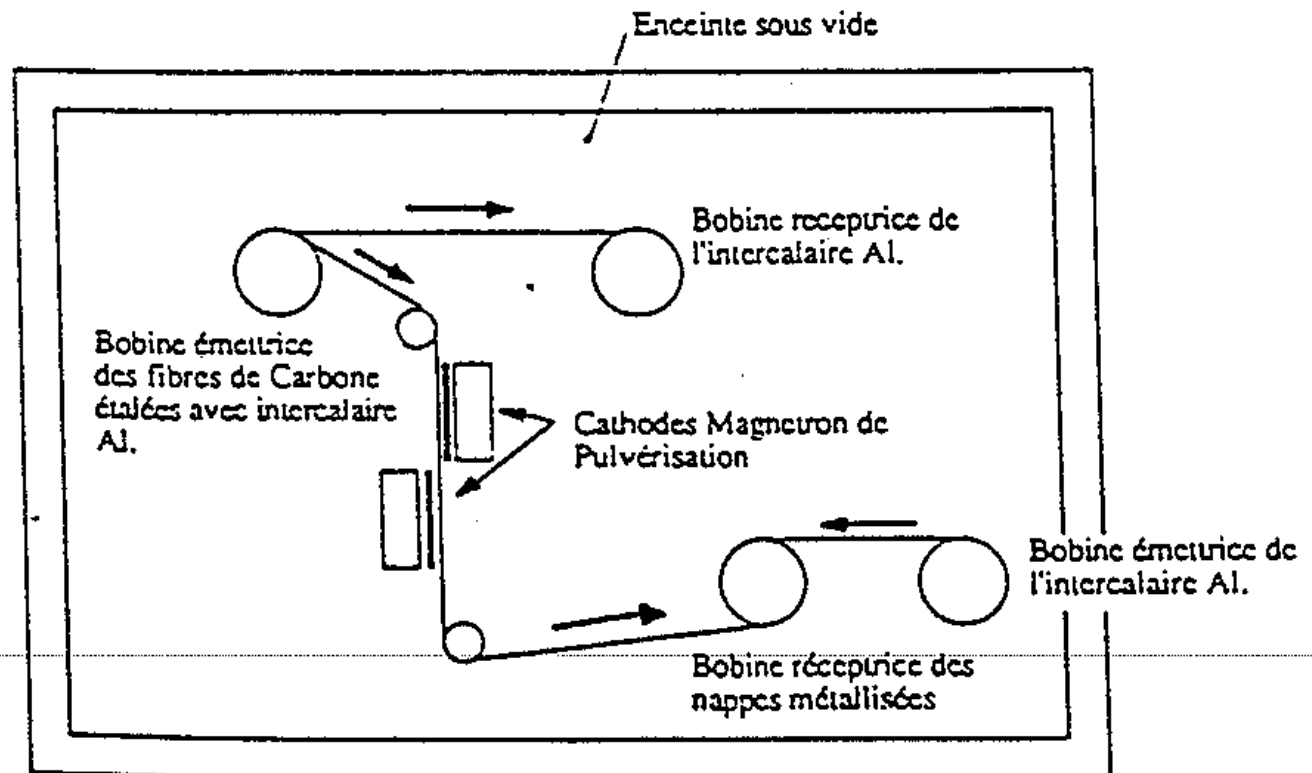
→ voie liquide

II.3 LES Composites à fibres

b) Enrobage par P.V.D.

Principe: Un flux d'atomes métalliques à l'état neutre (évaporation thermique) ou ionisé est dirigé sur le renfort fibreux au contact duquel les particules se condensent.

Exemples:

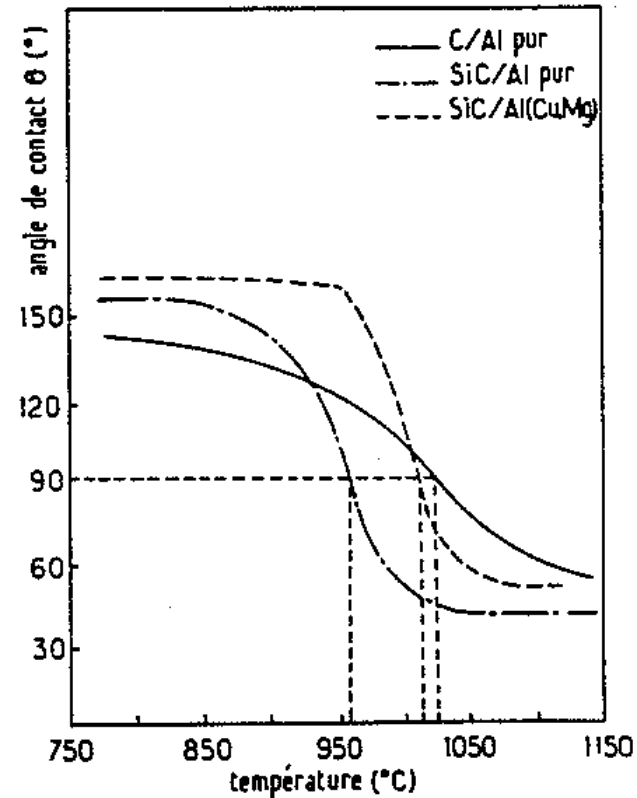
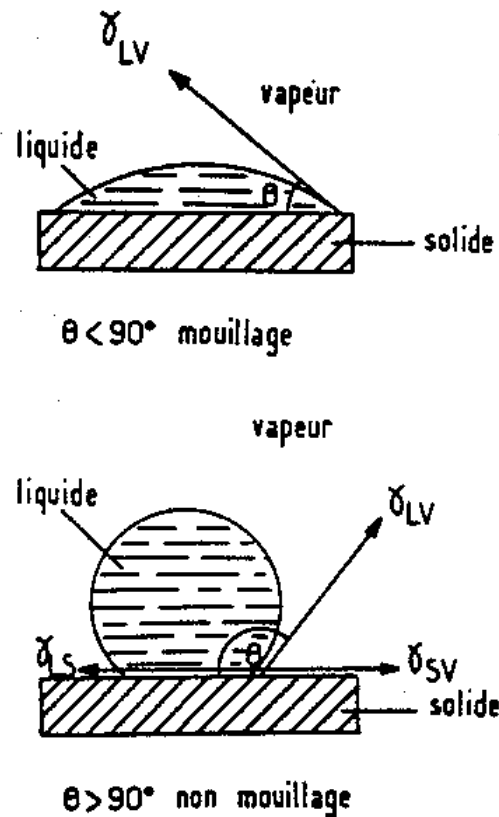


II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

Difficultés de la voie liquide:

Mouillage médiocre de la plupart des fibres céramiques par les métaux liquides à leur température de fusion



II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

Difficultés de la voie liquide:

Réactivité à haute température où le mouillage ($\theta < 90^\circ$) est plus aisément obtenu entre métaux liquides et renforts fibreux.

→ Dégradation des fibres ce qui limite les procédés par voie liquide aux métaux à bas point de fusion.

Diverses solutions

- utiliser le métal sous forme finement divisée comme une barbotine
- utiliser des matrices d'alliage à bas points de fusion
- déposer le métal à partir d'une solution d'un de ses sels soit par réaction d'oxydo-réduction ou électrodéposition
- limiter la durée de contact entre le renfort et le métal liquide (projection torche plasma)
- appliquer des pressions très élevées (forgeage liquide)
- modifier la surface des fibres pour améliorer le mouillage
- ajouter des tensioactifs dans la matrice métallique

II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

Pour avoir un bon renforcement:

→ bonne adhésion fibre/matrice

→ Fibres doivent être mouillées par la matrice

- Si $\theta < 90^\circ$, réactions chimiques entre fibres et matrice

avec formation de nouvelles phases à l'interface: ex Al_4C_3 pour Al/C

avec fragilisation de la matrice par dissolution d'éléments de la fibre : ex dissolution du C ou du SiC dans Al.

avec dégradation mécanique du renfort

Pour minimiser ces réactions:

- saturer la matrice métalliques avec les éléments du renfort
- utiliser des fibres revêtues avec une barrière de diffusion

II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

- Si $\theta > 90^\circ$, mauvais mouillage entre fibres et matrice
→ Traitements chimiques des fibres

Exemples :

- Addition d'éléments très électropositifs (Mg, Ca, Li) à la surface des fibres d' Al_2O_3 dans une matrice d'Al
- Passage des fibres de C dans un bain de métal alcalin (Na, K..)
- Revêtement des fibres de carbone par un métal noble de transition (Ag ou Ni) pour améliorer le mouillage par des alliages légers
- Dépôt par CVD de Ti ou dérivés TiB_2 , TiC
- Revêtements à base d'oxydes à partir d'organométalliques
- Revêtements de fluorures (K_2ZrF_6)

II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

Elaboration de pré-imprégnés.

permet l'obtention de pièces de renfort fibreux continu par compression à chaud, pultrusion, colaminage ou bobinage

Ils sont élaborés par imprégnation à l'aide du métal liquide ou de barbotine par projection plasma ou électrolyse

