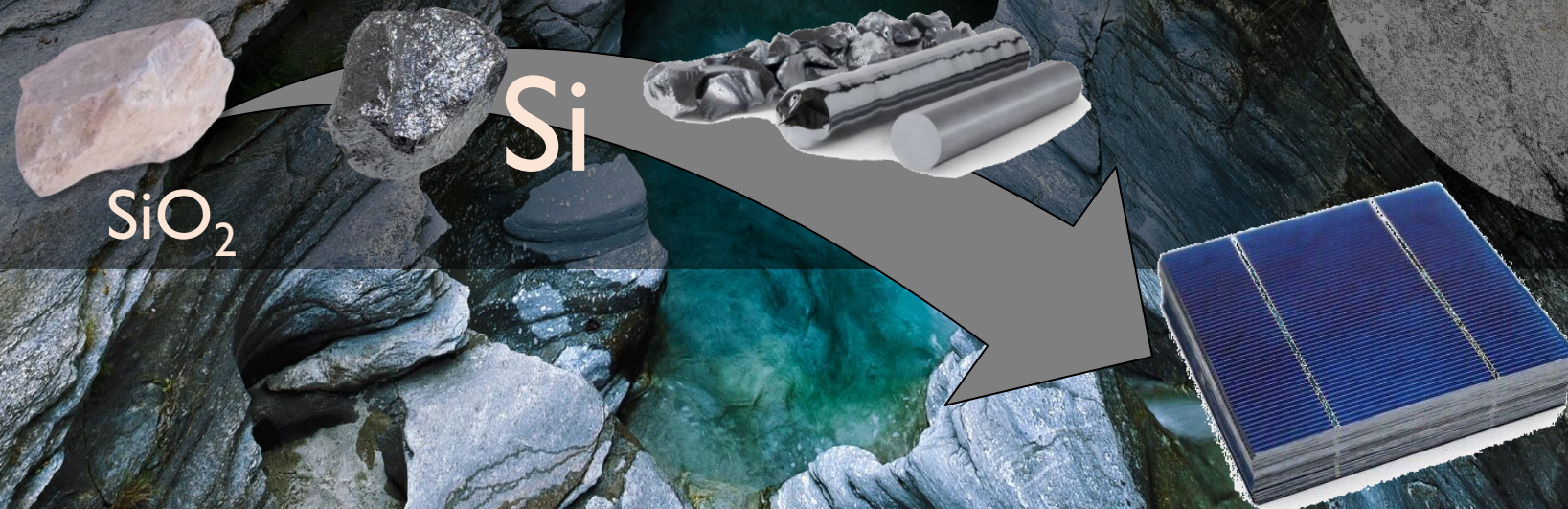


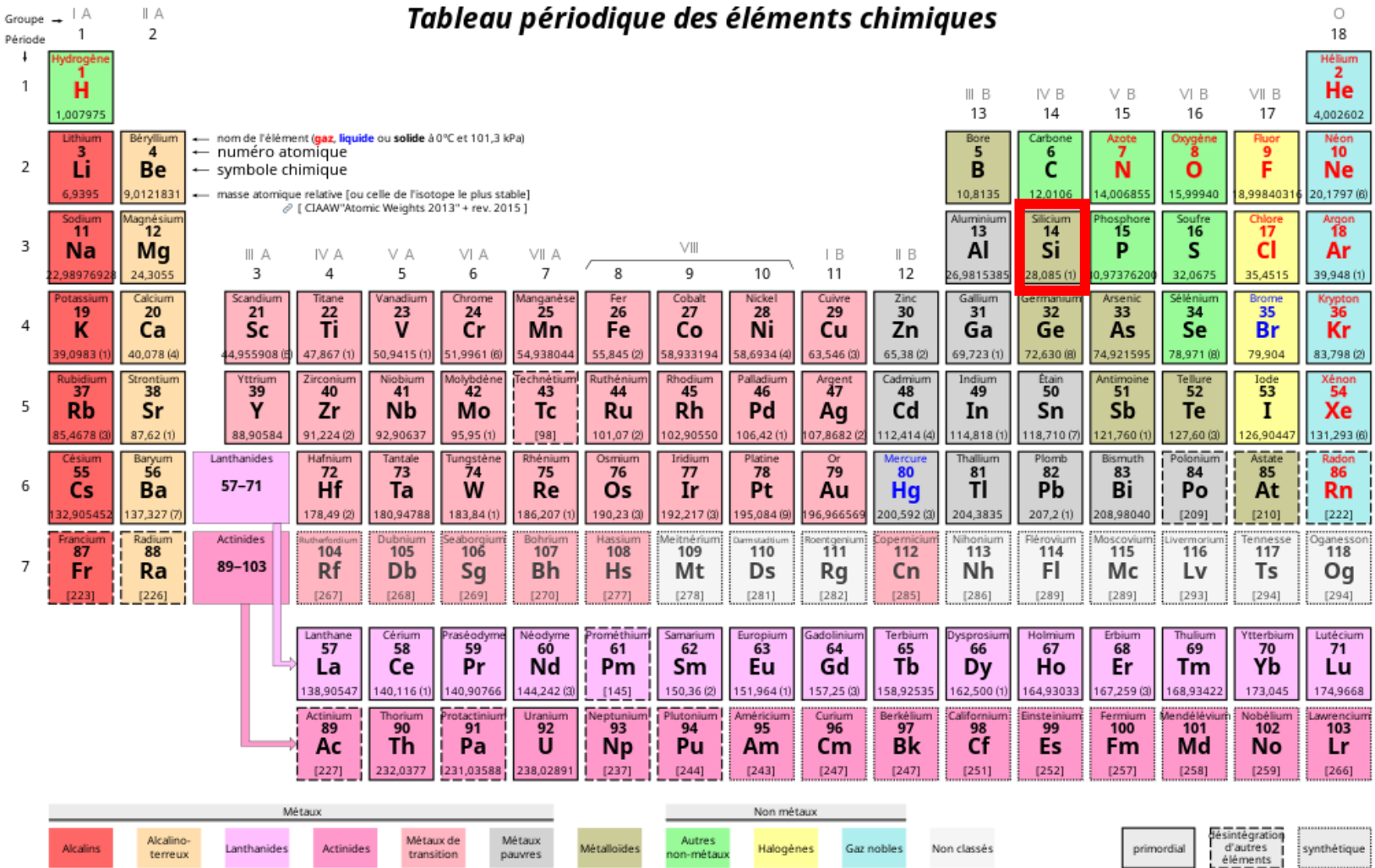
PLONGÉE DANS LE MARCHÉ DU SILICIUM METAL POUR LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Colloque Energie solaire et société, Collège de France, 21/04/2022

