



LE CYCLE DU CUIVRE



Webinaire n°5
Du 9 janvier 2025
Michel Jauzein,
Professeur de Science des Sols



Le cycle du Cuivre

- Le Cuivre et ses ressources planétaires
- Cycle biogéochimique du Cuivre
- Usage et Cycle de vie du Cuivre



1 – LE CUIVRE ET SES RESSOURCES PLANÉTAIRES

—

Le Cuivre : Cu

- ***Un « métal lourd » (plus de 5 g/cm³)***
 - Un élément métallique de transition parmi les moins lourds
 - Son nom vient du latin *cyprum*, désignant l'île de Chypre où il était extrait par les Romains.
 - Il est utilisé par l'Homme depuis plus de 5000 ans
 - Au contact de l'air, il réagit pour former de l'hydroxycarbonate de cuivre, le « vert de gris » des objets en cuivre
- ***Un élément trace métallique de la croûte terrestre***
 - Présent naturellement en faible quantité, mais toxique au-delà d'un certain seuil
- ***Un élément trace essentiel de la biosphère***
 - C'est un oligo-élément, élément nécessaire à la vie, mais en faible quantité

Cuivre natif (pépité)



Le Cuivre : Cu

Numéro atomique 29

Masse atomique 63,55 g/mol.

Dureté 3

Masse volumique 8,92 g/cm³.

Température de fusion de 1083,4°C

Tuyaux de cuivre

Teneur moyenne dans la croûte terrestre 55 ppm

On le retrouve dans plus de 165 minéraux

Des sulfures et des hydroxycarbonates en particuliers



Le cuivre est souvent accompagné d'autres « métaux lourds »

Fe (fer), Co (cobalt), Ni (nickel), Mo (molybdène), Zn (zinc), Ag (argent), Au (or) ...

Le Cuivre Cu : les minerais

- **Les gisements sulfurés (réduits)**

- principalement de type porphyres cuprifères
- On y retrouve surtout des sulfures, souvent associé au fer (Fe) :
 Cu_2S (chalcosine), CuFeS_2 (chalcopyrite), Cu_5FeS_4 (bornite)

- **Les gisements oxydés (carbonatés)**

- souvent présents dans les parties supérieures des gisements sulfurés, zones d'altérations importantes
- On y retrouve des formes oxydées, souvent sous forme de carbonates, d'oxydes ou d'hydroxydes :
 $(\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2)$ (malachite), $(2\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2)$ (azurite), Cu_2O (cuprite)



Chalcopyrite © CC Didier Descouens



Malachite et Azurite © PD Parent Géry

Les gisements de Cuivre Cu

En milliers de tonnes de cuivre contenu, en 2023, sur un total mondial de 22,413 millions de t. Source : Cochilco

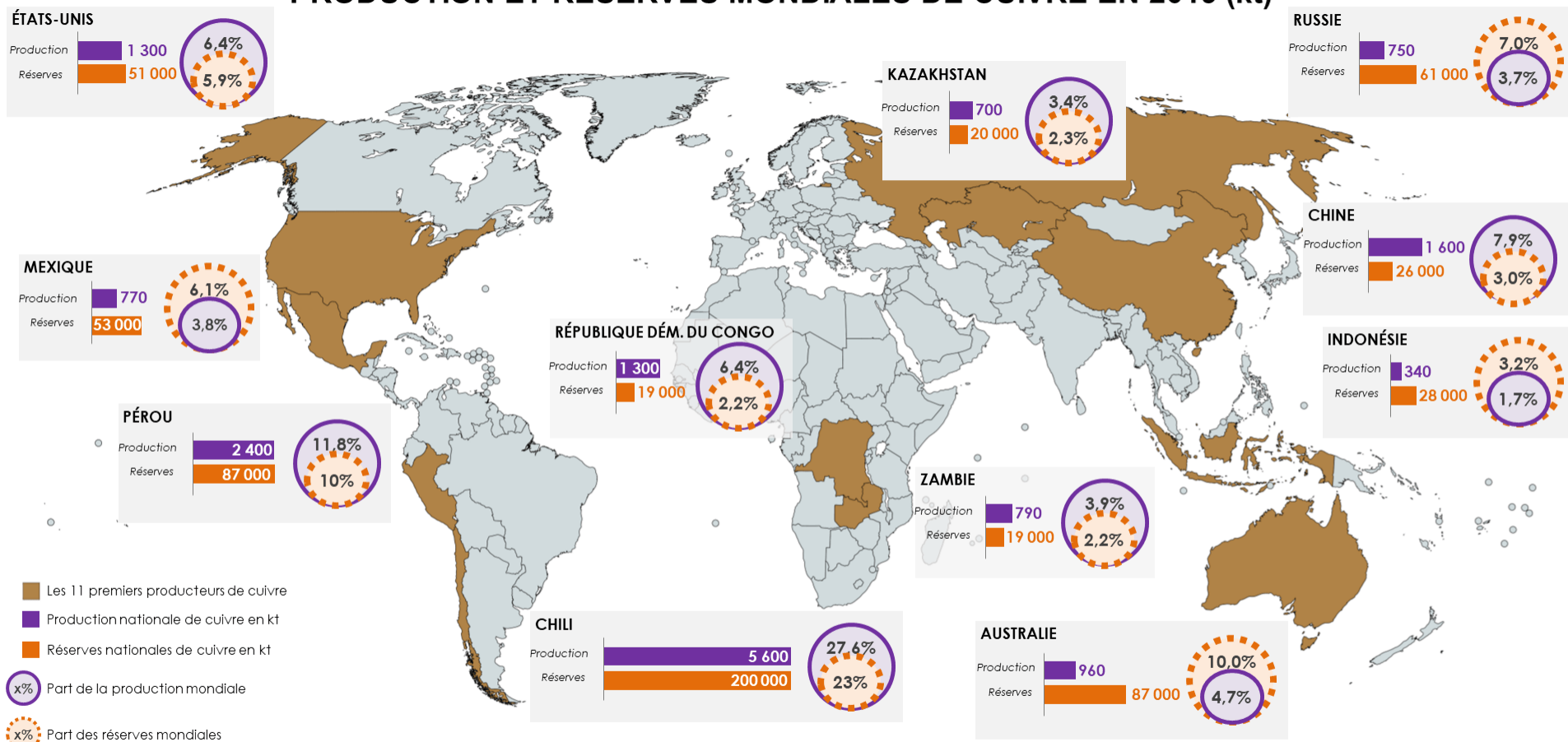
en milliers t de Cu contenu

Chili	5 250	Indonésie	894
R. D. du Congo	2 842	Kazakhstan	868
Pérou	2 755	Australie	797
Chine	1 685	Mexique	726
États-Unis	1 118	Zambie	698
Russie	1 000	Canada	500

