



***Le quartz – La Silice
Le dioxyde de Silicium***



Un matériau très banal dans la nature, mais ...

... aux débouchés innombrables, souvent non soupçonnés !



USINE DES CLAVAux



FerroPem

Groupe ■ FerroAtlántica

PRODUCTEUR DE SILICIUM

Le Silicium un matériau vraiment très polyvalent

USINE DES CLAVAux



alliages légers

chimie des
silicones

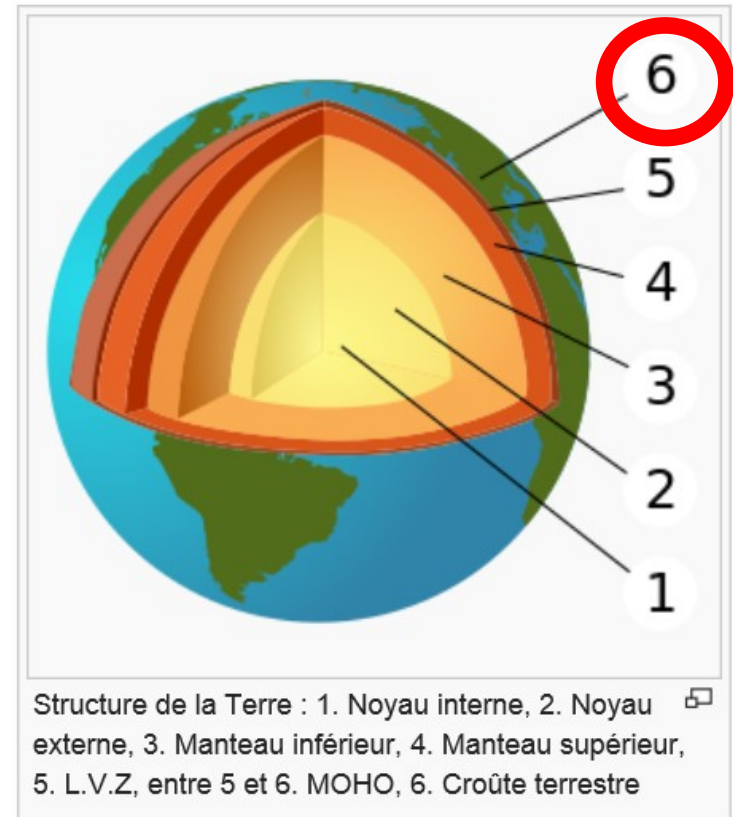
énergie solaire

Le Silicium : où le trouve-t-on ?

La Silice (SiO_2) : 70% de la croûte terrestre
 → Le Silicium = **2^{ème} élément le plus commun** à la surface de notre terre, juste derrière l'oxygène.

composition chimique moyenne de la croûte terrestre selon Clarke [réf. nécessaire]

Oxyde	Pourcentage (% pds)
SiO_2	59,71
Al_2O_3	15,41
CaO	4,90
MgO	4,36
Na_2O	3,55
FeO	3,52
K_2O	2,80
Fe_2O_3	2,63
H_2O	1,52
TiO_2	0,60
P_2O_5	0,22
total =	99,22



Epaisseur moyenne de la croûte terrestre = 30 km → seule partie accessible à l'homme

Le Silicium est partout autour de nous. Il y en a presque dans tout ce que l'on touche !

Les Galets :



la Silice représente la partie dure des roches. C'est ce qui reste après une forte érosion (glaciers du quaternaire). « Cueillette » des galets dans les contreforts ouest du massif central.

La terre est le plus souvent louée. Les galets de Silice sont triés mécaniquement. La terre est replantée et rendue sans « cailloux »



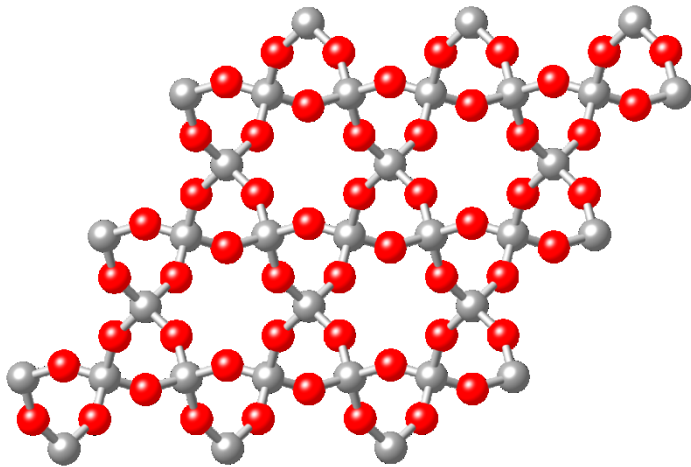
La Silice filonienne :

Des veines de Silice pure existent sur toute la surface de la terre. Extraction minière classique



Gisements de Silice dans le Nord-Ouest de l'Espagne.

La Silice - dioxyde de Silicium – SiO₂

2 atomes d'oxygène pour un atome de Silicium

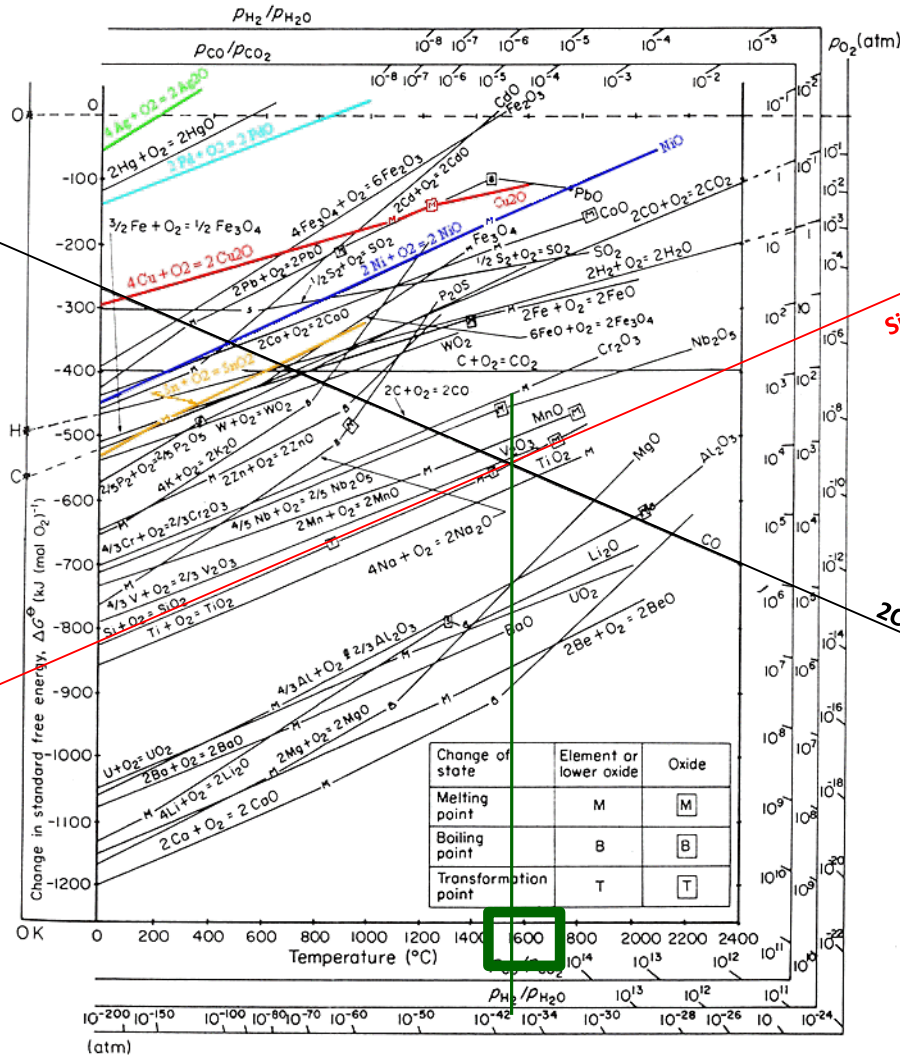


La Silice est présente dans la nature sous sa forme cristalline, bien ordonnée :

-  - Silicium
-  - Oxygène

Notre métier consiste à « libérer » le Silicium en le « débarrassant » de son oxygène (réduction). Ce n'est possible qu'à une température supérieure à 2000°C qui n'est accessible que grâce à l'arc électrique. C'est pour cette raison que l'électrometallurgie et l'hydroélectricité se sont développées ensemble dans les vallées alpines, autour de Grenoble.

