



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Innovation technologique
Liliane Bettencourt 2021-2022

Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique



Reconnue d'utilité publique depuis 1987

Mercredi 9 février 2022

La technologie silicium cristallin De la mine au recyclage

Daniel LINCOT

Trente ans d'évolutions technologiques et industrielles
des cellules solaires à base de silicium cristallin

Etienne DRAHI

daniel.lincot@cnrs.fr



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Innovation technologique
Liliane Bettencourt 2021-2022
Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique



Fondation
Bettencourt
Schueller

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

Mercredi 16 février 2022

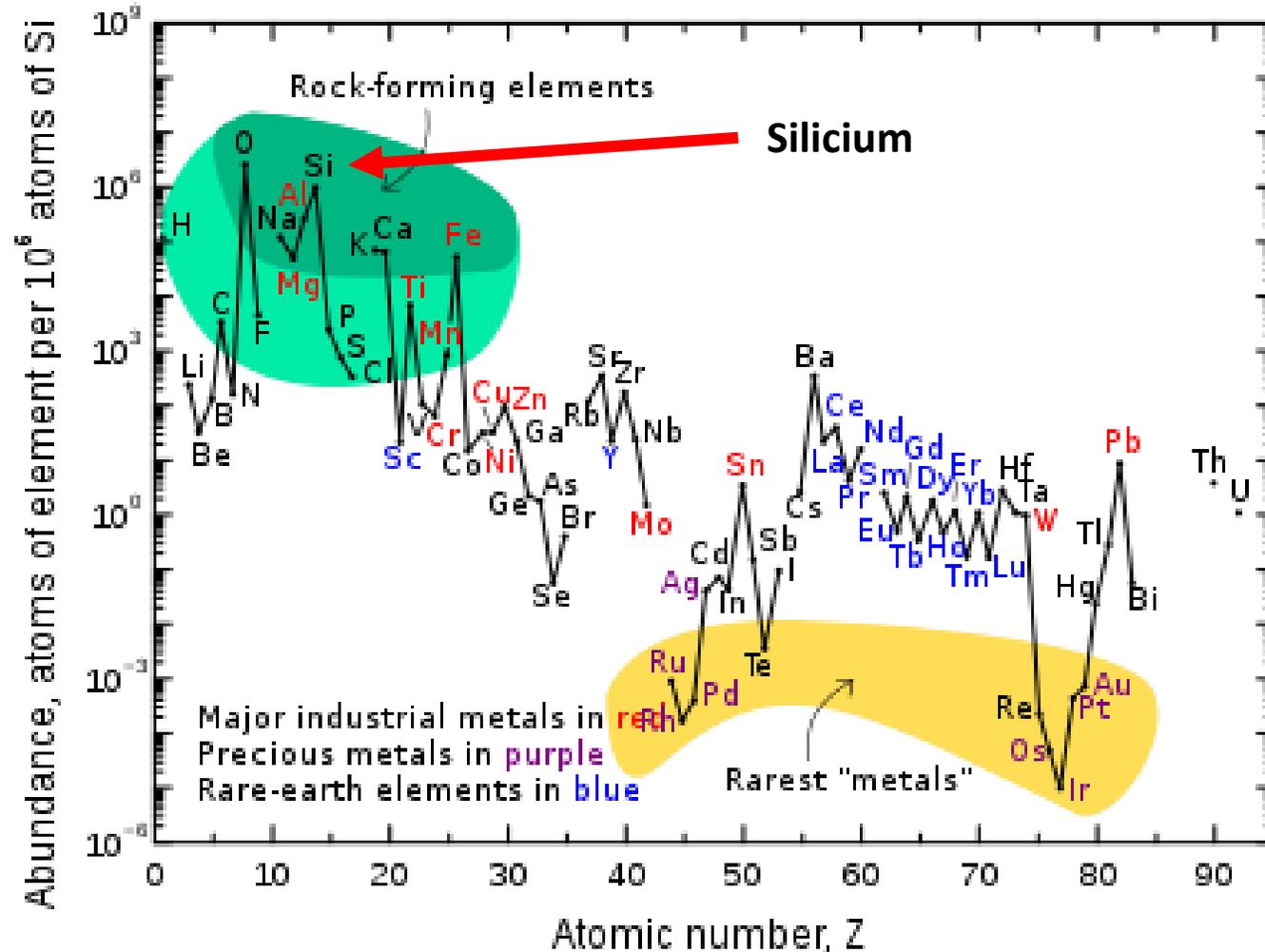
La technologie silicium cristallin « De la mine au recyclage »

Daniel LINCOT

Remerciements : Antoine Boubault (BRGM), Etienne Drahi (Total)

daniel.lincot@cnrs.fr

Abondance du silicium dans la croûte terrestre



Silicium : 2^{ème} élément de la croûte terrestre après l'oxygène
25,7 % en masse

Sous la forme de silice & dérivés : SiO_2 (Si^{4+})
 → Quartz, sable... (12% masse lithosphère)
 → Silicates (Al, Fe, Mg, K, Na...)
 → Silice biologique : diatomées, végétaux

Ressource quasiment « illimitée »
en silicium

Sources de SiO₂



Quartz - Mine de La Gardette, Le Bourg-d'Oisans, Isère France (13 × 13 cm).

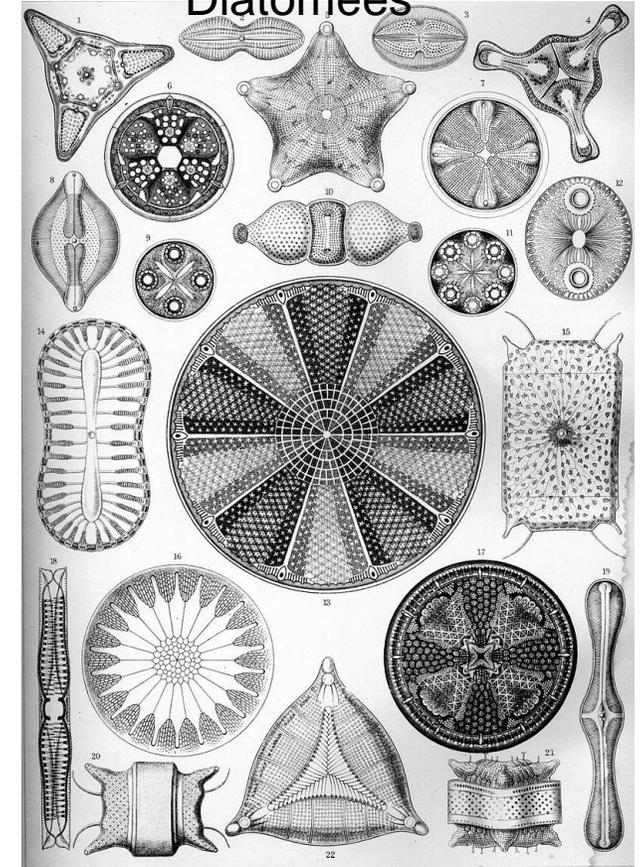


Grande mer de sable en Egypte (72 000 km²)

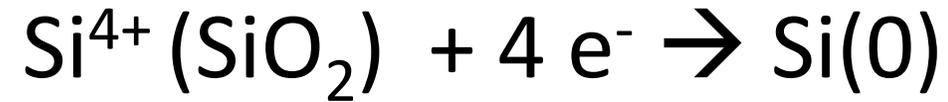
Phytoplancton

Voir : <https://www.college-de-france.fr/site/jacques-livage/inaugural-lecture-2002-01-17.htm>

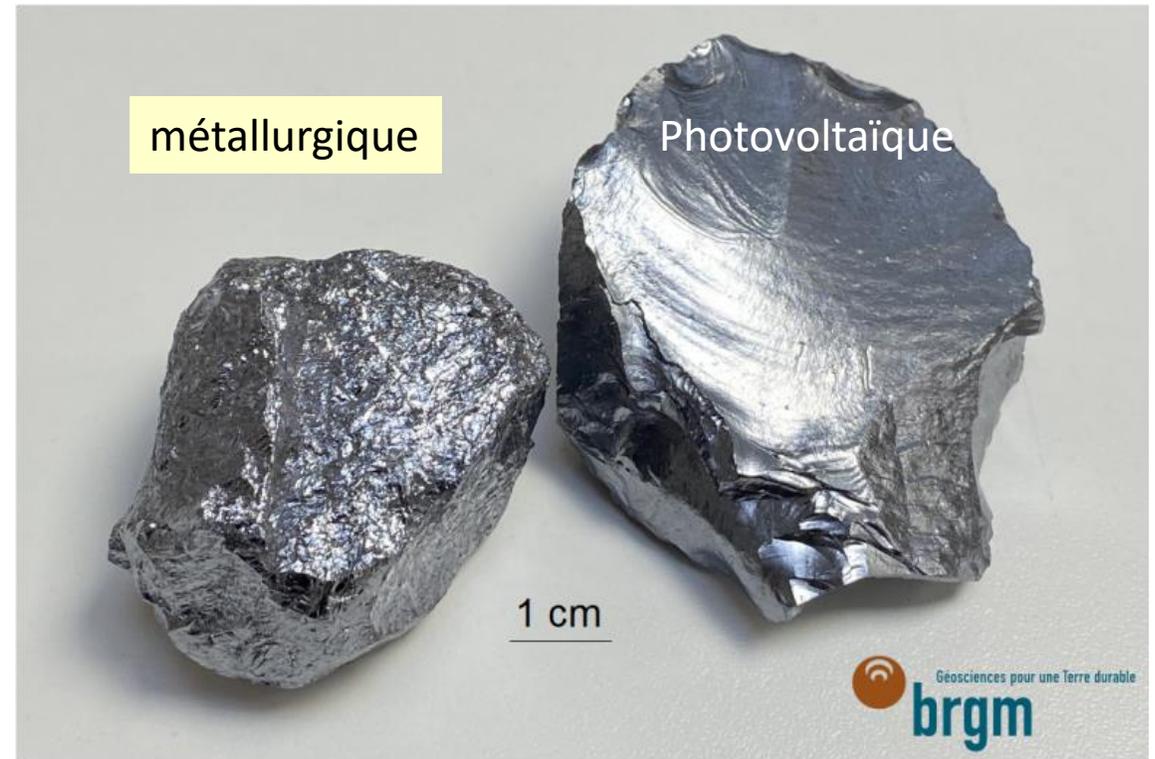
Origine biologique
Diatomées



De la silice au silicium, une affaire de réduction



Quartz - Mine de La Gardette, Le Bourg-d'Oisans, Isère France (13 × 13 cm).



Gauche : fragment de silicium métallurgique (pureté : 99,0 %)
Droite : fragment de polysilicium (pureté : 99,999 999 9 %)

Crédit : BRGM
Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Composition des sources de silice

> 99%



quartz

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

Sable de Fontainebleau
98%

<95%



Exemple de composition du quartz, Ghazvin Province, Iran
(en % masse)*

MnO	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃
0.012	0.020	0.17	0.086
CaO	SO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
0.085	0.051	0.17	99.4

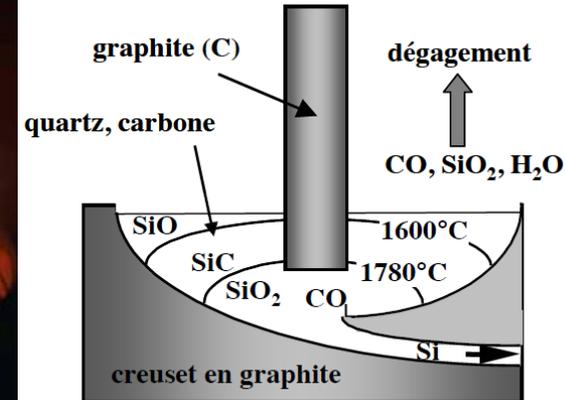
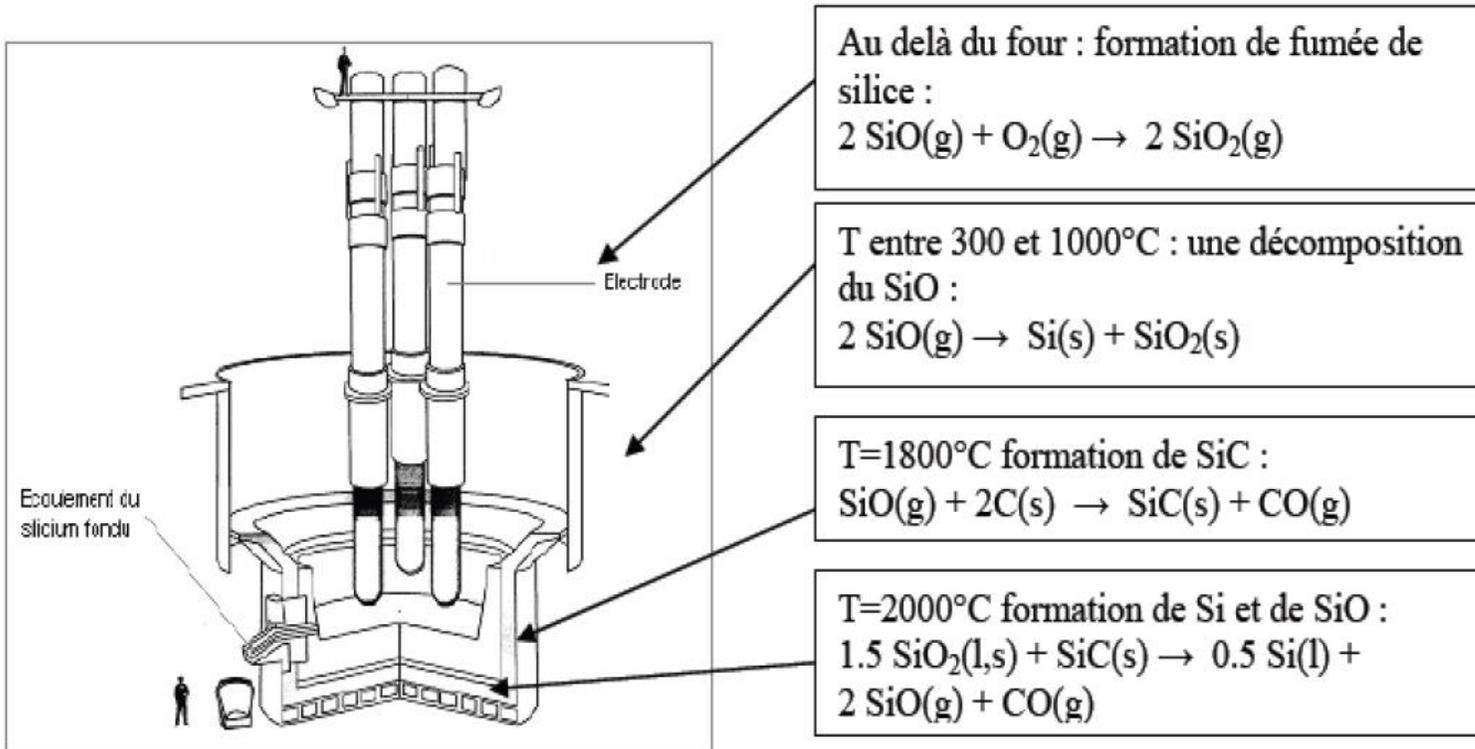
- Quartzite, galets de quartz, grès également
- Application en électronique & photovoltaïque : Si