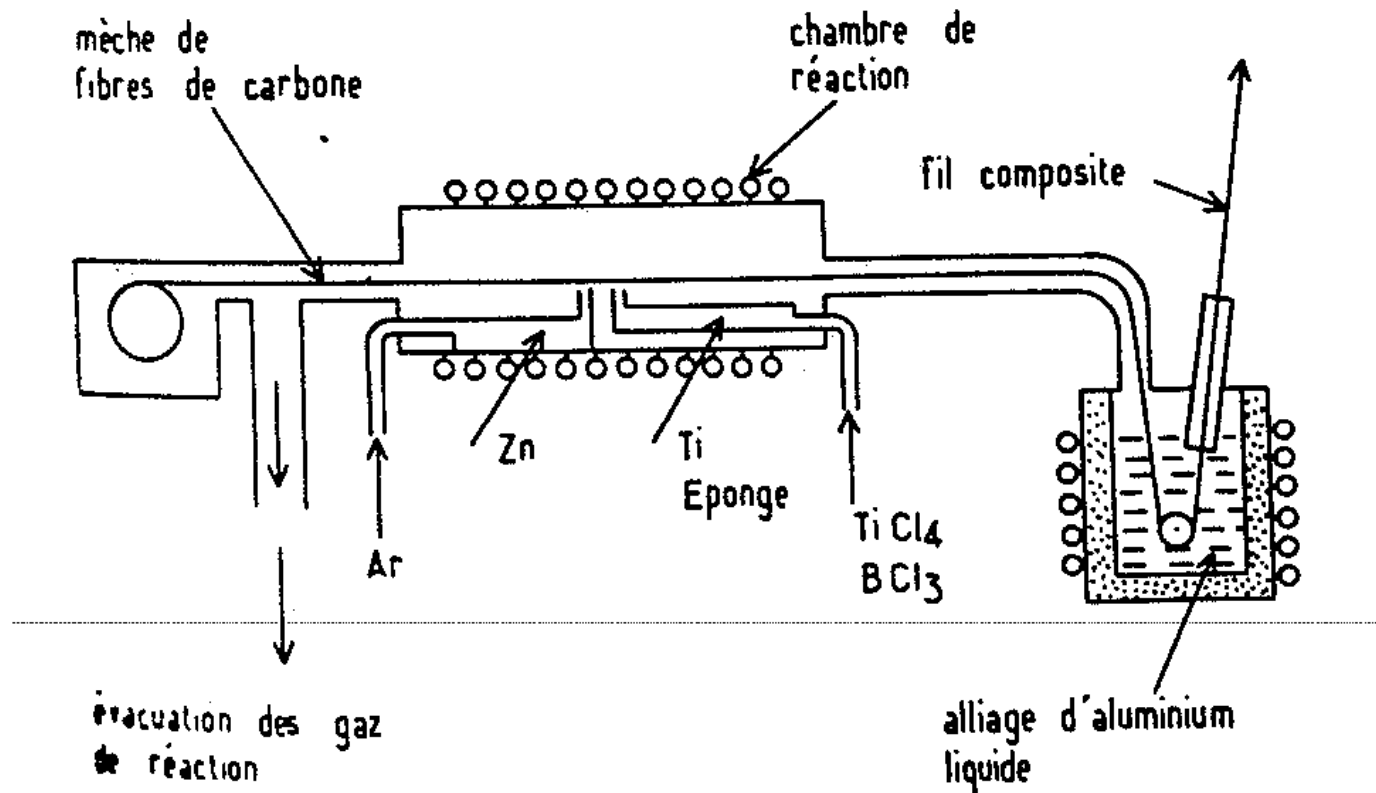
Le mouillage et l'adhésion fibre/matrice sont obtenus par

- 1) Un nettoyage de la surface des fibres
- 2) Un revêtement CVD (ex: Ti-B ou SiO₂)
- 3) L'imprégnation en atm inerte

II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

Elaboration de pré-imprégnés.



II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

Réalisation de pièces massives

par imprégnation de préformes fibreuses sous pression modérée

La préforme est placée dans un moule et le métal est coulé soit:

- par simple gravité
- sous dépression (fig 2.7)
- sous légère surpression (Fig 2.8)

II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

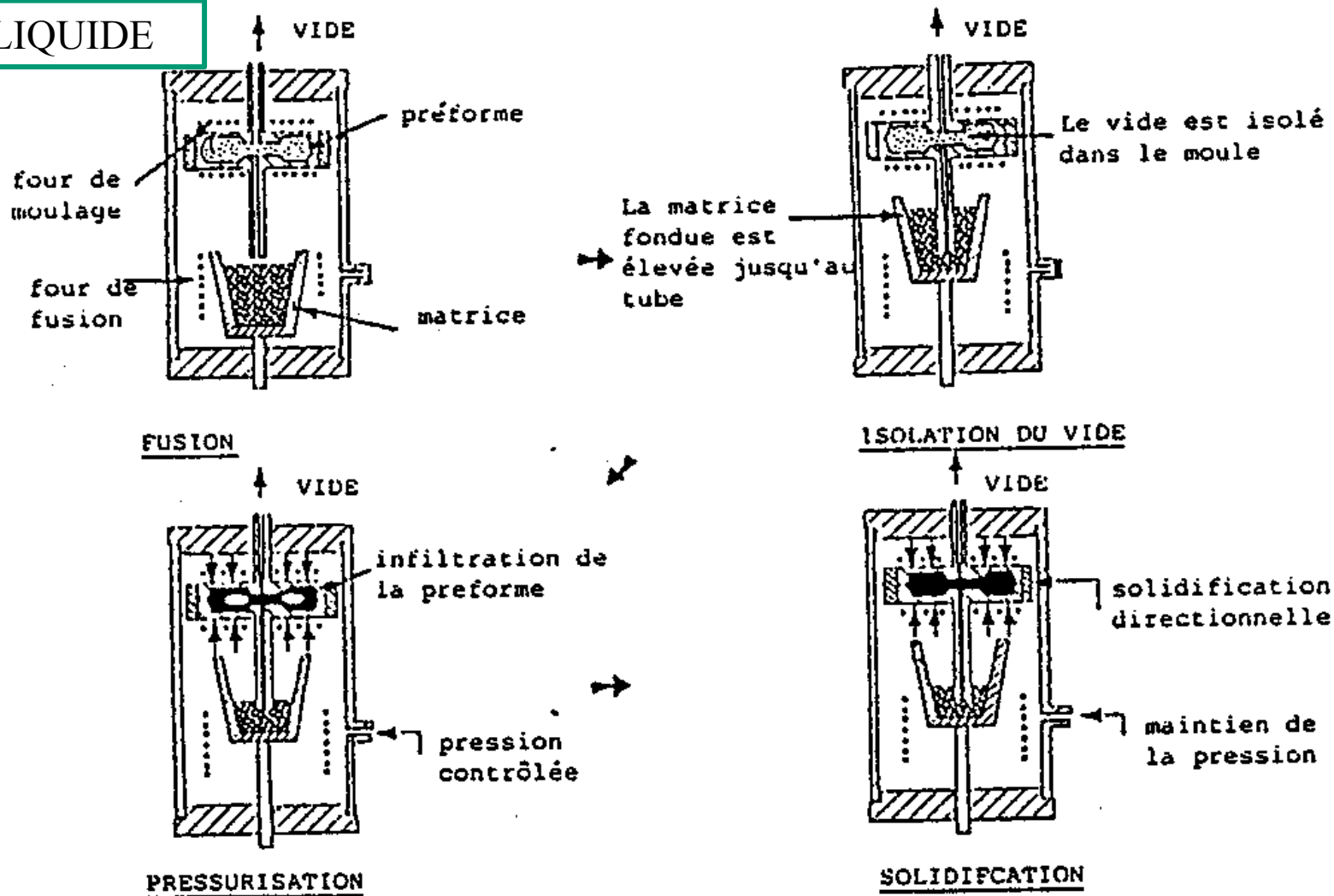


Figure 2.7 : Description schématique du procédé de coulage sous dépression.

II.3 LES Composites à fibres

VOIE LIQUIDE

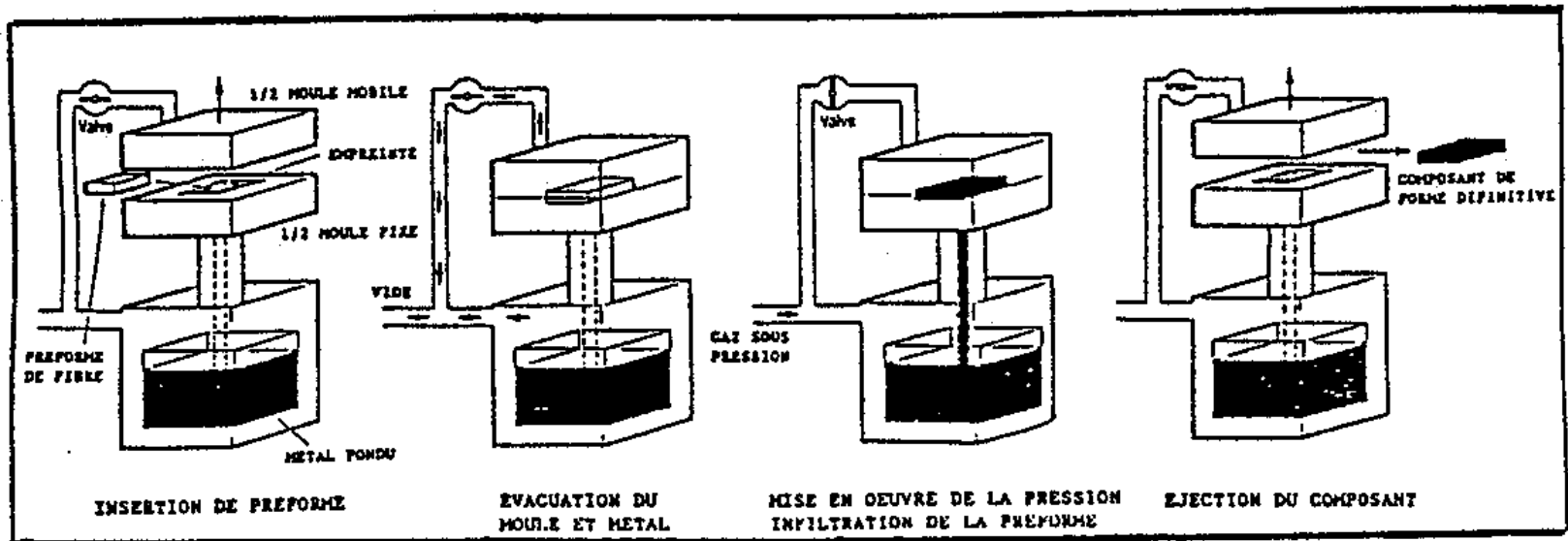
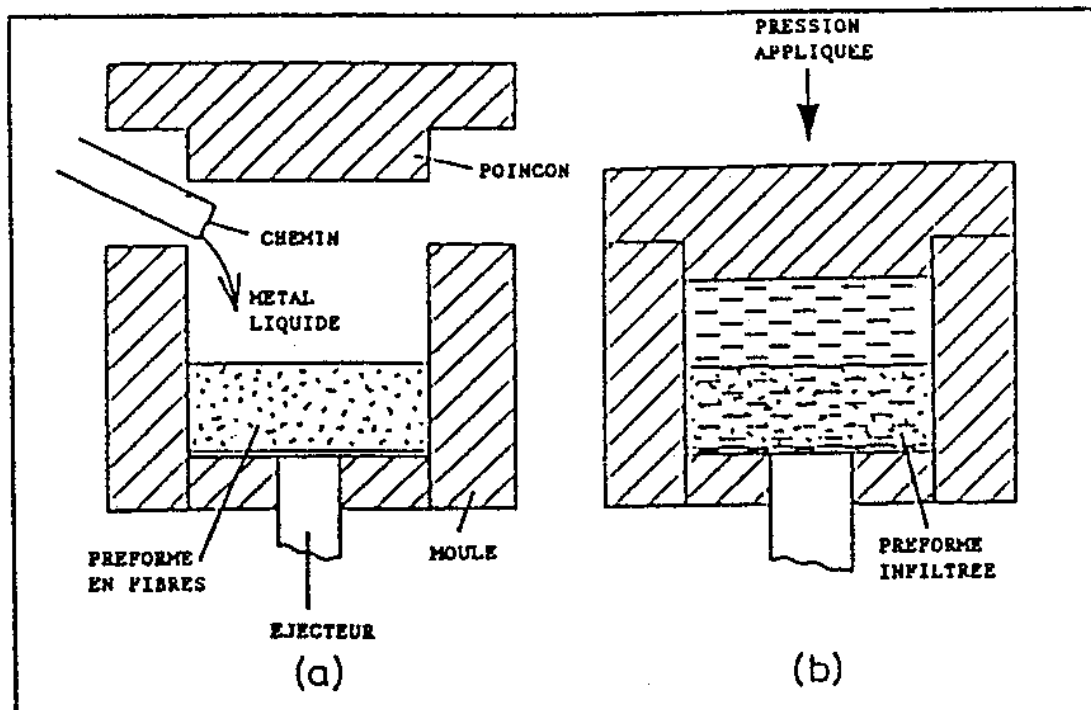


Figure 2.8. Description schématique du procédé sous faibles pressions.