Antoine Boubault
BRGM
a.boubault@brgm.fr



Semi-conducteur



Part de marché des cellules au silicium

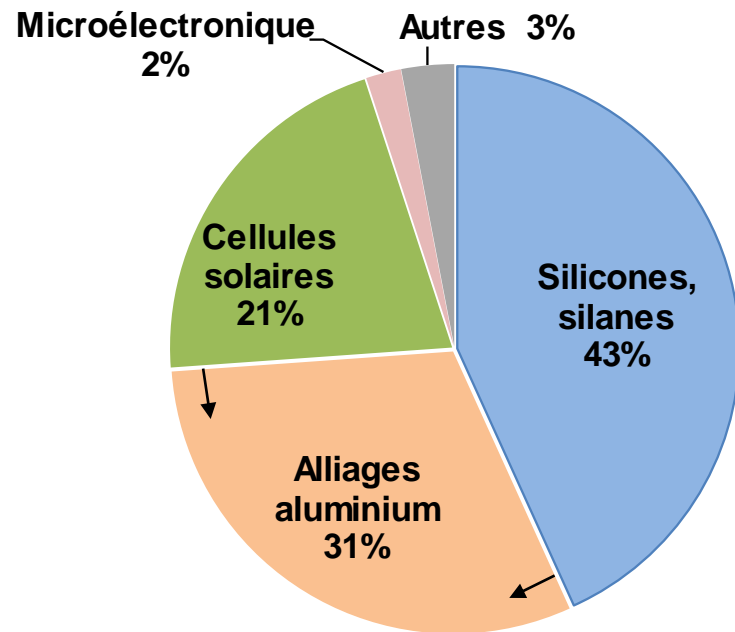


95%

source : IHS Markit, 2020

Usages et puretés

Usages du silicium métal en 2021



Consommation mondiale 2021 : 3,4 Mt

Source : BRGM



Qualité métallurgique :
pureté > 99 % (2N)



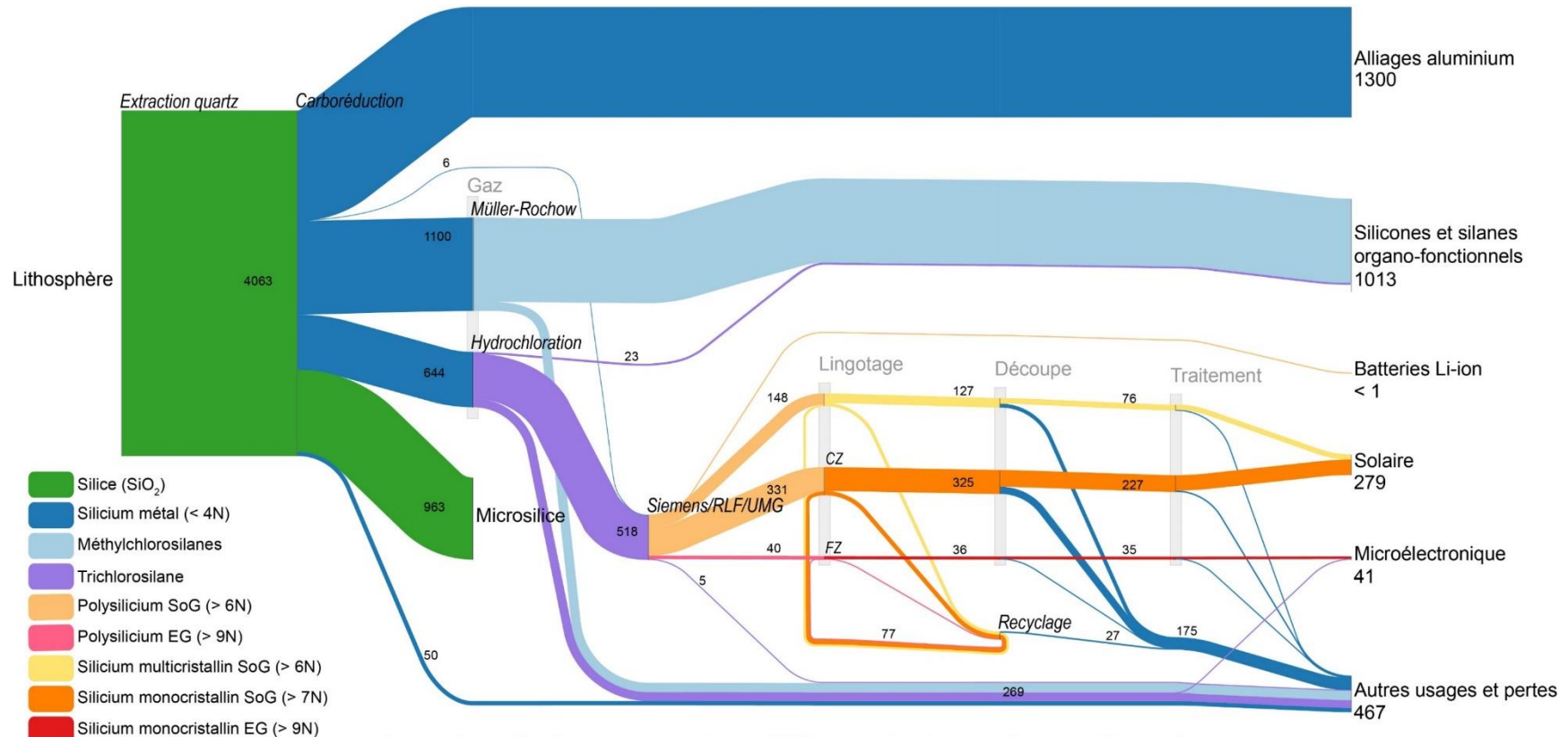
Qualité solaire :
pureté > 99,999 99 % (7N)

Qualité électronique :
pureté > 99,999 999 9% (9N)