L'usine des Clavaux, fondée en 1897, est la plus ancienne usine de production de Silicium du monde.



Courbes d'Ellingham :

en termes très imagés :

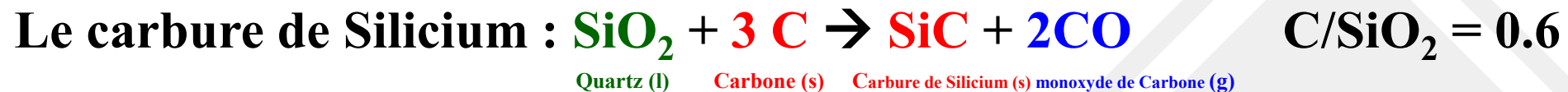
Plus la courbe est basse dans le diagramme, plus l'appétit de l'élément correspondant pour l'oxygène est important.

Au dessus de 1600°C, « l'appétit » en oxygène du carbone, devient plus important que celui du Silicium. Au-delà de cette température, le carbone peut donc théoriquement « arracher » les atomes d'oxygène de la molécule de Silice.

Réaction globale :



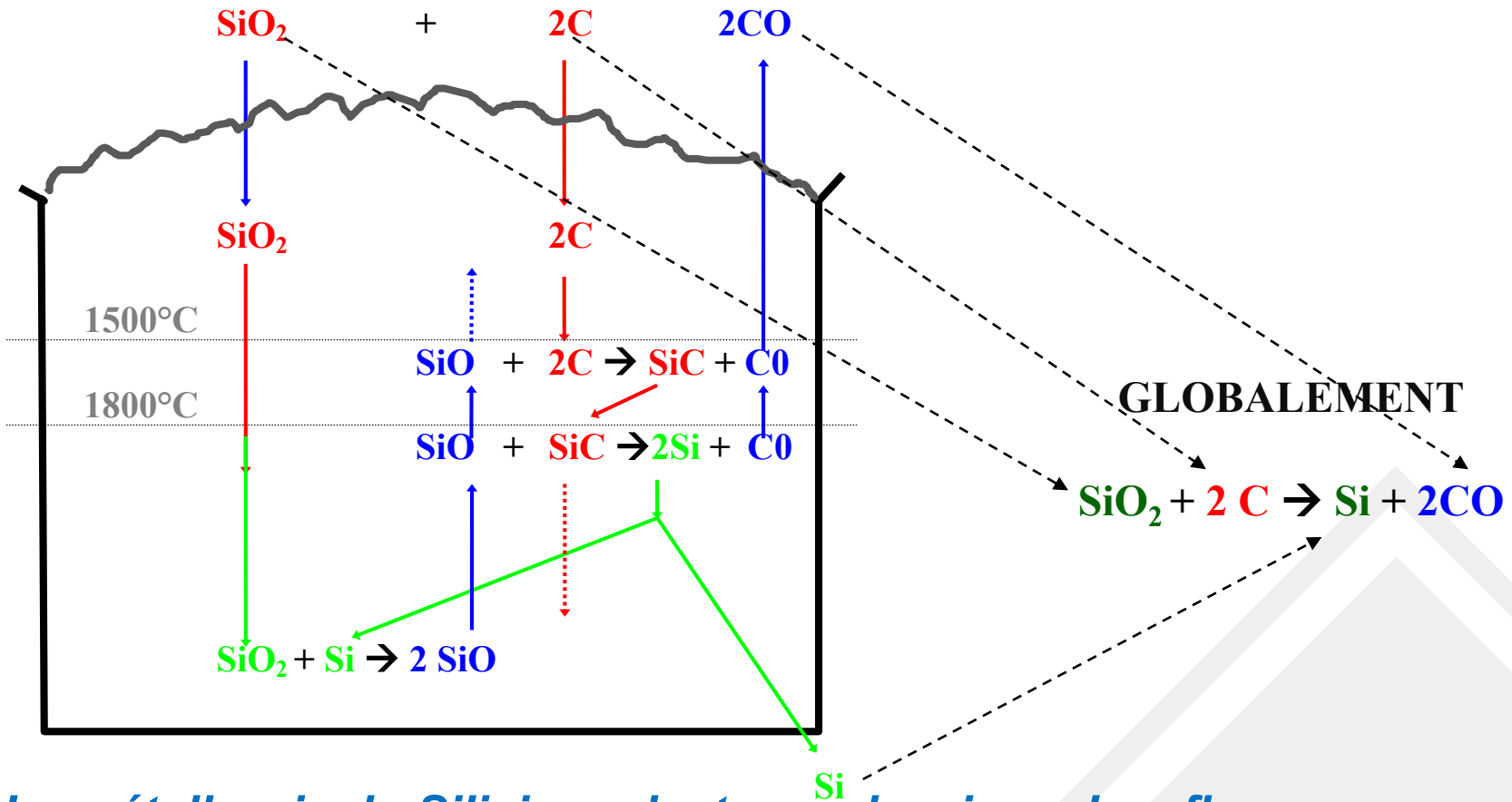
On ne produit pas que du Silicium quand on porte un mélange de Silice et de carbone à très haute température....



Un four à Silicium produit du laitier (simple fusion), de la fumée de Silice (réduction partielle), du Silicium (réduction) et du carbure de Silicium (sur-réduction).

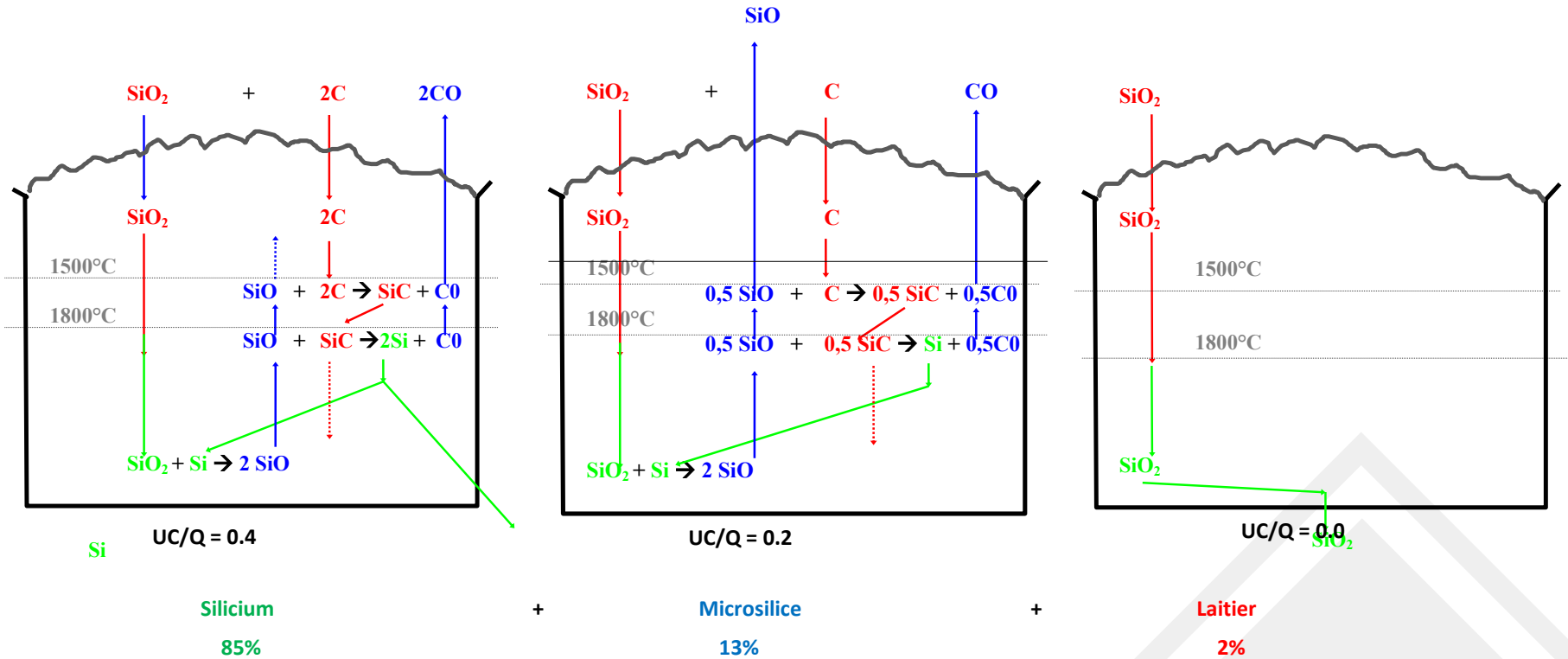
Nous devons favoriser la réaction qui produit le Silicium.