Sources : Cochilco

Les gisements de Cuivre Cu

PRODUCTION ET RÉSERVES MONDIALES DE CUIVRE EN 2019 (kt)



Source : U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020
Carte créée par IFP Energies Nouvelles avec Mapchart.net



2 – CYCLE BIOGÉOCHIMIQUE DU CUIVRE

—

Les données du cycle du Cu

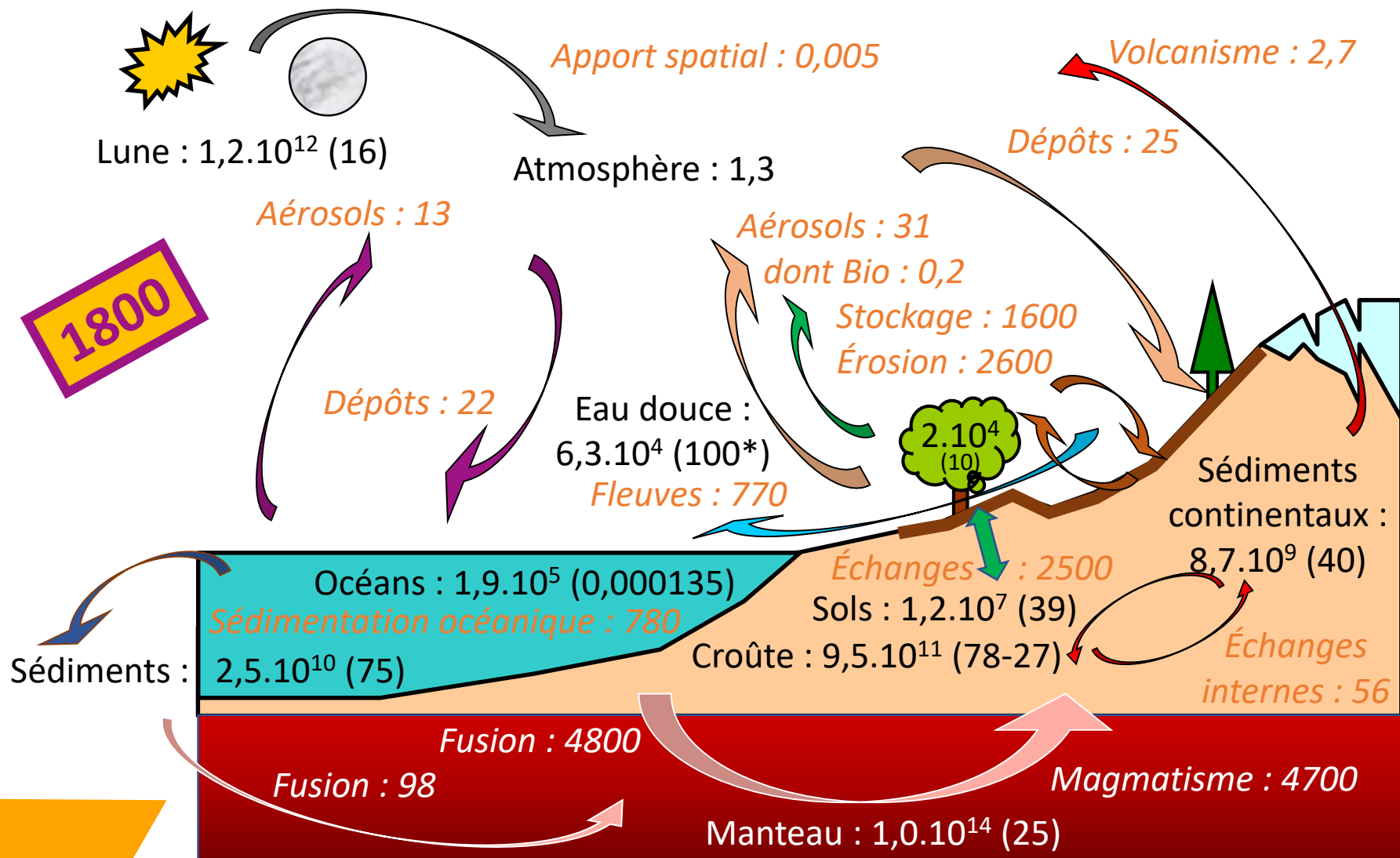
- ***Rauch, J. N., and T. E. Graedel (2007)***
 - Earth's anthrobiogeochemical copper cycle, Global Biogeochem. Cycles, 21, GB2010, doi:10.1029/2006GB002850
- ***Résumé traduit de la publication :***

« Un cycle « anthrobiogéochimique » du cuivre, du noyau terrestre à la Lune, combinant les stocks et les flux biogéochimiques naturels et anthropiques d'origine humaine, est calculé pour le milieu des années 90. Bien que certaines données de la quantification comportent des incertitudes moyennes à élevées, les flux anthropiques d'exploitation minière, de fabrication et d'utilisation (de l'ordre de 10^4 Gg Cu/an) dominant clairement le cycle. En revanche, les matériaux du noyau, du manteau et de la croûte terrestres, et ceux de la Lune, contiennent des stocks beaucoup plus élevés de cuivre ($> 10^{10}$ Gg) que les dépôts anthropiques ($< 10^6$ Gg). Les résultats indiquent un facteur d'environ 10^6 entre le flux anthropique d'extraction du cuivre et le flux naturel de renouvellement des réserves souterraines de la croûte terrestre.»
- ***Les données de cette publication ont été utilisées***
 - Pour créer les schémas du cycle du cuivre qui suivent, pour illustrer les stocks et les flux de cuivre entre 1800 et 1950