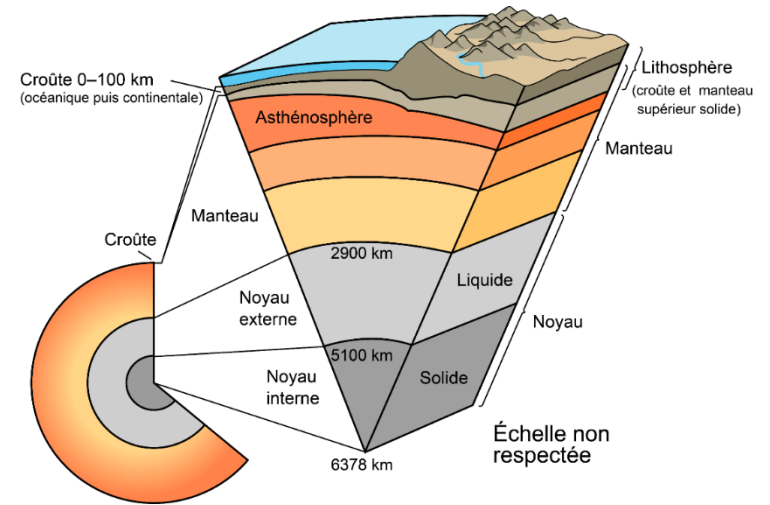
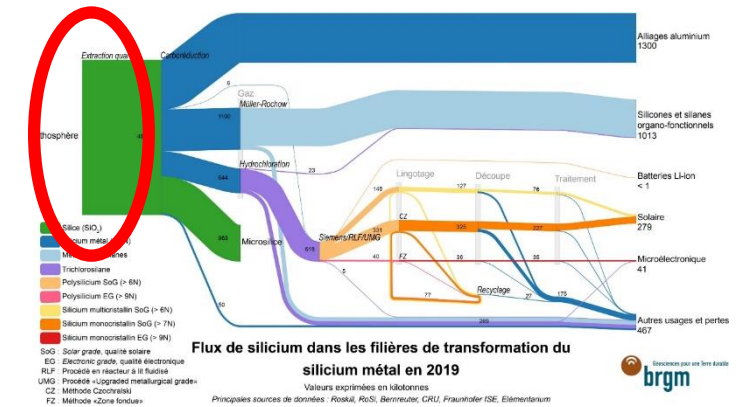
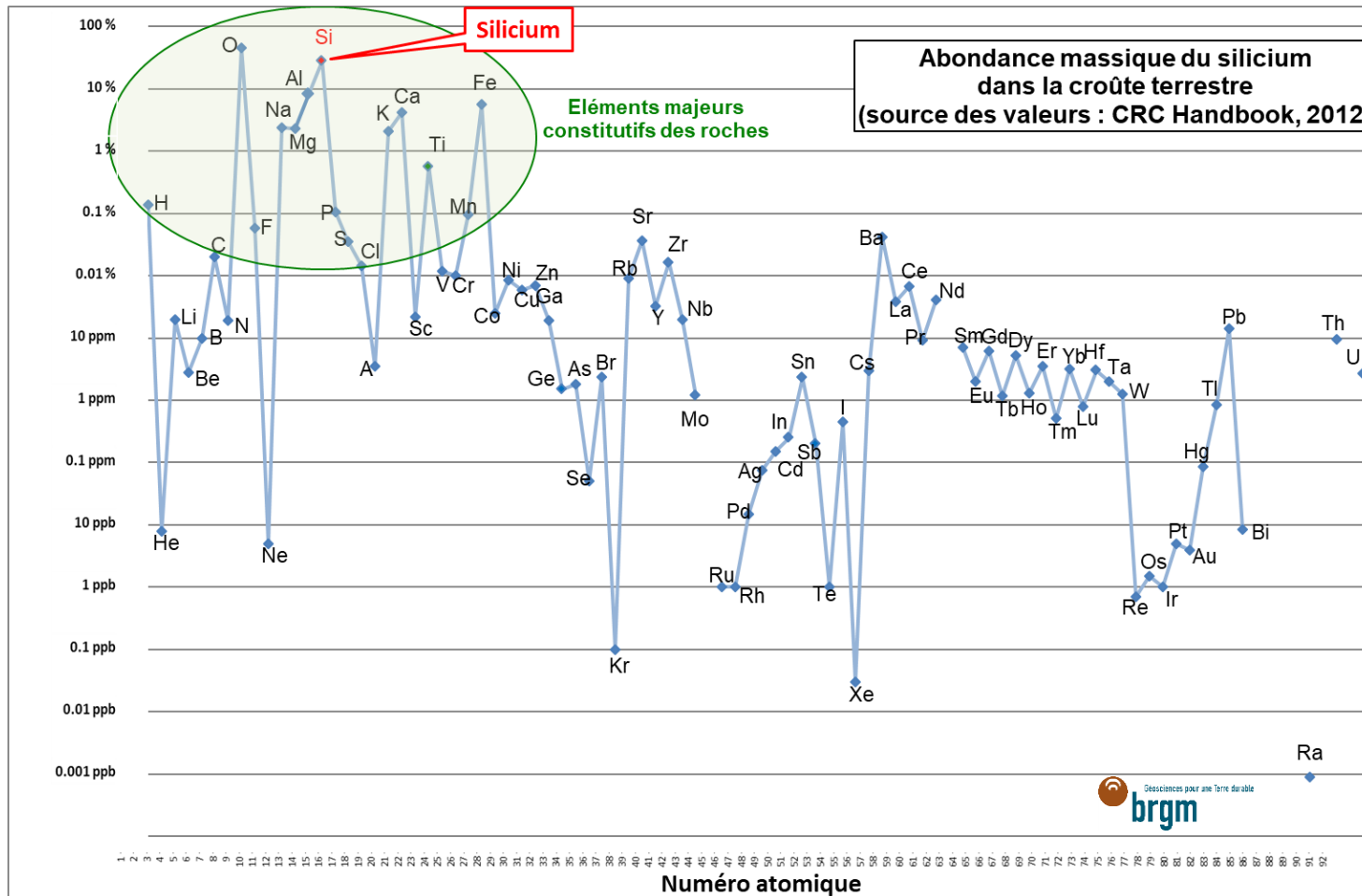


Extraction, transformation, usages

Flux de silicium



Très abondant



Des gisements spécifiques

Etat oxydé : Silice (SiO_2)

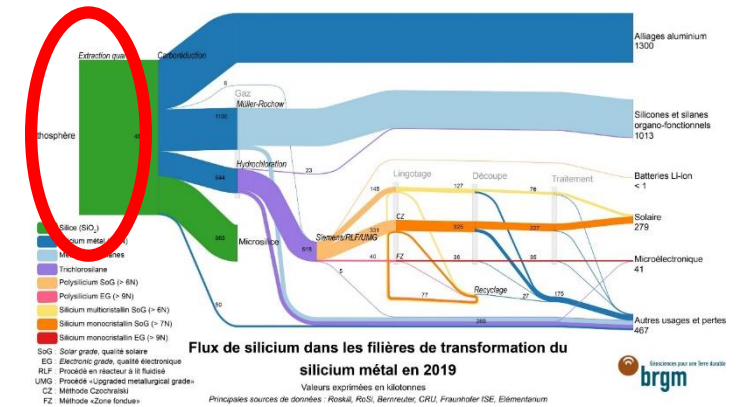
- 60% de la masse de la croûte terrestre
- Présente partout
- Matière la plus extraite au monde : 35-40 Gt par an

MAIS pour le silicium métal :

- Gisements de teneurs $> 99,5\%$ SiO_2
- Taille requise entre 20 et 100 mm (le sable n'est pas utilisé)
- Stabilité thermique requise

Ressources :

- Galets de quartz, quartzite, grès
- Production : 9 Mt en 2019
- Réserves mondiales > 60 Mt SiO_2 dont 25 Mt en Europe (Espagne, France, Pologne)



Gauche : galets de quartz ultrapur de calibre 60-120 mm
Droite : fragment de grès siliceux induré



Production du silicium métal

Handbook of Photovoltaic Science and Engineering ©2003 John Wiley & Sons Ltd
PRODUCTION OF METALLURGICAL GRADE SILICON