II.3 LES Composites à fibres

Réalisation de pièces massives
par imprégnation de préformes fibreuses sous **forte pression** ou
forgeage liquide ou « **squeeze casting** »

L'absence d'imprégnation spontanée est compensée par l'application
de très fortes pressions (jusque 100 MPa)



Obtention de pièces de grande taille en **1 seule étape**: imprégnation du renfort, mise en forme définitive de la pièce et amélioration du matériau par fermeture des microporosités.

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

Les méthodes par voie solide sont utilisées:

- pour élaborer des MMC directement à partir des constituants élémentaires
- pour transformer des demi-produits

Principe: diffusion à l'état solide et déformation plastique à chaud sous pression

Problèmes:

- T et temps de maintien doivent être aussi réduits que possible pour minimiser les dégradations thermochimiques
- La pression doit être suffisante pour éviter l'endommagement des fibres mais assez forte pour induire la déformation plastique
- Atmosphère sous gaz inerte ou vide

Solutions:

- Barrières de diffusion sur la surface des fibres (B_4C , SiC, BN)
- Addition d'éléments d'alliage à la matrice pour \uparrow la plasticité

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

a) **Elaboration de demi-produits** par **COMPRESSION A CHAUD**

Principe:

Compacter un empilement de couches de fibres unidirectionnelles ou croisées (filaments) et de feuilles (ou lit de poudre) métalliques (feuillards).

Les filaments sont obtenus

- par tissage (les filaments sont maintenus par une trame de fil de même nature que la matrice métallique)
- par bobinage sur un mandrin cylindrique puis projection d'un liant organique et découpe pour donner une nappe unidirectionnelle de fibres liées entre elles

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

COMPRESSION A CHAUD

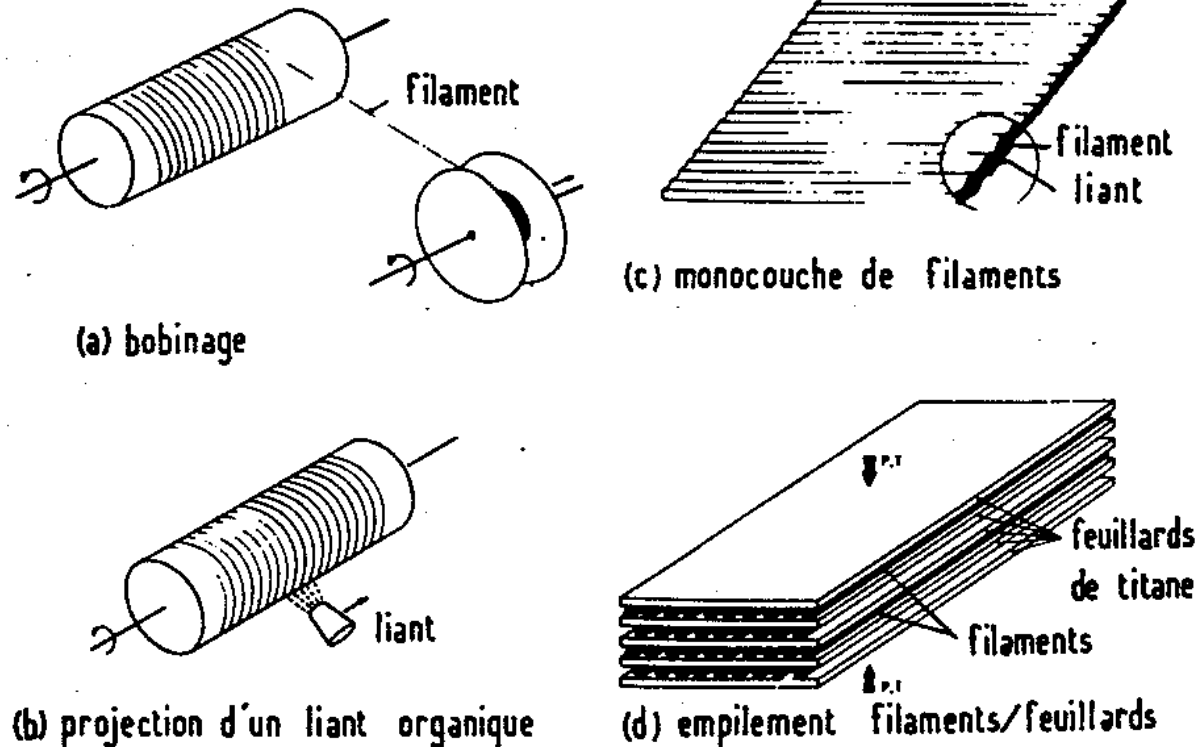


Figure. 2.10 : Principe d'élaboration des matériaux composites par compression uniaxiale à chaud : (a) bobinage de la fibre sur un mandrin, (b) projection d'un liant organique, (c) nappe unidirectionnelle de filaments, (d) empilement alterné de nappes de fibres et de feuilards métalliques et compression.

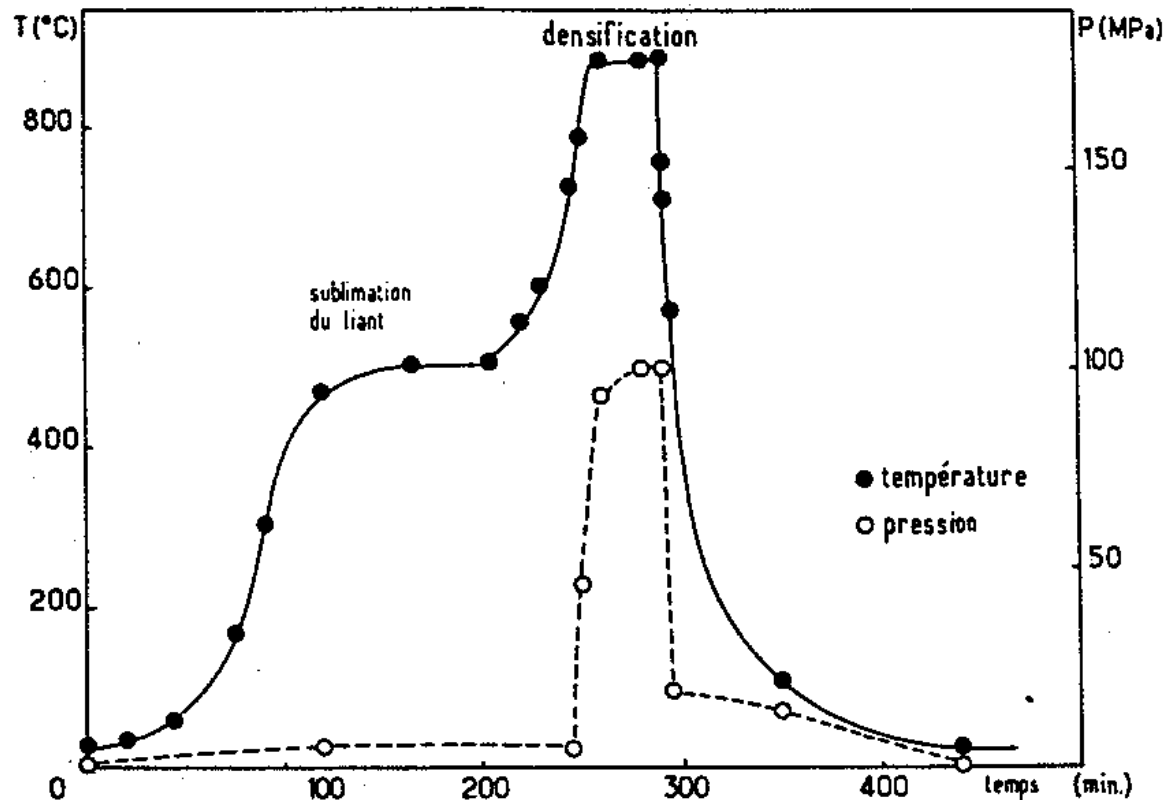
Des feuilles minces (50-200 μm) de métal et les monocouches de renfort sont ensuite empilées dans une presse

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

COMPRESSION A CHAUD

Conditions de pressage: palier à température modérée sous faible pression pour éliminer le liant organique sans détruire l'orientation des renforts avant densification