Le four parfait !



La métallurgie du Silicium n'est pas classique. Les flux gazeux y jouent un rôle déterminant car l'oxyde intermédiaire, SiO , est un gaz! Un four à Silicium doit donc plutôt être considéré comme un réacteur à contre-courant dans lequel le gaz produit en partie basse réagit avec une charge solide poreuse alimentée en continu par le haut.

La réalité un peu plus complexe



$$\text{CU/Q nécessaire} = 0.85 \times 0.4 + 0.13 \times 0.2 + 0.02 \times 0 = 0.34 + 0.026 = 0.366$$

Mélanges : 0.326

Electrodes : 0.04

0.366

Pour une marche correcte
 avec un rendement Silicium
 de 0.85.

Réglage en sous-réduction pour éviter la formation de carbure de Silicium qui bloquerait le creuset

Le four à Silicium bien réglé ...

RF = Rdt fumée = 12%



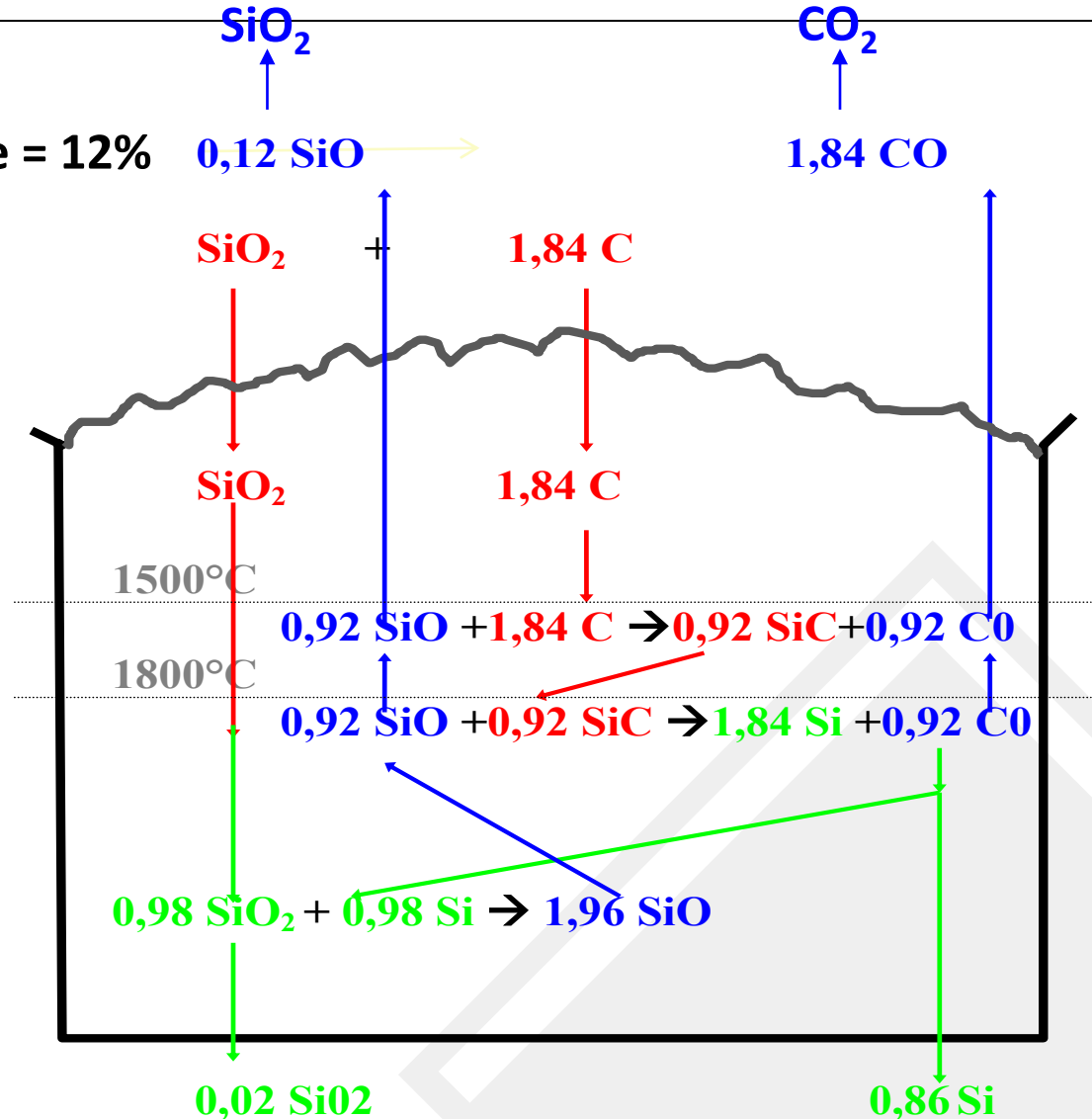
RSi + RL + RF = 100%

A chaque niveau

+0.86 x reaction 2C

+ 0.12x reaction 1C

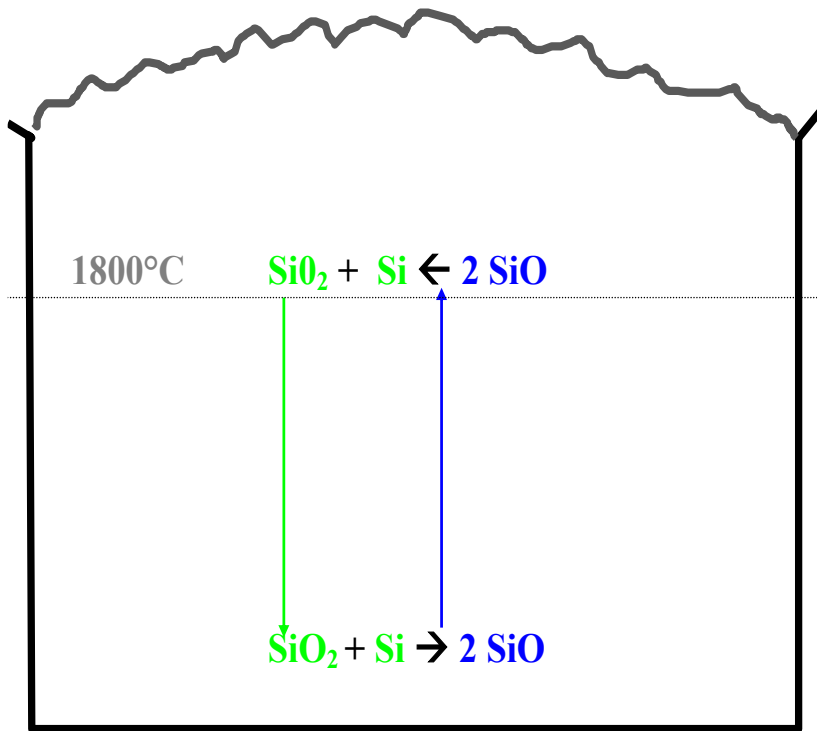
+0.02 x reaction 0C



RL = Rendement laitier = 2%

RSi = Rdt Silicium = 86%

Nécessité de “condensation”

