

Les alliages d'aluminium: production et mise en forme

lundi 28 Avril 2025

- ✚  Coulée continue acier 
- ✚  Aciers Sandvik 
- ✚  Recyclage et coulée semi-continue Alu 
- ✚  Extrusion Aluminium 
- ✚  Coulée alu: principe 

Les alliages d'aluminium

L'aluminium: élément Al ($Z = 13$, 14 neutrons, $M = 27$ g/mol)

										13 IIIA	14 IVA	15 VA
										B 5	C 6	N 7
										10.811	12.0107	14.00
										2.04 3	2.55 4	3.04
										Boron	Carbon	Nitrogen
										Al 13	Si 14	P 15
										26.981538	28.0855	30.973762
										1.61 3	1.90 4	2.19
										Aluminum	Silicon	Phosphorus
5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9	10	11 IB	12 IIB					
V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33		
50.9415	51.9961	54.938045	55.845	58.933195	58.6934	63.546	65.38	69.723	72.64	74.9216		
1.63 5	1.66 6,3	1.55 7,4,2	1.83 3,2	1.88 3,2	1.91 2	1.9 2,1	1.65 2	1.81 3	2.01 4,2	2.18		
Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic		

$E = 70$ GPa mais densité = 2.7

Module spécifique = E/ρ équivalent à ceux de Fe, Ti et Cu

($1/\rho$ est le volume spécifique en m^3/kg , e.g. $0,37 \text{ dm}^3$ pour 1 kg d'Al)

Module spécifique en flexion (E/ρ^2 ou E/ρ^3) idem à Mg et Ti et plus élevé que Fe.

Al est très abondant dans la croûte terrestre: 8 % après O et Si.

Aluminium

Son oxyde Al_2O_3 (céramique utilisée comme réfractaire) est très stable.

Mais la couche d'oxyde (5 à 10 nm) auto-protège le métal car elle :

- adhère bien au métal
- n'est pas friable
- et est quasi-imperméable à O.

Application: casserole de cuisine. L'Al ne rouille pas et les ions Al^{3+} nocifs pour la santé ne diffusent pas dans les aliments grâce à la couche d'oxyde en surface.

Autre propriété remarquable:

Ses conductivités thermique et électrique, 60 % de celle du Cu.

Application: lignes à haute tension, Al est bp moins cher que Cu, Ag et Au, et a une faible densité. Al permet de maximiser le **rapport conductivité électrique, σ , sur densité, i.e. conductivité par unité de masse (σ/ρ) ou conductivité spécifique.**

Les structures en aluminium



Sas d'entrée



Airbus A380
575 t au décollage, ca.
400 t à l'atterrissage.



Satellite

Les métaux sont extraits des minerais dans lesquels ils existent sous forme d'oxydes: Al est extrait de la bauxite.

Un minerai est une roche contenant des éléments utiles en proportion suffisamment intéressante pour justifier son exploitation. Cela nécessite une transformation (métallurgie extractive) pour être utilisé par l'industrie.

Aluminium

Bref historique

Sa synthèse industrielle commence **en 1886** (son prix chute de 130 £/kg à 5.5 £/kg) suite aux travaux de Henri Sainte-Claire Deville 1818-1881 (réduction par de Al_2O_3 par Na)

Sa production industrielle s'étend dès 1886 grâce à **2 brevets**:

- **Charles Martin Hall aux US**
- **Paul Héroult en France**

Principe: **électrolyse de Al_2O_3 dans un sel, la cryolite (hexafluoroaluminate de trisodium)**

Minerai riche en Al_2O_3 : la bauxite (Baux de Provence)

Mais l'électrolyse de Al_2O_3 coute très cher en énergie (fort courant, 100 à 200 kA). Production au Canada et dans les Alpes Suisses et Françaises. Son prix chute à 0.44 £/kg en 1900.

Cependant, ses propriétés mécaniques sont encore médiocres et mal connues: Al ressemble à Ag mais est relativement mou (faible limite élastique).