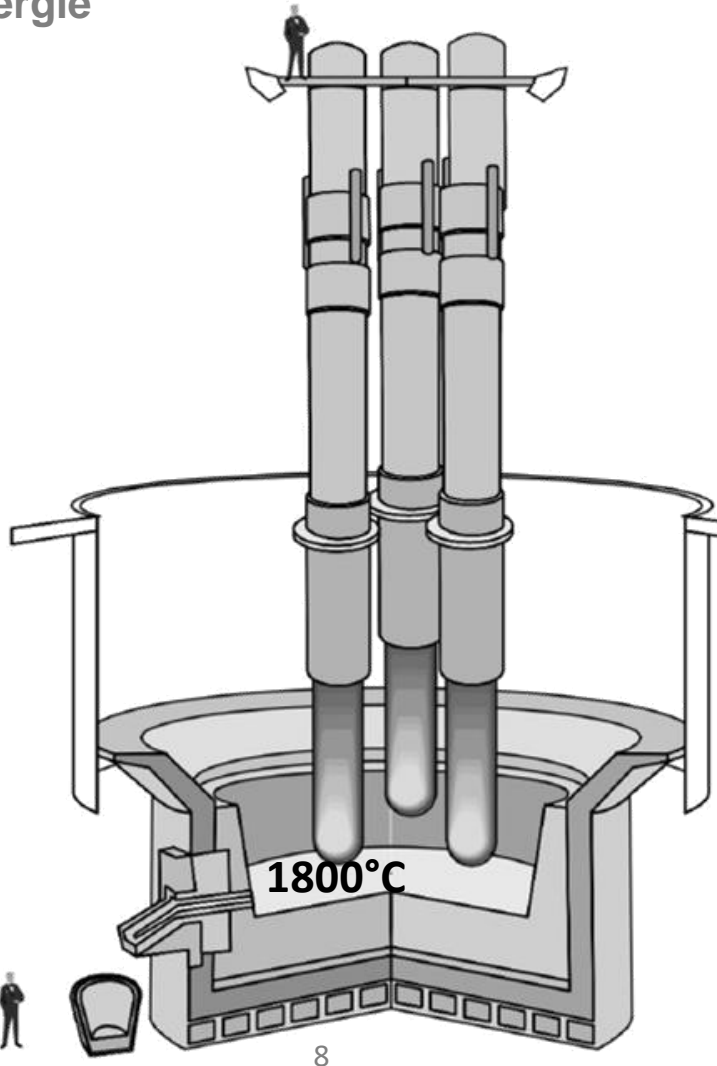
Une production intensive en matière et énergie

Transformation en silicium métal (1 t)

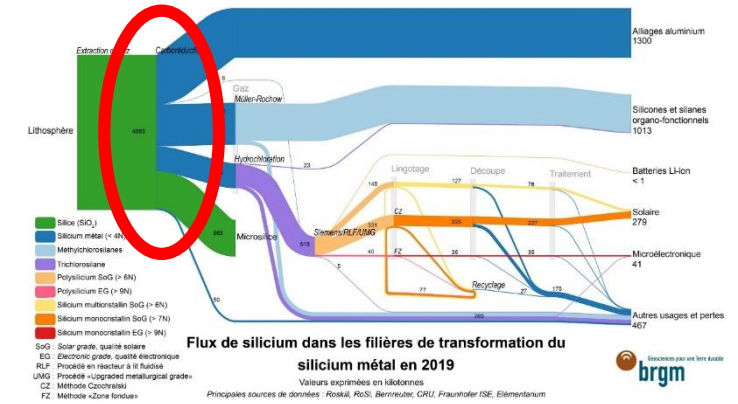
- Four à arc électrique (carboréduction)
- 2,8 t silice
- 1,5 t charbon, coke, charbon de bois
- 1,5 à 2,5 t de copeaux de bois
- 100 à 150 kg d'électrodes en graphite
- 11 à 14 MWh/t Si électricité
- ~2 t dioxygène



crédit : Susoltech



8

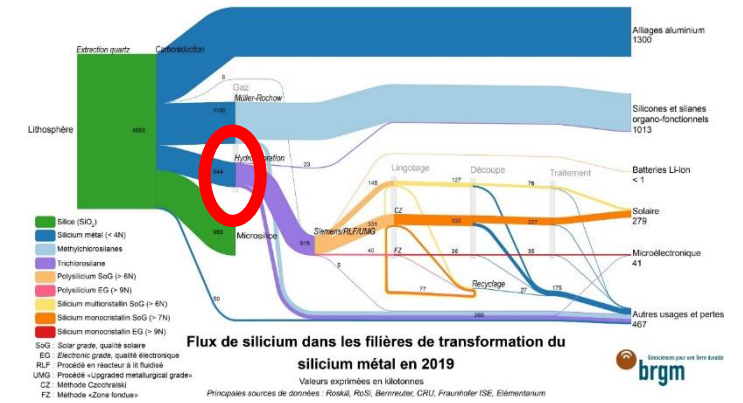


Emissions directes : ~3 à 5 kg CO_{2eq}/kg Si
Empreinte carbone : ~13 kg CO_{2eq}/kg Si
(ecoinvent 3.6)

