

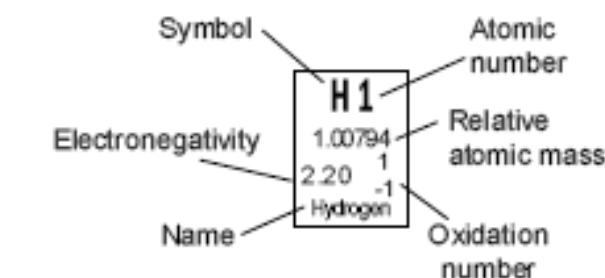
Les alliages d'aluminium: production et mise en forme

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)



The diagram shows the periodic table with a callout for Hydrogen (H). The callout highlights the following properties of H1:

- Symbol:** H1
- Atomic number:** 1
- Relative atomic mass:** 1.00794
- Oxidation number:** -1
- Name:** Hydrogen
- Electronegativity:** 2.20

The periodic table below shows the element properties for Hydrogen (H1) and other elements in group 13 (Boron), group 14 (Carbon), and group 15 (Nitrogen).

	13 IIIA	14 IVA	15 VA							
B 5 10.811 2.04 Boron	C 6 12.0107 2.55 Carbon	N 7 14.00 3.04 Nitrog								
Al 13 26.981538 1.61 Aluminum	Si 14 28.0855 1.90 Silicon	P 1 30.97 2.19 Phosph								
V 23 50.9415 1.63 Vanadium	Cr 24 51.9961 1.66 Chromium	Mn 25 54.938045 1.55 Manganese	Fe 26 55.845 1.83 Iron	Co 27 58.933195 1.88 Cobalt	Ni 28 58.6934 1.91 Nickel	Cu 29 63.546 1.9 Copper	Zn 30 65.38 1.65 Zinc	Ga 31 69.723 1.81 Gallium	Ge 32 72.64 2.01 Germanium	As 33 74.921 2.18 Arsen

E = 70 GPa mais densité = 2.7

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

(1/ρ est le volume spécifique en m³/kg, e.g. 0,37 dm³ pour 1 kg d'Al)

Module spécifique en flexion (E/ρ² ou E/ρ³) 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 Al³⁺ 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 **rappor tconductivité 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'atterrissement.



Satellite

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

Un minéral 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).

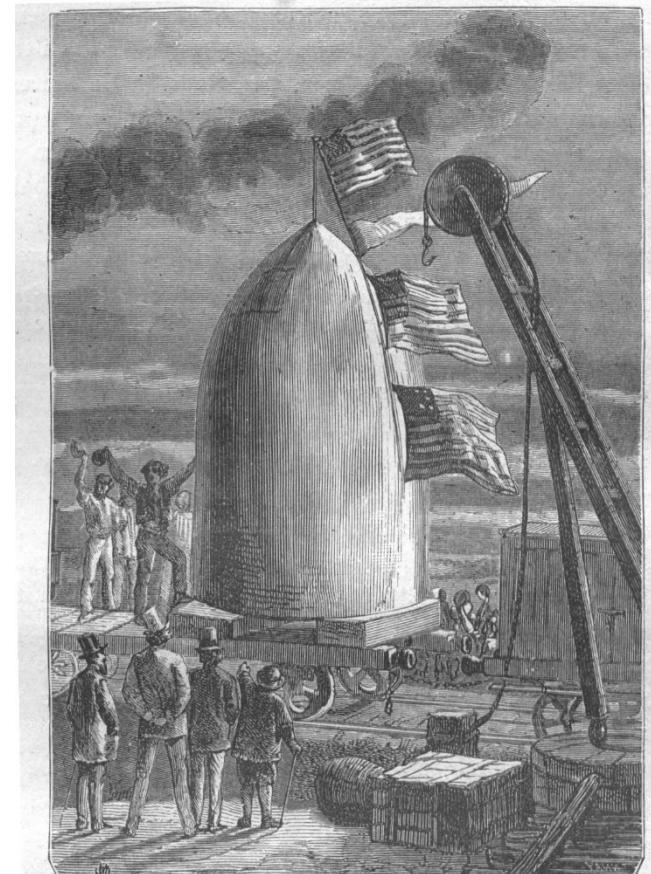
Vers 1911, Alfred Wilm (Berlin et Düren) développe le duralumin ($\text{Al}-\text{Cu}-\text{Mn} + \text{Mg}$), alliage dur qui sera utilisé pour les premiers Zeppelinspuis plus tard pour les avions. Article de O. Hardouin Duparc et site <https://www.aluminium.fr/production-et-transformation/>

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."



L'arrivée du projectile à Stone's-Hill (p. 139).

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.