Vers 1911, Alfred Wilm (Berlin et Düren) développe le duralumin ($\text{Al-Cu-Mn} + \text{Mg}$), alliage dur qui sera utilisé pour les premiers Zeppelinspuis plus tard pour les avions. Article de O. Hardouin Duparc et site <https://www.aluminium.fr/production-et-transformation/>

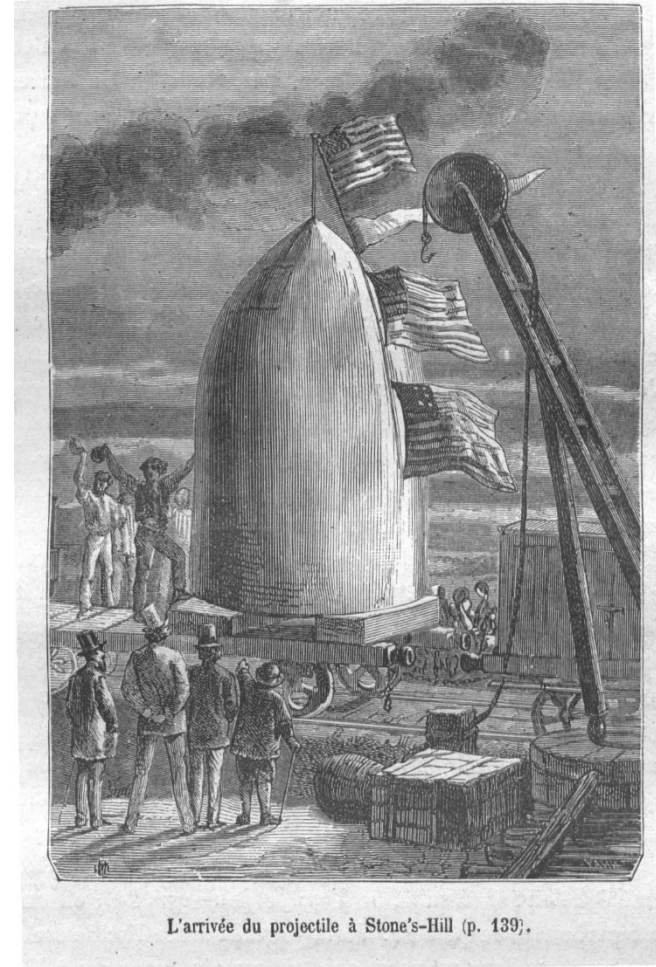
Aluminium

"Aluminum?" cried his three colleagues in chorus.
"Unquestionably, my friends".

This valuable metal possesses the **whiteness of silver**, the **indestructibility of gold**, the **tenacity of iron**, the **fusibility of copper**, the **lightness of glass**. It is easily **wrought**, is very widely distributed, forming the base of **most of the rocks**, is **three times lighter than iron**, and seems to have been created for the express purpose of furnishing us with the material for our projectile."

"But, my dear president," said the major, "is not the cost price of aluminum extremely high?"

"It was so at its first discovery, but it has fallen now to nine dollars a pound."



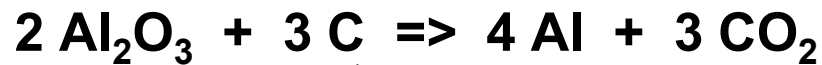
Jules Verne, De la Terre à la Lune, 1865

Aluminium primaire (ou de première fusion)

Production par réduction de l'oxyde d'aluminium (alumine) par le carbone dans les cuves d'électrolyse (St Jean de Maurienne, Sierre, Chicoutimi, ...)

L'efficacité de ce procédé passe de 40 kWh/kg Al à la fin du 19e siècle à **13 kWh/kg Al en 2003**. La limite théorique étant de 6.5 kWh/kg Al donc une optimisation est encore possible.

Bilan 4 t bauxite + 14 MWh + consommables donne 1 t Al. ($14 \cdot 10^6 \cdot 3600 = 50.4 \text{ GJ}$)



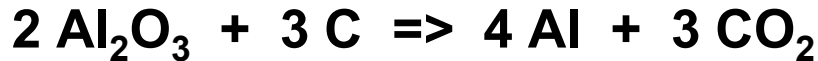
bauxite
mineral

présent dans l'anode sacrificielle au graphite

À 950°C dans un sel liquide (électrolyte), la cryolite
(hexafluoroaluminate de trisodium Na_3AlF_6)



Cuve d'électrolyse

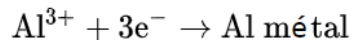


Principe [\[modifier | modifier le code \]](#)

L'alumine est dissoute dans un bain fluoré d'électrolyse entre 950 °C et 1 000 °C suivant la réaction (simplifiée) suivante :