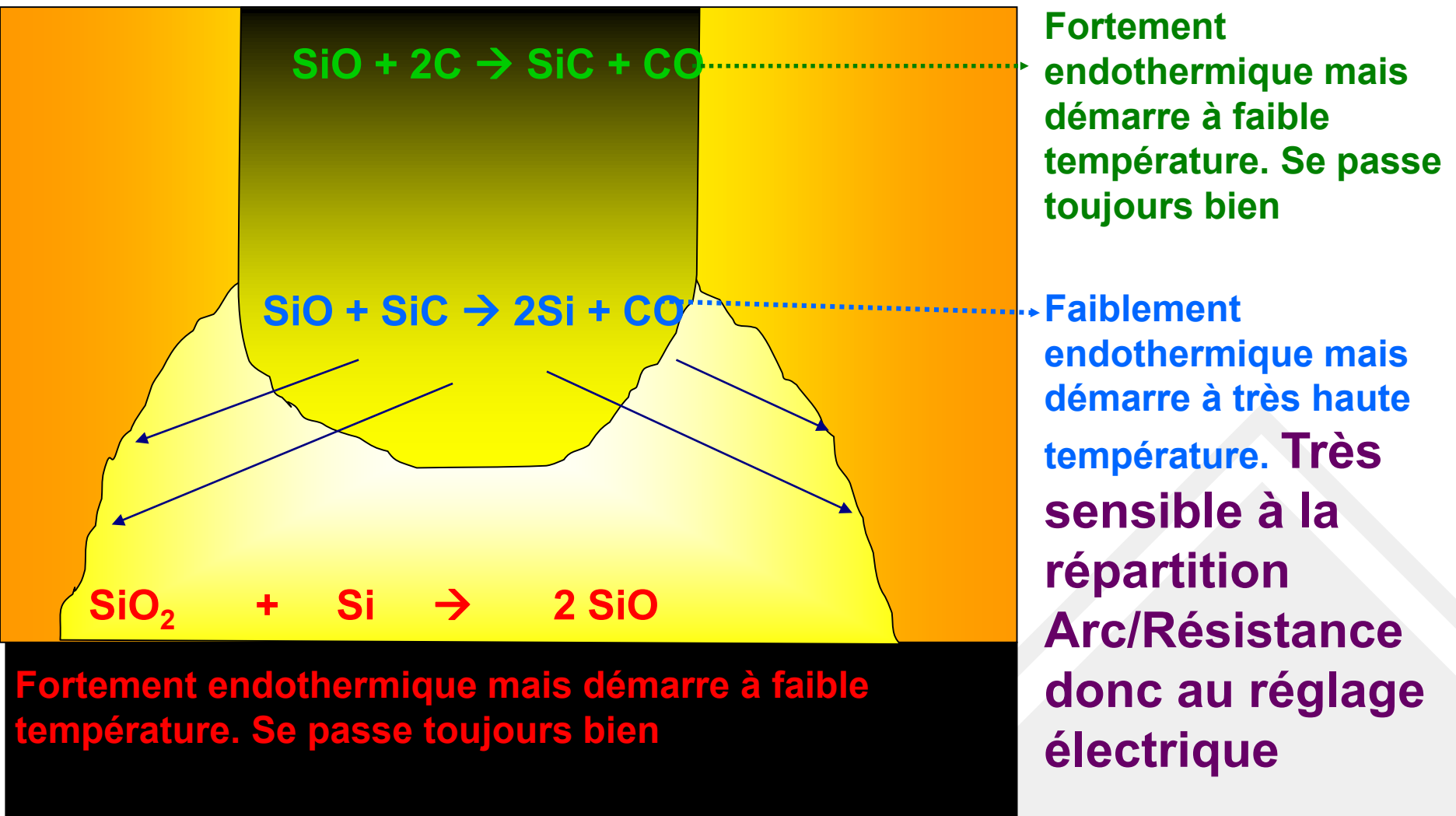


La production de Silicium par carbothermie a longtemps été réputée impossible industriellement en raison de la faiblesse du taux théorique de conversion de la Silice en Silicium.

Pour que la production de Silicium par carbothermie soit possible industriellement, il a fallu avoir recours à un artifice : la “condensation”

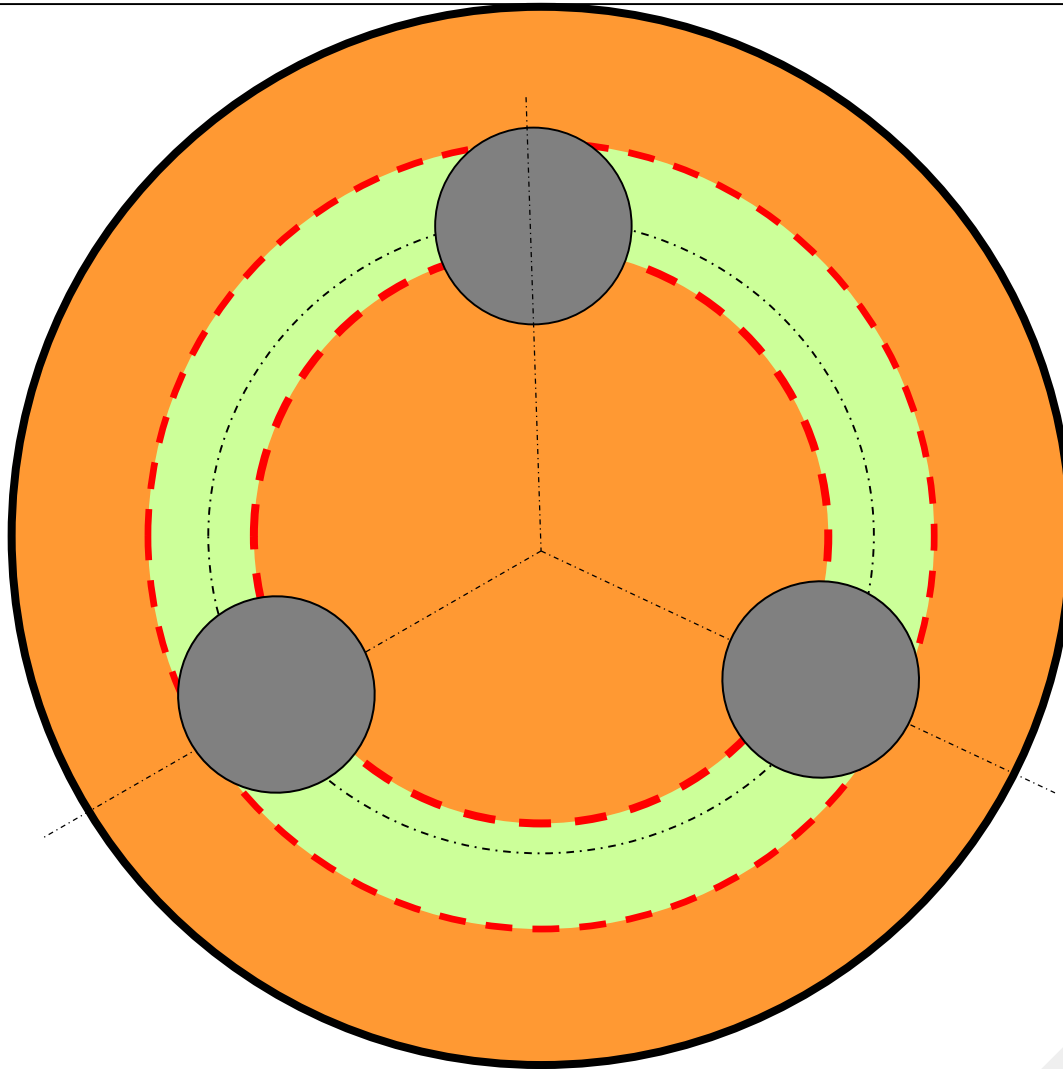
Pour la production du Silicium, il faut utiliser des réducteurs bruts (crus) dont la déshydratation et la cokéfaction endothermiques provoquent un refroidissement de la surface du creuset. Ce refroidissement favorise la “condensation” du gaz SiO qui n’a pas eu le temps de réagir. On donne ainsi plusieurs chances réagir à chaque molécule de SiO. On monte ainsi le “rendement Silicium” à plus de 85%. La production de Silicium devient possible!

4.1 - L'importance du positionnement vertical de l'électrode



Si le réglage électrique est mauvais, on produit SiO et SiC en excès !