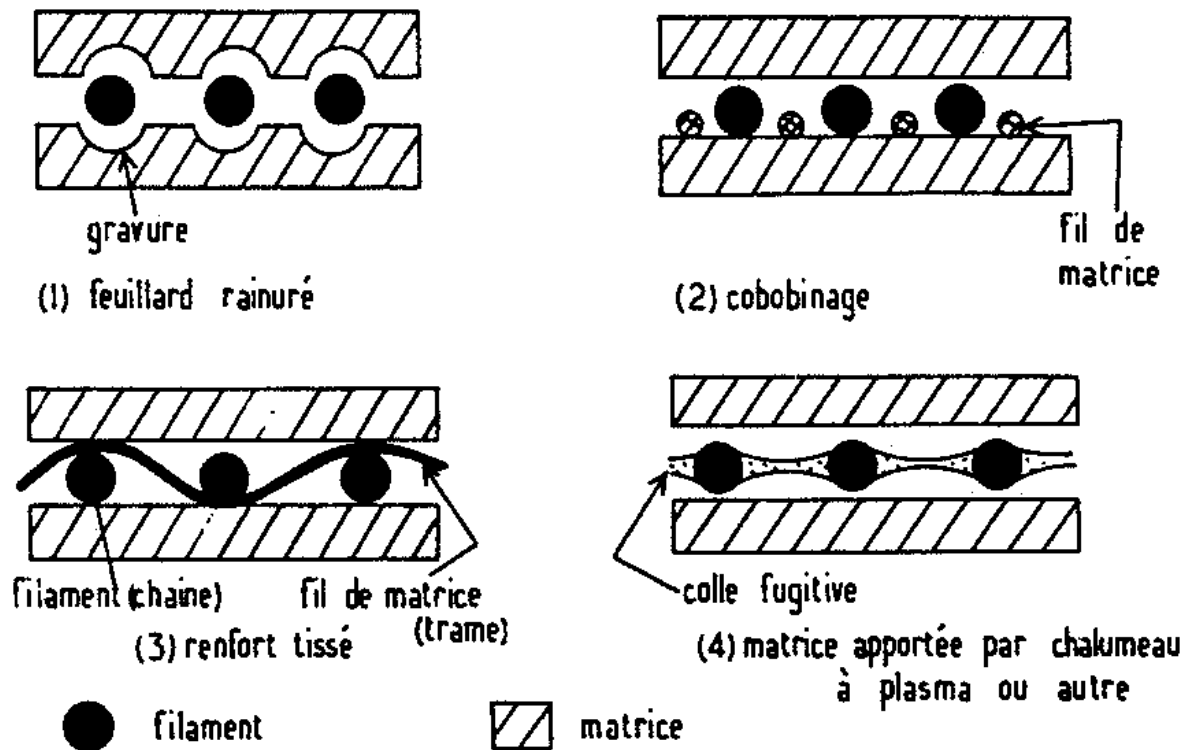
SiC/Ti-6Al/4V

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

COMPRESSION A CHAUD

Différents modes de maintien de filaments en alignement 1D



II.3 LES Composites à fibres

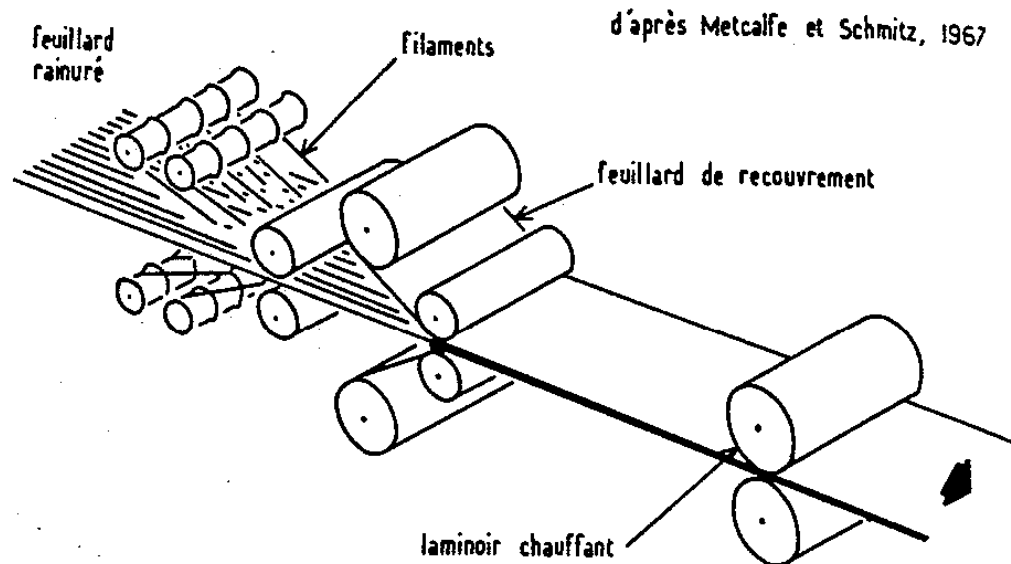
VOIE SOLIDE

COLAMINAGE A CHAUD

Principe:

Colaminer à chaud un empilement de feuilles de métal et de nappes de filaments pour obtenir en continu un feuilard de composite unidirectionnel.

Le temps de cuisson est très court (1 seconde pour B/Ti laminé à 980°C) ce qui limite les risques de dégradation thermochimique



II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

b) Procédés de transformation des demi-produits

Les demi-produits (fils, rubans, tissus pré-imprégnés) élaborés préalablement par projection plasma, imprégnation par voie liquide, colaminage, compression à chaud sont compactés, assemblés par des méthodes de transformation à l'état solide.

La compression à chaud:

consiste à compacter un empilement de demi-produits composites entre les plateaux chauffants d'une presse.

→ obtention en discontinu de plaques en B/Al, C/Al, SiC/Al.... Ou des pièces plus complexes (aubes de compression en B/Al)

Ce procédé peut être rendu continu par compactage pas à pas ou laminage continu.

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

La compression à chaud de demi-produits

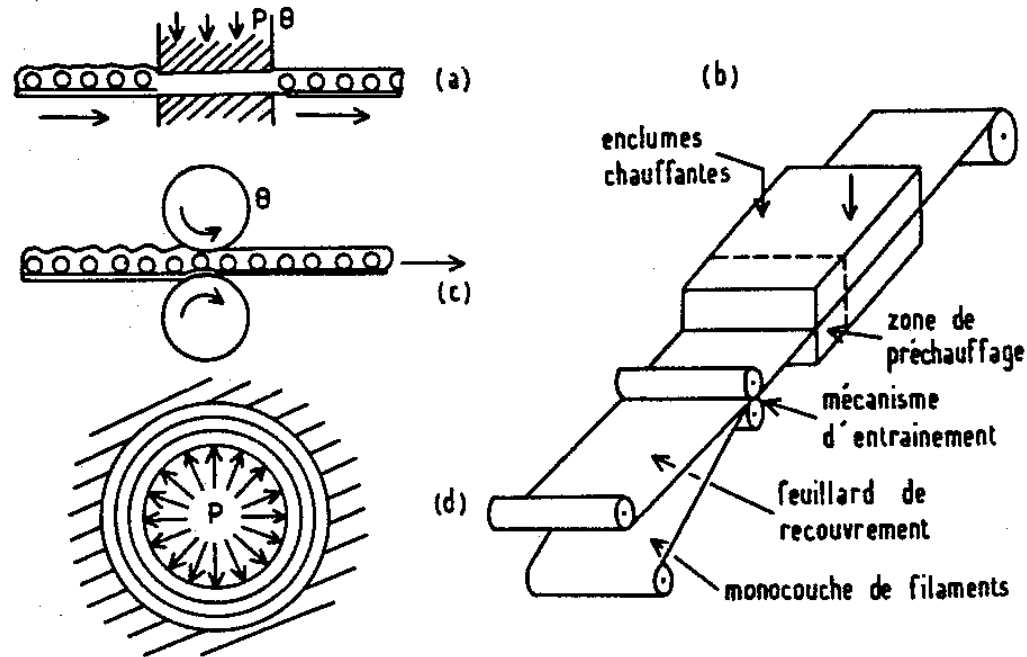


Figure. 2.14. : Compactage de demi-produits composites : (a) compactage pas à pas, (b) et (c) laminage à chaud, (d) réalisation de tube à l'aide d'un mandrin expansible.

Fabrication de tubes en MMC en enroulant autour d'un mandrin expansible une ou plusieurs couches de demi-produits, ensuite en encapsulant l'ensemble dans une matrice cylindrique et en portant le tout dans un four alors qu'une pression interne est exercée à l'intérieur du mandrin.

II.3 LES Composites à fibres

VOIE SOLIDE

La pultrusion de demi-produits

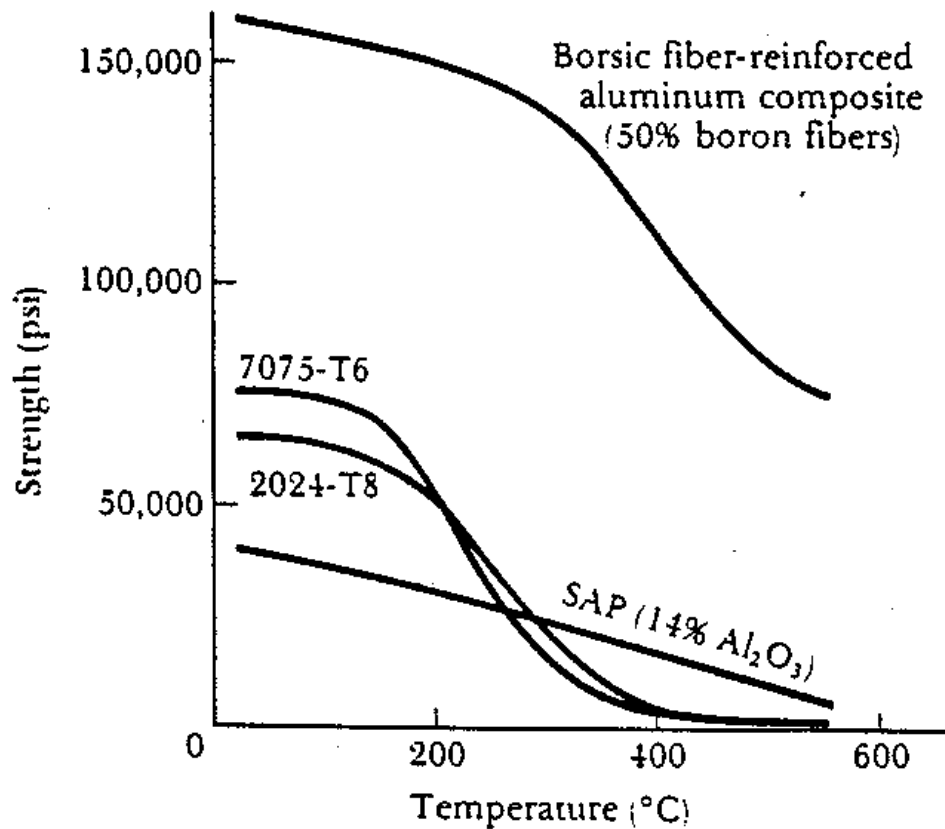
Passage des demi-produits (fils ou rubans) dans une filière à haute température pour les transformer en profilés .