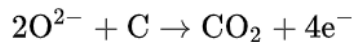


Suivant le principe de l'électrolyse, un **courant électrique** continu circule entre l'**anode** (pôle +) et la **cathode** (pôle -). L'aluminium se forme à la **cathode**, où il **entre en coalescence** dans une nappe d'aluminium liquide, selon la réaction :

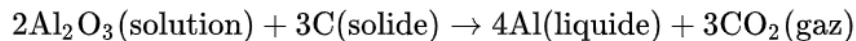


En pratique, il faut plusieurs milliers d'**ampères** pour produire une quantité significative d'aluminium : environ 7,65 kg d'aluminium par cellule par jour et par millier d'ampères.

À l'anode en **carbone**, le **dioxyde de carbone** gazeux se dégage sous forme de grosses bulles qui s'échappent dans l'**atmosphère** :



La réaction globale s'écrit :



Le bain est ici considéré comme un **électrolyte** dans lequel se dissout l'alumine et ne tie

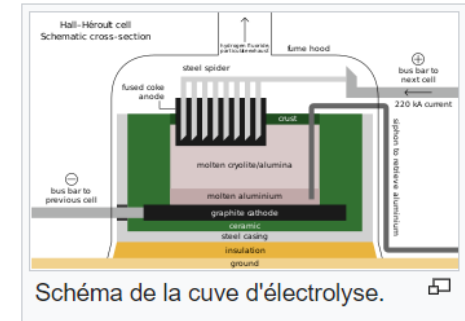


Schéma de la cuve d'électrolyse.



Source: wikipedia

Aluminium

Production par recyclage (récupération, tri et refonte): ca. 50% en Europe.

L'aluminium est 100% recyclable, sans perte de ses qualités physico-chimiques. On estime que 75% de l'aluminium produit depuis 1880 est toujours utilisé aujourd'hui. Si la production primaire consomme beaucoup d'électricité, **le recyclage ne consomme que 5% de l'énergie initialement nécessaire.**

Il est donc très rentable : l'aluminium usagé a une valeur économique élevée.

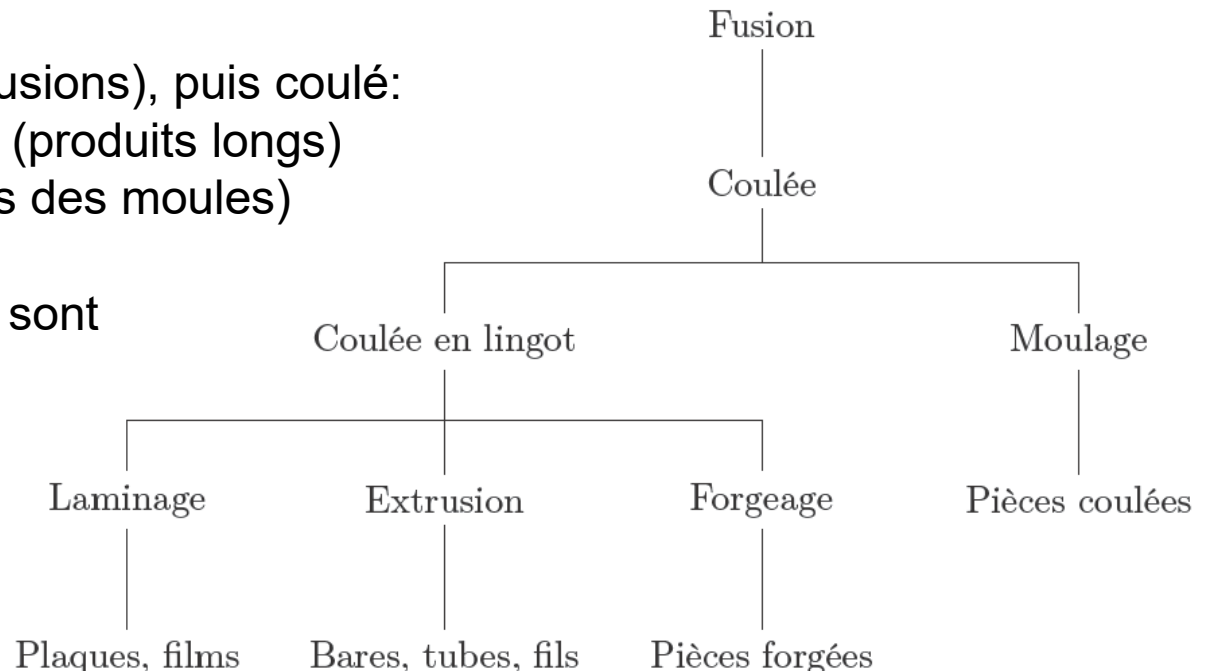
En CH, 91% des cannettes de boisson sont recyclées.