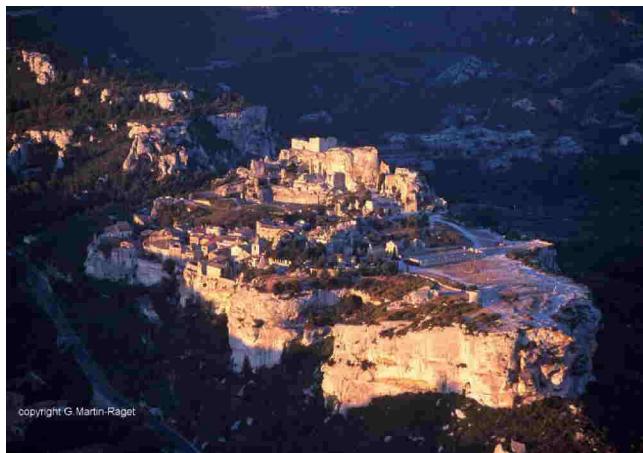
Bilan 4 t bauxite + 14 MWh + consumables donne 1 t Al. ($14 \cdot 10^6 * 3600 = 50.4 \text{ GJ}$)



présent dans l'anode sacrificielle au graphite

bauxite
minérai

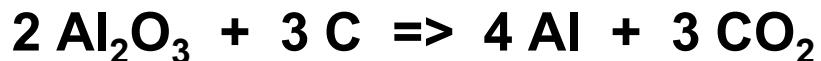
À 950°C dans un sel liquide (électrolyte), la cryolite (hexafluoroaluminate de trisodium Na₃AlF₆)



copyright G. Martin-Raget



Cuve d'électrolyse

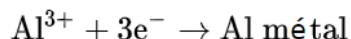


Principe [modifier | modifier le code]

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 :

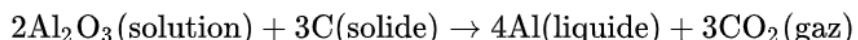


En pratique, il faut plusieurs milliers d'**ampères** pour produire une quantité significative d'aluminium : environ 7,65 kg d'aluminium par cellule par jour et par millier d'ampères.

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

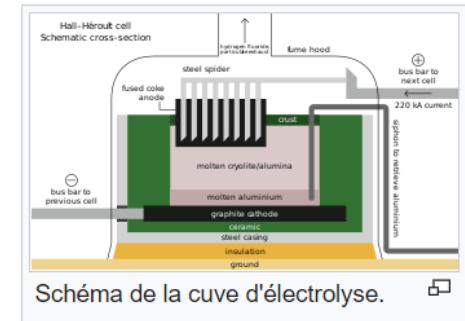


Schéma de la cuve d'électrolyse.



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.

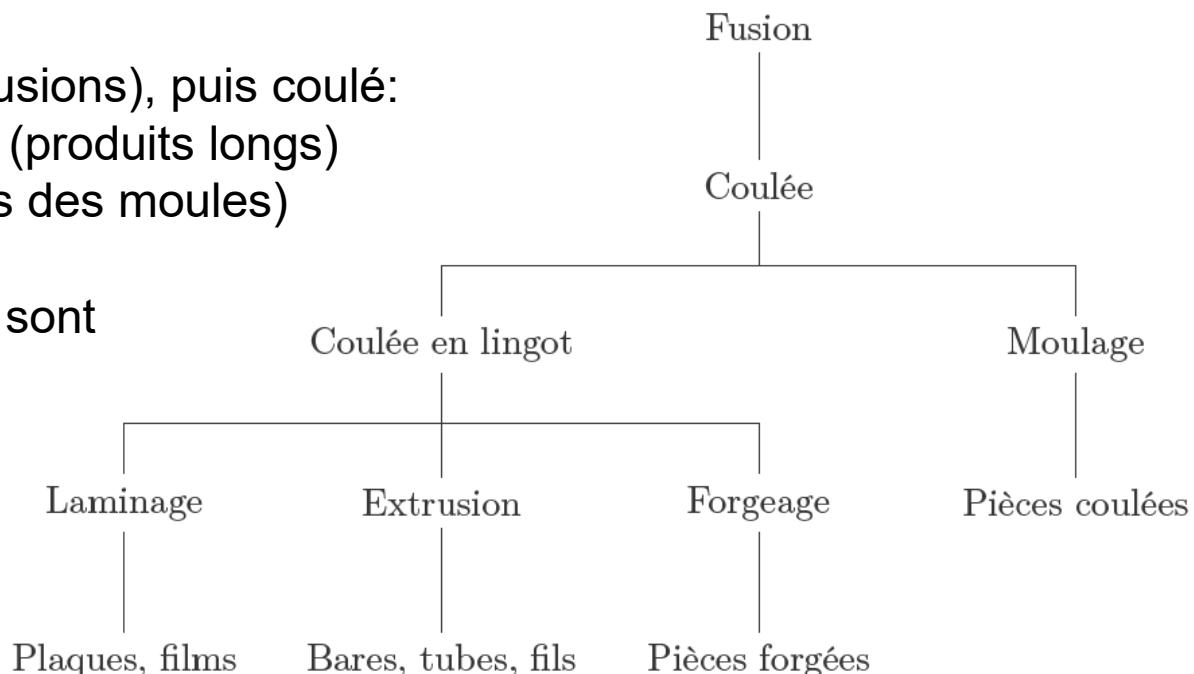
En CH, 91% des cannettes de boisson sont recyclées.