Stocks et Flux naturels de Cu

Données d'après Rauch, J. N., and T. E. Graedel (2007), Earth's anthrobiogeochemical copper cycle, Global Biogeochem. Cycles, 21, GB2010, doi:10.1029/2006GB002850

Unités : Gg (ppm) ; *Gg/an*



* Eau de surface : particules en suspension

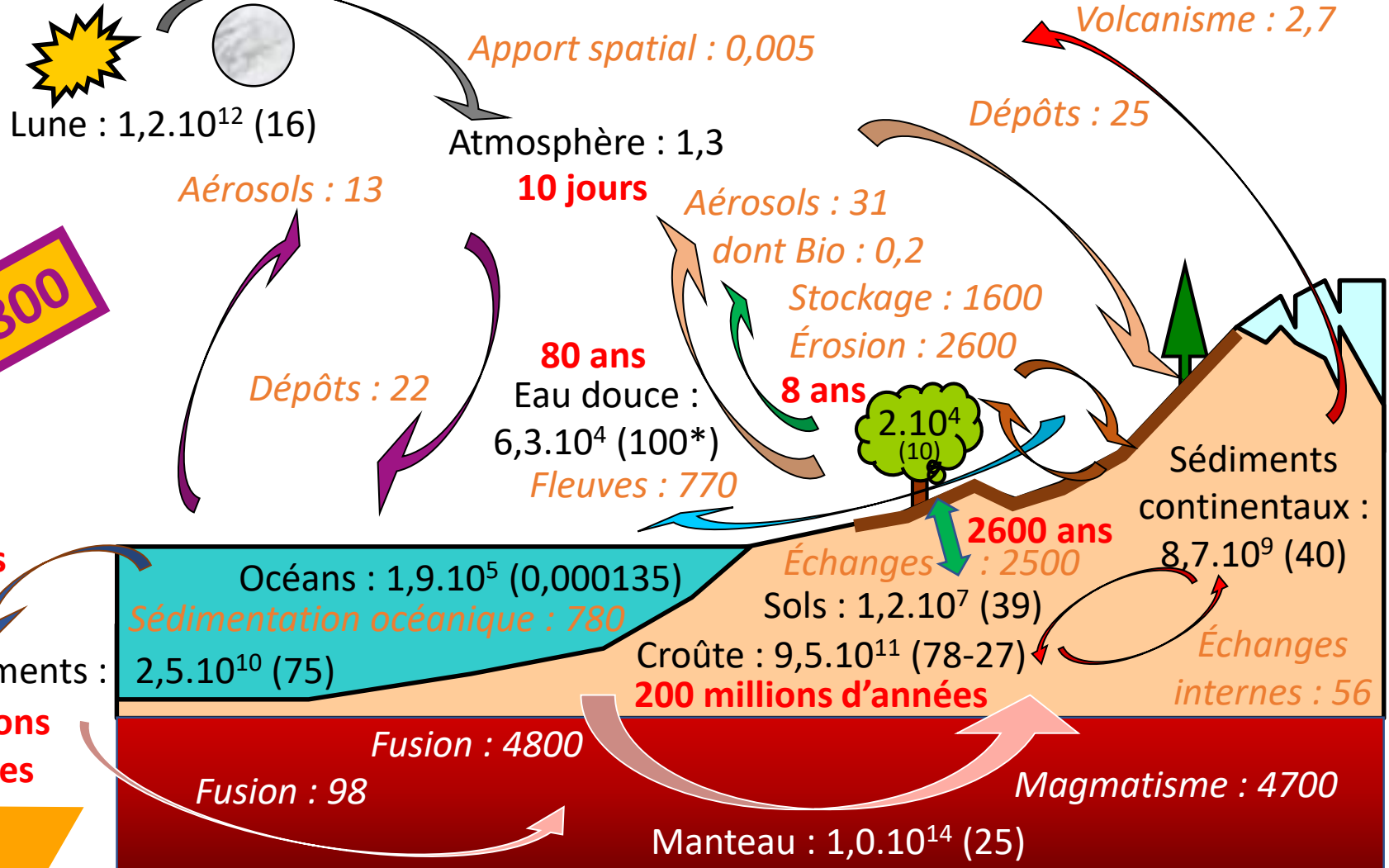
© Schéma personnel, Michel Jauzein, 2024

Stocks et Flux naturels de Cu

Données d'après Rauch, J. N., and T. E. Graedel (2007), Earth's anthropiogeochemical copper cycle, Global Biogeochem. Cycles, 21, GB2010, doi:10.1029/2006GB002850

Univers : $1,8 \cdot 10^{39}$ (0,06)