Moyenne européenne 65%.

L'alu est ensuite allié, filtré (inclusions), puis coulé:

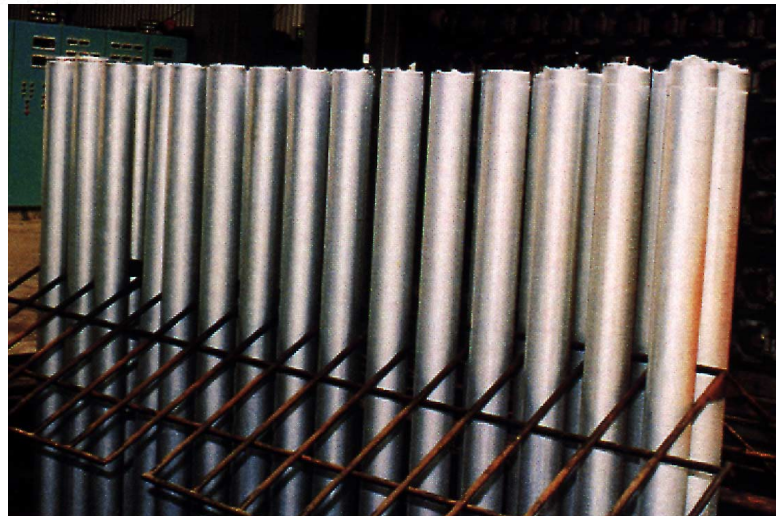
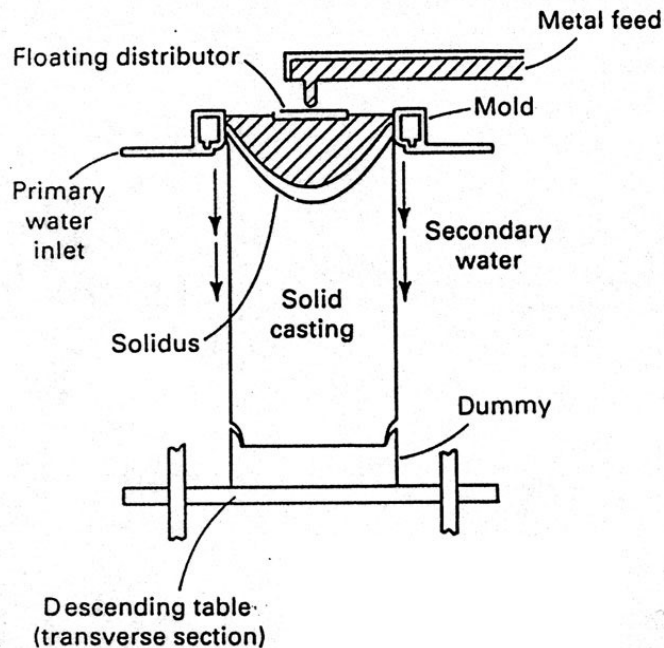
- par coulée semi-continue (produits longs)
- par moulage (coulée dans des moules)

Ensuite les semi-produits longs sont mis en forme pour devenir des produits finaux à la géométrie désirée.