Moyenne européenne 65%.

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

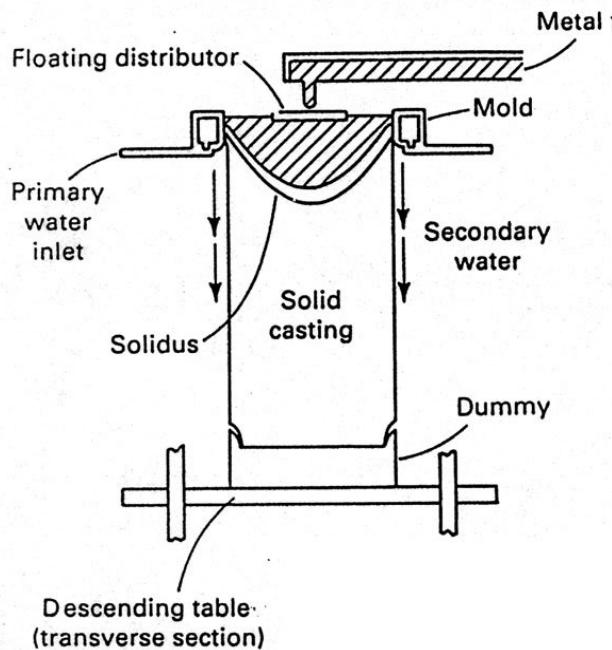
- par coulée semi-continue (produits longs)
- par moulage (coulée dans des moules)

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



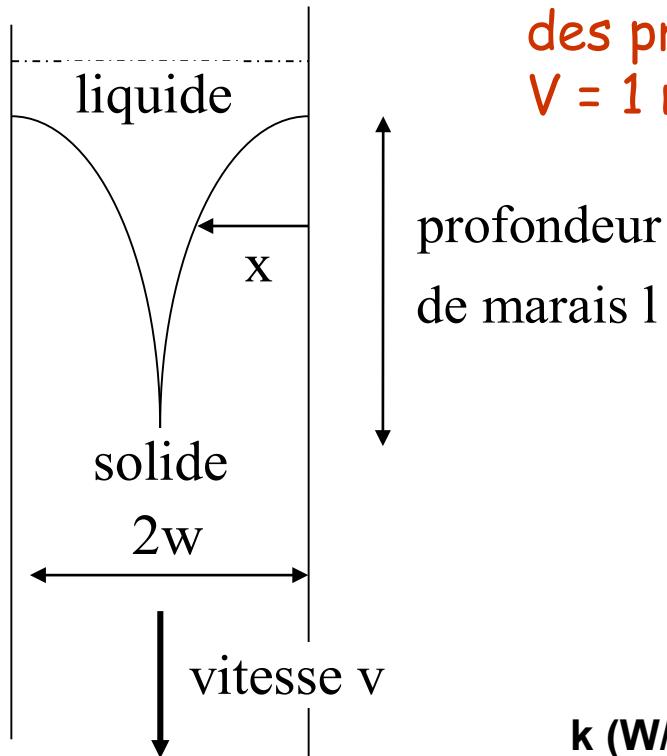
Semi-produits en aluminium

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 $2w = 0.5 \text{ m}$



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

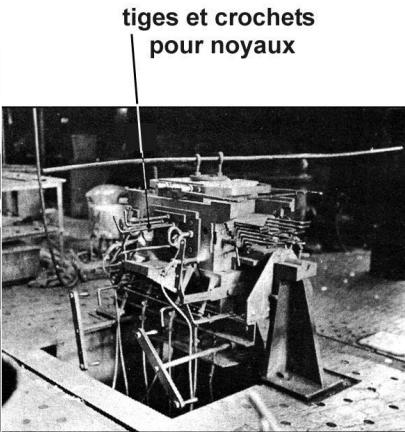
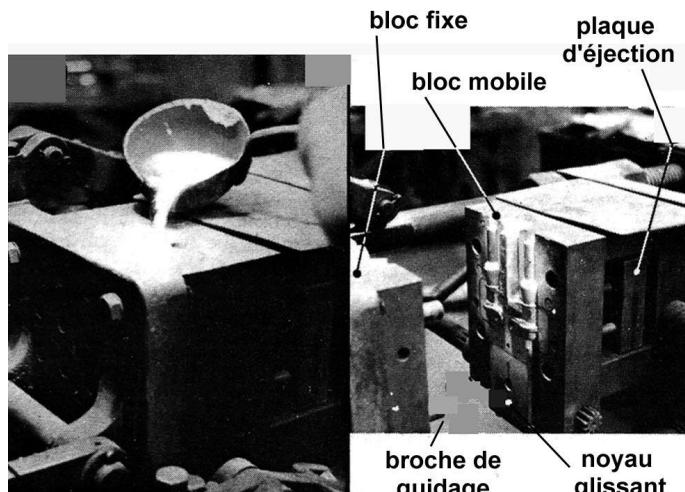
$$\text{et } x = w \text{ quand } t = 1/v \text{ soit } 1 = ?$$