Exemple: fabrication en continu de baguettes ou de tubes à partir de fils C/Al.

La compression isostatique à chaud de demi-produits

II.3 LES Composites à fibres

Les MMC renforcés par fibres longues présentent de meilleures propriétés mécaniques à T ambiante et à hautes températures.

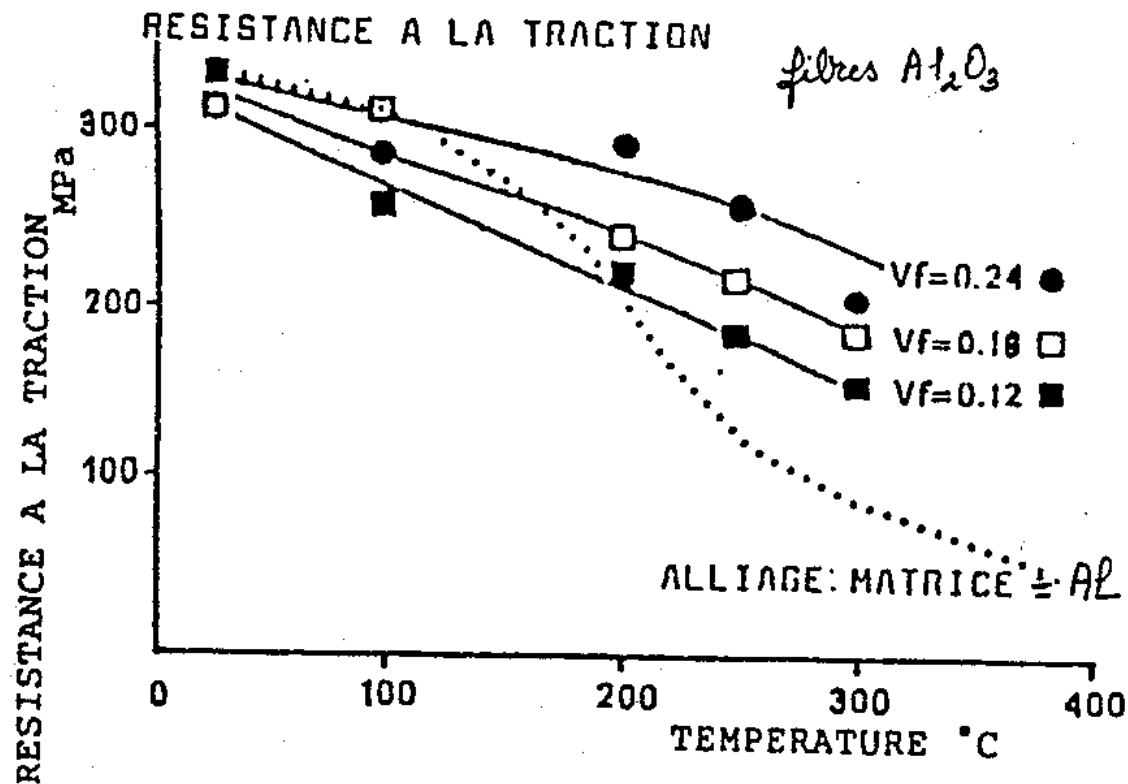


Principales applications:
aérospatiale
Al renforcé par fibres de bore

Plus lourds que les FRP

II.3 LES Composites à fibres

Les MMC renforcés par fibres longues présentent de meilleures propriétés mécaniques à T ambiante et à hautes températures.



II.3 Application particulière: cables supra

Les composés intermétalliques Nb_3Sn ont de bonnes propriétés superconductrices mais sont très fragiles.

→ des filaments de pur niobium sont entourés de Cu et les 2 métaux sont extrudés pour former un seul câble.

Le composite est ensuite recouvert d'étain qui diffuse et réagit avec le niobium pour former le composé intermétallique.

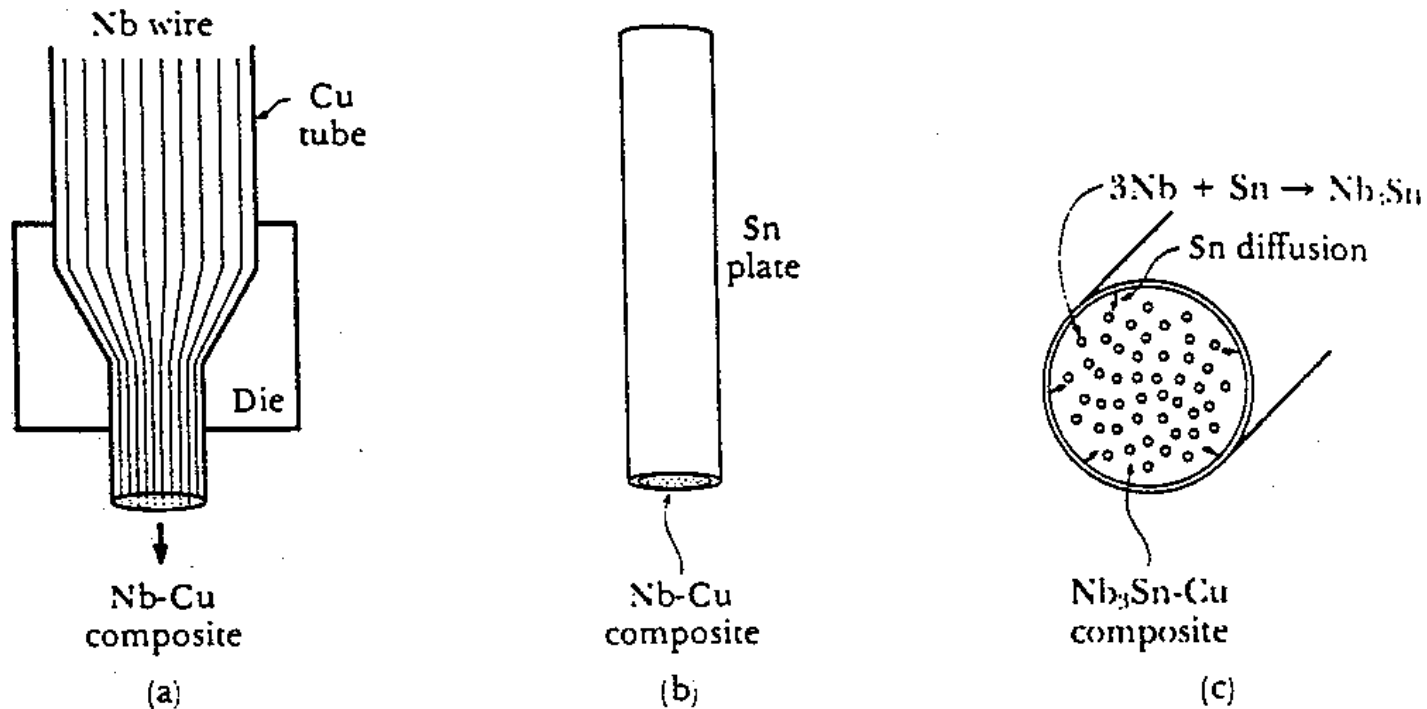


Figure 2.15 : Procédé de fabrication de cables supraconducteurs.

II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE LIQUIDE

Même procédés d'imprégnation sous pression modérée ou forte pression que pour les fibres longues

Même difficultés dues au mauvais mouillage et la réactivité

Moins critiques si utilisation de mélanges pâteux fibres et matrice appelés **compounds**.

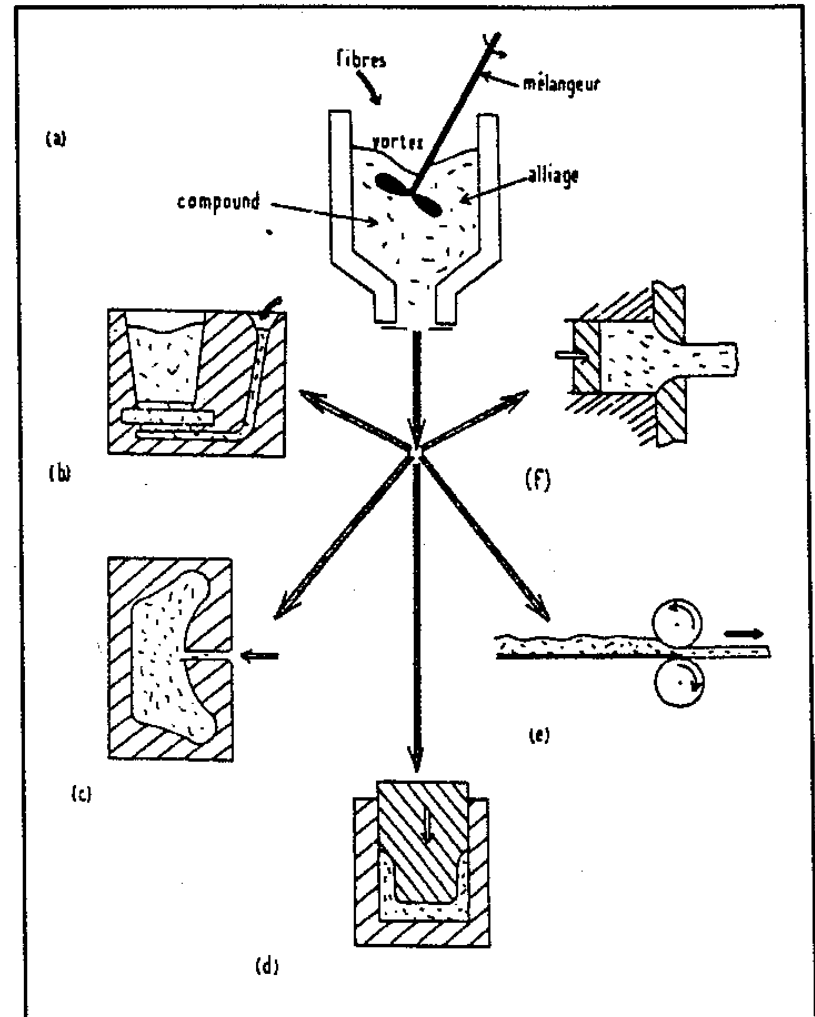
II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE LIQUIDE: **compounds**

1^{ère} étape

Incorporation de fibres courtes ou particules au sein du métal par un brassage dans métal liquide ou malaxage d'un mélange semi-liquide.