Analyse chimique du sable brut d'Adrar

Oxyde	Pourcentage%
SiO ₂	91.82
CaCO ₃	4.56
CaO	2.39
Al ₂ O ₃	0.29
Fe ₂ O ₃	0.93
Total	99.99

→ Applications en fabrication du verre

Fabrication du silicium métallurgique



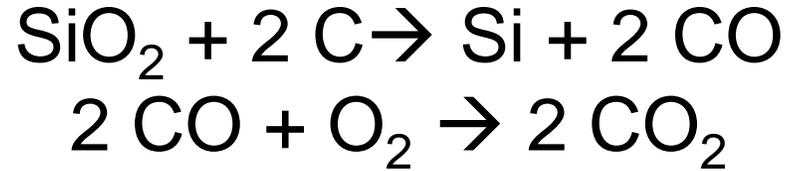
Température de fusion du silicium : 1410°C
 Température de fusion de la silice : 1710°C
 Température de fusion de SiC : 2730°C

Elaboration du silicium à partir du sable du désert Algérien, M. Nekous (2013)

http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=52 Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Fabrication de silicium métallurgique par carboréduction : bilans

Réactions bilan



Pour produire une tonne de Si (pureté 98-99 %)

Quartz	2 900	Copeaux de bois	1 580
Coke de pétrole	740	Électrodes	150
Charbon bitumineux	590	Énergie	12 000 kWh

production de 1 mole Si \rightarrow 2 moles de CO₂

1 tonne de Si \rightarrow 5000 m³ de CO \rightarrow 3,14 tonnes de CO₂
+ 12 MWh d'électricité

Four électrique à 1700 °C

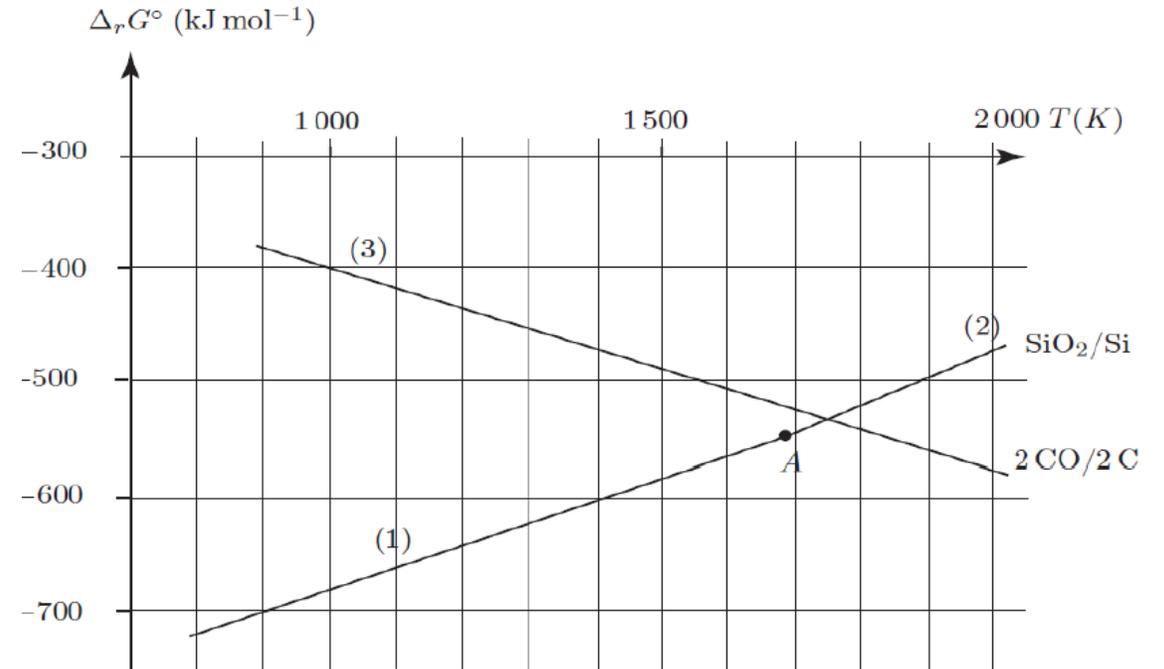
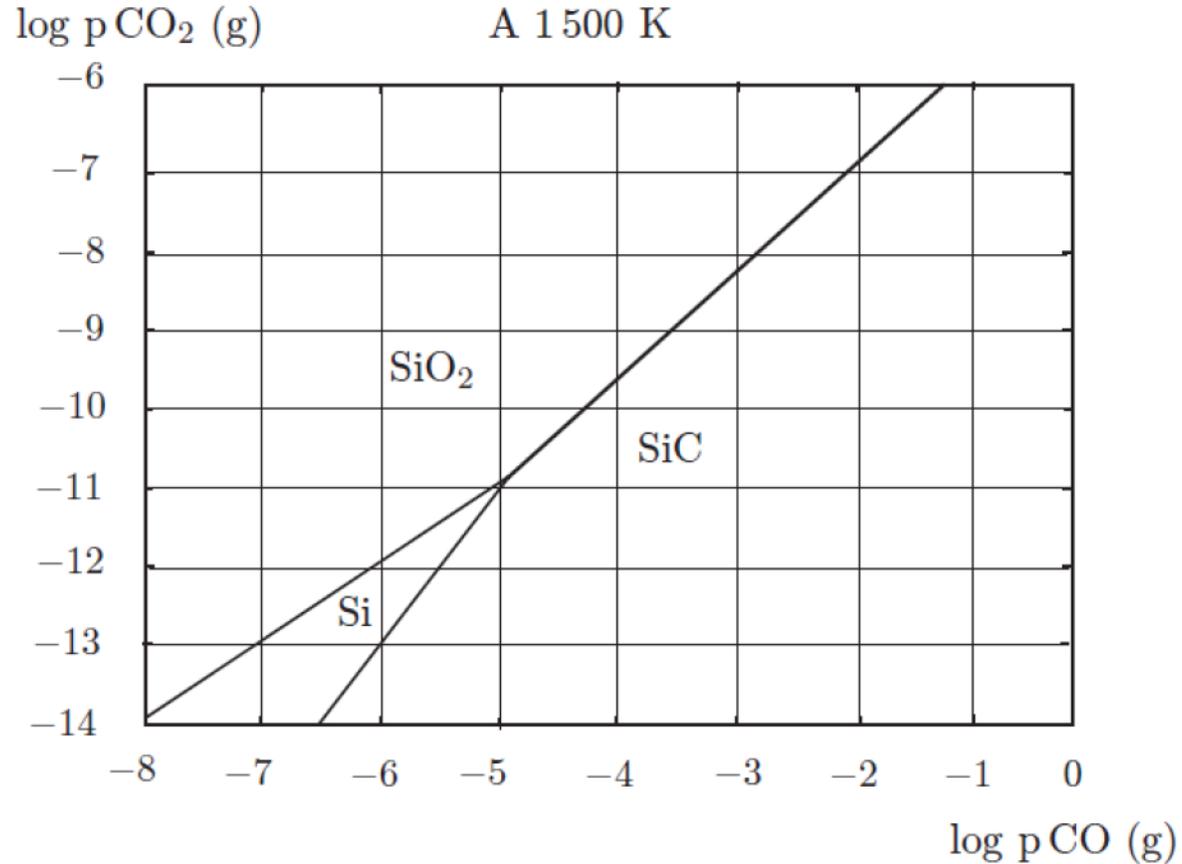
600 kg Si en cellules
À 3,6 g/W \rightarrow 166 kW
Soit 180 MWh électrique/an
Soit 3,6 GWh sur 20 ans
Soit 0,9 gCO₂/kWh

12 MWh pour 600 kg
À 800g de CO₂/kWh
Soit 9,6 tonnes de CO₂
Soit 2,6 g CO₂/kWh

Soit 3,5 gCO₂/kWh si charbon
Soit 0,9 gCO₂/kWh si électricité décarbonée

Domaines de prédominance thermodynamique Si (s), SiO₂(s), SiC (s), CO₂(g), CO(g)

Diagramme thermodynamique en fonction de la température

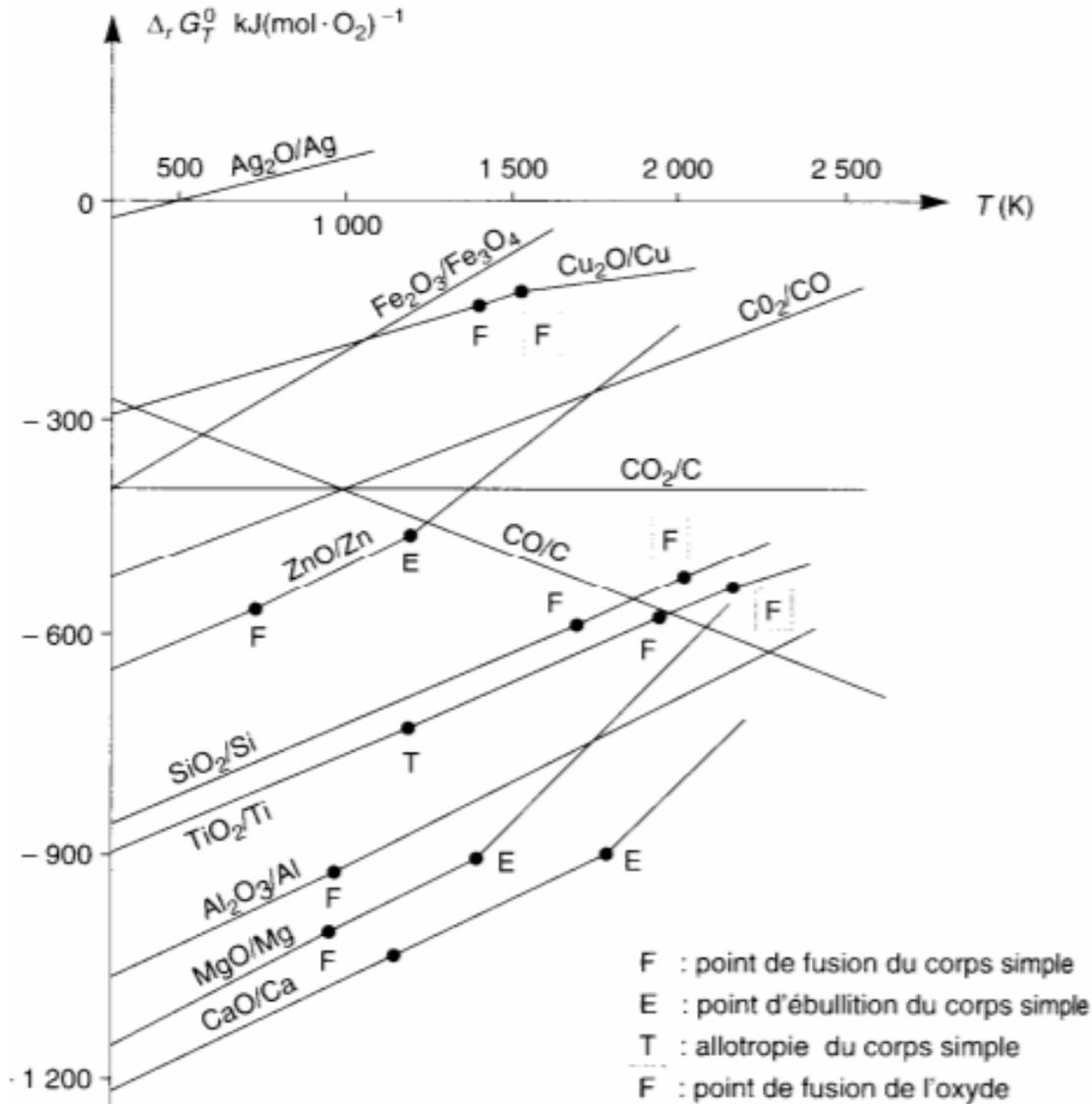


Elaboration du silicium à partir du sable du désert Algérien, M. Nekous (2013)

http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=52 Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Diagrammes d'Hellingham des métaux

Exemple de composition du silicium métallurgique



Element	Concentration (ppma)
Al	1200-4000
B	37-45
P	27-30
Ca	590
Cr	50-140
Cu	24-90
Fe	1600-3000
Mn	70-80
Mo	<10
Ni	40-80
Ti	150-200
V	100-200
Zr	30

Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Analogie avec les diagrammes de répartition potentiel-PH en solution (M. Pourbaix 1959)