Production du trichlorosilane

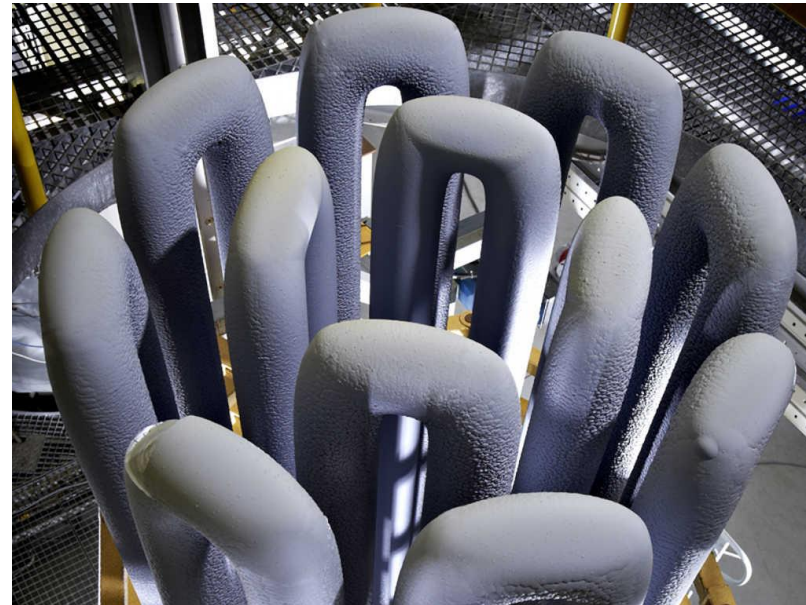
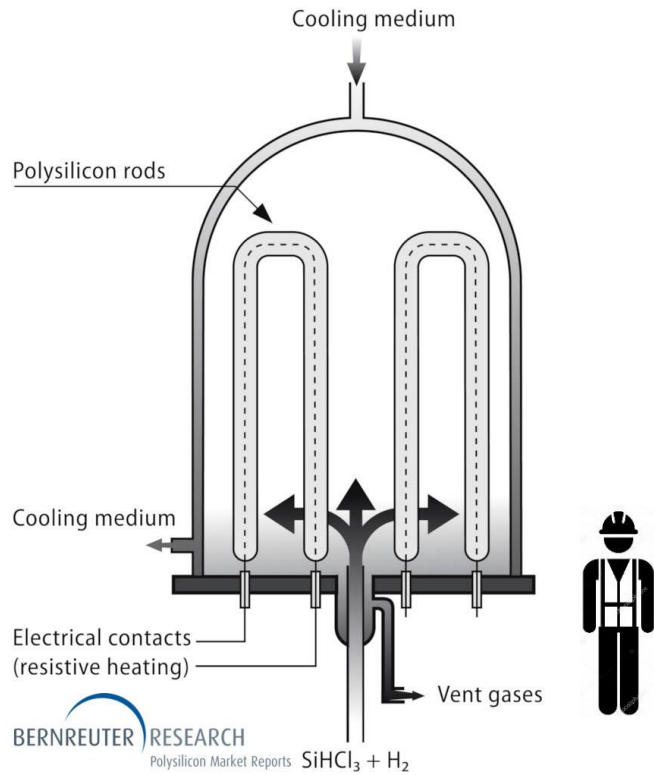


crédit : Wacker

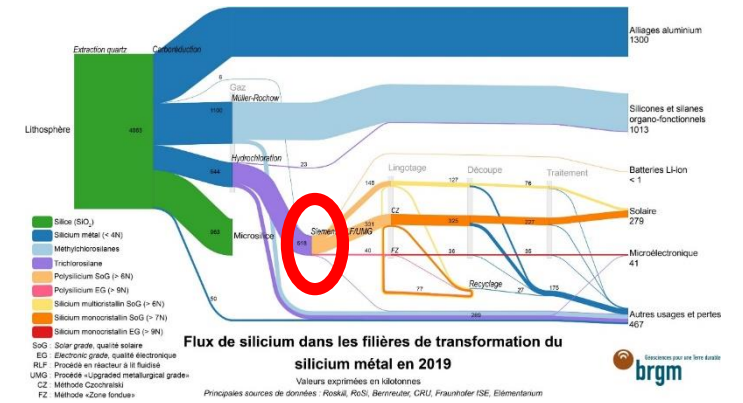


- SiHCl_3
- Utilisation chlorure d'hydrogène
- Distillation fractionnée
- Usines capitalistiques

Production du polysilicium



crédit : Silicon Products Group

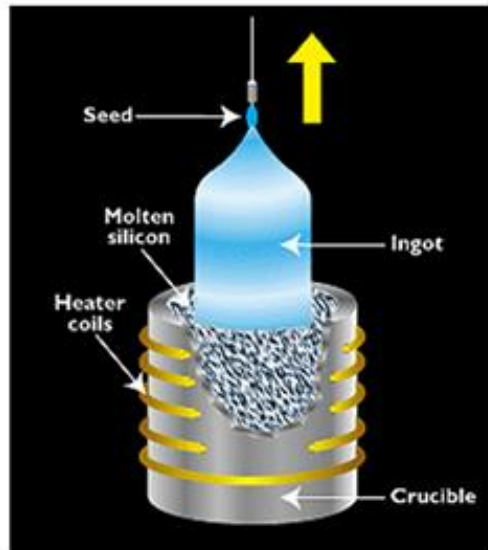
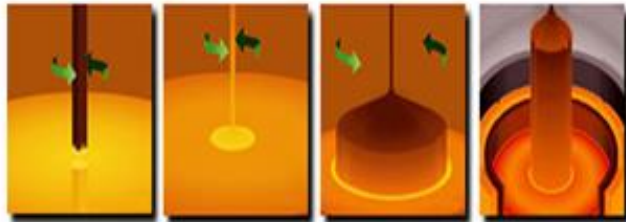