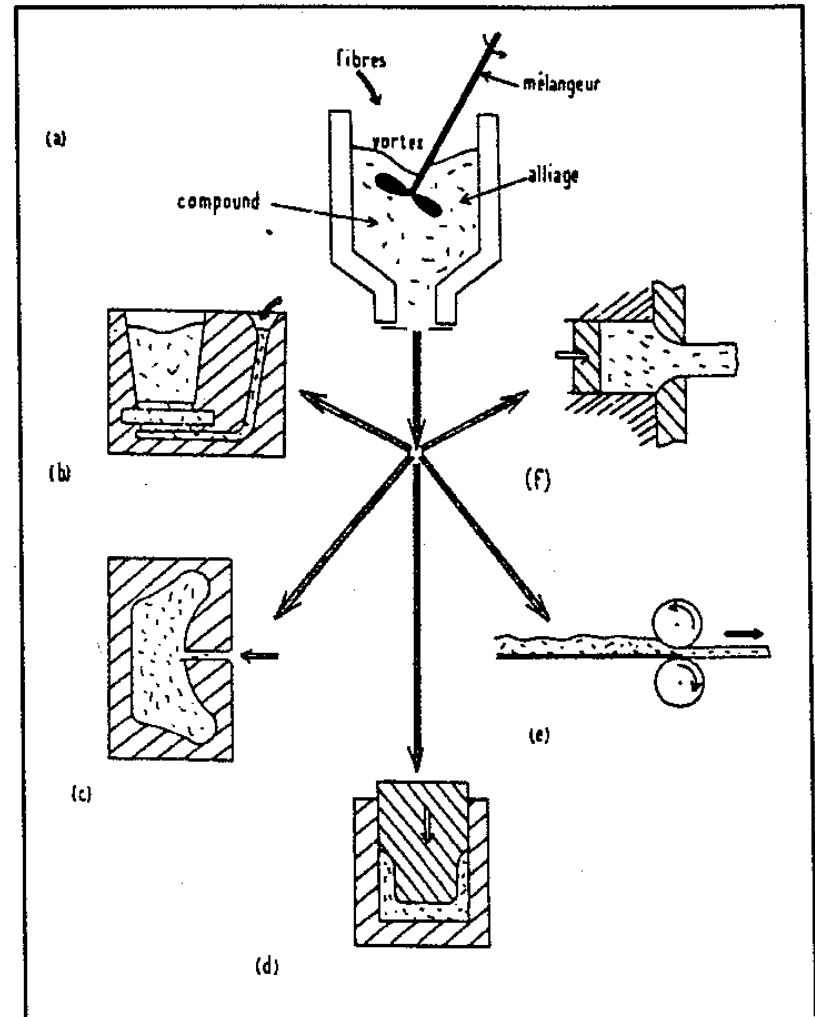
II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE LIQUIDE: **compounds**

2^{ème} étape : Mise en forme par:

- Coulée par gravité (<10 vol%) b
- Injection (30%) c
Cadence élevée de pièces finies
- Forgeage (30%) d
Compounds de très faible coulabilité
- Laminage (50%) e
Produits plats
- Extrusion f
Réduction de section importante
- Coulée centrifuge



II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES

Matrice sous forme de poudre + fibres suffisamment courtes ou particules

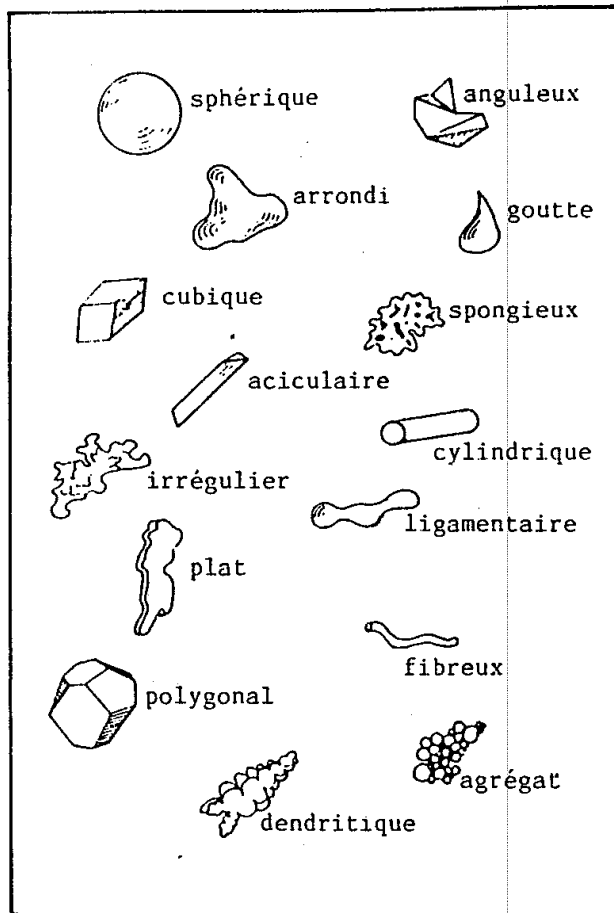
→ billettes

Les demi-produits sont ensuite transformés par déformation plastique: extrusion, laminage, forgeage....

II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE



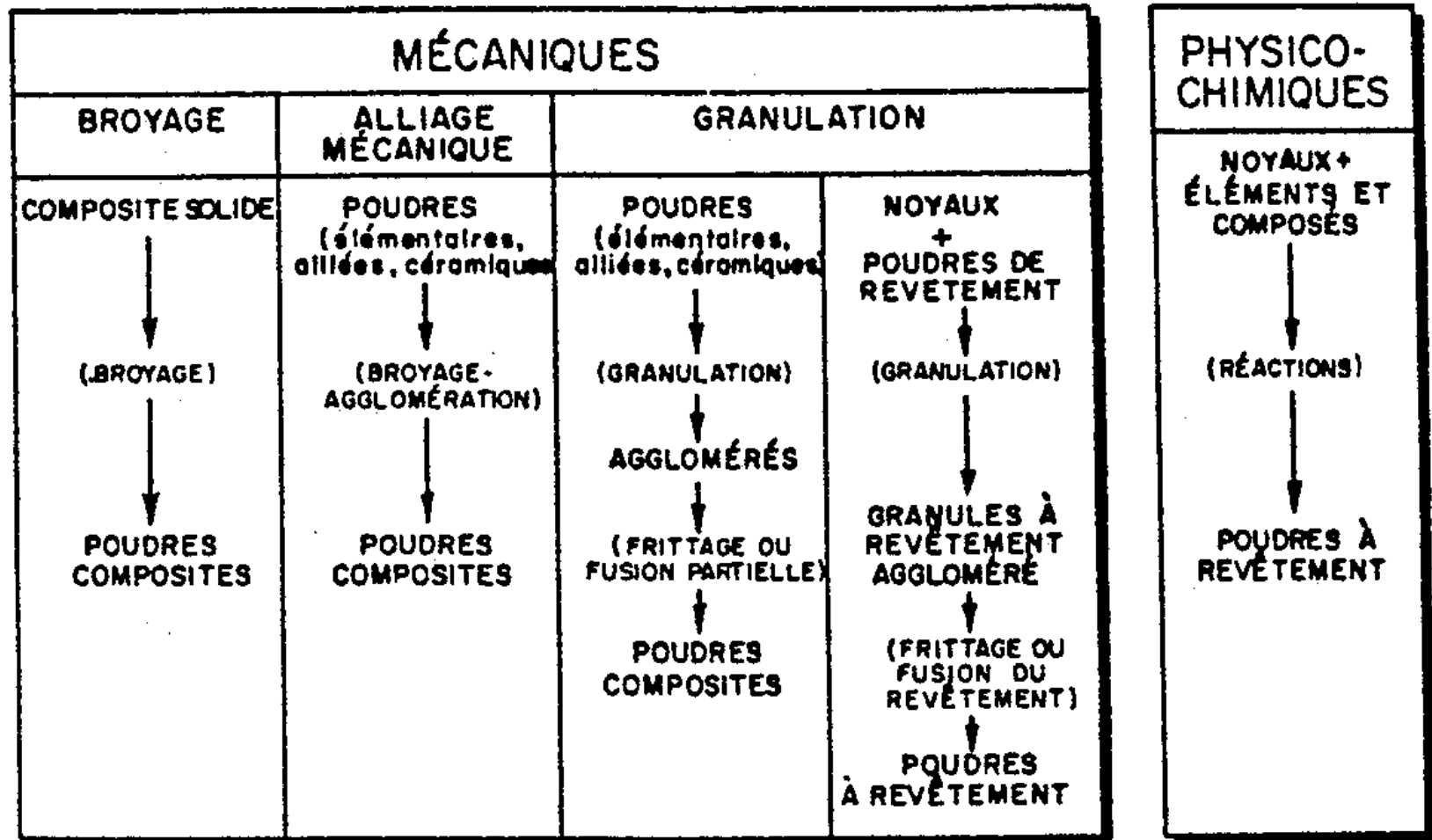
TYPE	SECTION D'UNE PARTICULE
<u>ÉLÉMENTAIRES</u>	
<u>ALLIÉES</u>	
<u>À REVÊTEMENT</u>	
<u>COMPOSITES</u>	