Unités : Gg (ppm) ; *Gg/an* ; **temps de séjour**



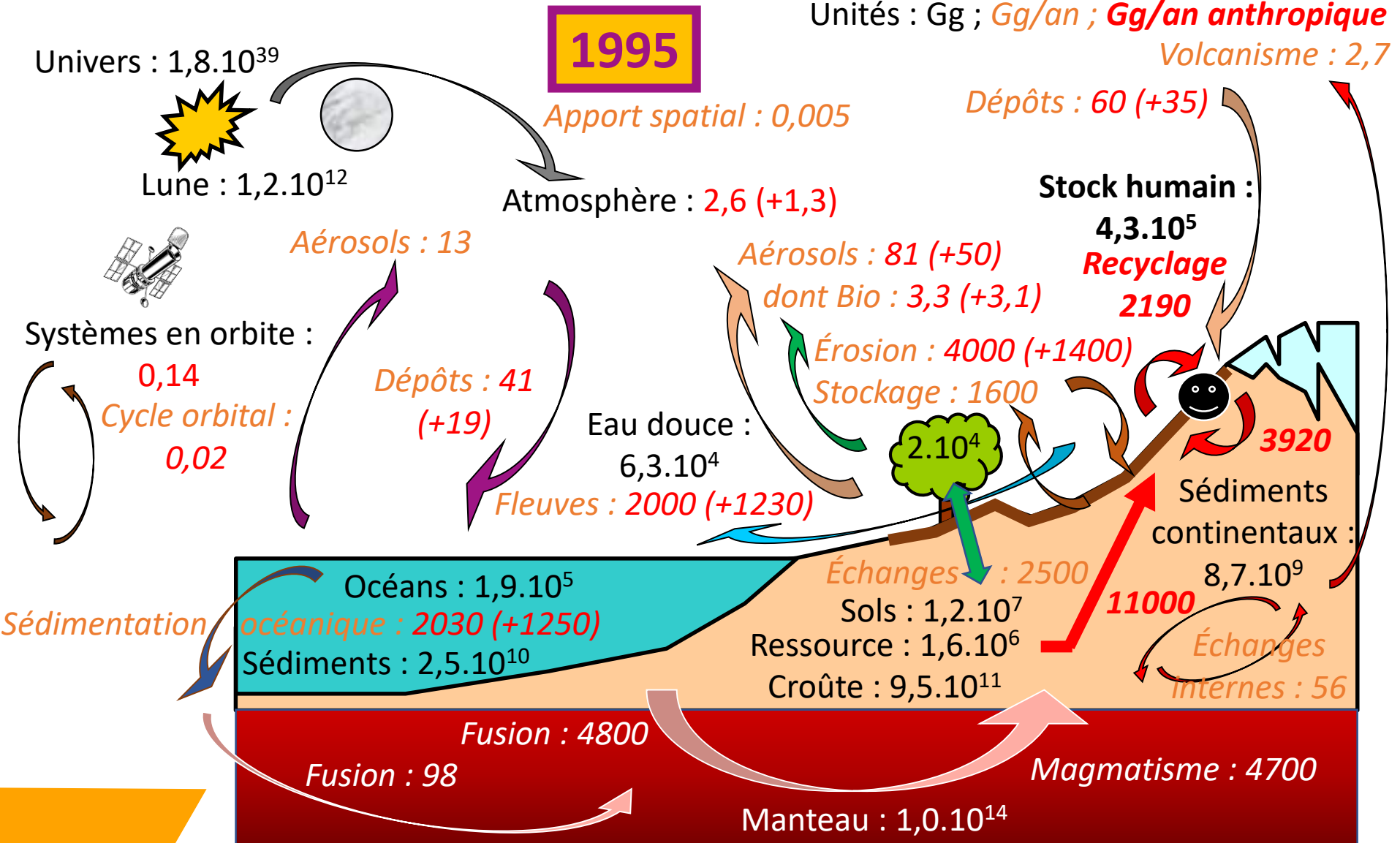
* Eau de surface : particules en suspension