- Utilisation H_2
- 60 MWh/t Si
- Vitesse de dépôt < 1 mm/h

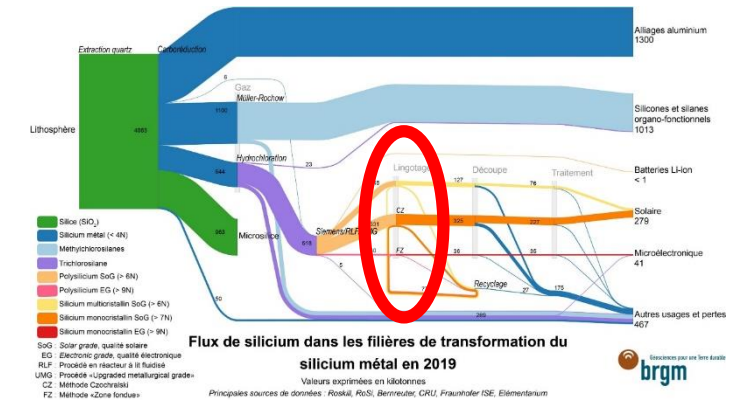


crédit : Susoltech

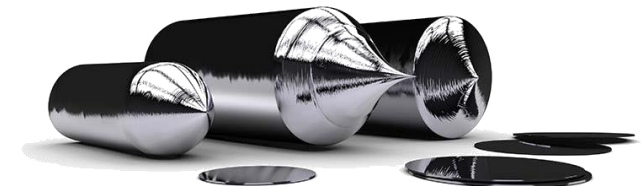
Production de lingots monocrystallins



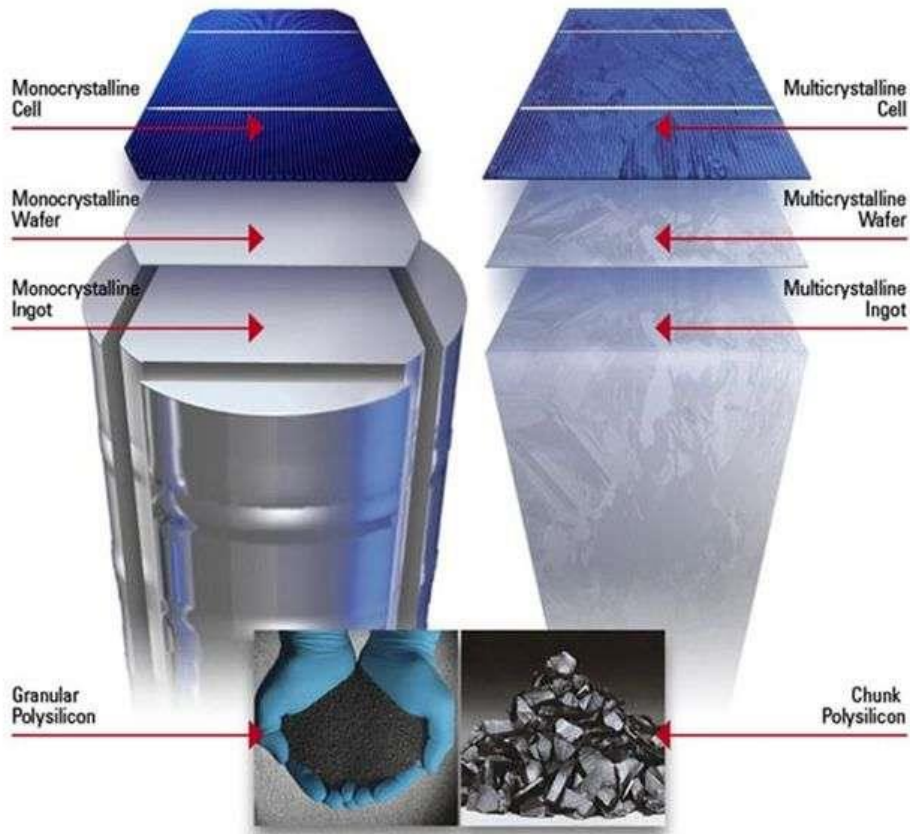
crédit : Waferpro



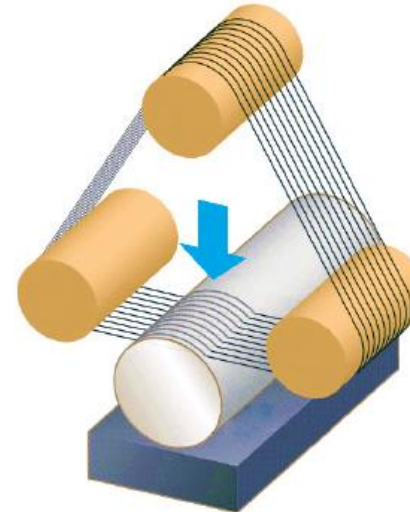
- 1400°C
- Plusieurs jours pour faire un lingot



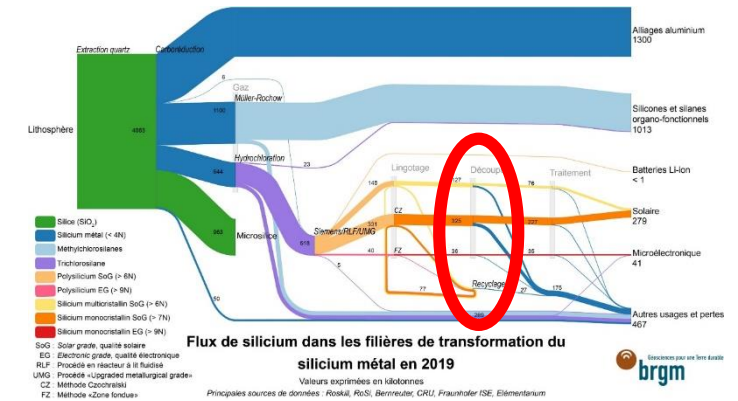
Découpe des lingots et plaquettes



crédit : Futura-sciences

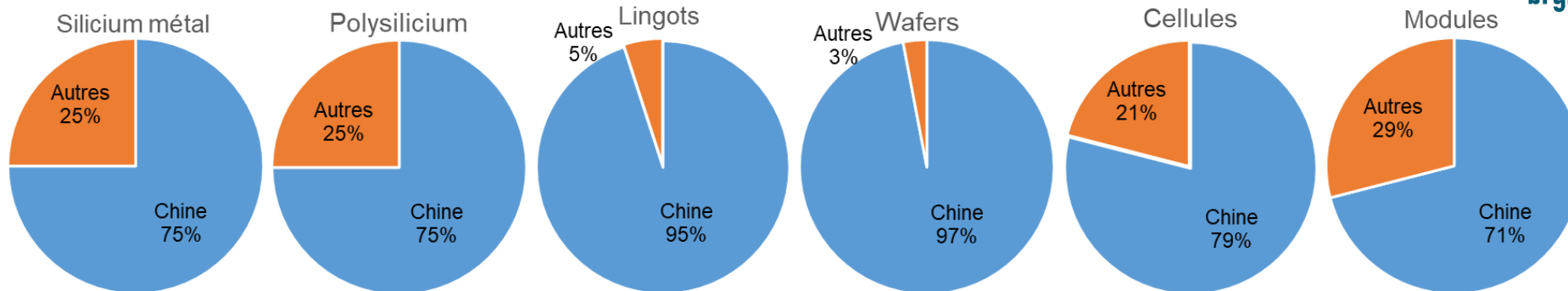
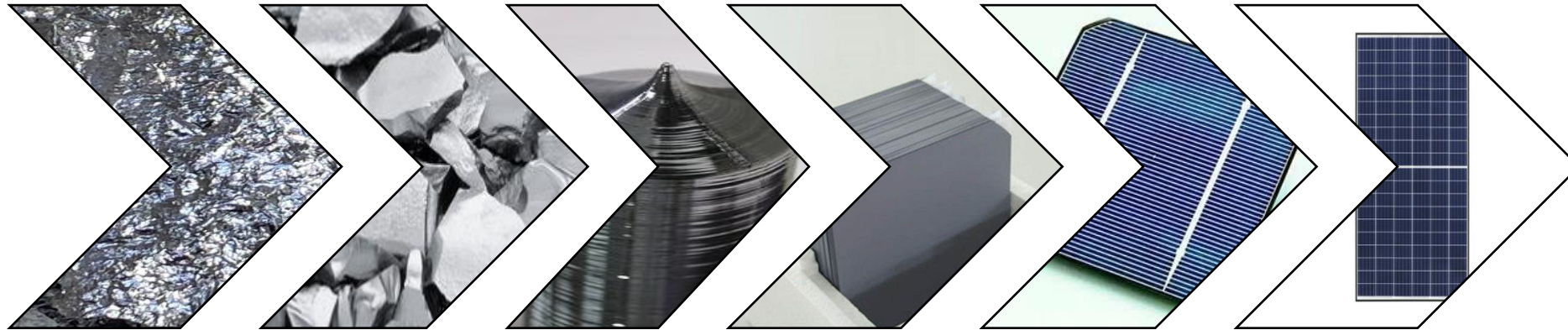


- Découpe des lingots
- Recyclage de certaines chutes
- Découpe au fil diamanté
- 45% de pertes