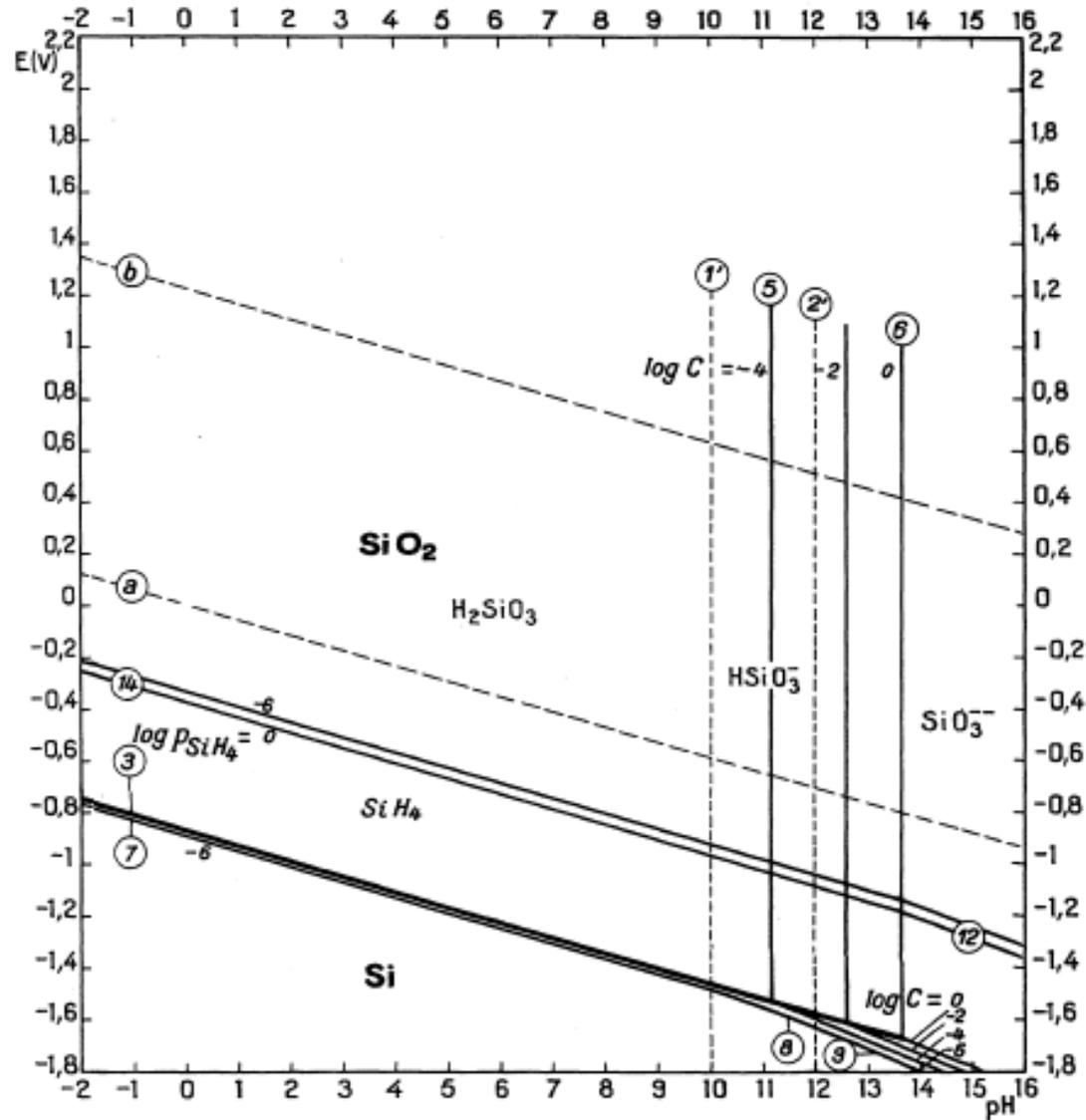
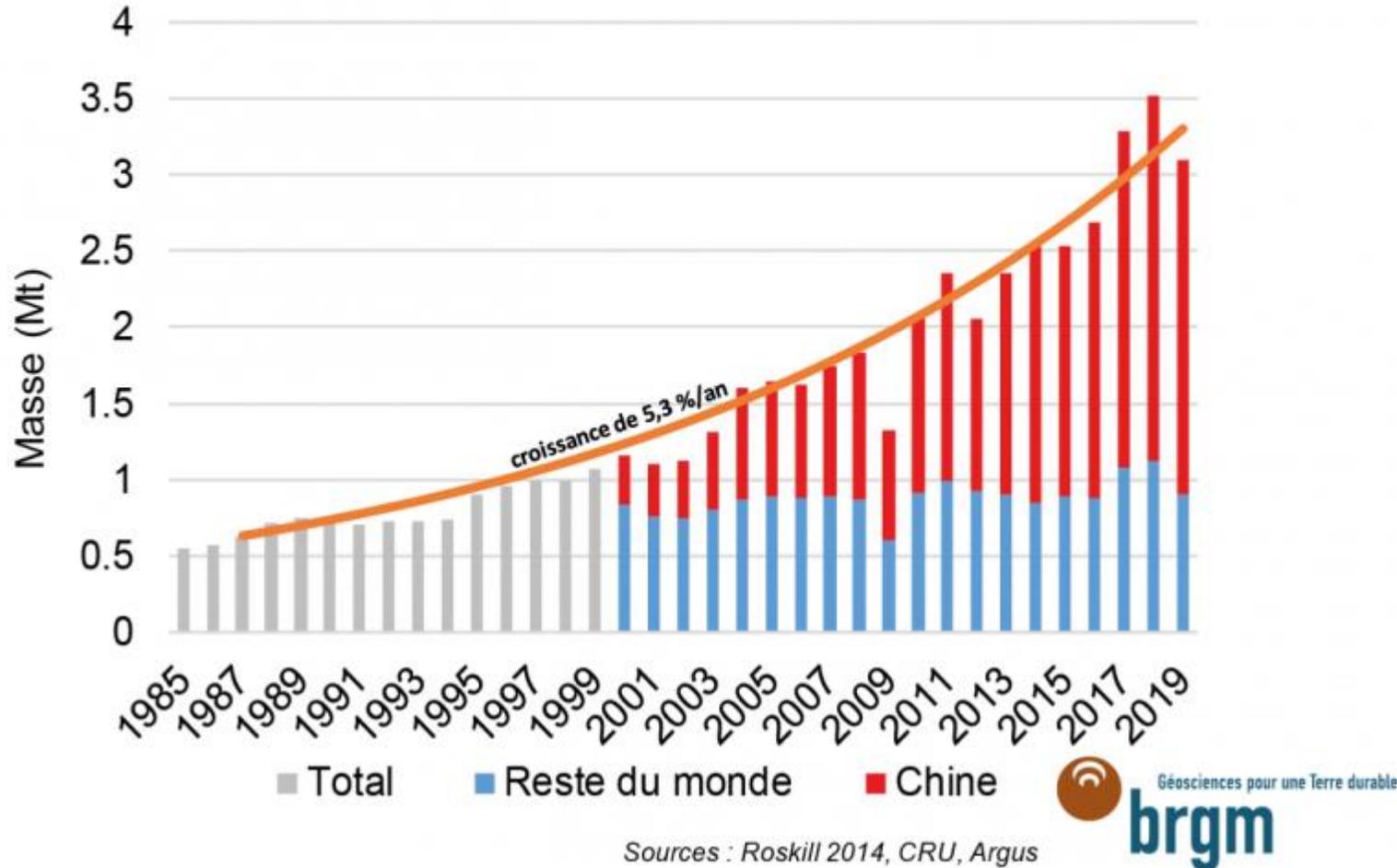


FIG. 1. Potential-pH equilibrium diagram for the system silicon-water, at 25°C.
(Considering SiO_2 in the form of quartz. Approximate diagram.)

Evolution de la production mondiale de Si métal entre 1985 et 2019



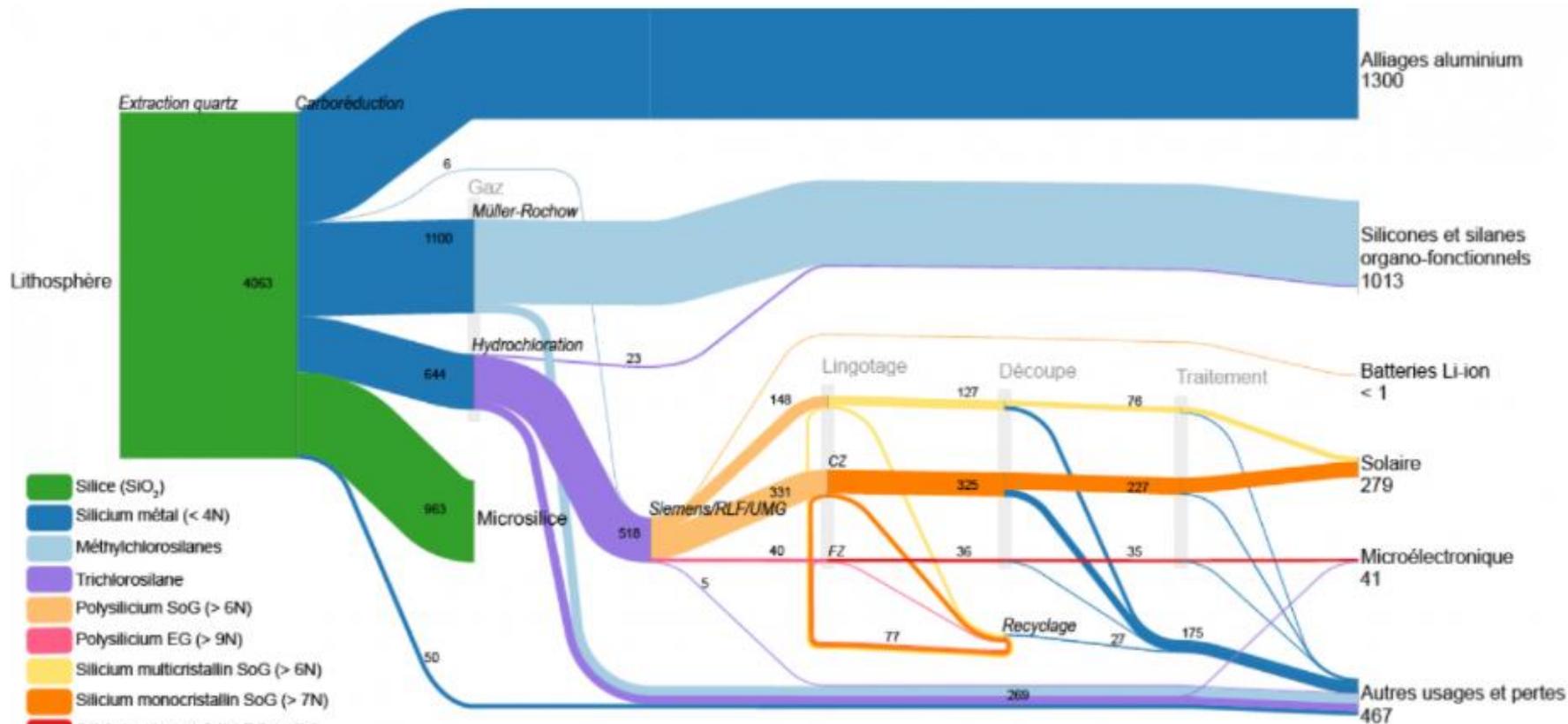
Production 2019 : 3,1 Mt
 Chine : 2,2 Mt (71%)
 Brésil : 200 kt
 Norvège : 170 kt
 USA : 135 kt
 France : 100 kt

Usines en France, opérées par Ferroglobe
 (anciennement Péchiney électrométallurgie)

Anglefort (01) : 38000t
 Château Feuillet (73) : 23000t
 Montrichet (73) : 33000t
 Les Clavaux (38) : 38000t
 Laudun(30) : 23000t

Chaîne de transformation silicium pour le photovoltaïque

Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022



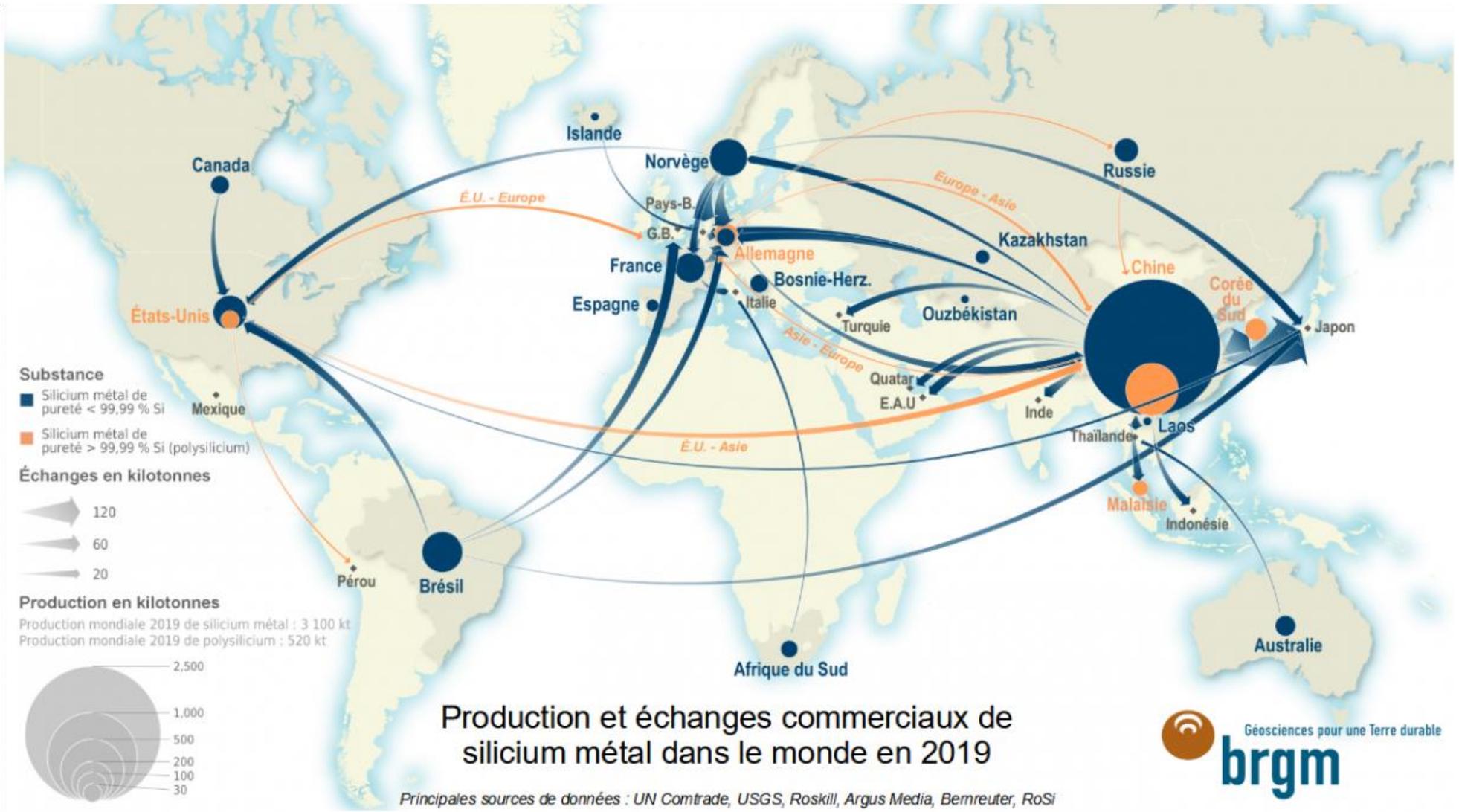
- 1: 4 Mt
 - 2: 3,1 Mt
 - 3: 644 kt
 - 4: 518 kt (17%)
 - Électronique : 40 kt
 - Solaire poly : 148 kt
 - Solaire mono: 331 kt
 - 7: Solaire : 279 kt (-42%)
- 479 kt (15,5%)**

- Silice (SiO₂)
 - Silicium métal (< 4N)
 - Méthylchlorosilanes
 - Trichlorosilane
 - Polysilicium SoG (> 6N)
 - Polysilicium EG (> 9N)
 - Silicium multicristallin SoG (> 6N)
 - Silicium monocristallin SoG (> 7N)
 - Silicium monocristallin EG (> 9N)
- SoG : Solar grade, qualité solaire
 EG : Electronic grade, qualité électronique
 RLF : Procédé en réacteur à lit fluidisé
 UMG : Procédé «Upgraded metallurgical grade»
 CZ : Méthode Czochralski
 FZ : Méthode «Zone fondue»

Flux de silicium dans les filières de transformation du silicium métal en 2019, en kt