© Schéma personnel, Michel Jauzein, 2024

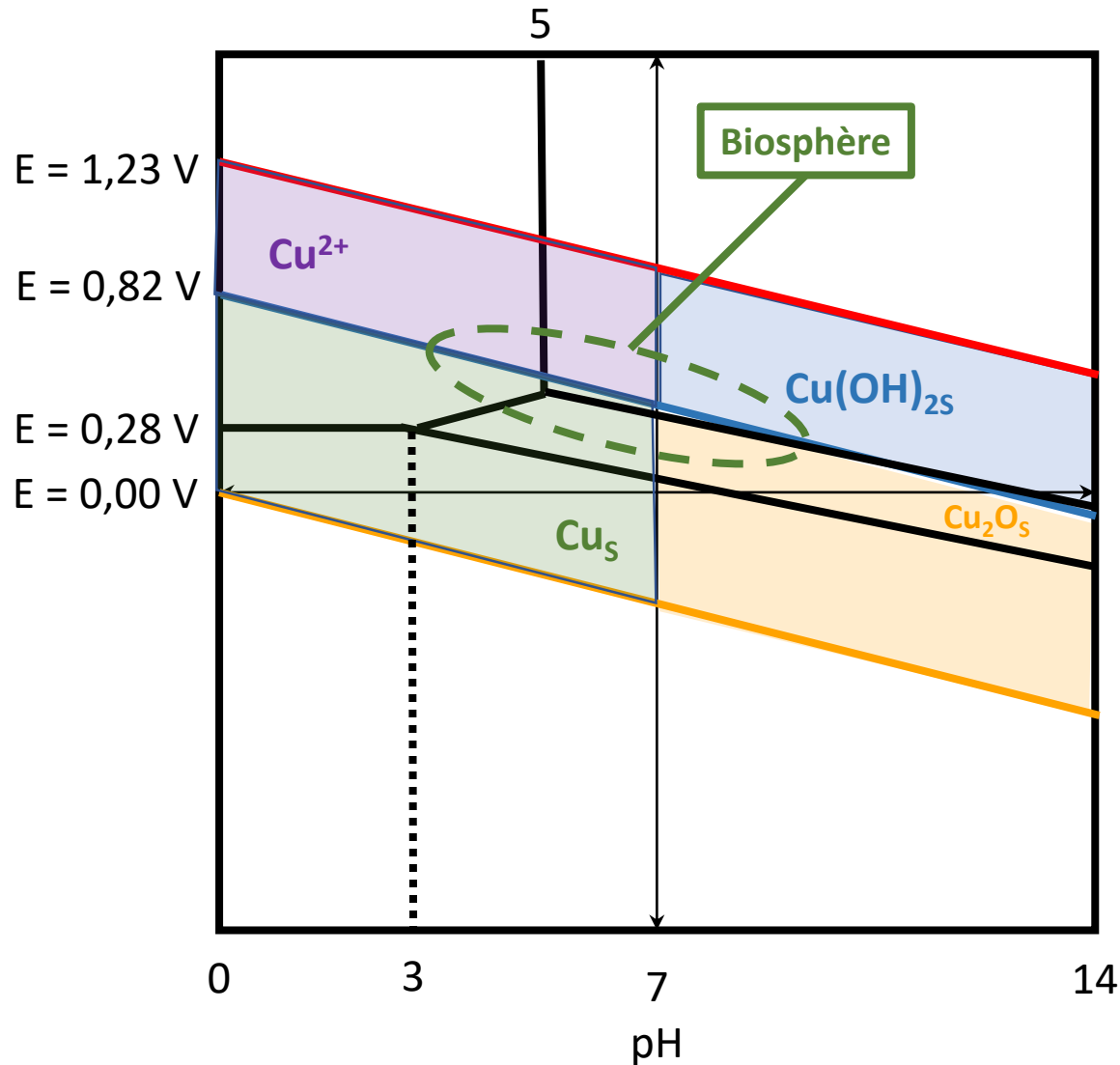
Flux anthropiques de Cu

Données d'après Rauch, J. N., and T. E. Graedel (2007), Earth's anthropobiogeochemical copper cycle, Global Biogeochem. Cycles, 21, GB2010, doi:10.1029/2006GB002850

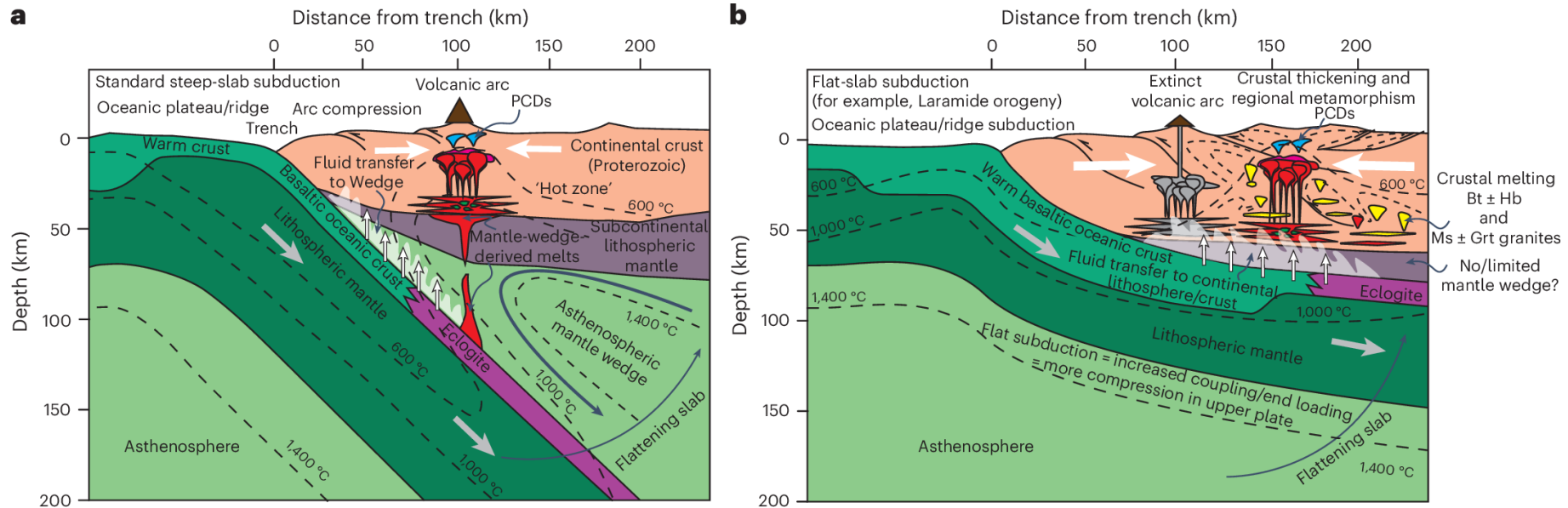
Unités : Gg ; *Gg/an* ; *Gg/an anthropique*



Le cuivre dans l'hydrosphère : diagramme Eh/pH du Cuivre



Dans la lithosphère, formation des gisements de porphyres cuprifères (PCD) :



a subduction « standard » à pendage abrupt, avec arc magmatique et PCD provenant de fontes dérivées du manteau en coin. **b** Subduction à pendage faible où l'écoulement forcé dans le manteau coincé est interrompu et les substances volatiles dérivées de la plaque (H_2O , CO_2 , Cl et S) passent directement dans la base de la croûte, déclenchant une fonte partielle de la croûte en présence d'eau, un magmatisme granitique et, potentiellement, une formation de PCD. Bt, biotite ; Hb, hornblende ; Ms, muscovite ; Grt, grenat.

Le Cuivre, bienfait du vivant

- ***Un oligo-élément essentiel pour l'homme***

- Assimilé dans l'intestin, en compétition avec le zinc (Zn), il est transféré vers le foie grâce à deux protéines dont la protéine de Wilson.
- Stocké, distribué et régulé par la céruloplasmine dans le corps (95 % du Cu porté par cette protéine avec jusqu'à 8 atomes de Cu par molécule)
- Le cuivre participe à la mobilisation du fer (Fe) dans le sérum
- C'est un cofacteur d'enzymes du métabolisme cellulaire :
 - Système de défense contre les radicaux libres (puissant antioxydant permettant de lutter contre le stress oxydant)
 - Fonctionnement des mitochondries (centrale énergétique des cellules)
 - Synthèse de la kératine, de l'élastine et du collagène (souplesse de la peau)
 - Conversion de la dopamine en noradrénaline
 - Conversion de la tyrosine en mélanine

- ***Un oligo-élément essentiel chez les mollusques et les arthropodes (crustacés, araignées, scorpions, insectes, myriapodes...)***

- Il remplace le fer (Fe) pour le transport de l'oxygène (O₂) avec l'hémocyanine, remplaçant ainsi l'hémoglobine comme pigment respiratoire, plutôt bleuté

Le Cuivre, bienfaits et méfaits chez les plantes

- ***Un oligo-élément essentiel pour les plantes***

- Le cuivre joue un rôle important dans la plante au niveau de la respiration cellulaire, de la photosynthèse et de l'absorption de l'azote. Il augmente le taux de protéines et le nombre de grains par épi chez les céréales. Il améliore la résistance aux maladies.