Semi-produits en aluminium

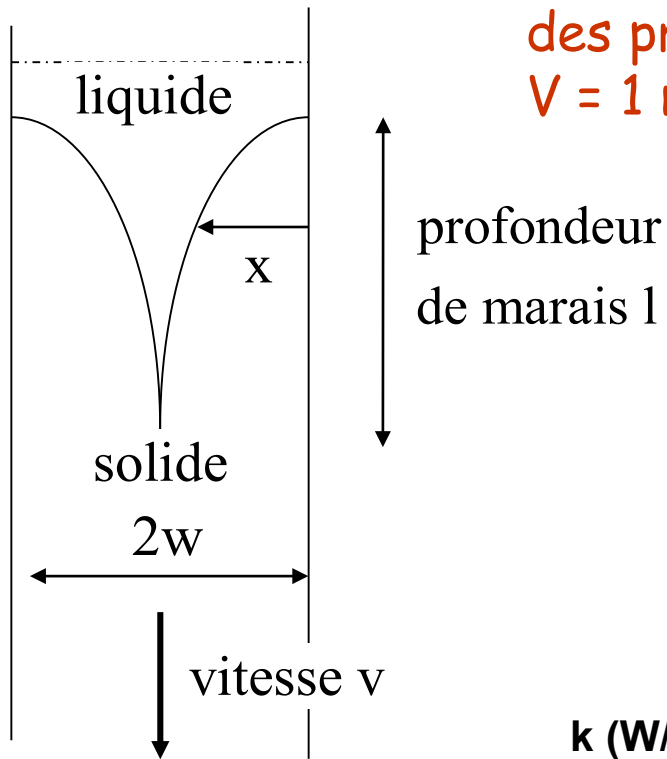
La coulée semi-continue fabrique **des semi-produits** qui seront ensuite laminés, extrudés ou tréfilés pour en faire **des produits finis**.



Exo: analyse thermique de la coulée continue

Profondeur du marais en fonction du format et des propriétés de l'alliage:

$V = 1 \text{ mm/sec}$ et $2w = 0.5 \text{ m}$



$$x = \sqrt{Dt} \quad \left(D = \frac{k}{\rho C_p} \right)$$

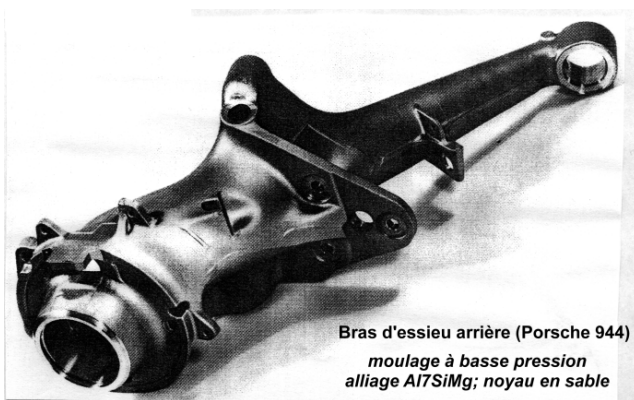
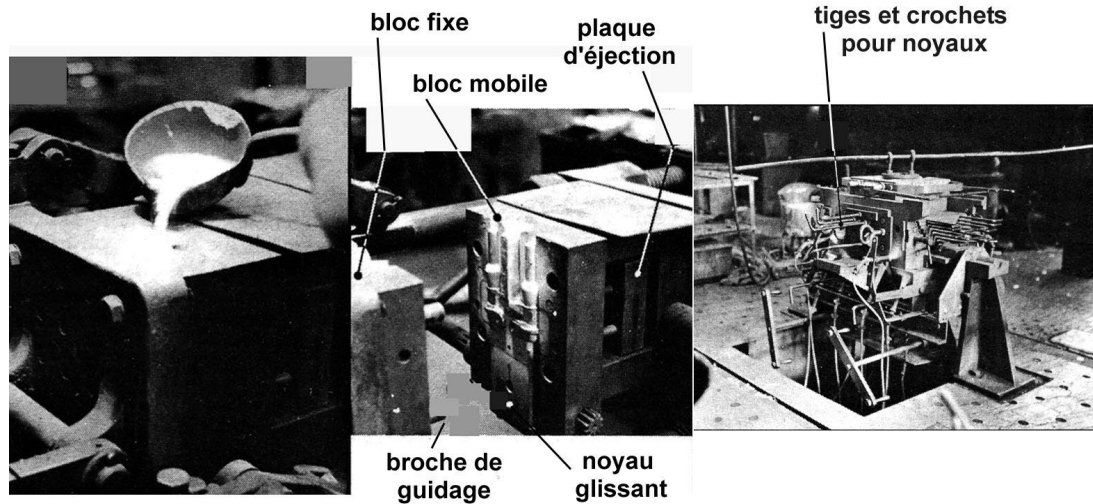
et $x = w$ quand $t = l/v$ soit $l = ?$

	$k \text{ (W/mK)}$	density (-)	$C_p \text{ (kJ/kgK)}$	Profondeur du marais (m)
Copper	350	9	0.4	?
Alus	200	2.7	1.1	?
Steel	31	7.85	0.73	?