II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES

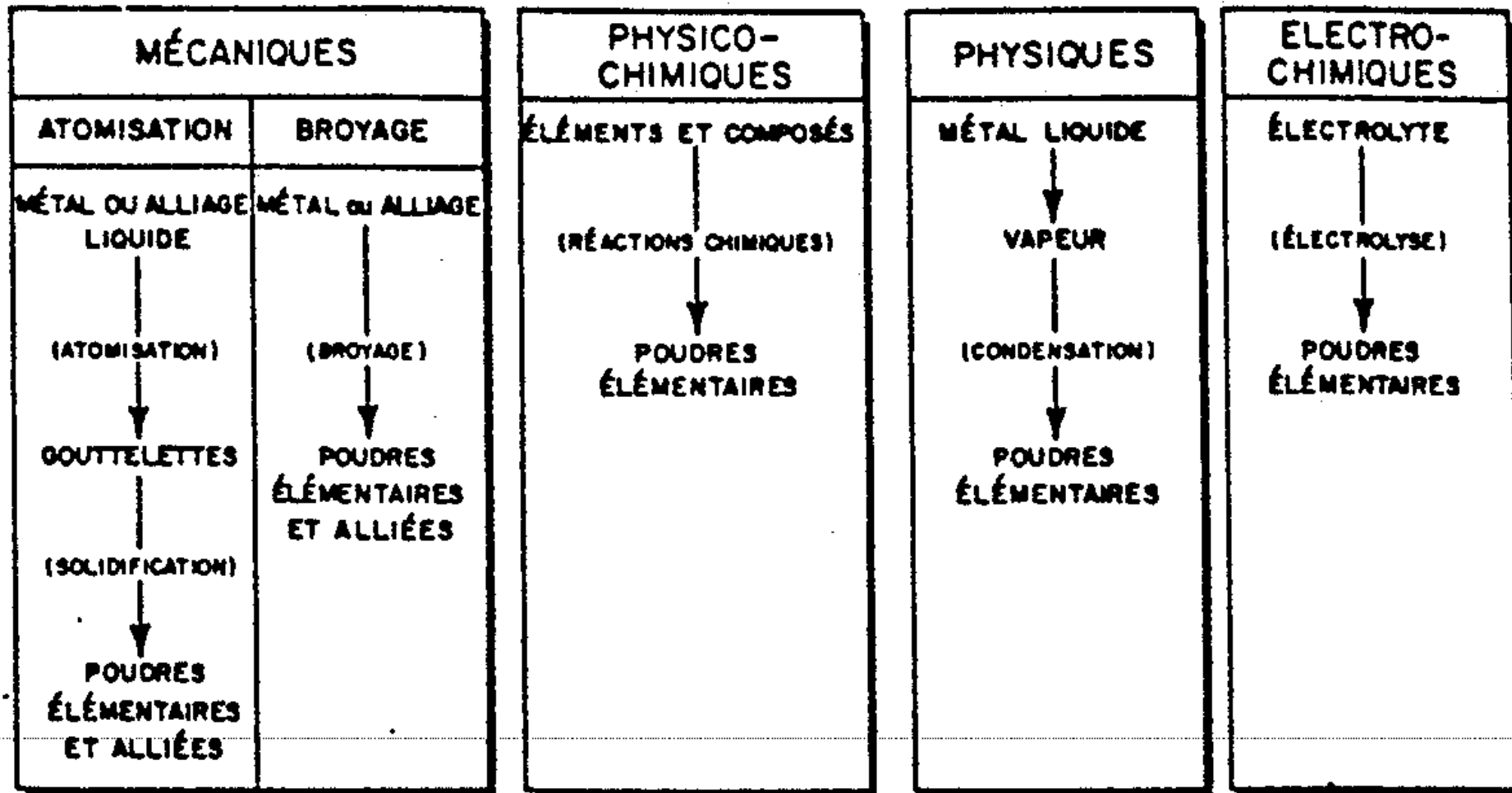


II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

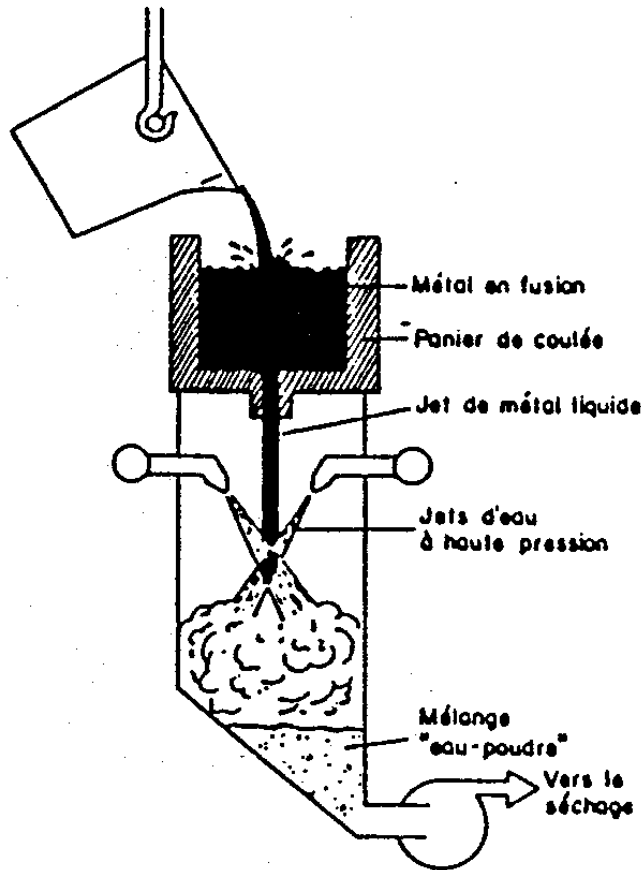
METALLURGIE DES POUDRES



II.3 LES Composites à fibres

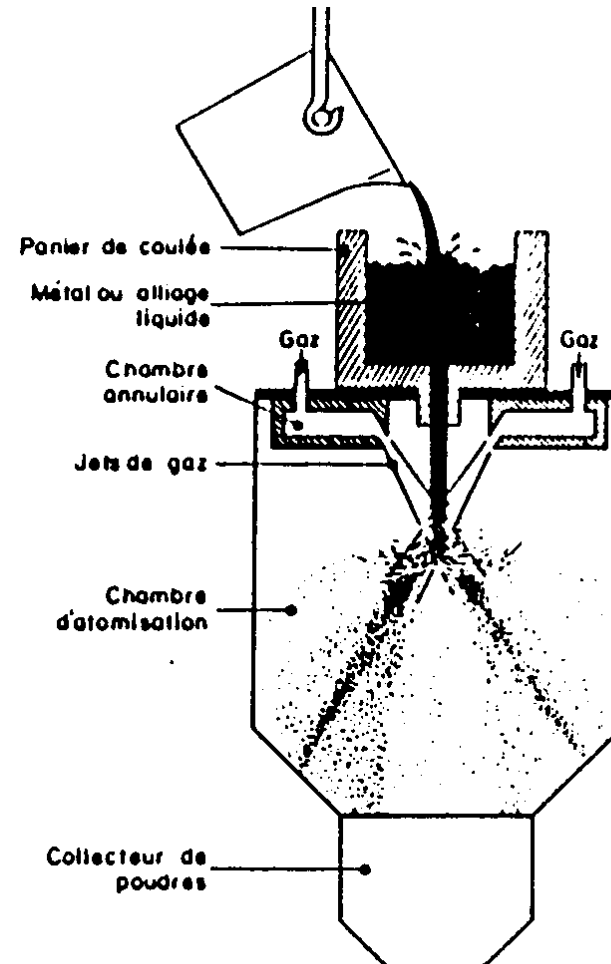
Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE



ATOMISATION A L'EAU

METALLURGIE DES POUDRES



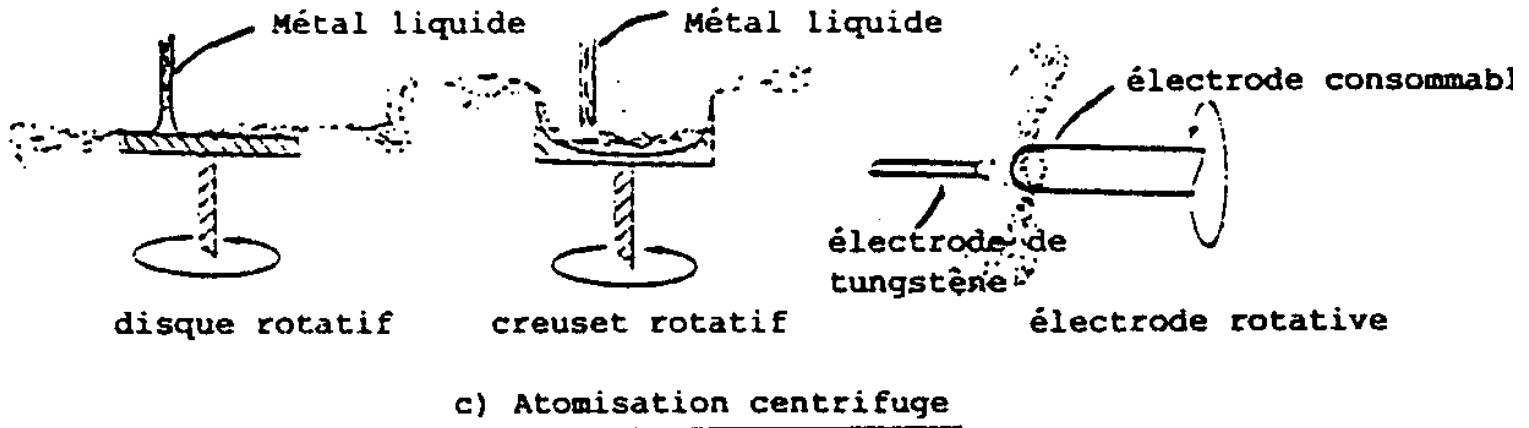
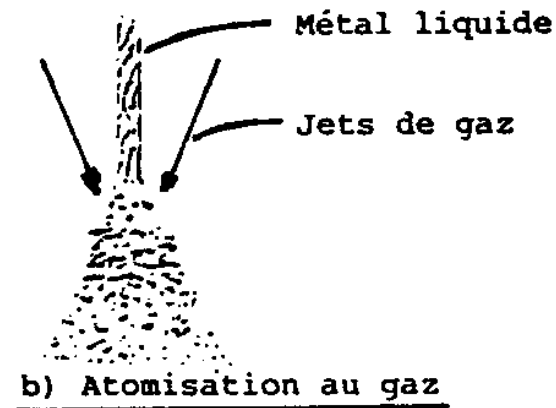
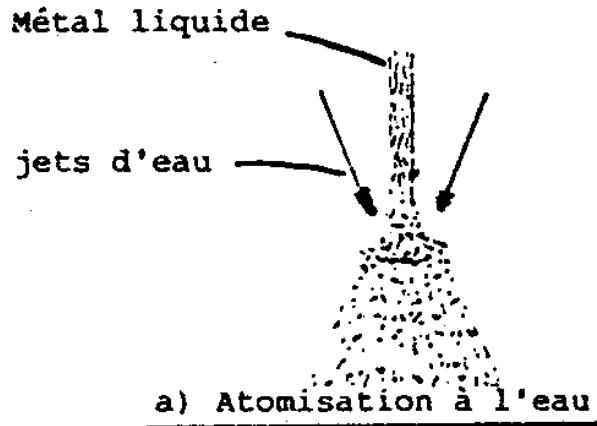
ATOMISATION AU GAZ