Possibilité de carences en cuivre pour les végétaux

Effet sur la fructification et la bonne production de graines

< 2-5 ppm pour 5 % MO
Cu extractible à l'EDTA

Possibilité d'effet toxique pour les végétaux

Effet sur la fonction photosynthétique, jaunissement « chlorose » de céréales suite à la viticulture intensive

MO = Matière Organique



> 250 ppm pour 5 % MO
Cu extractible à l'EDTA

Le Cuivre, un toxique pour le vivant

- ***Moyennement toxique pour l'homme***

- Danger principalement ciblé sur le foie, avec des vomissements et des troubles gastro-intestinaux
- Effet sur la mobilité des spermatozoïdes
- Chez certains individus, la maladie de Wilson (liée aux fonctions de la protéine de Wilson) provoque l'accumulation de Cu par manque de régulation et plus de toxicité induite dans l'organisme
- Les directives de qualité pour l'eau potable de l'OMS recommandent une limite de 2 mg/l (2 ppm), la DL50 du rat est de 30 mg/kg (30 ppm)

- ***Toxique pour les poissons et les mollusques***

- DL50 variables de 50 à 70 mg/l (50 à 70 ppm)

DL50 = Dose Létale 50%

- ***Biocides pour les bactéries, les champignons et les algues***

- Exemple de la bouillie bordelaise à base de sulfate de cuivre pour la vigne contre le mildiou (un champignon)
- Utilisé depuis l'antiquité pour soigner les infections chez l'homme
- Il limite le risque de contamination des réseaux d'eau potable
 - La présence de cuivre sur les ouvrages limite le développement de mousses et lichens (toits), ainsi que les voiles noirs liées aux cyanobactéries (murs et façades)



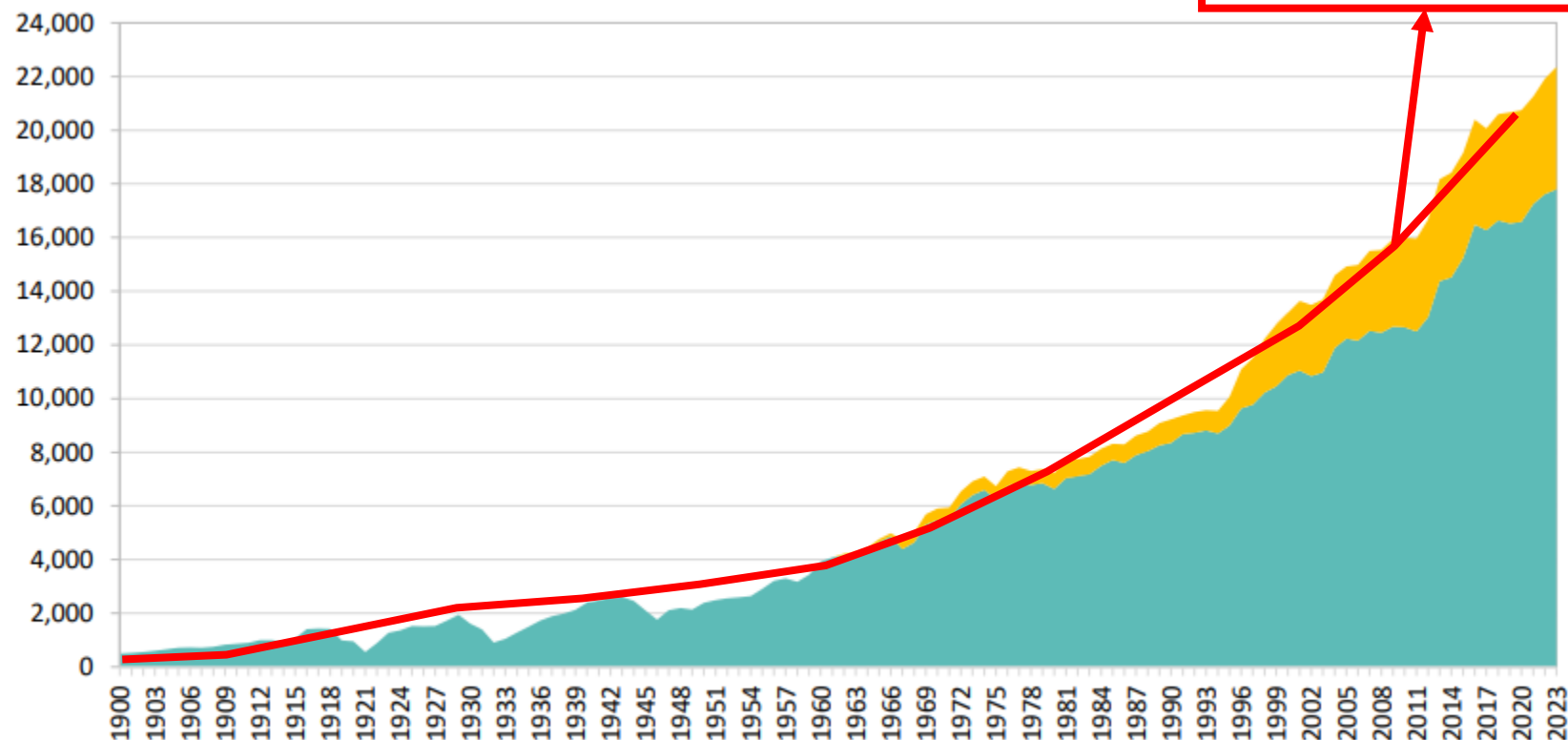
3 – USAGE ET CYCLE DE VIE DU CUIVRE

—

Production minière de Cuivre

Production mondiale 1900-2023

Gg/an



Concentration par flottation,
pyrométallurgie, affinage
électrolytique

Concentrates

SX

SX : *Solvent eXtraction*, lixiviation réactive

EW : *ElectroWinning*, extraction électrolytique

Dans des alliages, sur un total de 6,428 millions de t, répartition :

en %

	Monde	Chine	Union européenne
Câbles	10 %	11 %	4 %
Barres	45 %	31 %	68 %
Feuilles	38 %	48 %	22 %
Tubes	7 %	10 %	6 %

Source : IWCC

Usages du Cuivre sous-produits et produits finis

Secteurs d'utilisations : dans le monde, en 2022, sur un total de 30,583 millions de t.