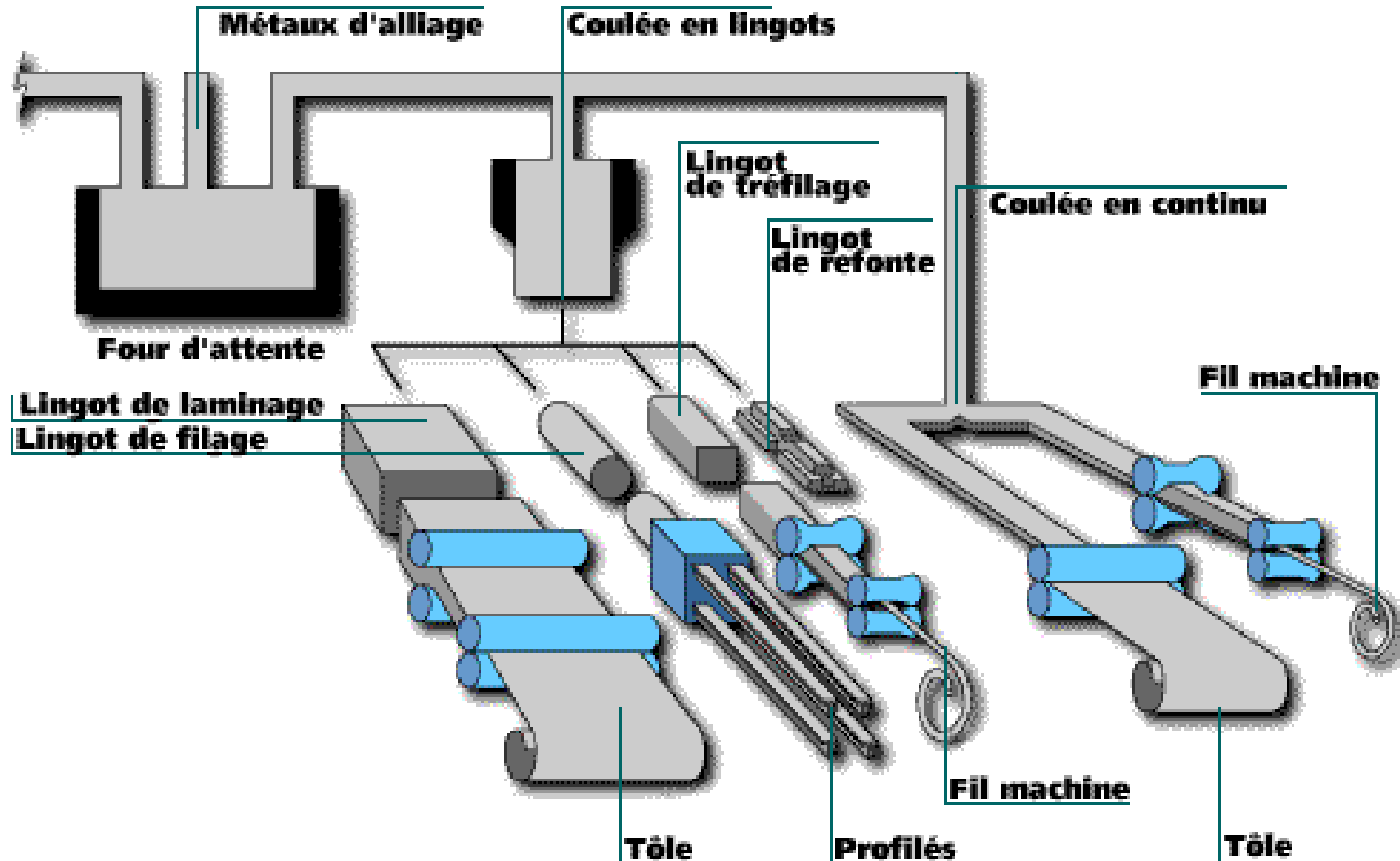
Conclure sur le caractère continue ou semi-continue de la coulée pour ces trois métaux.

Semi-produits d'aluminium obtenus par moulage (ca 10% en masse)

L'alliage d'alu est coulé dans un moule permanent ou non, en sable, en céramique, en métal. Les techniques sont très variées.



Mise en forme des aluminiums par procédés continus



Film: SAPA extrusion, <https://www.youtube.com/watch?v=baM5hNnBcT8>

Prochains cours

Propriétés mécaniques I et II