Monopole chinois

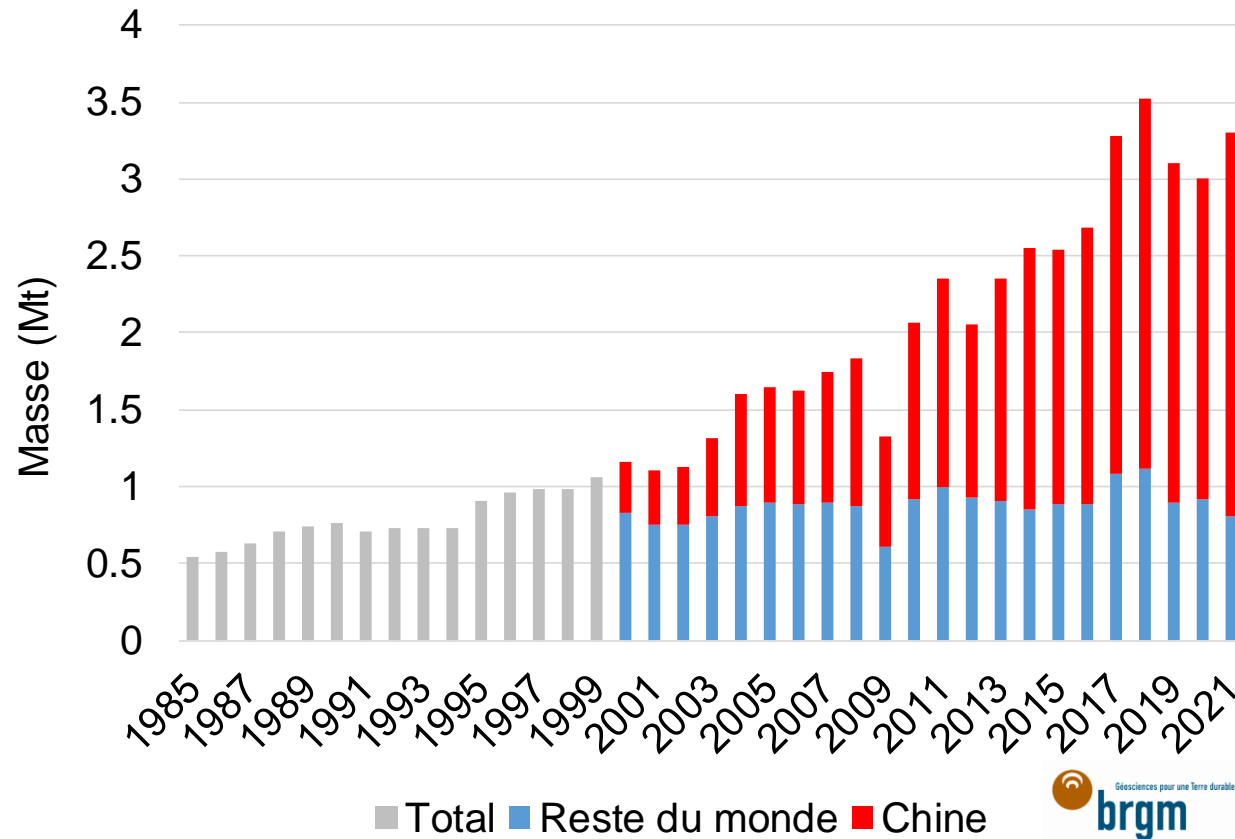
La Chine domine toutes les étapes de transformation



Inspiré par Bernreuter

Monopole chinois

Evolution de la production mondiale de Si métal
entre 1985 et 2021



- **Chine : 75% de la production**
- **Principaux producteurs hors-Chine : Brésil, Norvège, E.-U., France**

Sources : Roskill 2014, CRU, USGS



Monopole chinois

Qui affecte les prix

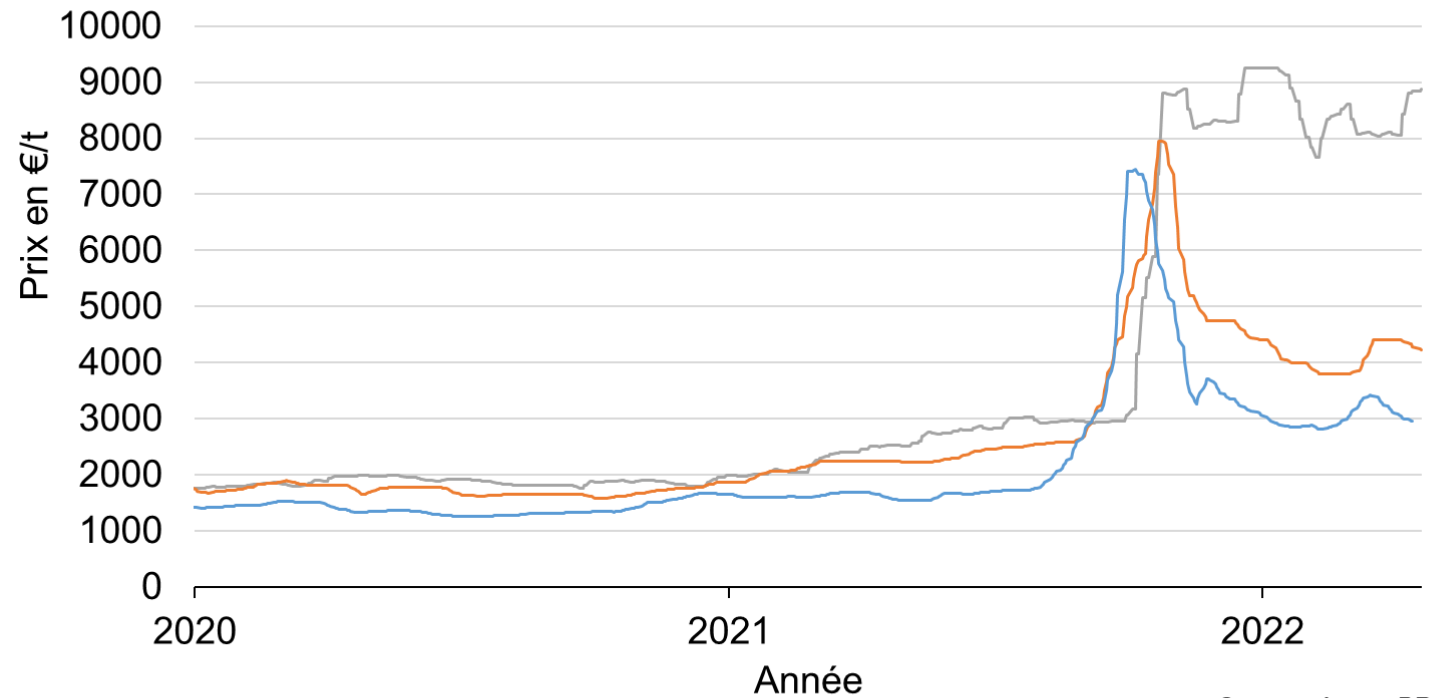
- Prix bas avant 2021 ayant causés de nombreuses fermetures hors-Chine (US, France, Corée du Sud)

Puis forte hausse fin 2021 :