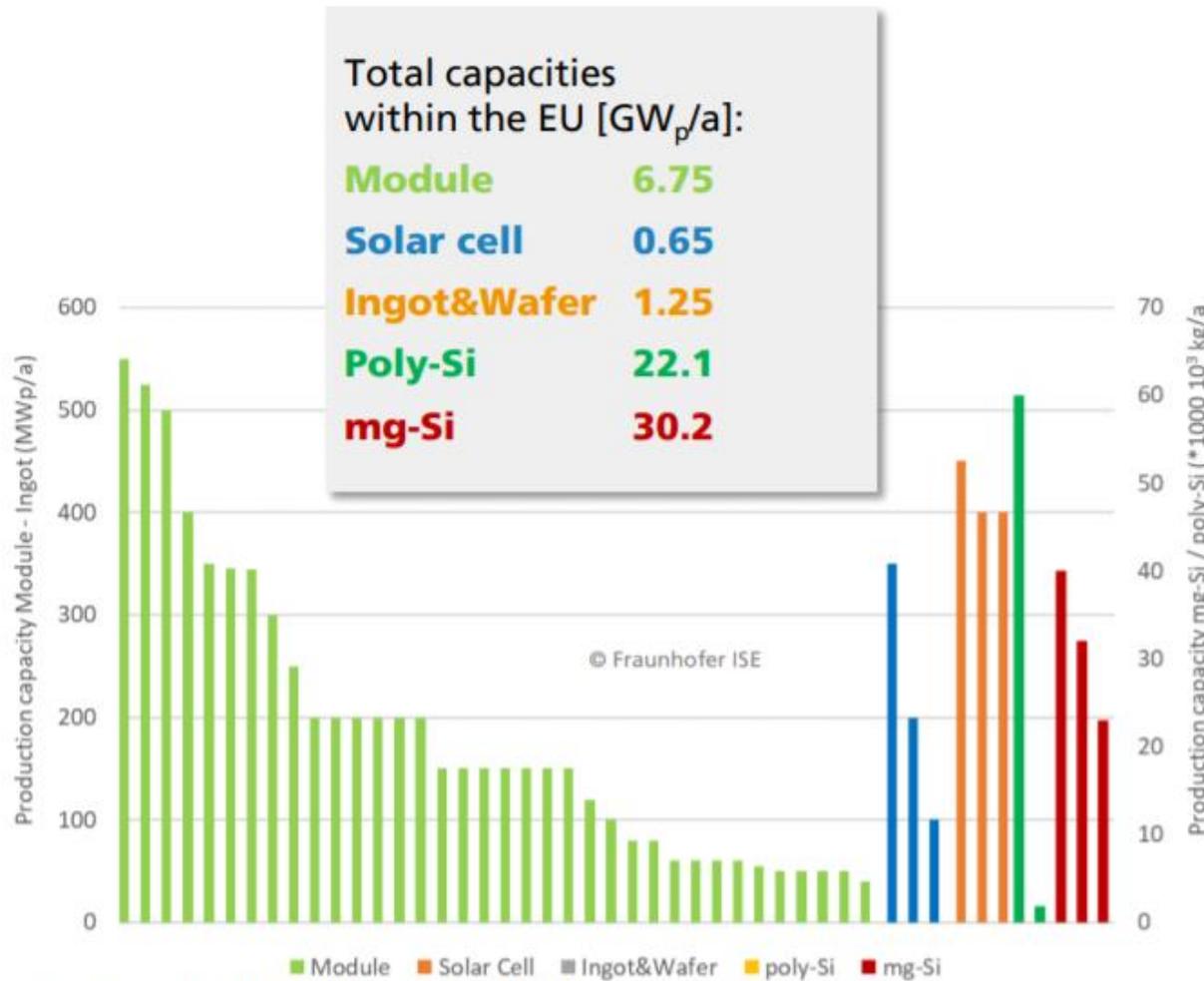
Extraction silice : 4 millions de tonnes en silicium contenu



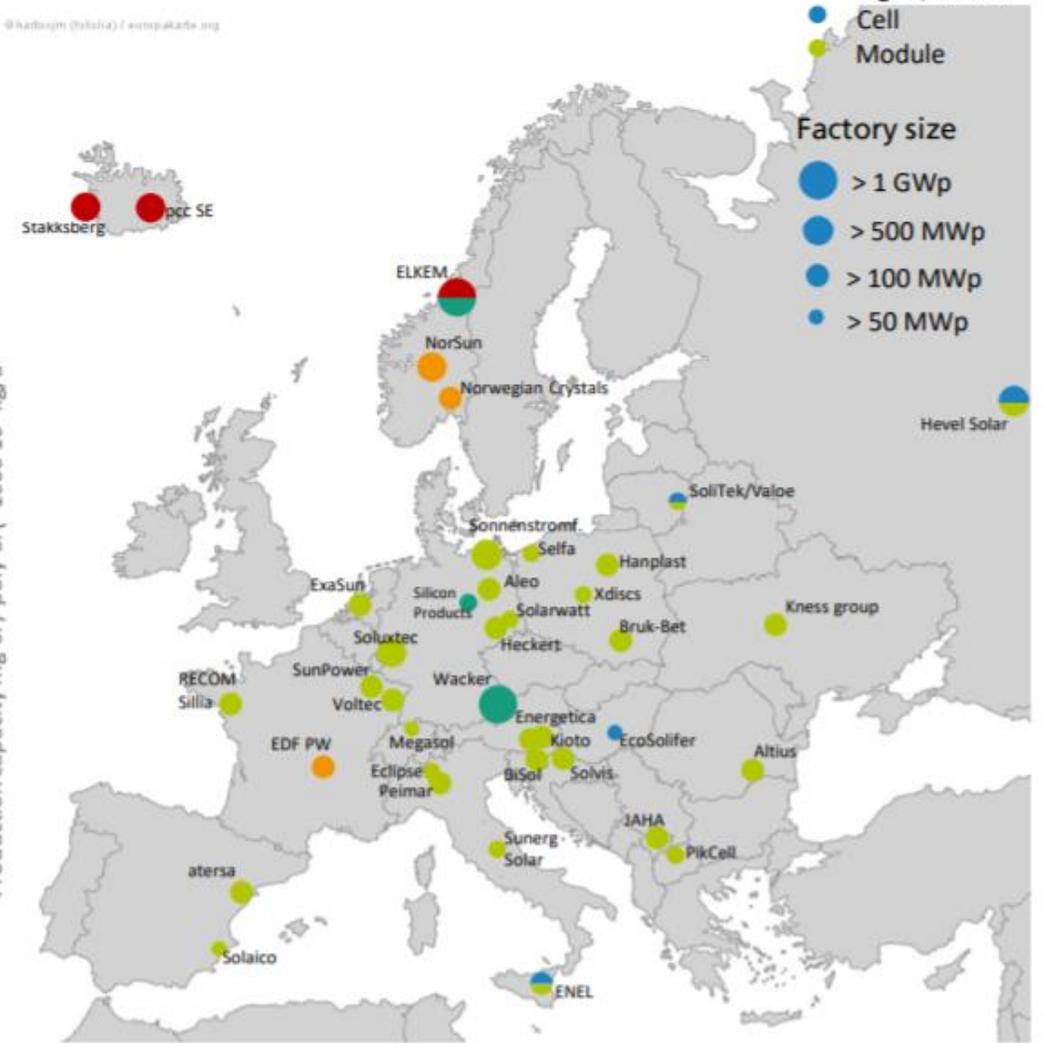


Current European c-Si PV Manufacturing Landscape

Status Quo, End of 2020



© katbuim (fotolia) / europakarte.org



Data and Graph: Jochen Rentsch, Fraunhofer ISE 2021

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

22 juillet 2020 – Initiative Fraunhofer ISE



Supporters

Company/ R&D Organisation	Address	
ACI Systems GmbH	Albring 18 78658 Zimmern o. R. Germany	
acp systems AG	Albring 18 78658 Zimmern o. R. Germany	
AZUR SPACE Solar Power GmbH	Theresienstrasse 2 74072 Heilbronn Germany	
cire Cologne Institute for Renewable Energy	Faculty of Process Engineering and Mechanical Systems Betzdorfer Strasse 2 50679 Cologne Germany	
Helmholtz-Zentrum Berlin PVcomB	Schwarzschildstrasse 3 12489 Berlin Germany	
Hennecke Systems GmbH	Aachener Strasse 100 53909 Zuelpich Germany	
IBC SOLAR AG	Am Hochgericht 10 96231 Bad Staffelstein Germany	
IEO - Institute for Renewable Energy	Fletniowa 47B 03-160 Warsaw Poland	
IPVF	18, boulevard Thomas Gobert 91120 Palaiseau France	
ISC Konstanz	Rudolf-Diesel-Strasse 15 78467 Konstanz Germany	
Jonas & Redmann Group GmbH	Kaiserin-Augusta-Allee 113 10553 Berlin Germany	
M10 Industries AG	Munzinger Strasse 10 79111 Freiburg Germany	
NexWafe GmbH	Hans-Bunte-Strasse 19 79108 Freiburg Germany	
Polish Industrial PV Platform (Bruk-Bet, Hanplast, ML System, Corab)	Mokotowska 4/6 00-641 Warsaw Poland	
RCT Solutions GmbH	Line-Eid-Strasse 1 78467 Konstanz Germany	

Rena Technologies GmbH	Hoehenweg 1 78148 Guetenbach Germany	
ROSI return of silicon	PEI – Bâtiment Gallée 1270 rue de la Piscine 38400 Saint-Martin-d'Hères France	
Singulus Technologies AG	Hanauer Landstraße 103 63796 Kahl am Main Germany	
Wacker Chemie AG	Hanns-Seidel-Platz 4 81737 Muenchen Germany	

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/ISE-Sustainable-PV-Manufacturing-in-Europe.pdf>

Projets en cours 2022
Meyer Burger 5GW en Suisse
Autre en Espagne
Italie (Enel, CEA...)

Polysilicon capacities of the Big Six in 2020

No.	Manufacturer	Capacity
1	Tongwei	96,000 MT
2	GCL-Poly	90,000 MT
3	Wacker	84,000 MT
4	Daqo New Energy	80,000 MT
5	Xinte Energy	80,000 MT
6	East Hope	40,000 MT
	Total	470,000 MT



Six manufacturers will form a new polysilicon super league – Chart: Bernreuter Research

2 ▼ Wacker Chemie AG (Germany/USA)



1 ▲ Tongwei Co., Ltd. (China)

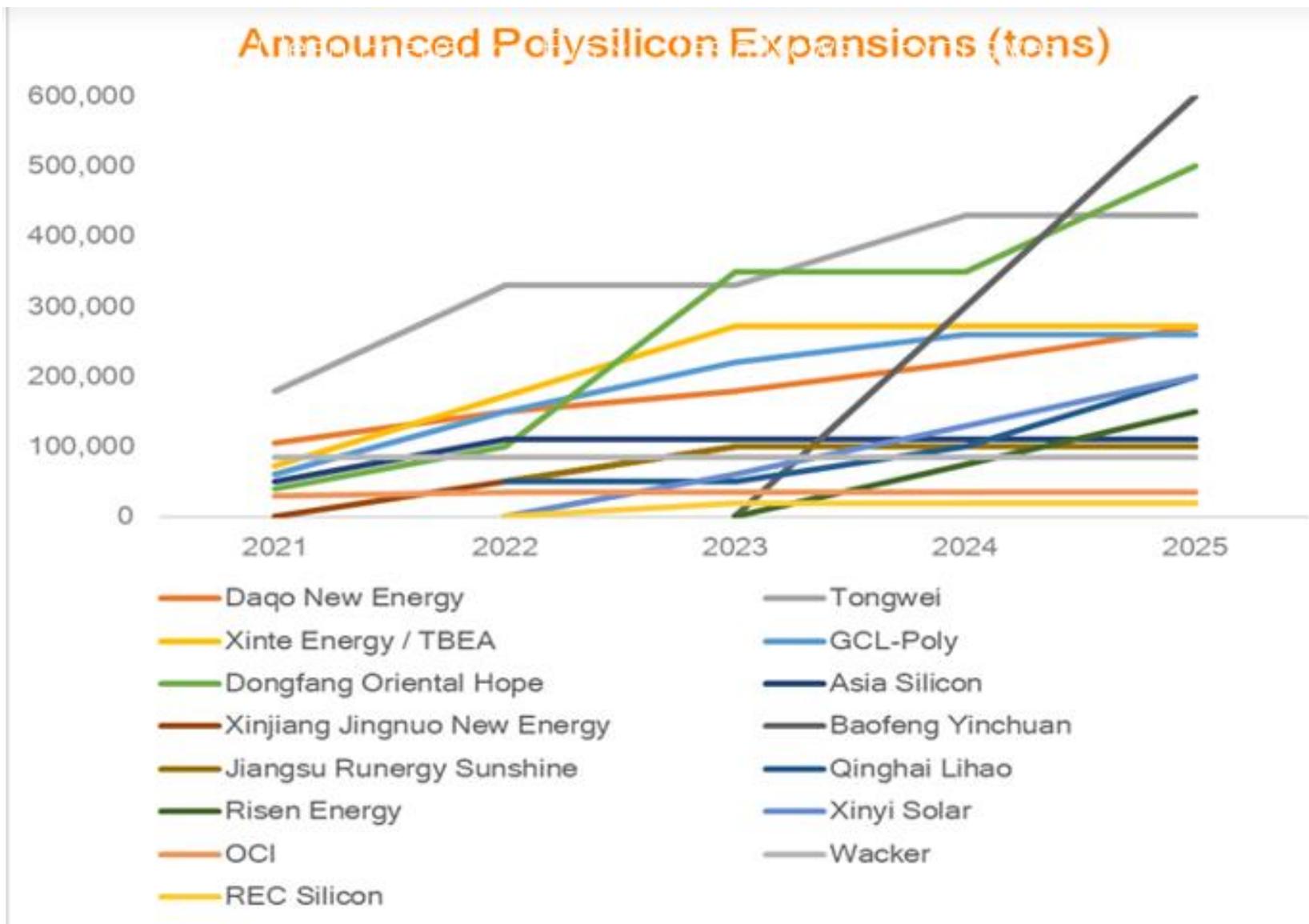


Polysilicon plant of Tongwei's subsidiary Yongxiang New Energy in Leshan – Image: Sichuan Daily

3 ▲ Daqo New Energy Corp. (China)



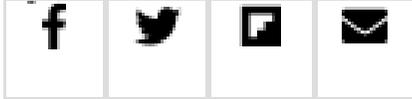
Prévisions d'extension de la production de silicium métal dans le monde