La position horizontale des électrodes



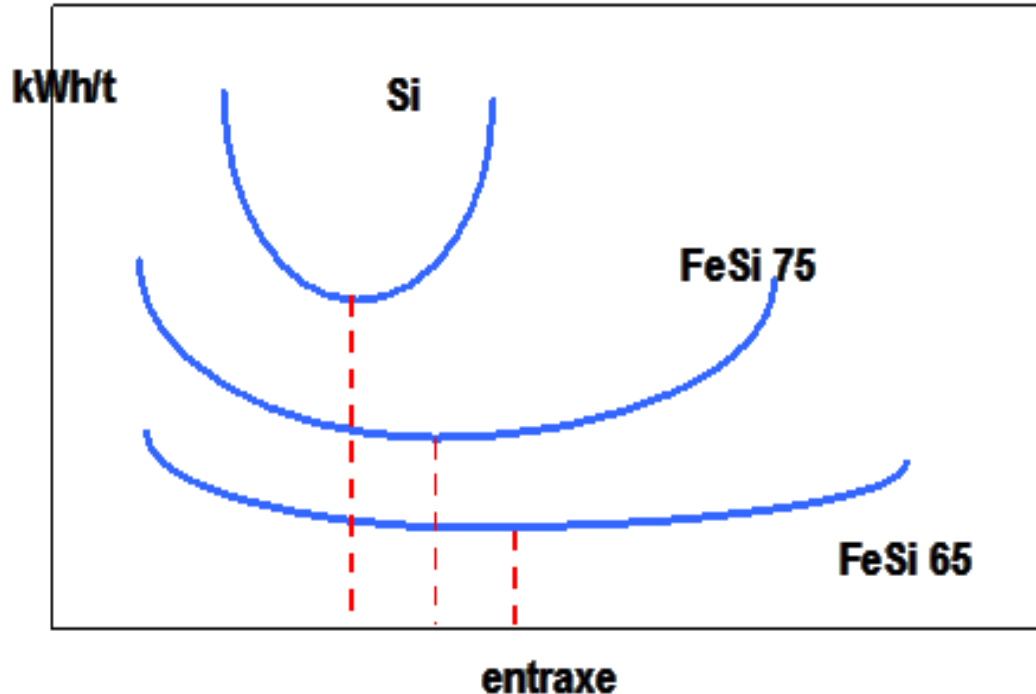
- ❑ Les cercles critiques intérieurs et extérieurs sont d'autant plus proches que :
 - la densité de puissance est élevée
 - la profondeur du creuset est élevée
 - que la résistance de consigne est forte
 - Que la résistance de charge est faible

- ❑ L'augmentation de puissance a rendu le bon positionnement des électrodes plus délicat en rapprochant les cercles critiques

Quand les cercles critiques se confondent le positionnement des électrodes devient impossible. On ne peut plus tenir les pointes d'électrodes au bon endroit.

Réglage électrique

Positionnement horizontal des électrodes



La distance entre électrodes qui donne les meilleurs kWh/T dépend du titre en Silicium de l'alliage produit.

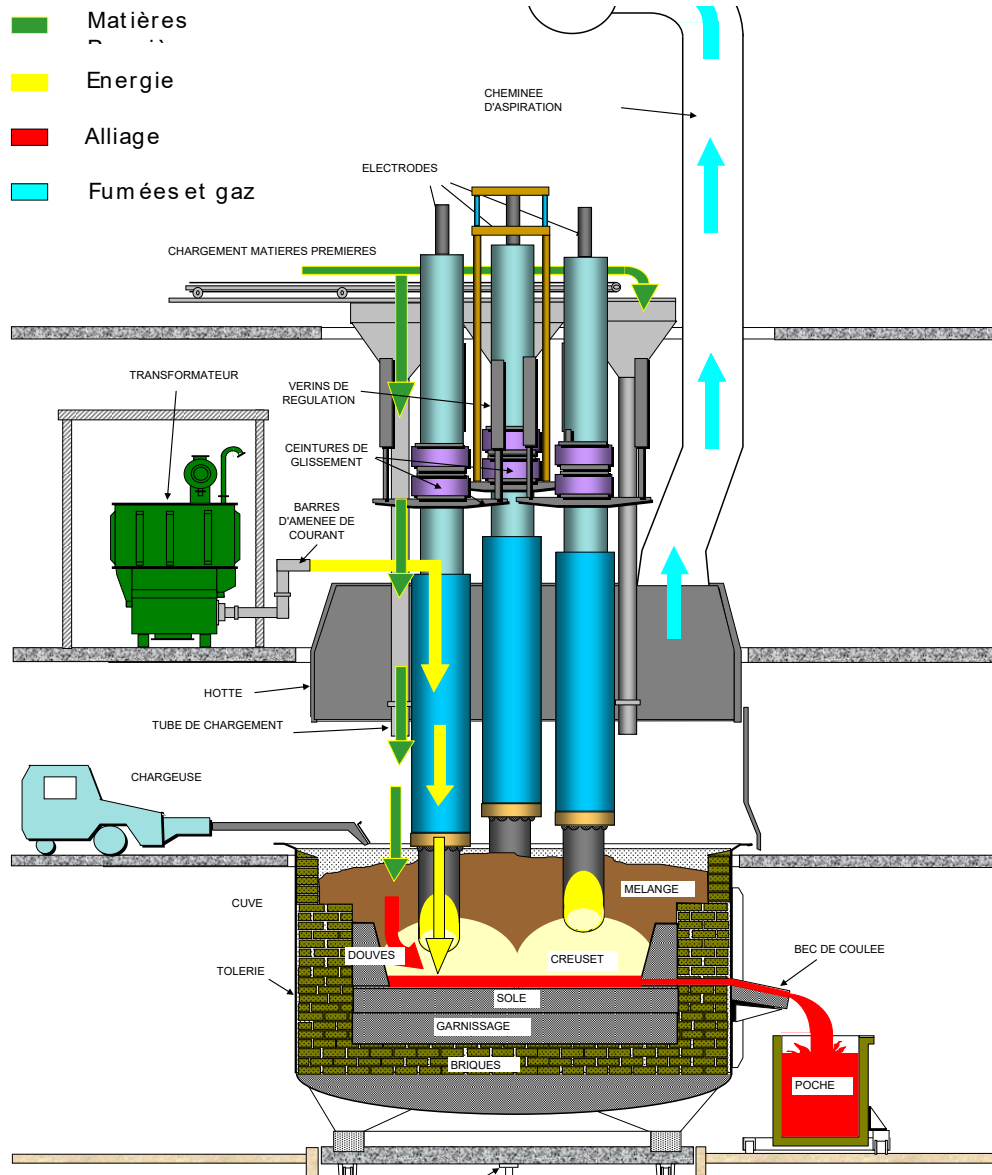
Plus le titre en Silicium est élevé, plus la distance inter-électrodes est faible.

Le graphique montre aussi que plus le titre en Silicium est élevé, plus le réglage doit être précis

Pour la production de Silicium, la distance inter-électrodes est vraiment un paramètre clé du procédé. Le réglage doit être d'autant plus précis que la densité de puissance dans le creuset est plus élevée.

Un écart de quelques cm peut changer considérablement le comportement métallurgique d'un four!!! Certains fours ont quelquefois été remis sur leurs rails en modifiant l'entraxe de seulement 3 cm.

Le four à Silicium



- Entre 20 et 30 mètres de haut.
- 10 mètres de diamètre
- Plusieurs centaines de tonnes.
- Consommation électrique équivalente à celle d'une ville de 50 000 habitants
- 300 tonnes de matières premières par jour.
- Marche continue, 24h/24h et 7j/7j.
- Plusieurs semaines de mise en régime thermique



La charge du four



La coulée du four

3 fours à Silicium

Autour des chargeurs, des couleuses et des recouleurs... 150 personnes travaillent pour maintenir la performance des fours à son meilleur niveau.

- Encadrement,
- Maintenance
- Fumée de Silice
- Conditionnement...

L'usine des Clavaux : Les matières premières



Le **quartz** (la Silice) : 120 000T par an. Il apporte le Silicium (principalement France et Espagne)



La houille : 60 000T par an. C'est le réducteur qui amène majoritairement le carbone (principalement Amérique du Sud / pureté)



Le bois déchiqueté : 80 000T par an. Ce réducteur a pour principale vocation d'apporter de la porosité à la charge (principalement déchets de l'industrie du bois)

+ autres MP plus marginales : coke de pétrole, charbon de bois ...

Flux logistique important : près de 1000 tonnes de matières premières par jour!