- Redémarrage de la demande suite à la pandémie
- Crise de l'énergie en Chine
- Restrictions au commerce Chine-Etats-Unis
- Augmentation du coût des matières premières (quartz, charbon, électricité)

Prix du polysilicium : 10 \$/kg → 35 \$/kg

Evolution du prix du silicium métal dans trois régions



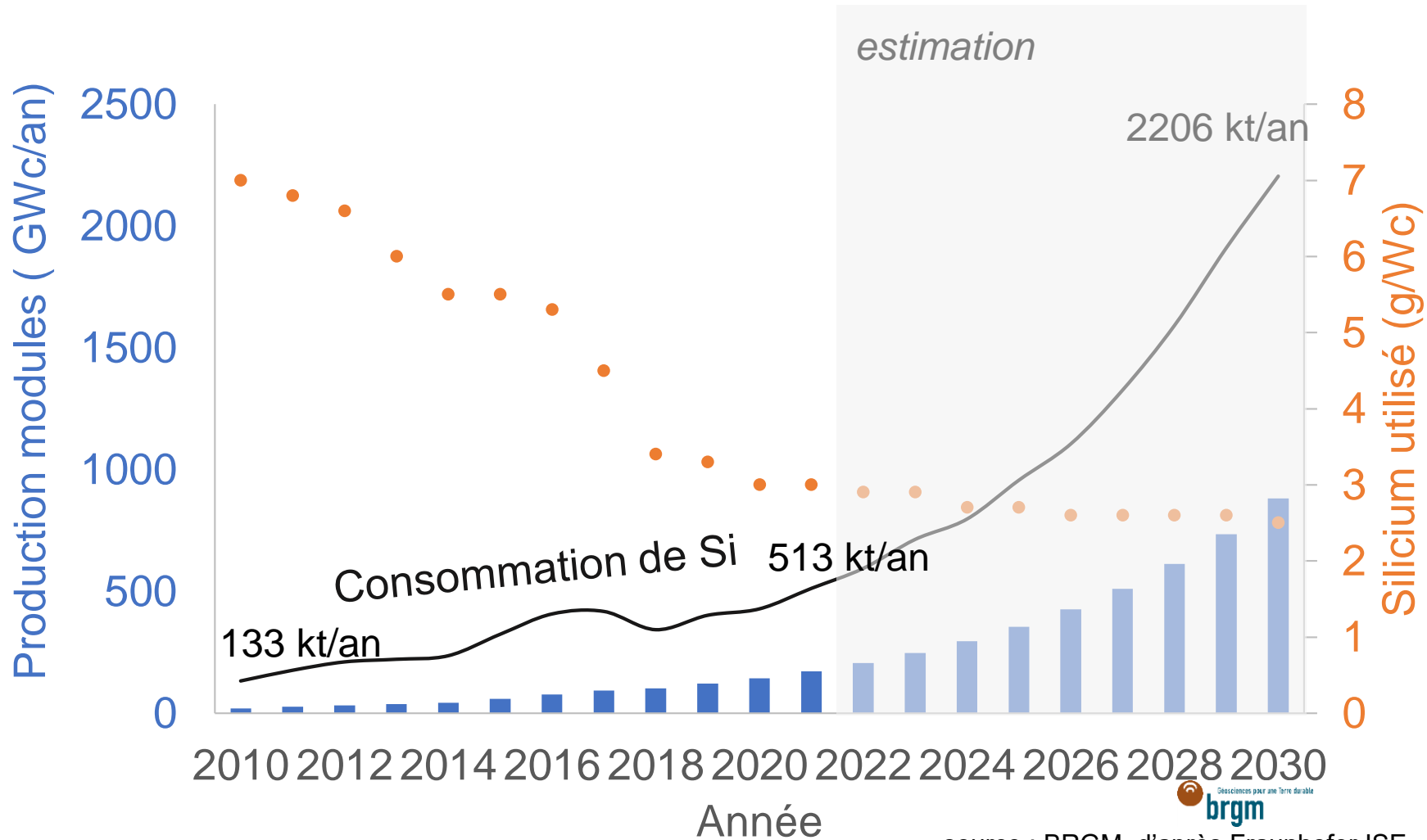
Source : Argus, BRGM

- Silicon 5-5-3, min. 98.5% Si, USA
- Silicon 5-5-3, min. 98.5% Si, Europe
- Silicon 5-5-3, min. 98.5% Si, fob China



De forts besoins de polysilicium pour le PV

... en dépit des gains d'efficacité matière

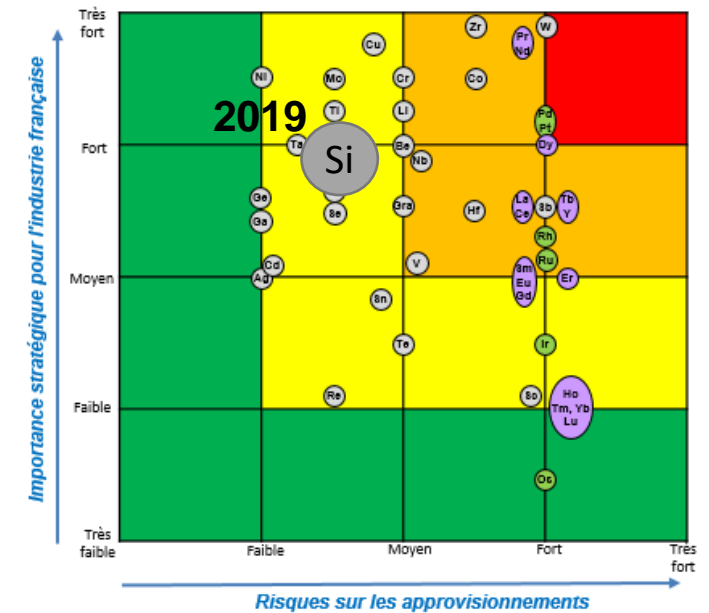


source : BRGM, d'après Fraunhofer ISE

Messages-clés

- 1/ La production d'un module fait appel à de nombreuses étapes techniques et impactantes
- 2/ La Chine controle la plupart de ces étapes
- 3/ Production hors-Chine de Si métal existe (dont France) mais est en difficulté
- 4/ Dépendance croissante sur un secteur stratégique

ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ DES SUBSTANCES OU GROUPES DE SUBSTANCES ÉTUDIÉS PAR LE BRGM
Positionnements actualisés à mi 2021 ("Fiches de criticité")



- Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité.
- Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, étude de scénarios de parade).
- Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement).
- Zone à criticité faible. Veille ponctuelle recommandée
- Platinoïdes (éléments du groupe du platine)
- Terres rares
- Gra Graphite naturel



Merci pour votre attention

Contact : a.boubault@brgm.fr

Retrouvez nos articles d'analyse et fiches de criticité sur les métaux et géomatériaux :

- mineralinfo.fr
- brgm.fr