Équipements	32 %	Transports	13 %
-------------	------	------------	------

Constructions	26 %	Industries	12 %
---------------	------	------------	------

Infrastructures	17 %
-----------------	------

Source : ICSG



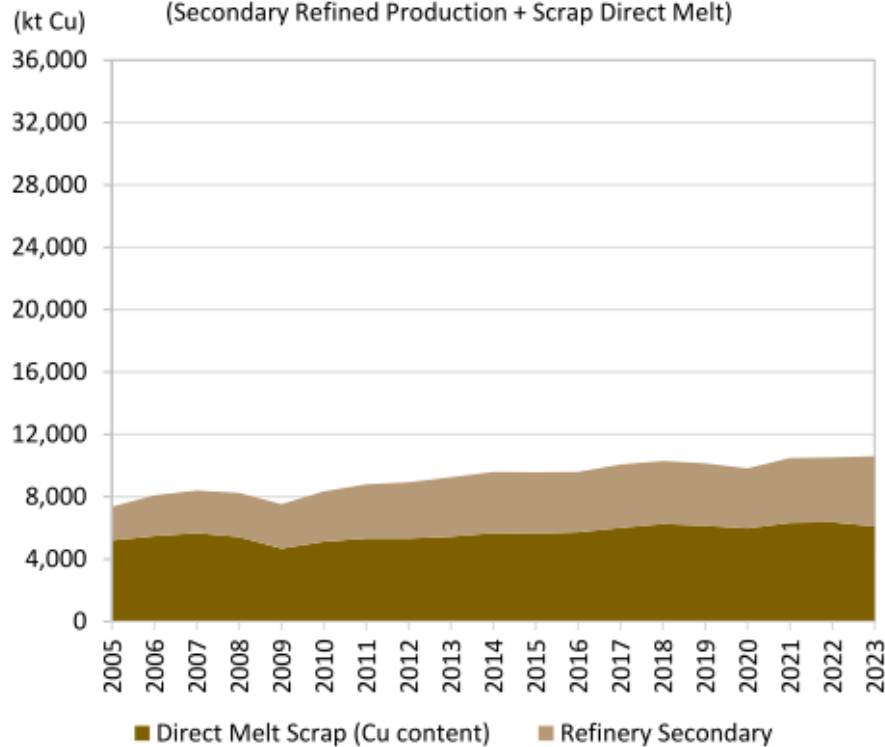
ICSG GLOBAL COPPER SCRAP USAGE AND RECYCLING INPUT RATE, 2005-2023

Thousand metric tonnes of copper

Source: ICSG

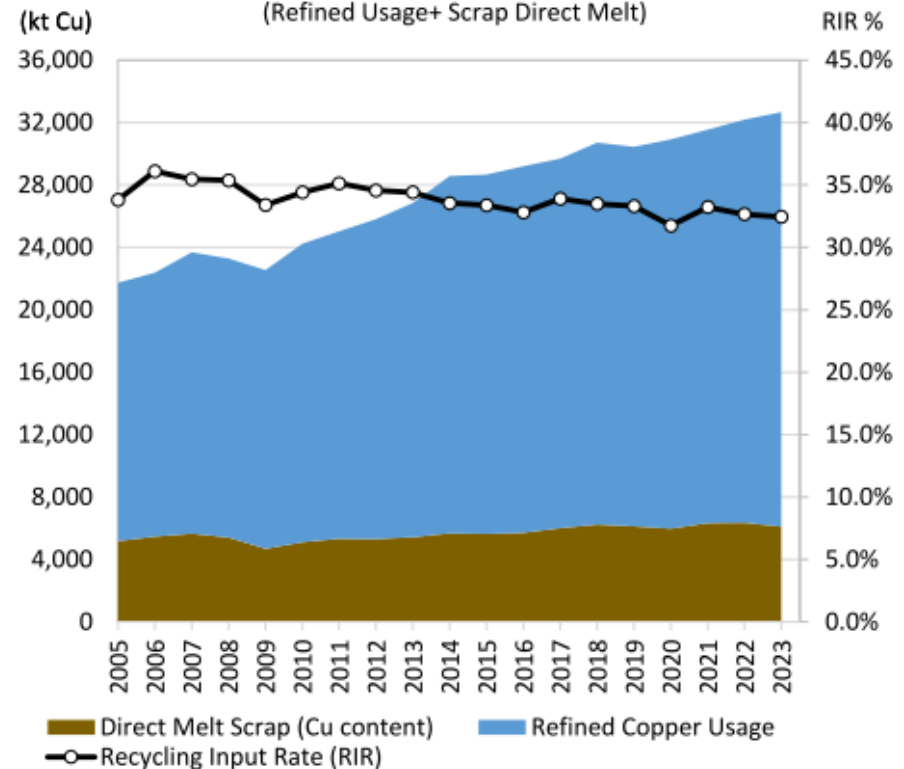
Global Scrap Usage

(Secondary Refined Production + Scrap Direct Melt)



Global Copper Usage and Recycling Input Rate

(Refined Usage+ Scrap Direct Melt)