12 février 2022



By [David Waterworth](#) Published 1 day ago



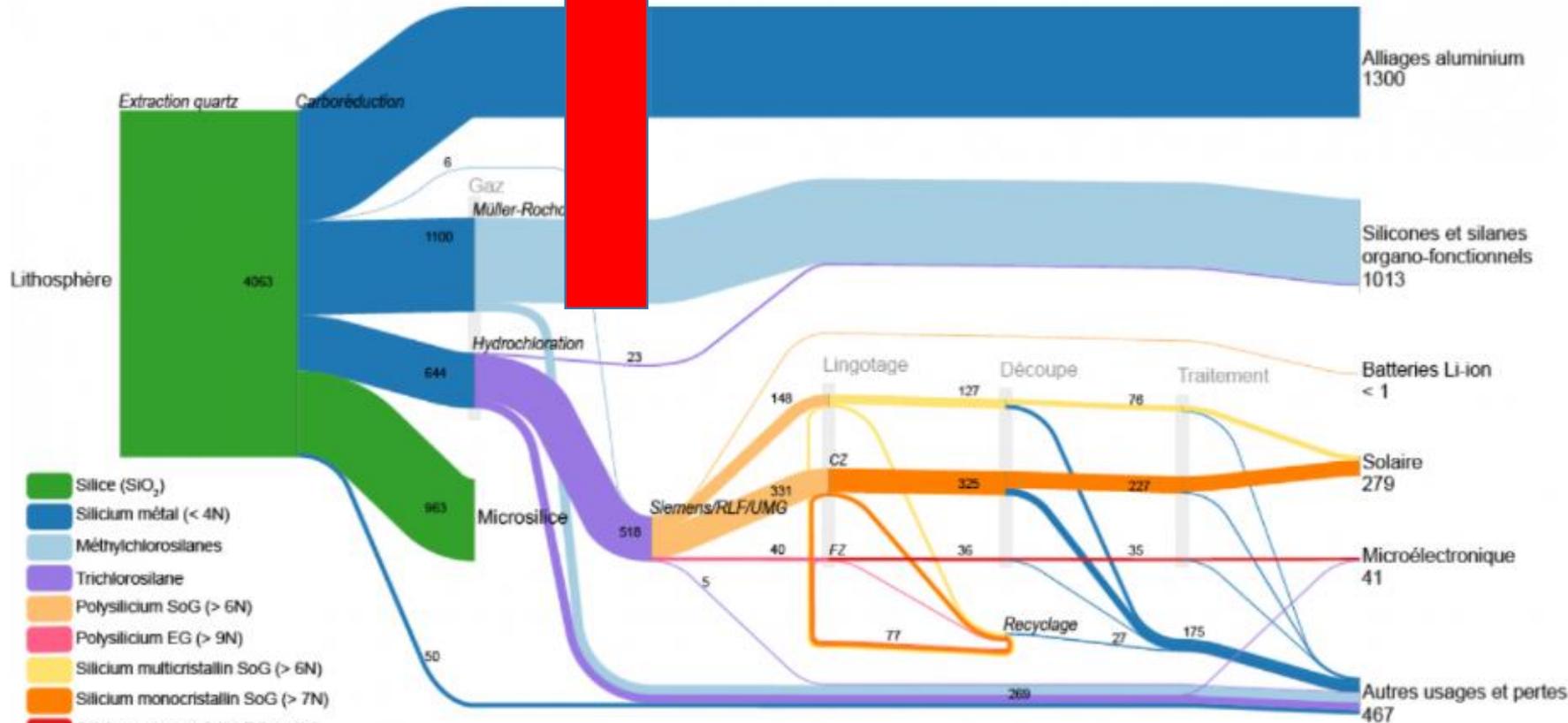
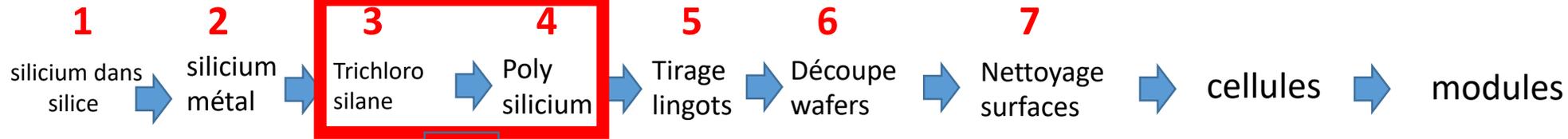
[1 Comment](#)

Just in time for peak oil, Rethink Energy predicts that there will be a surge of new polysilicon production capacity coming online in the next two years, leading to a glut of solar panels by 2025.

The production capacity of solar panels is expected to exceed 1,000 GW per year by 2030. Pledges made by several dozen companies should see production capacity triple over the next three years. An expansion to nearly 4 million tons of solar-grade polysilicon production capacity will have been announced just in the last few weeks alone. Running at two-thirds capacity utilization would be enough to manufacturer 900 GW of photovoltaics every year.

Chaîne de transformation silicium pour le photovoltaïque

Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022



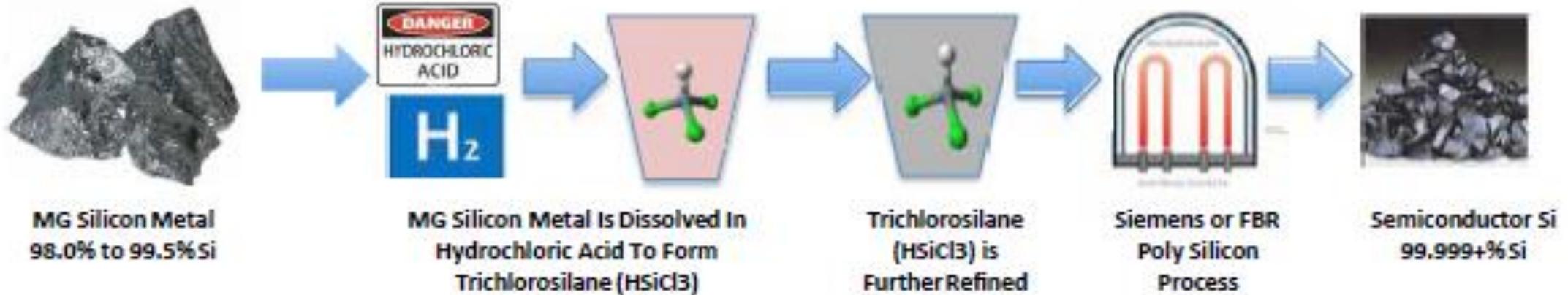
- 1: 4 Mt
 - 2: 3,1 Mt
 - 3: 644 kt
 - 4: 518 kt (17%)
 - Électronique : 40 kt
 - Solaire poly : 148 kt
 - Solaire mono: 331 kt
 - 7: Solaire : 279 kt (-42%)
- 479 kt (15,5%)**

Flux de silicium dans les filières de transformation du silicium métal en 2019, en kt

Extraction silice : 4 millions de tonnes en silicium contenu



Du silicium métallurgique au silicium ultra-pur (polysilicium)



148 000 tonnes PV multicristallin SoG (>6N)
 331 000 tonnes PV monocristallin SoG (>7N)
99,99999 %at
 40 000 tonnes electronque EG (9-11 N)
 Tirage CZ (Czochlalski)

Typical Impurity Level	
Boron	< 0.1 ppba
Phosphorous	< 0.1 ppba
Other Donors	< 0.03 ppba
Carbon	< 0.15 ppm
Transition Metals (Total Cu, Ni, Fe)	< 1 ppba

70 MWh à 120 MWh pour produire une tonne de silicium

→ 15-25 g CO₂/kWh-PV si 800 gCO₂/kWh-ELEC

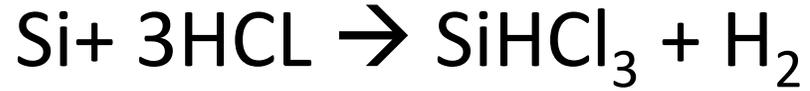
Source: Manufacturing of Silicon Materials for Microelectronics and Solar PV
 Babu Chalamala, Ph.D. Sandia National Laboratory (2018)

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1497235>

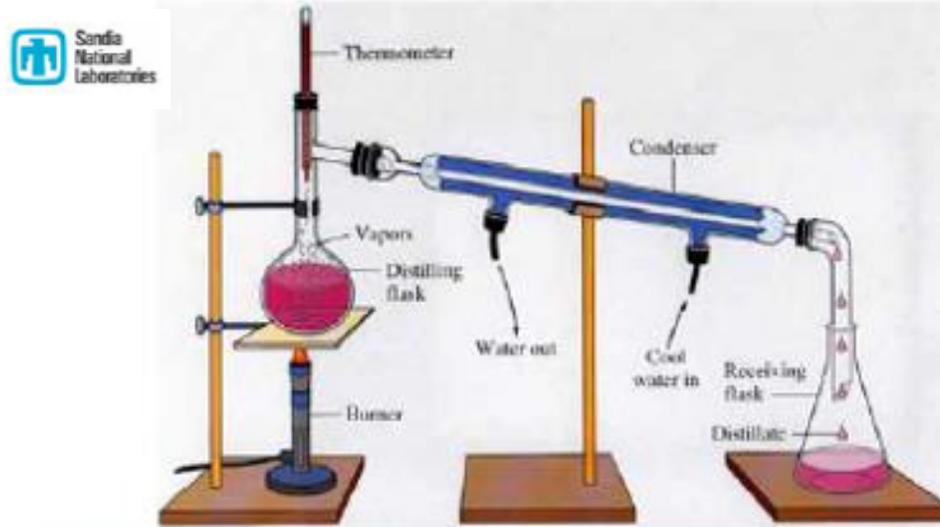
Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Fabrication du trichlorosilane

Distillation



300°C en lit fluidisé
Avec catalyseur
Rendement 90%



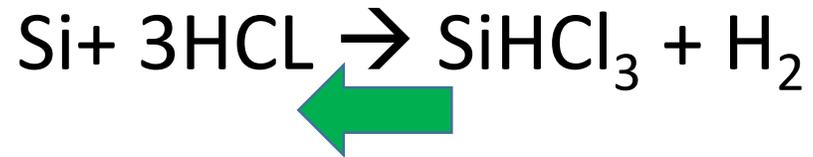
Teneur finale
en impuretés
actives
<1 ppb at%



Source: élémentarium

Fabrication du polysilicium grâce aux équilibres chimiques (étape 4)

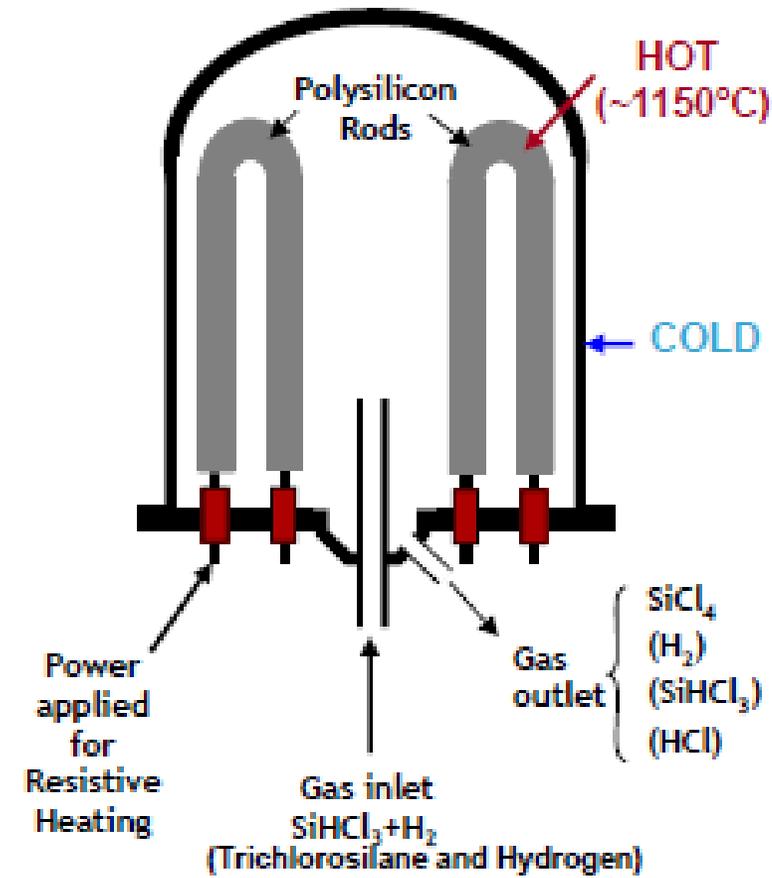
Inversion du sens de la réaction avec la température



Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

à 1150°C

Vitesse de dépôt : 1 mm/h



Vue des fours industriels



Siemen's reactor



Before polysilicon
growth – slim rods



As grown polysilicon
rods after a reactor run

Source: GR Fisher, Proc. IEEE, vol. 100, pp. 1454 – 1474, April 2012

Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Autres procédés, innovations ?

Peut on partir directement de silicium métallurgique ?
Exemple du procédé photosil (France)

Protocole : Choix du silicium métallurgique haute pureté (99,9%)
Société RIMA (Brésil); ScanWafer (Norvège)

a - Fusion sous plasma (Arc ou RF) avec Ar / O₂ / H₂[16] :

- Température de traitement de l'ordre de 2500 K
- Équilibre liquide vapeur : alcalins, eutectiques
- Élimination de B, P par oxydation BO_x : ENSCP, KAWASAKI, ELKEM, RIMA

[17] Procédé et dispositif d'élimination du bore dans le silicium par fusion de zone sous plasma inductif
J. Amouroux, D. Morvan
Brevet USA 28.7789 – 28/07/1981
Brevet International + publications, thèses, programme Joule 1989-1991

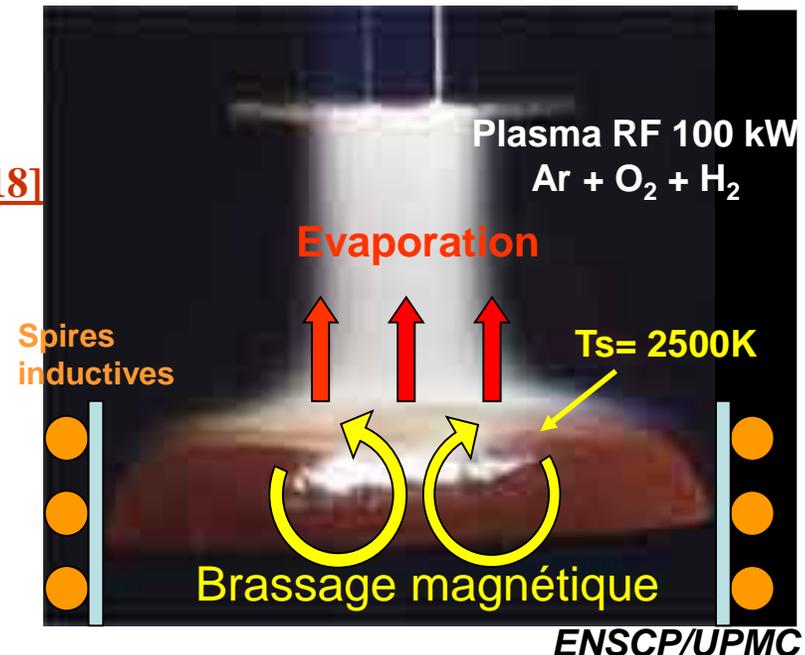
b - Fusion sous plasma avec brassage magnétique du bain [18]

Société APOLLON SOLAR Chambery

- Vitesse maximale de brassage du bain: jusqu'à 90 cm/s
- Transfert rapide des impuretés du liquide vers la surface
- Diminution du temps de traitement

Purification de zone par plasma
Ar / 1% H₂ / 0.1% O₂ (6 passages 60 cm/h)

Impureté	Avant traitement (ppmw)	Après traitement (ppmw)
Al	2800	0.0005
B	20	0.0049
Ca	2100	0.002
Fe	3780	<0.8



Metallurgical route
Plasma torch process: equipment

La métallurgie du silicium solaire

Christian Trassy (christian.trassy@grenoble.cnrs.fr)
Science et ingénierie des matériaux et procédés, UMR CNRS 5266, Grenoble

→ The Photosil project is at a pilot level of development.