II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES

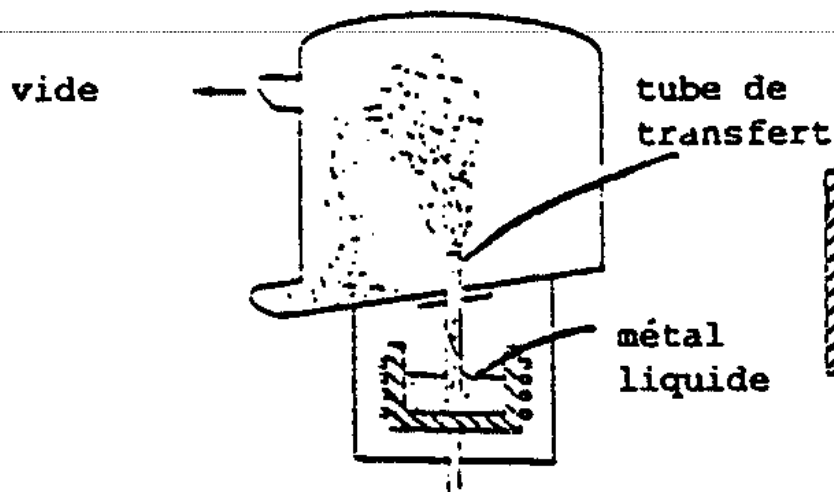


II.3 LES Composites à fibres

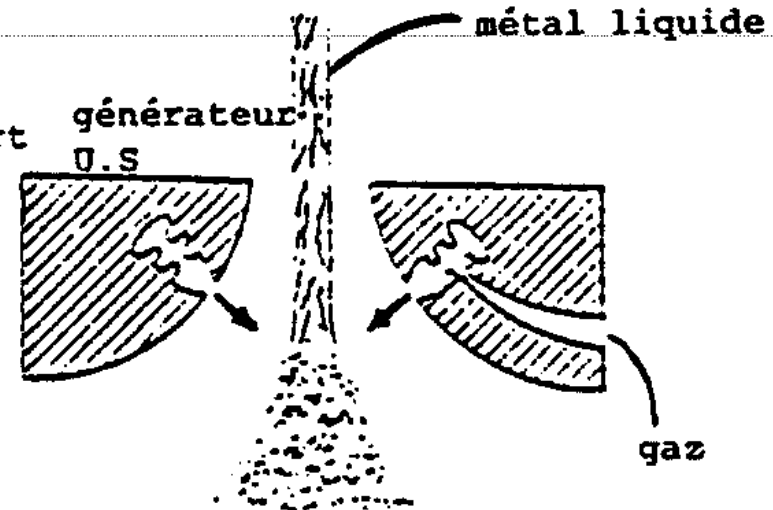
Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES



d) Atomisation sous vide



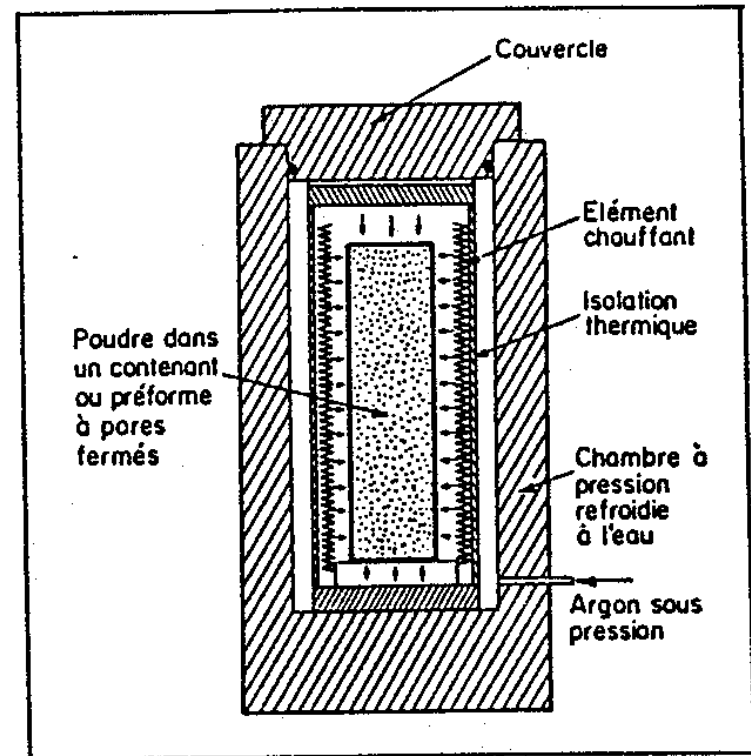
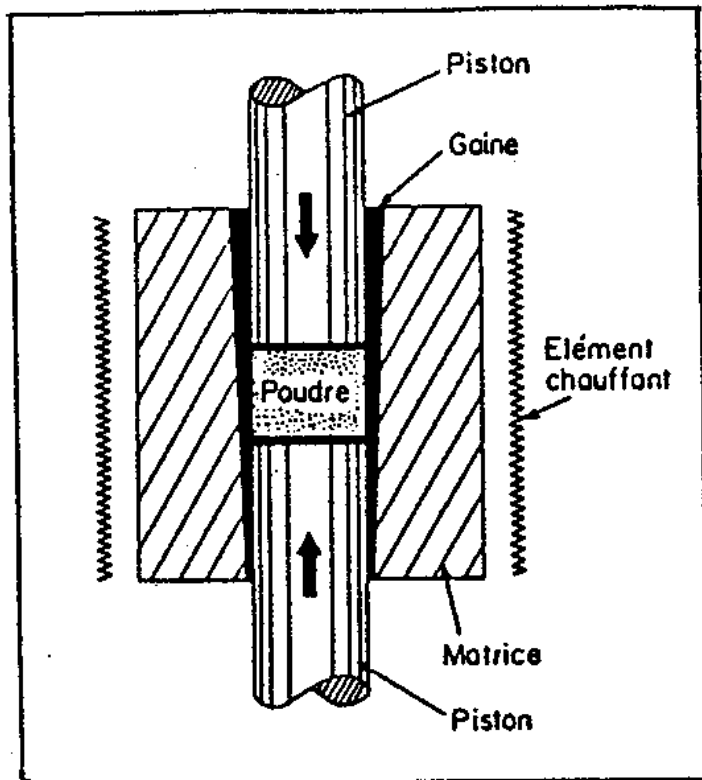
e) Atomisation par ultra-sons

II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES

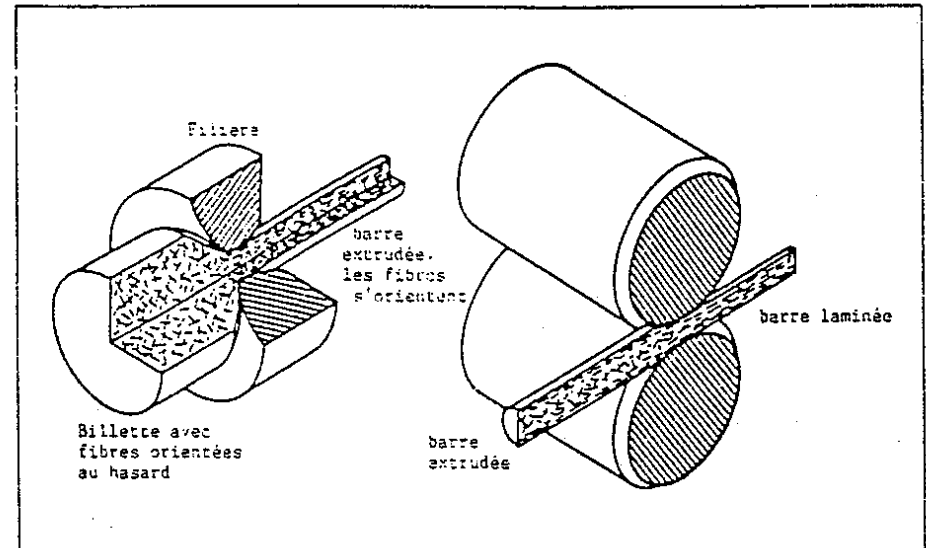
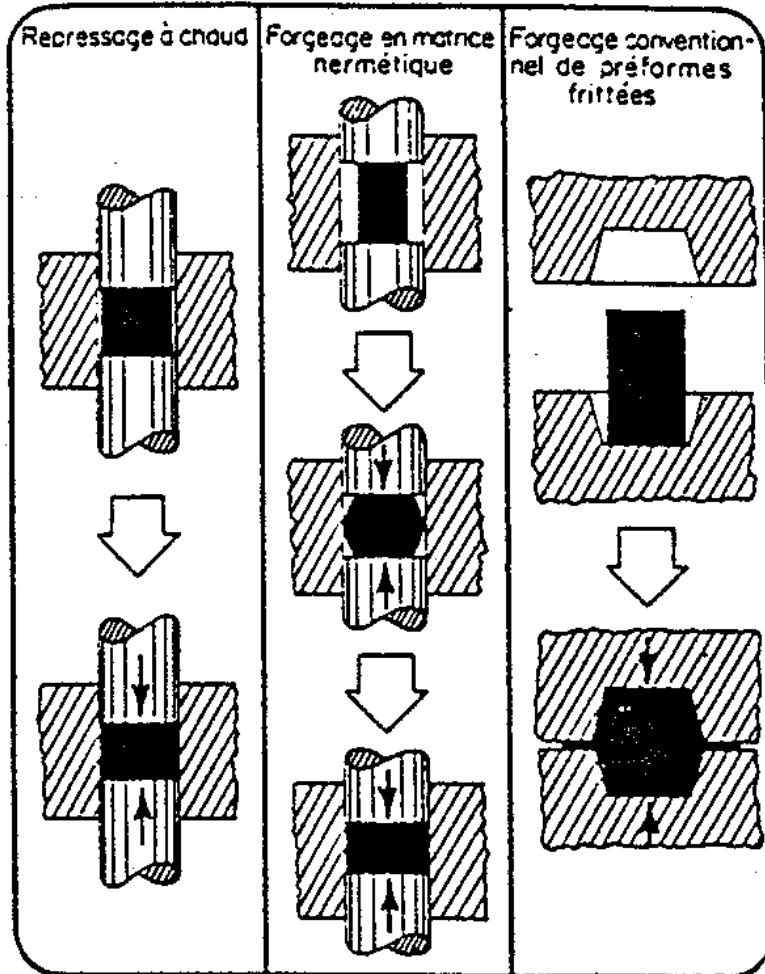


II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES



II.3 LES Composites à fibres

Méthodes de mise en forme des composites à fibres courtes ou particules

VOIE SOLIDE

METALLURGIE DES POUDRES