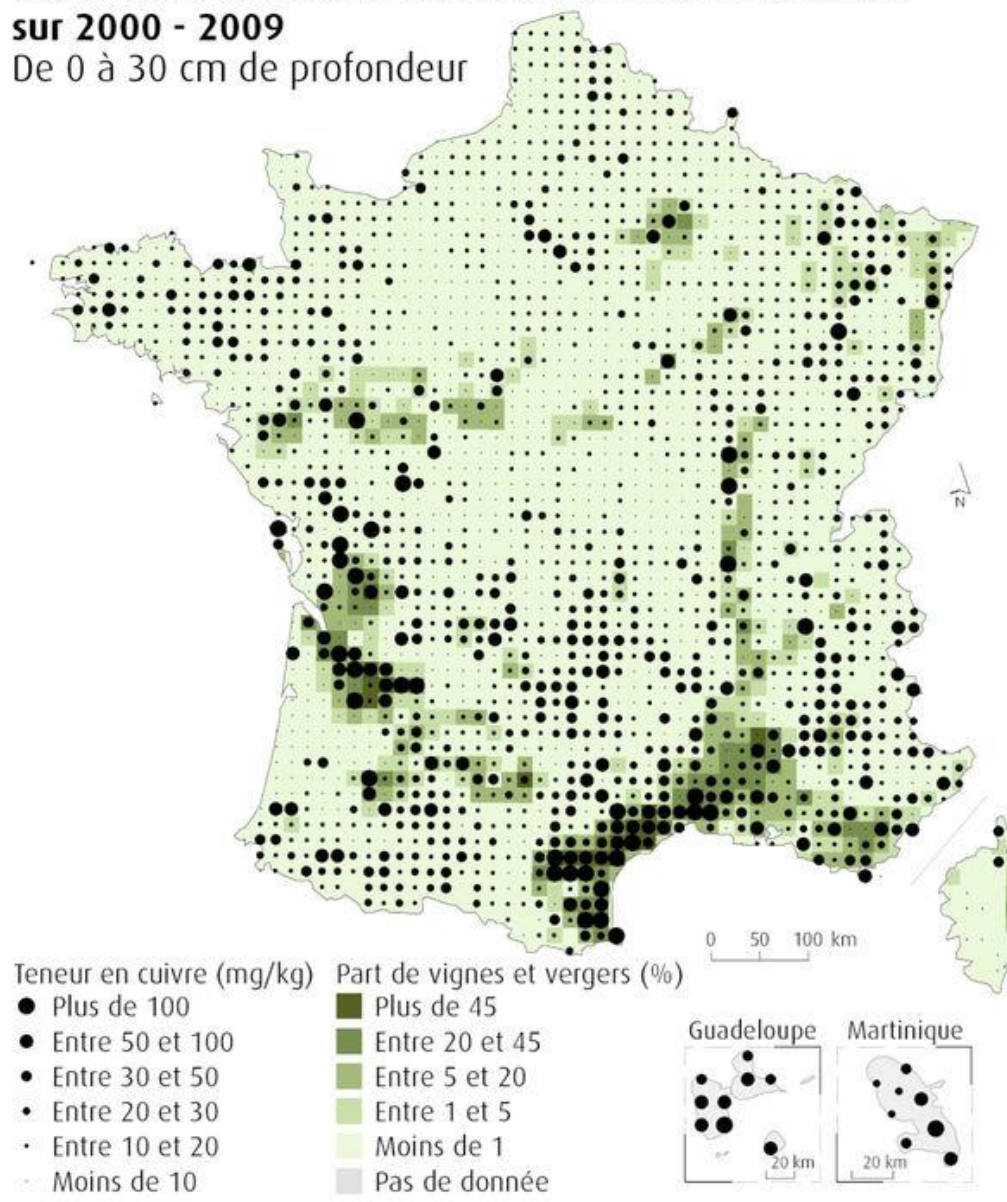


Direct-melt copper scrap figures for 2023 are preliminary estimates, as is the Recycling Input Rate (RIR).

Contamination des sols par l'agriculture

Les teneurs totales en cuivre dans les sols mesurées
sur 2000 - 2009

De 0 à 30 cm de profondeur



*Teneurs en cuivre dans
les sols et présence de
vignes et vergers ;
Source : CGDD, 2019.
(Commissariat Général
au Développement
Durable)*

Energie et eau utilisées pour la production et le recyclage du cuivre

Quantité d'eau et d'énergie utilisée pour l'extraction de minerai ou la réutilisation de déchets de l'industrie minière (Sverdrup and Koca, 2016)

	Energie (MJ/kg)		Eau (M³/tonne)	
	Déchets	Minerai	Déchets	Minerai
Cuivre	14	31 - 2040	15	40 - 200

Impact énergétique des procédés comparaison Li et Cu

Métal	Energie pour la production primaire (MJ/kg)	Energie pour la transformation (MJ/kg produit)
Lithium	380-850	12 (batteries)
Cuivre	30-90	3 (câbles)

© UNEP, Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles,
Editor: International Resource Panel, Working Group on the Global Metal Flows

Cycle du cuivre : principales conclusions

- ***Des flux anthropiques qui s'imposent***
 - et continuent à augmenter de manière exponentielle, malgré un recyclage d'environ 30 %.
- ***Des stocks importants dans les roches souterraines***
 - mais des réserves exploitables identifiées non renouvelables à l'échelle humaine (une centaine d'années d'exploitation).
- ***Des déchets cuivrés qui s'accumulent dans les sols et les sédiments continentaux ou marins***
 - De manière localisée pour les déchets industriels,
 - De manière diffuse pour les usages agricoles ou les aérosols d'origine industrielle,
 - Très peu soluble dans l'eau, sauf en conditions acides et aérées, le cuivre est transporté avec les particules en suspension pour sédimenter de manière localisée dans des lacs ou mers intérieures, ou de manière diffuse dans la profondeur des océans.
- ***Un réel besoin de généraliser le recyclage du cuivre dans les produits solides usagés***
 - Et peut-être de pouvoir récupérer le cuivre dans les stockages de déchets continentaux ou dans les sédiments enrichis ?



?



ARTSETMETIERS.FR