Produits et coproduits d'un four à Silicium

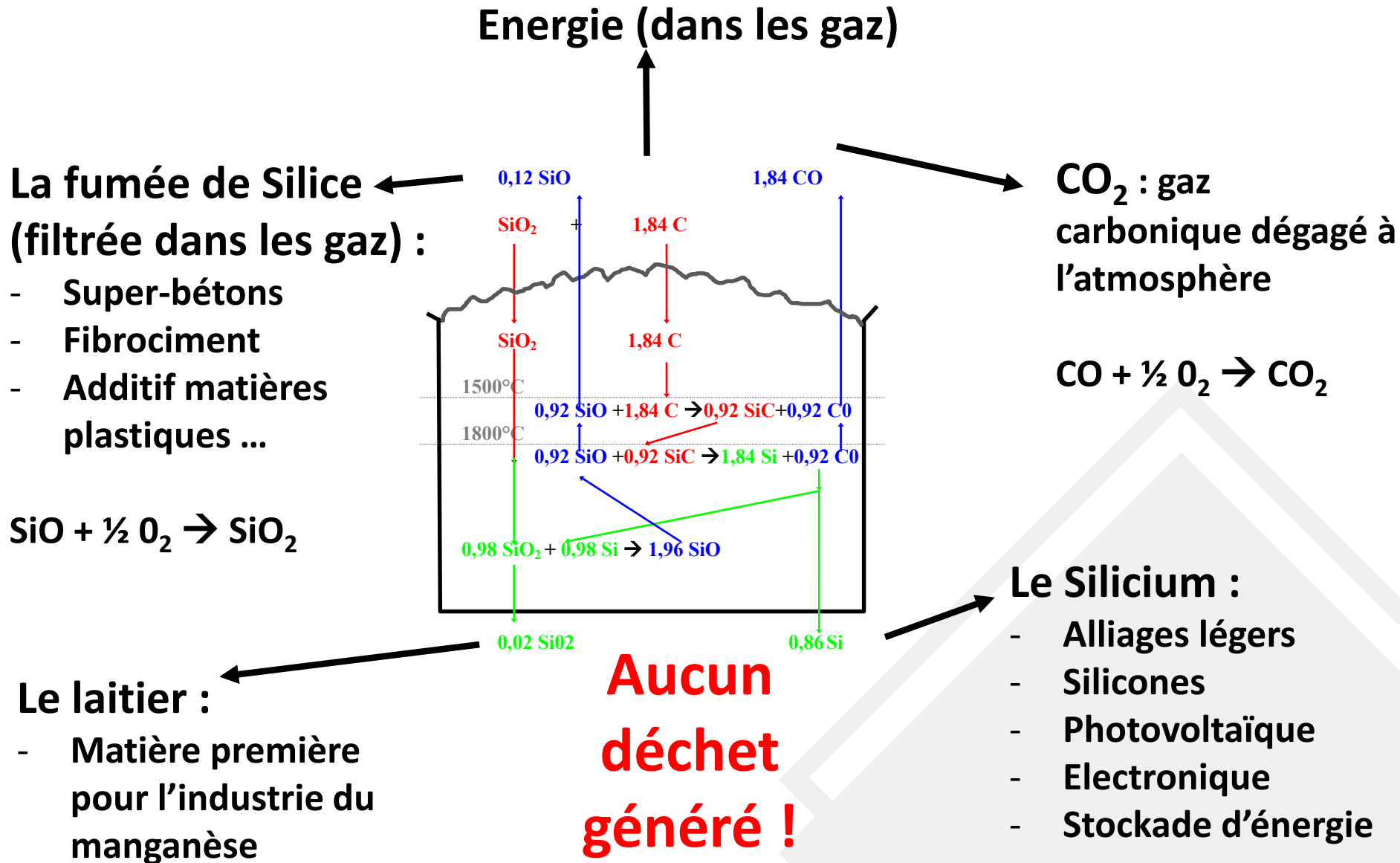
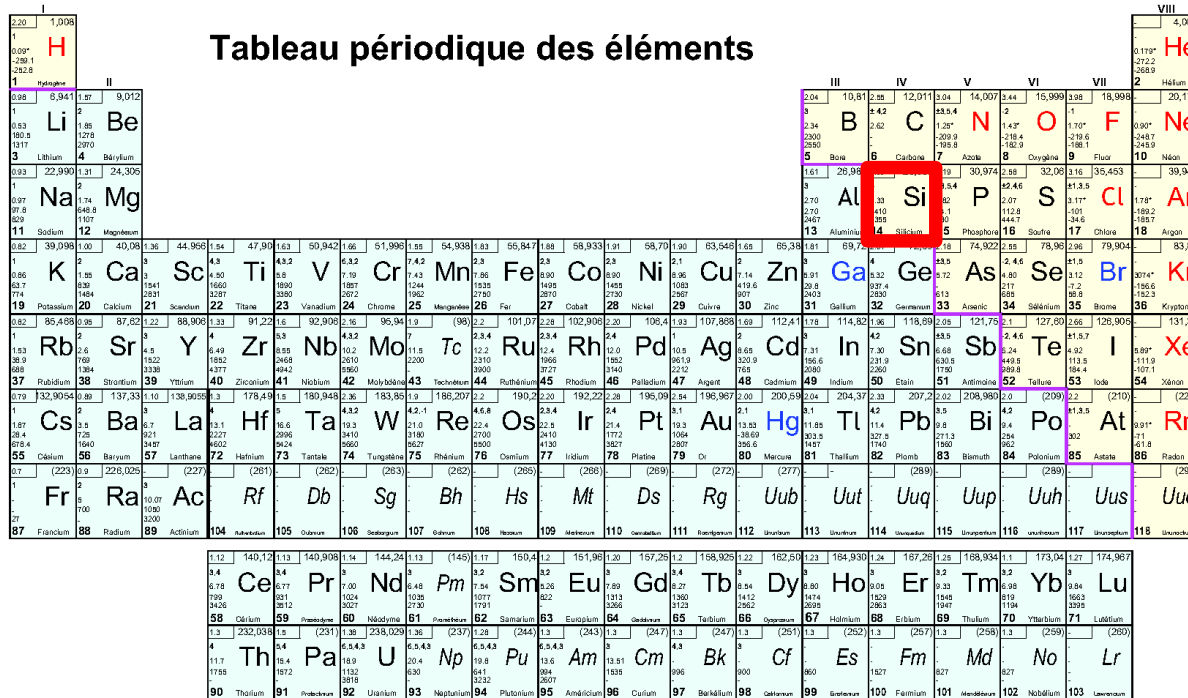


Tableau périodique des éléments



The image shows a periodic table of elements. The element Silicon (Si) is highlighted with a red box. It is located in the 3rd period, 14th group. The element Aluminum (Al) is also highlighted with a red box, located in the 3rd period, 13th group. The table includes element symbols, atomic numbers, and names in French.

- Alliages légers

- Silicones

- Electronique

- Photovoltaïque

Le Silicium : sa structure électronique en font un élément aux multiples facettes :

- Très voisin de l'aluminium, il lui est souvent mêlé pour en améliorer certaines caractéristiques mécaniques → Alliages légers
- De même structure extérieure que le carbone (chimie organique), il permet une chimie presque aussi riche (chimie des silicones)
- C'est un semi-conducteur → électronique, photovoltaïque

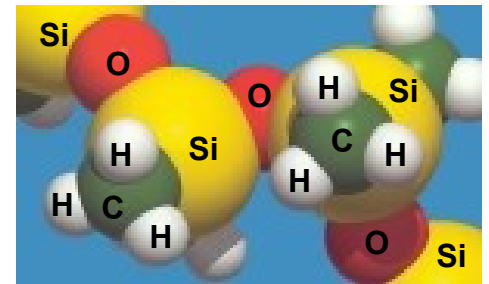
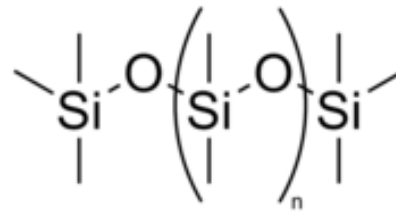
➤ Marché métallurgique

- ◆ Pièces moulées en aluminium
- ◆ Automobile, aéronautique...