Article disponible sur le site
<http://www.refletsdelaphysique.fr> ou
<http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007058>

Segregation step



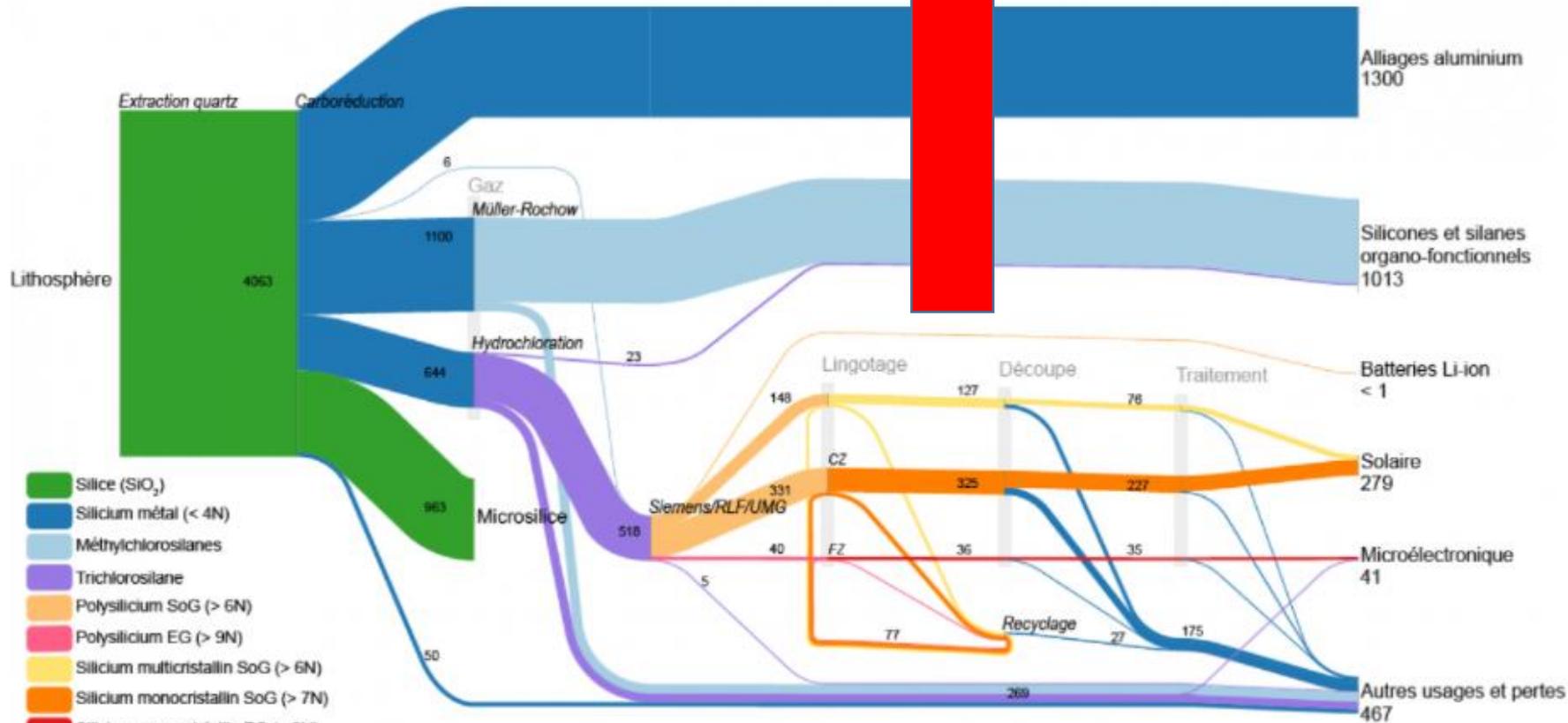
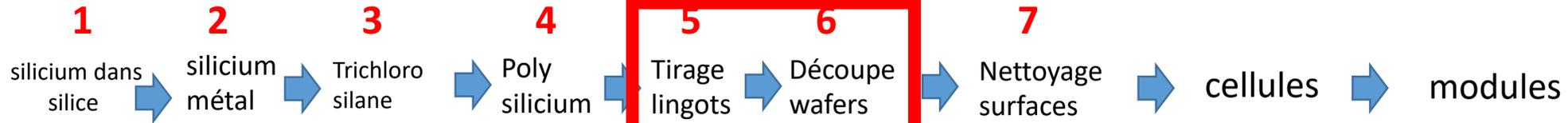
Outside view of the segregation equipment for the production of the upgraded metallurgical silicon

Purification step by plasma torch



Outside view of the plasma purification and solidification unit

Voir également film « Super photon pour Maxi Watt CNRS (2009) »
<https://images.cnrs.fr/video/2020>



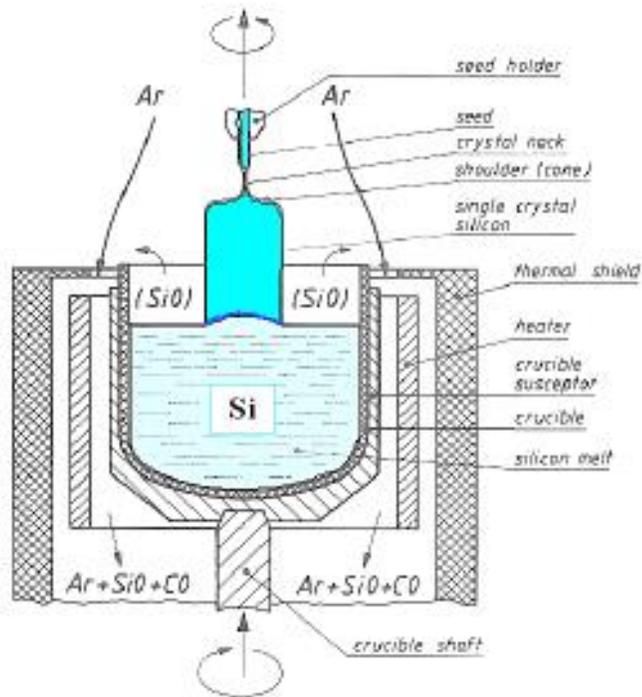
- 1: 4 Mt
 - 2: 3,1 Mt
 - 3: 644 kt
 - 4: 518 kt (17%)
 - Électronique : 40 kt
 - Solaire poly : 148 kt
 - Solaire mono: 331 kt
 - 7: Solaire : 279 kt (-42%)
- 479 kt (15,5%)**

Flux de silicium dans les filières de transformation du silicium métal en 2019, en kt

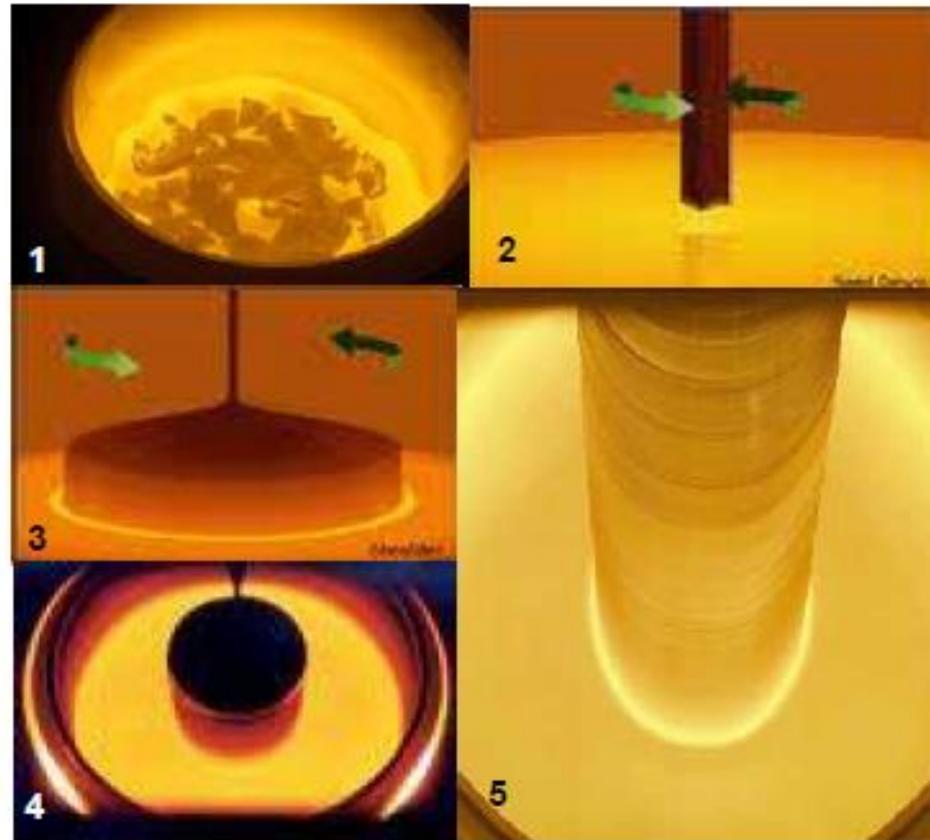
Extraction silice : 4 millions de tonnes en silicium contenu

La méthode reine : croissance de monocristaux

Crystalline Si Czochralski Crystal Growth



Crystal Puller



Various stages of Czochralski crystal growth,
1 Meltdown, 2 Seed Dip, 3 Top, 4 Shoulder, 5 Body

Effet de purification
par ségrégation
des impuretés dans le liquide

Les impuretés n'entrent pas
facilement dans
la phase solide cristalline

Coefficients de partage

La méthode bas coût : le tirage de lingots polycristallins

Film CNRS sur le photovoltaïque (2009) :
Superphoton pour MaxiWatt

Tournage à PHOTOWATT(Bourgoin-Jalieu)

Test des blocs de polysilicium (4)



Version française

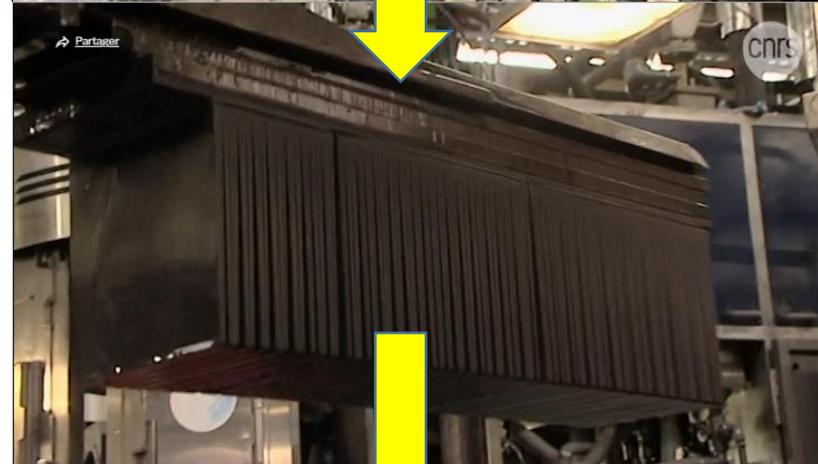
<https://images.cnrs.fr/video/2020>

Version en anglais

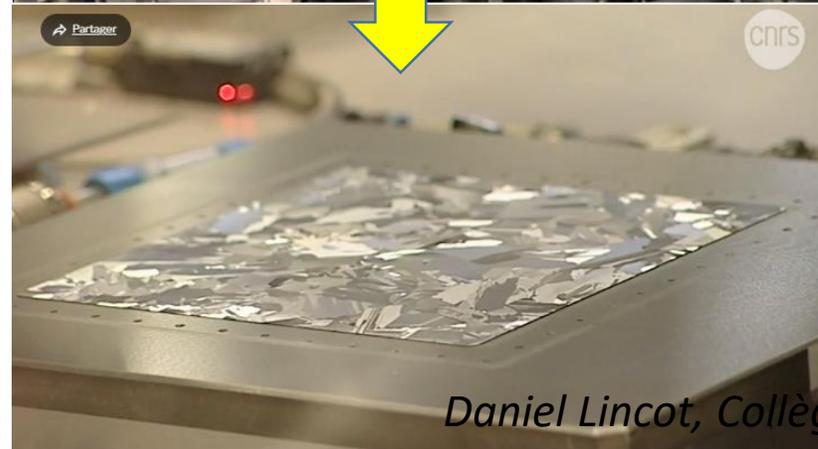
<https://images.cnrs.fr/en/video/2020>



Lingot en sortie de four
(5)



Sciage des plaquettes
(6)

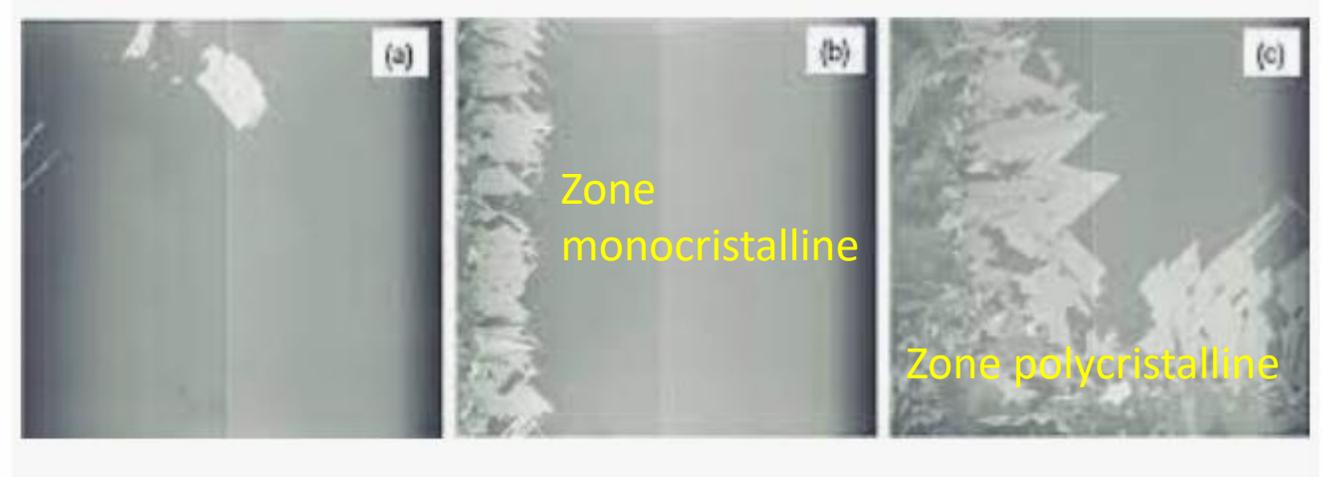
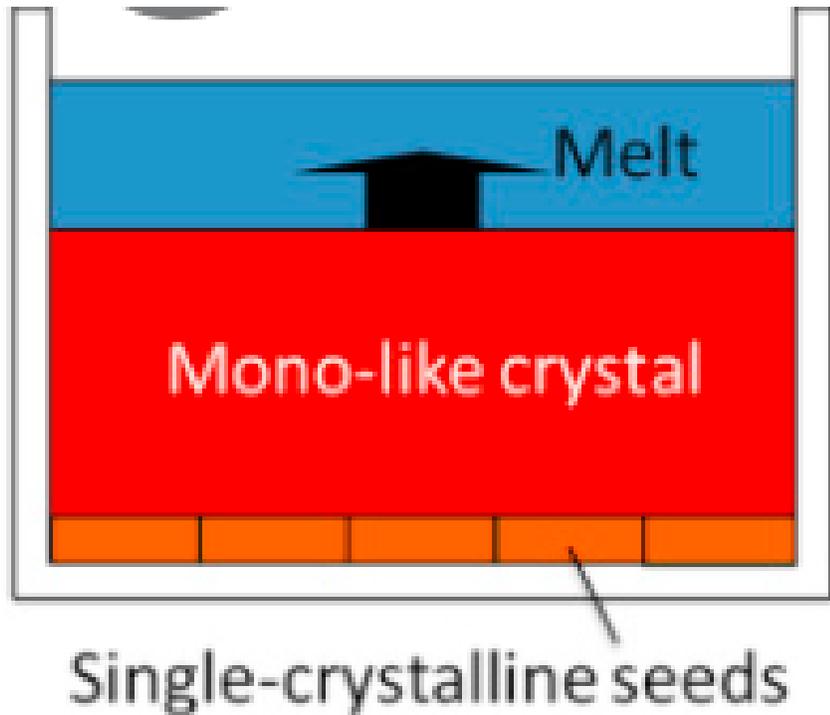


Wafer après nettoyage
Prêt pour la fabrication
des cellules
(7)

Autres procédés, innovations ?