	$k (\text{W/mK})$	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	?

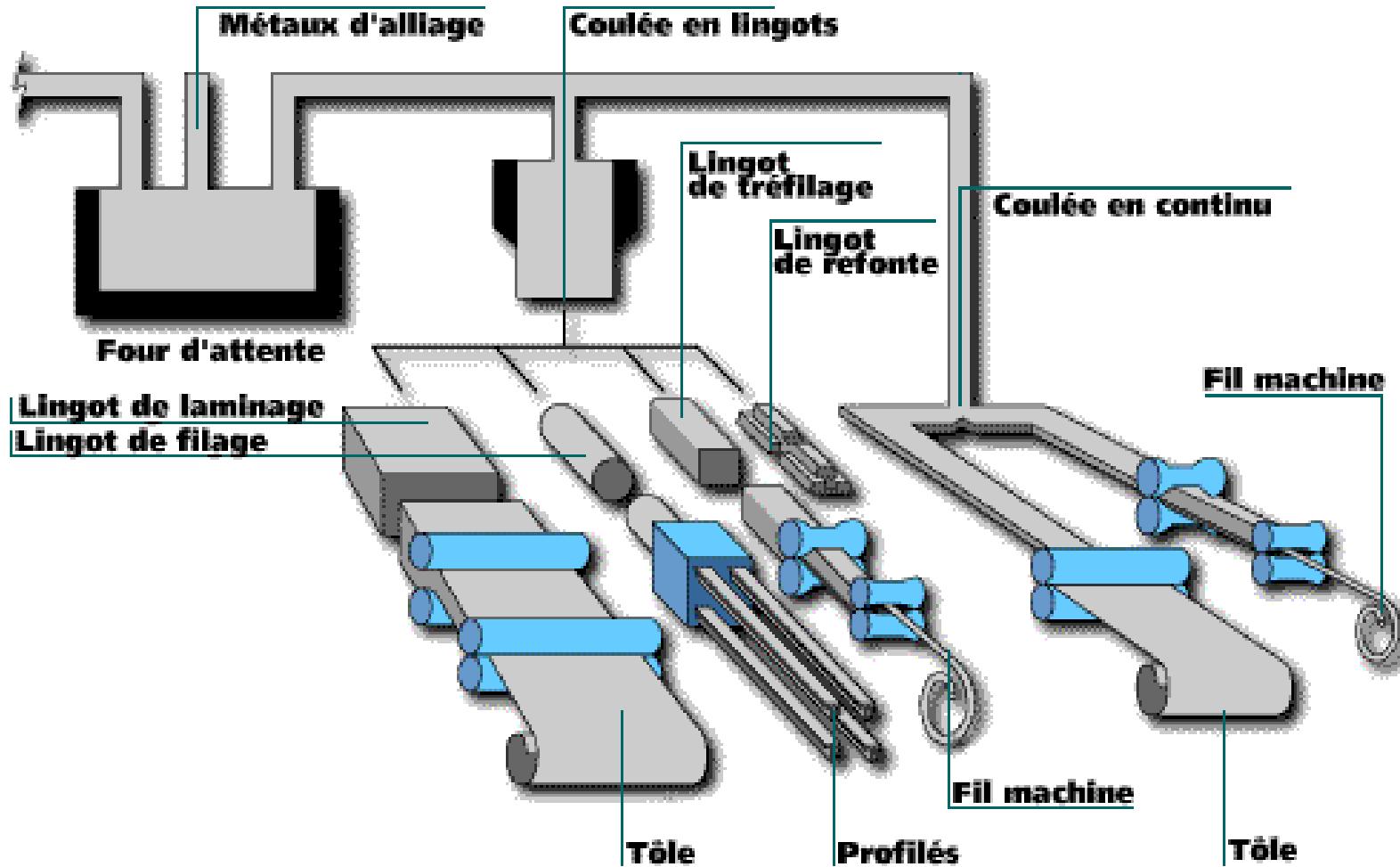
Conclure sur le caractère continu ou semi-continu de la coulée pour ces trois métaux.

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