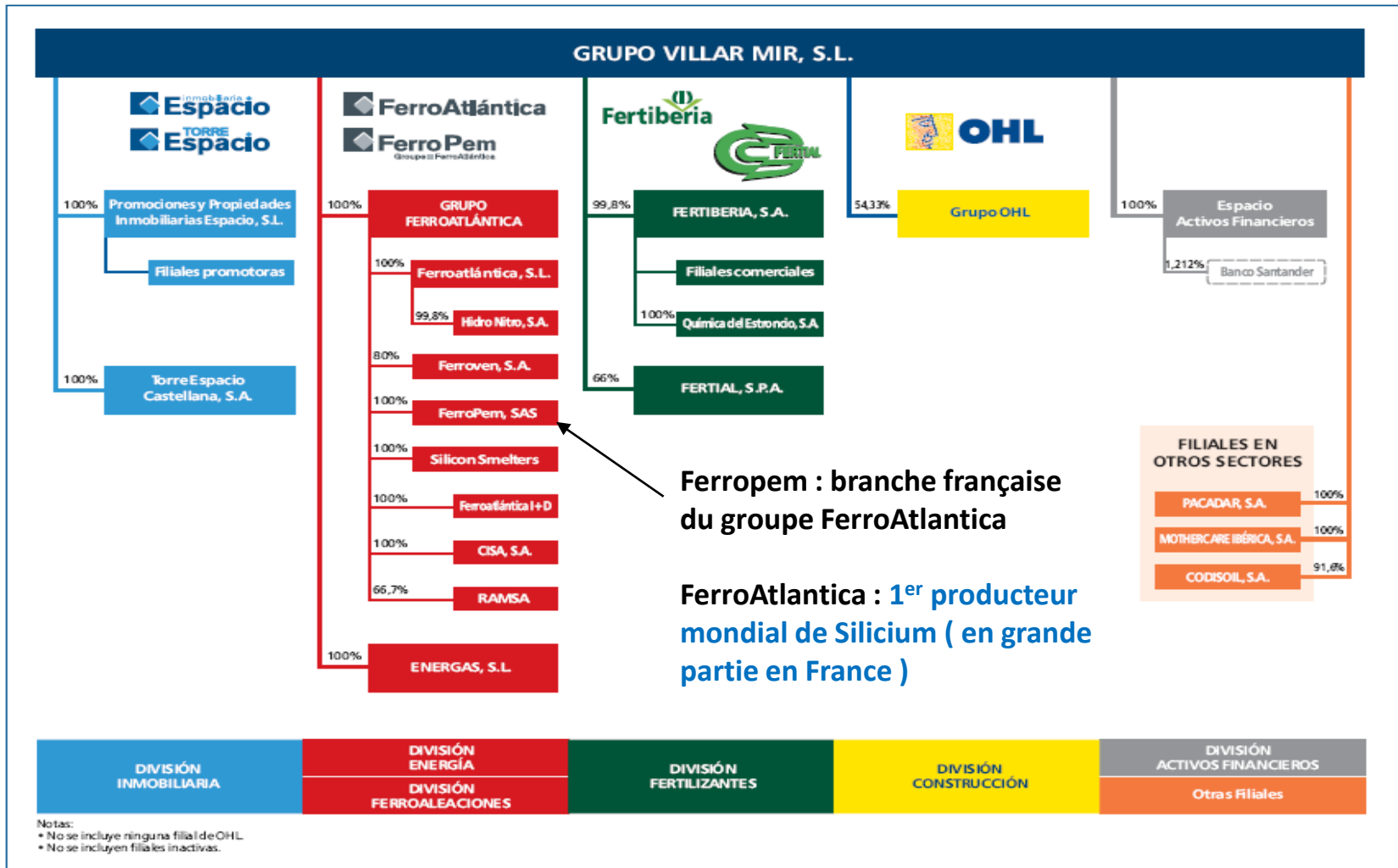
➤ Marché chimique

- ◆ Silicium: M.P. pour production de silicone
- ◆ Marché lié à la construction



- Marchés Photovoltaïque et électronique
 - ◆ Purification de 99% Si à 99.9999999% Si
 - ◆ Marché du solaire (énergie renouvelable)





Ferropem : branche française du groupe FerroAtlántica

FerroAtlántica : 1^{er} producteur mondial de Silicium (en grande partie en France)

A la fin 2015, FerroAtlántica (1^{er} producteur mondial) s'est uni avec l'américain Globe (4^{ème} producteur mondial) pour donner naissance au groupe **Ferroglobe**

Le Silicium Demain ...

Production d'énergie :

- une source propre et inépuisable

Stockage de l'énergie :

- des batteries permettant de donner plus de 1000 km d'autonomie à nos voitures et de les recharger plus vite.
- De l'énergie stockée dans les murs de nos habitations

Transports : Des véhicules de plus en plus légers

Vie quotidienne : électronique, informatique, nano-technologies, étanchéité, plastiques à haute performance et bien plus encore...



Notre énergie, demain ...