Peut on faire du monocristallin bas coût?

Concept Monolike (ECM, Photowatt...)

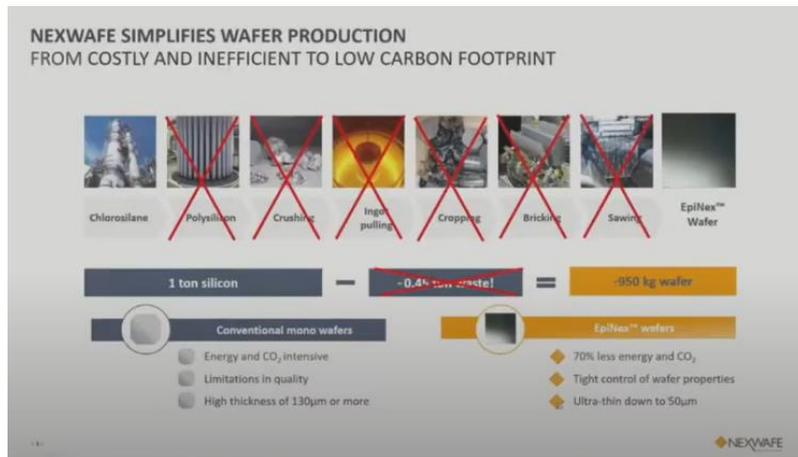


T. Kaden et al. / Energy Procedia 27 (2012) 103 – 108

Quasi-mono ou monolike (ECM grenoble et Photowatt en France) : 2% du marché en 2019, arrivée du chinois GCL en 2018

Technologies sans sciage ?

A partir du trichlorosilane



Start up Nexwafe (Fraunhofer)

<https://www.nexwafe.com/epinex-process>

Coulage direct

Direct Wafer Manufacturing

The bedrock for a tandem device and the key to ultra-low-cost solar.

Direct Wafer technology manufactures silicon wafers the way they should have been made from day one: in one step, directly from a bath of molten silicon. The resulting product delivers the world's lowest cost of electricity today, offers a significant reduction in carbon footprint over conventional methods, and produces the ideal bottom cell for high-efficiency tandem modules.

Learn More >

<https://cubicpv.com/technology/>

Autres : tirage de rubans à partir de bains fondus...*

A. Goetzberger et al, Solar Energy Materials and Solar Cells 74(2002)1

Analyses de cycle de vie -recyclage

A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory

Amelie Müller, Lorenz Friedrich, Christian Reichel, Sina Herceg, Max Mittag, Dirk Holger Neuhaus

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany

A. Müller et al.,
Solar Energy Materials and Solar Cells 230 (2021) 111277

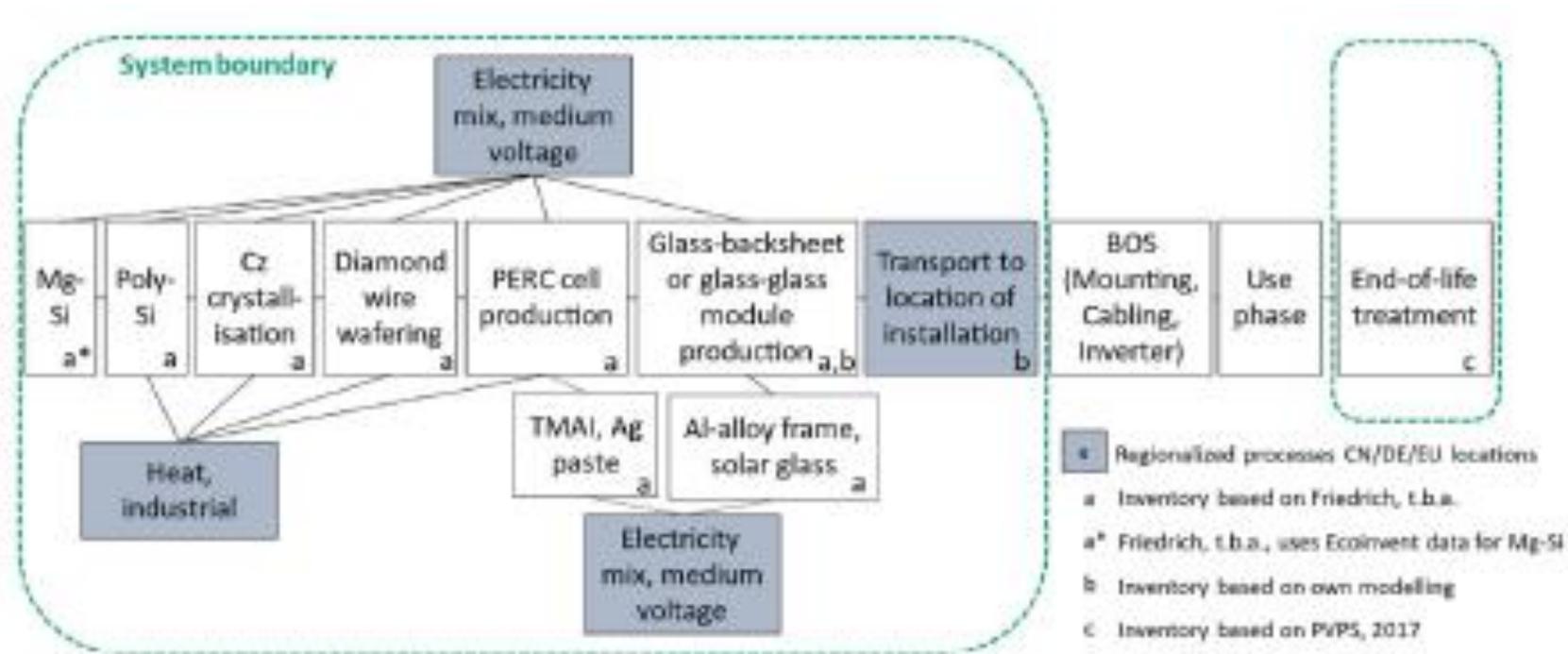
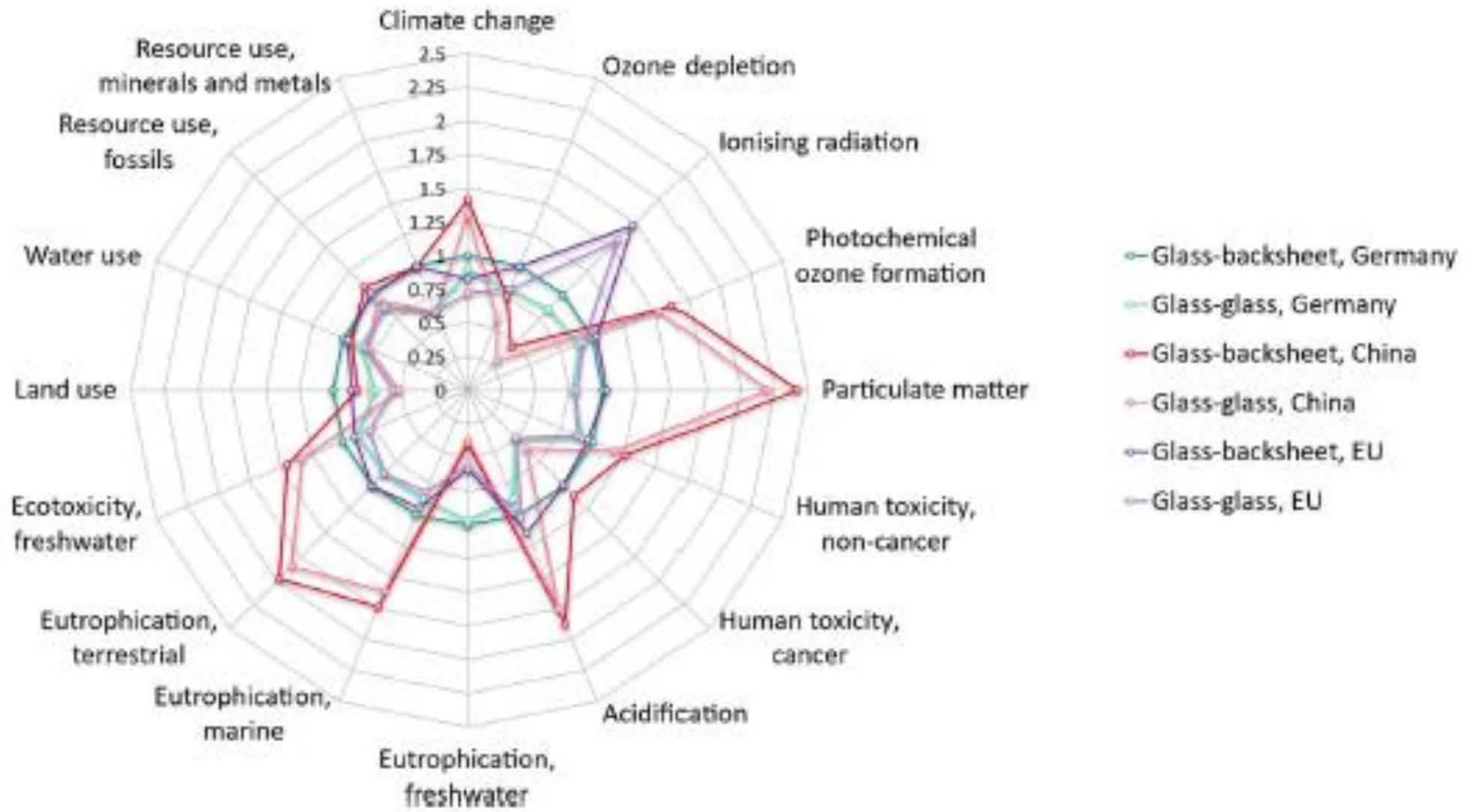


Fig. 2. System boundaries of this study. Adopted from Friedrich et al., t.b.p [30]. Ecoinvent v3.7 [22] is used in this study.



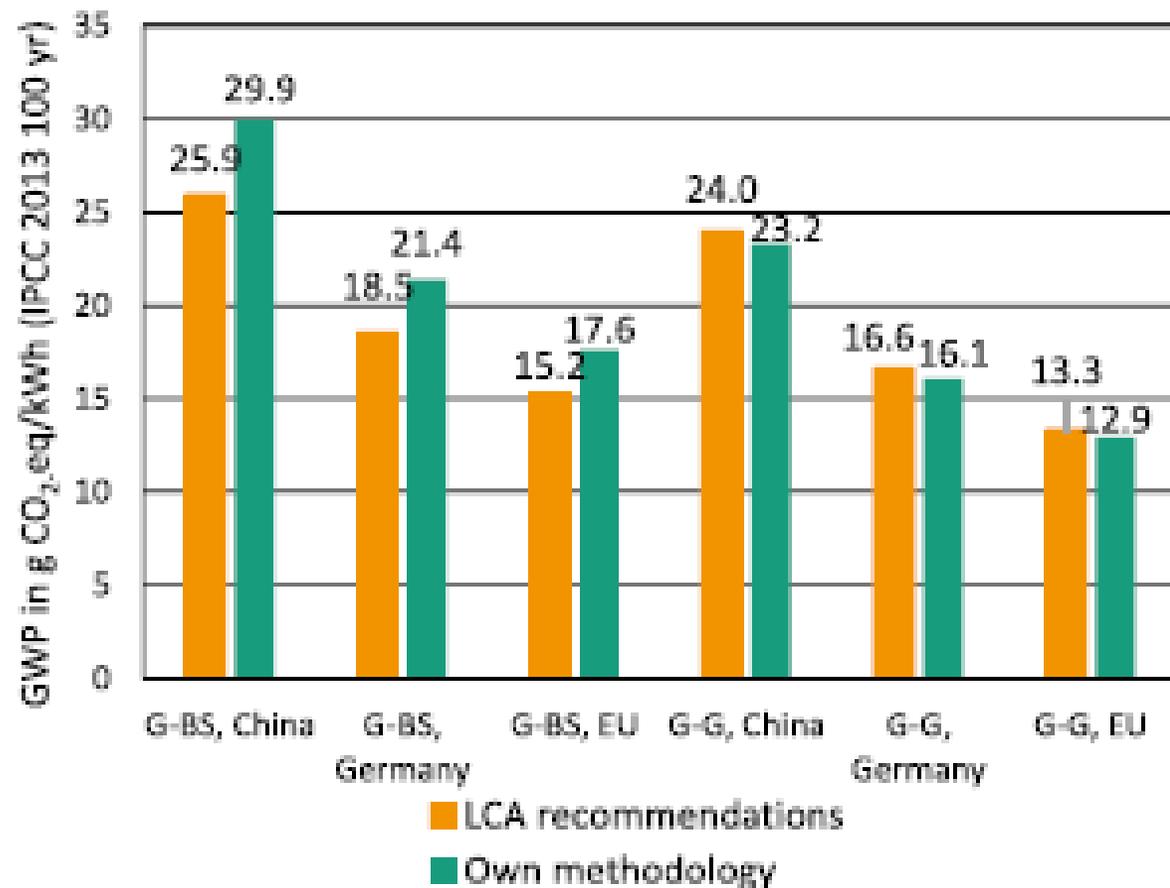


Fig. 7. Climate change: Global Warming Potential (GWP) in g CO₂-eq/kWh of *sc*-Si glass-backsheet and glass-glass modules produced in China, Germany or the EU using IPCC 2013 100-year method. Including production, transport and end-of-life. Excluding BOS, installation and operation. Installation location is an average European location (1391 kWh/(m²yr) solar irradiation). Orange: calculation based on recommendations of IEA PVPS 2020 for LCA of PV systems (LT = 30 yr, PR = 0.75, DR included in PR). Green: calculation based on own methodology using average of module performance warranties given by PV module producers (LT = 25.44 yr (G-BS), 29.89 yr (G-G), PR = 0.85, DR_{1st year} = 2.67% (G-BS), 2.55% (G-G), DR_{following years} = 0.64% (G-BS), 0.45% (G-G). Including production, transportation and end-of-life; excluding BOS, installation and operation. LCI listed in SI. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