Le Silicium : un rôle central

Soleil



Eolien

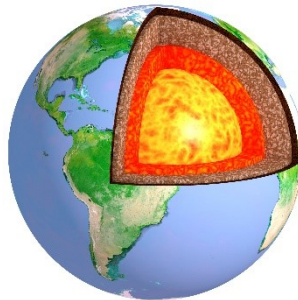


Silicium

Transformation et stockage



Biomasse



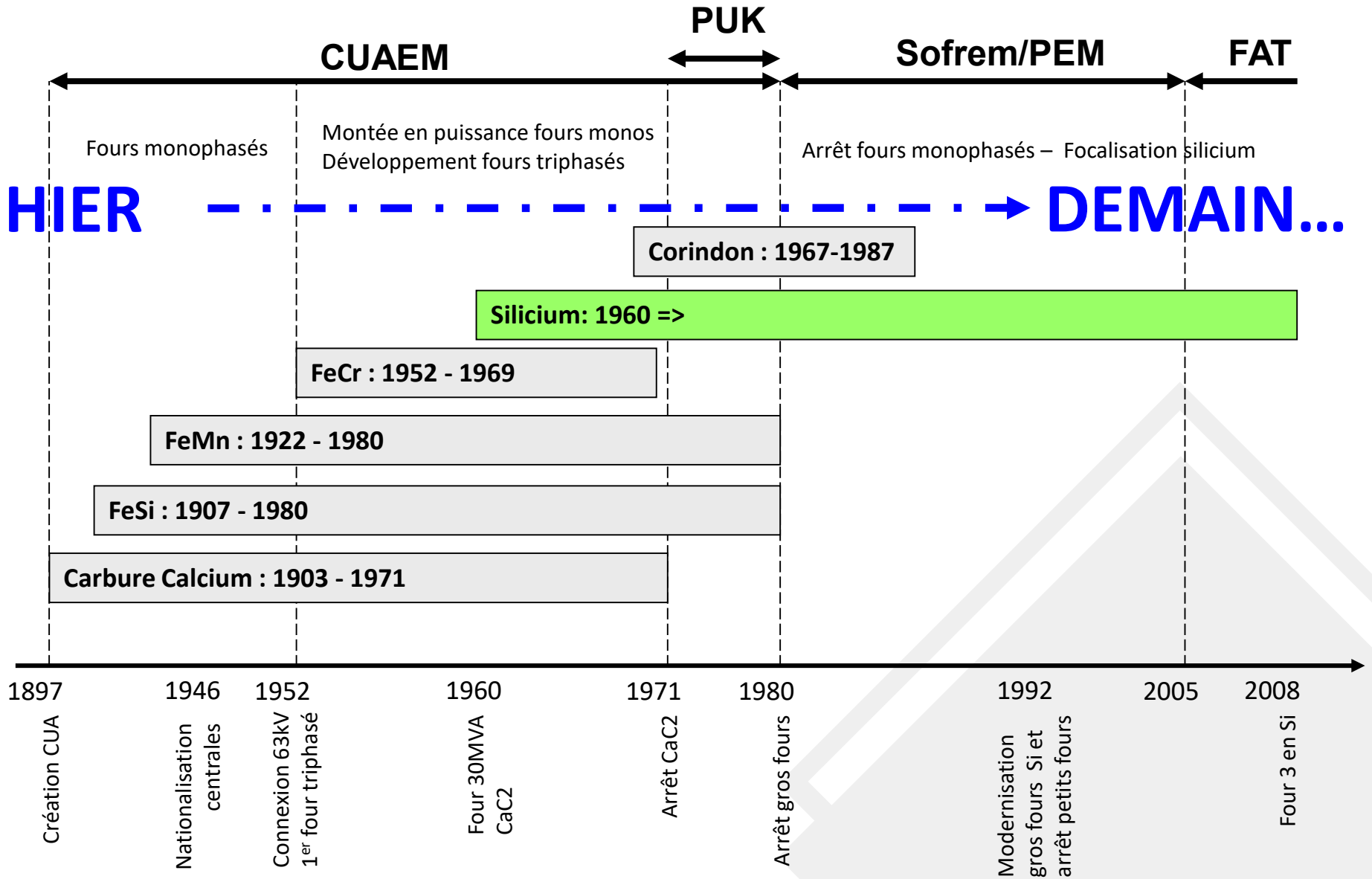
Geothermie

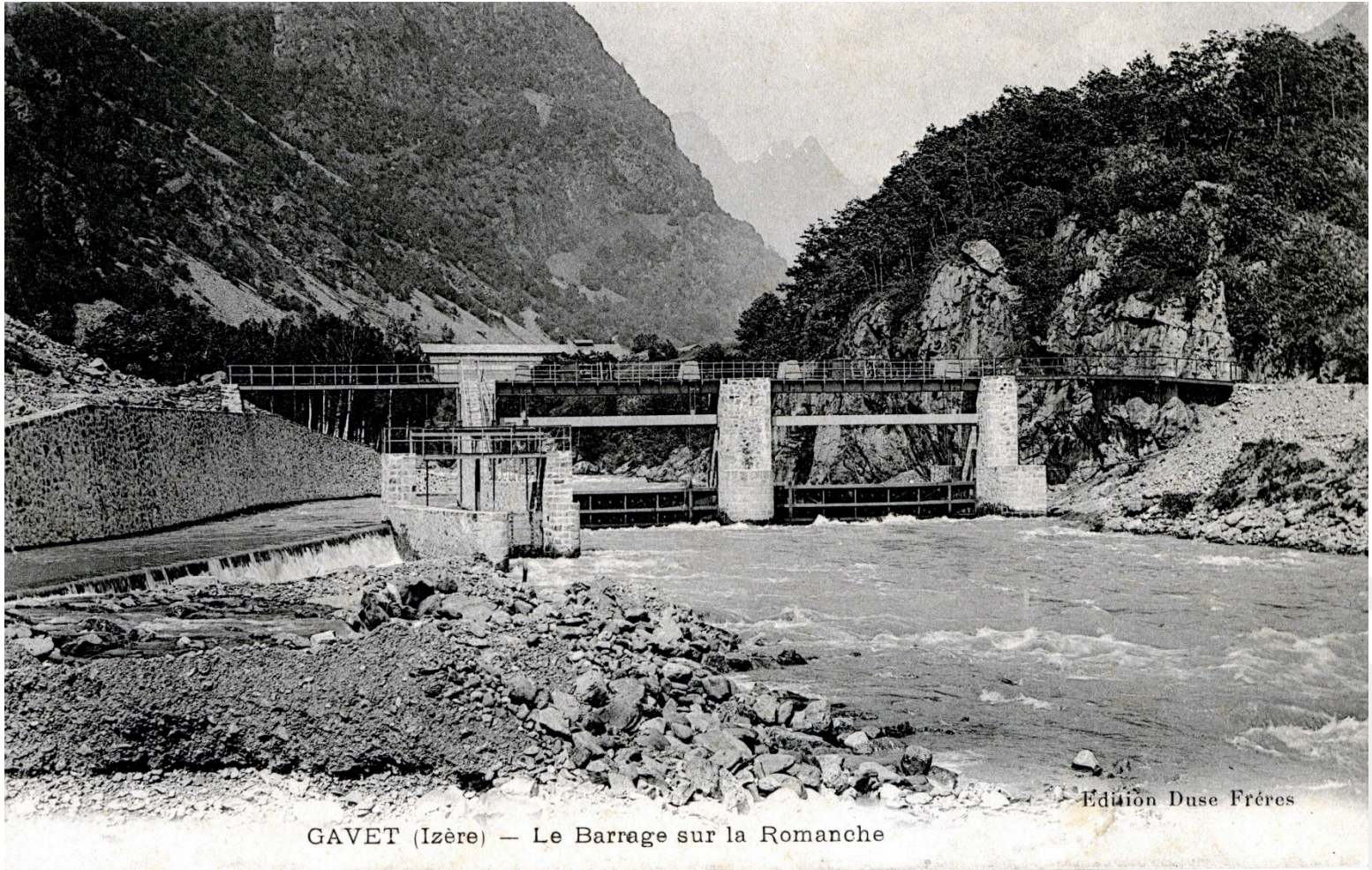


Hydraulique



Et hier ?



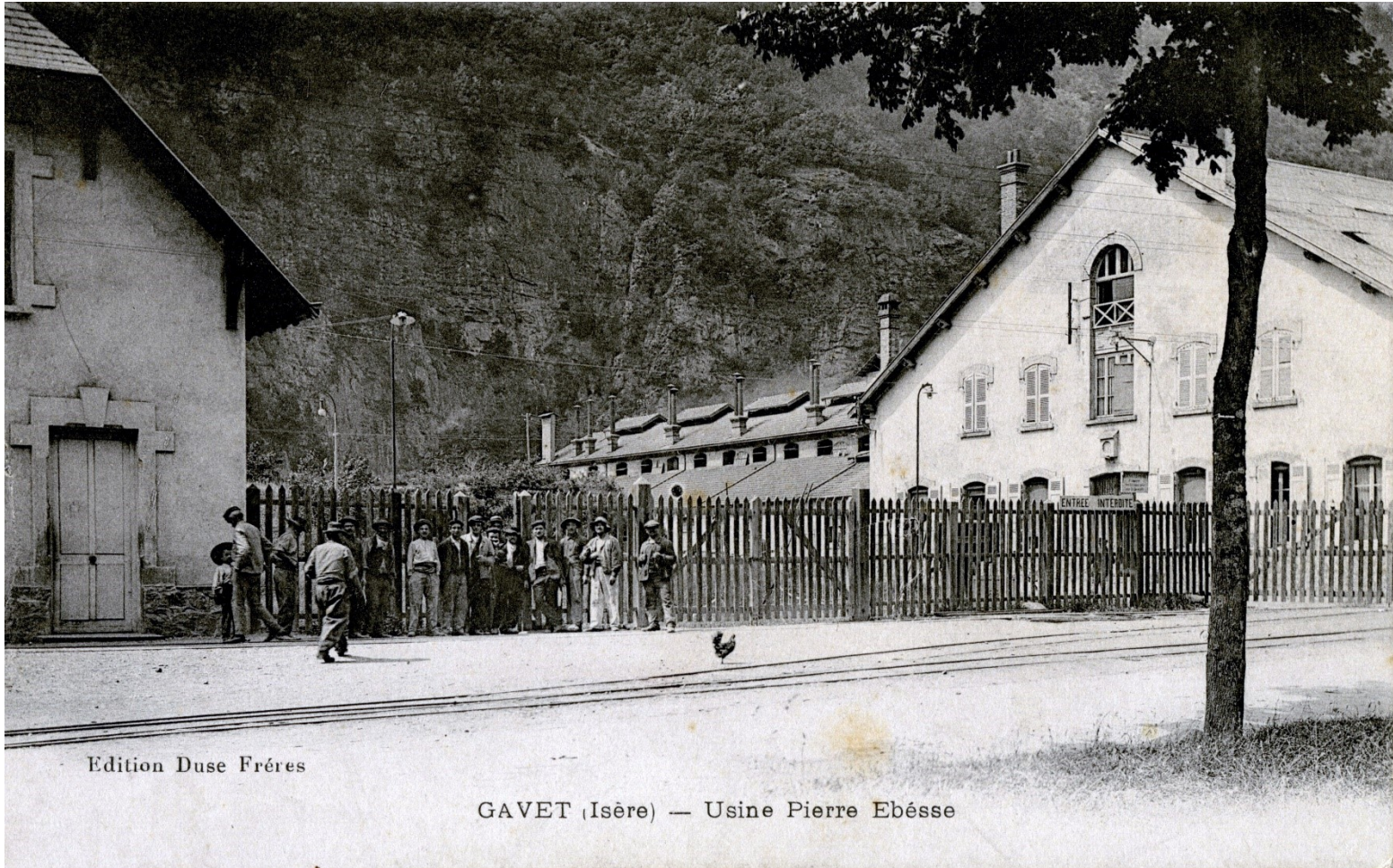


Au commencement ... Une histoire d'eau....

La puissance de la nature ...



... domestiquée par l'homme !



Le train... et surtout des hommes

➤ CUAEM

Compagnie Universelle d'Acétylène et d'ElectroMétallurgie

- ◆ 1898: création de la CUA (Compagnie Universelle Acétylène)
- ◆ 1930: production de CaC_2 , FeSi , FeMn sur 9 fours monophasés de 3MW en moyenne
- ◆ 1946: nationalisation des centrales des Roberts, des Clavaux et de Pierre-Eybesse
- ◆ 1952: Connexion au réseau 63kV. Montée des puissances des fours monophasés
- ◆ Puis la spécialisation en Silicium, matériau d'avenir... + de 70 MW en 2017