ANALYSIS

[View Article Online](#)
[View Journal](#) | [View Issue](#)



Cite this: *Energy Environ. Sci.*,
2021, 14, 5587

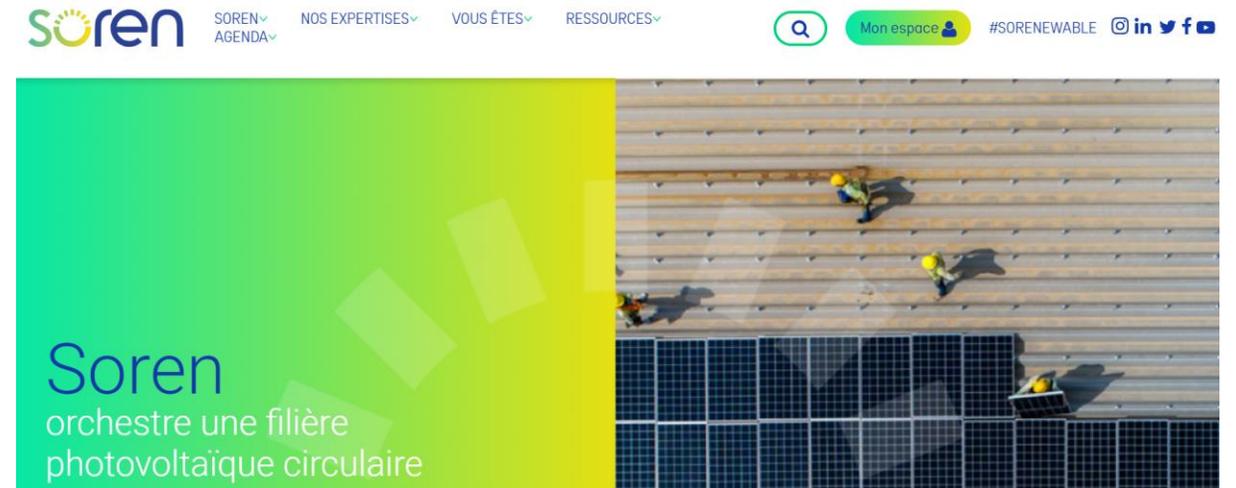
Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption

Yuchao Zhang,  ^{†*a} Moonyong Kim,  ^{†a} Li Wang,  ^a Pierre Verlinden  ^{abcd} and Brett Hallam  ^a

Le Recyclage



<https://pvcycle.org/?lang=fr>



<https://www.soren.eco/>



November 8, 2021

IMPLEMENTATION OF END-OF-LIFE
ASSESSMENT IN THE CURRENT LCA FOR
PEROVSKITE ON SILICON TANDEM

Faïza SOUMANE

Internship supervisors:

Caterin SALAS-REDONDO, IPVF

Lars OBERBECK, IPVF and TotalEnergies

Internship place :

Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France, Palaiseau France

TotalEnergies Gas, Renewables & Power, Paris La Défense Cedex, France

Daniel Lincot, Collège de France, 16/02/2022

Acteur de la semaine : Rosi Solar lance l'industrialisation de sa technologie de recyclage

Rosi Solar a développé une solution industrielle capable de récupérer le silicium de haute pureté, l'argent et le cuivre contenus dans les modules PV en fin de vie. Avec un processus de séparation thermique et chimique avancé, la start-up grenobloise poursuit son développement en R&D et en application commerciale pour redonner de la valeur aux matériaux des modules solaires en Europe et à l'international.

FÉVRIER 14, 2022 MARIE BEYER

En ce qui concerne la France seule, les besoins en recyclage pourraient être de 150 000 tonnes d'ici 2030, selon l'éco-organisme chargé du recyclage des panneaux solaires Soren (ex-PV Cycle France).

Autre acteur industriel : Véolia à Rousset

<https://www.pv-magazine.fr/2022/02/14/acteur-de-la-semaine-rosi-solar-lance-lindustrialisation-de-sa-technologie-de-recyclage/>



Collaboration avec ADEME, CNRS, Véolia, Europe

Procédé innovant : chimique + thermique

Usine à La Mure en Isère

Début : fin 2022

Objectif : 3000 tonnes de panneaux solaires/an,
90 tonnes de silicium ultrapur,
3 tonnes d'argent

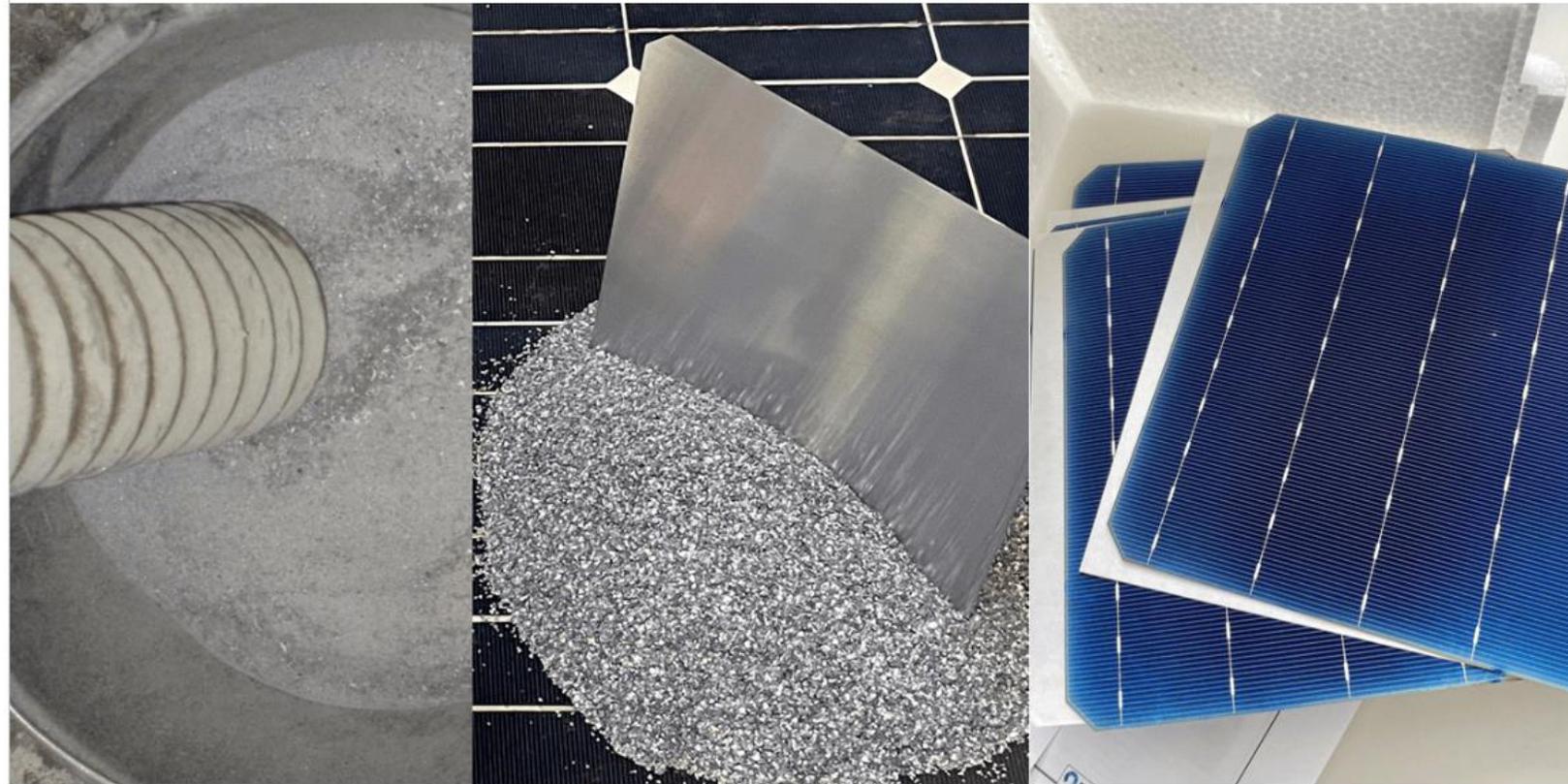
PRESS RELEASE

PRESS RELEASE

February 7, 2022 || Page 1 | 4

PERC Solar Cells from 100 Percent Recycled Silicon

Around ten thousand tons of silicon in discarded photovoltaic modules end up on the recycling market annually in Germany. This figure will rise to several hundred thousand tons per year by 2029. Currently, the aluminum, glass and copper of the discarded modules are reprocessed, however, the silicon solar cells are not. In order to be able to reuse the silicon, researchers from the Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics CSP and the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE together with the largest German recycling company for PV modules, Reiling GmbH & Co. KG, have developed a solution, in which the silicon in the discarded modules was recycled on an industrial scale and reused to produce new PERC solar cells.

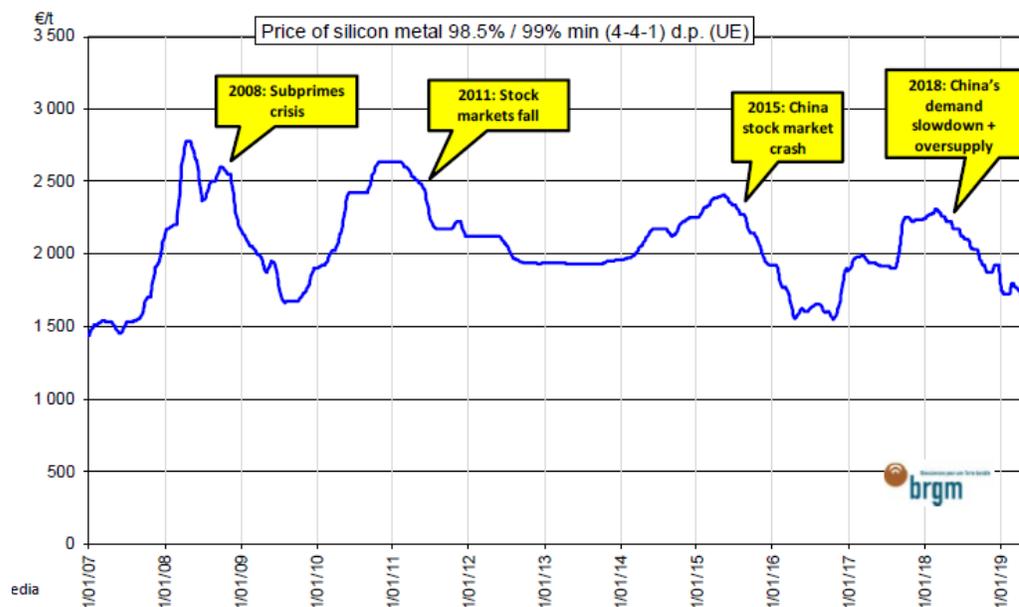
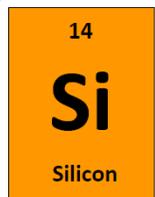


By-products of the treatment process at Reiling GmbH, from which the solar cell fragments are separated and collected (left). Purified silicon and wafers made from 100% recycled silicon (middle). PERC solar cells made

© Fraunhofer ISE

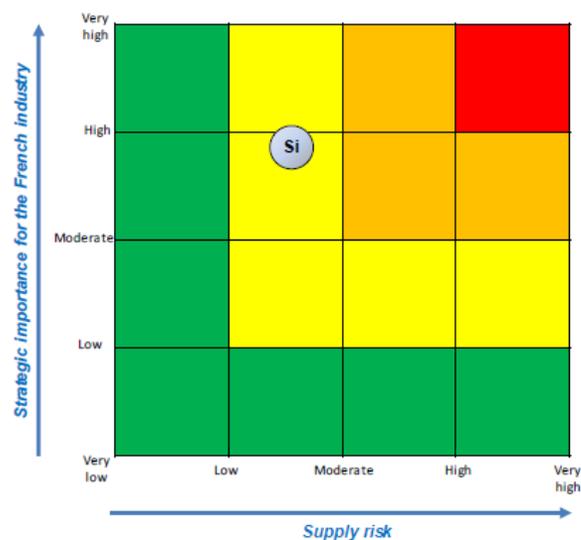
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/solar-cells-from-recycled-silicon.html>

Criticality assessment - Silicon metal



Criticality matrix

Silicon metal criticality



Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)

Final Report

Très complet

Economic importance

- Silicon metal is essential to several industrial sectors (aluminum, silicones, solar, electronics, and others)

Supply risks

- France has large resources of high-purity quartz
- Global leader, group Ferroglobe, is the unique producer of silicon metal in France (subsidiary FerroPem)
- Solar-grade and electronic-grade silicon metals are not produced in France

Dire que le silicium est rare ou que le PV utilise des terres rares est pourtant répandu : (ex: livres A. Lauvergeon, G. Pitron...)

Conclusions et perspectives

- Ressources considérables en silicium
- Processus de fabrication de silicium métal relevant de la grande métallurgie, pyrométallurgie avec carbo-réduction
- Processus de purification à grande échelle par distillation et condensation
- Production des plaquettes par sciage et décapage, évolution vers des plaquettes monocristallines
- Mise en place du recyclage et analyse fouillée de cycle de vie
- **Pistes d'innovations :**
 - Utilisation de sable (du désert?)
 - remplacement de la carbo-réduction par réduction hydrogène ? (CF évolution de la production d'acier dans ce sens, Arcelor Mittal)
 - Purification directe du silicium métallurgique
 - Croissance de lingots monocristallins par procédé « monolike »
 - Réduction des pertes par sciage : faire des plaquettes par clivage, dépôt CVD direct ou coulage direct ?

Annexes

Energy &
Environmental
Science



ANALYSIS

[View Article Online](#)
[View Journal](#) | [View Issue](#)



Cite this: *Energy Environ. Sci.*,
2021, **14**, 5147

Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics

Jan Christoph Goldschmidt, *^a Lukas Wagner, ^a Robert Pietzcker ^b and
Lorenz Friedrich ^a

[nature](#) > [nature sustainability](#) > [analyses](#) > article

Analysis | [Published: 20 January 2022](#)

The aluminium demand risk of terawatt photovoltaics for net zero emissions by 2050

[Alison Lennon](#) , [Marina Lunardi](#), [Brett Hallam](#) & [Pablo R. Dias](#)

[Nature Sustainability](#) (2022) | [Cite this article](#)

PHOTOVOLTAICS REPORT



Prepared by

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE
with support of PSE Projects GmbH

Freiburg, 27 July 2021

www.ise.fraunhofer.de