



Conducteur de la transition énergétique

# · LE CUIVRE ·

Etienne Laborde, Madeleine Lefranc, Maëlie Benistand-Hector,  
Marie Cubertafont, Romain Vauchelle, Colombe Mille





01

# Propriétés physico-chimiques



# Le tableau périodique des éléments

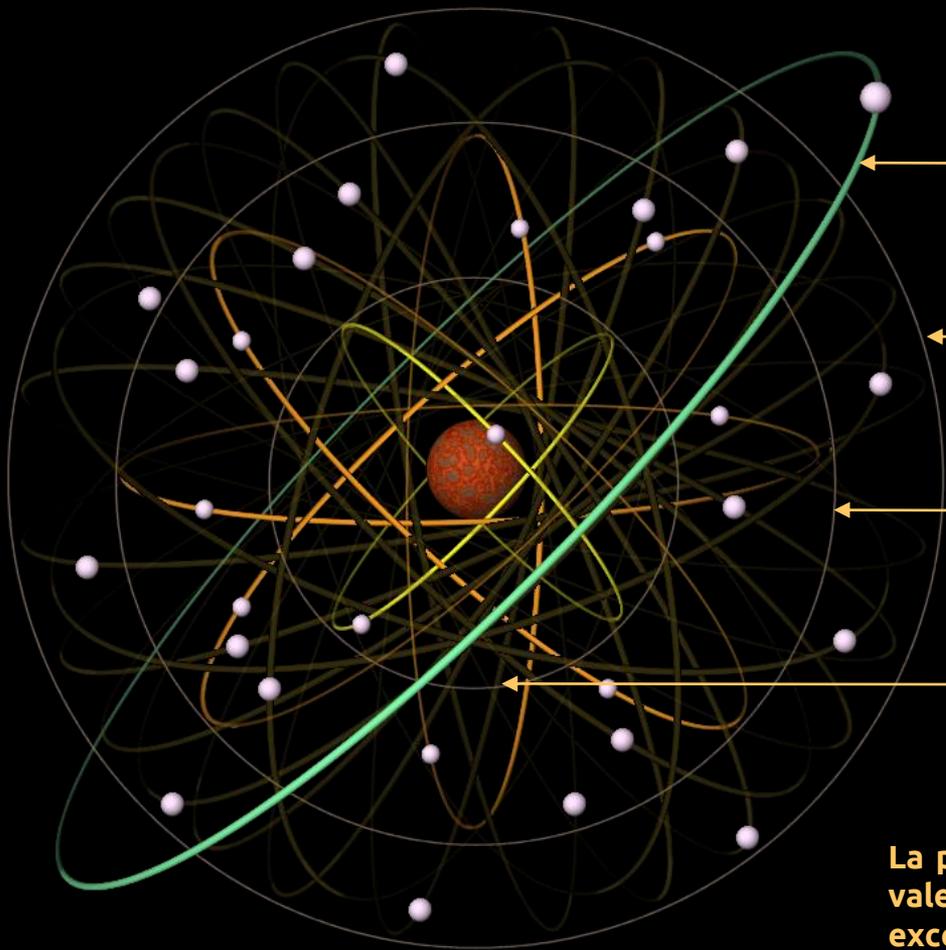
																	
																	
																	
																	
																	
																	
																	
																	
																	

⚠️ Radioactive elements

Properties of the elements of the actinoid series are similar to those of the lanthanoid series. The elements of the actinoid series are all radioactive. The elements of the actinoid series are all radioactive. The elements of the actinoid series are all radioactive.

Under copyright © 2007 Thomson IT, Inc. All rights reserved.

Other uses of the name "periodictableofelements.com" may violate the terms of use of this website.



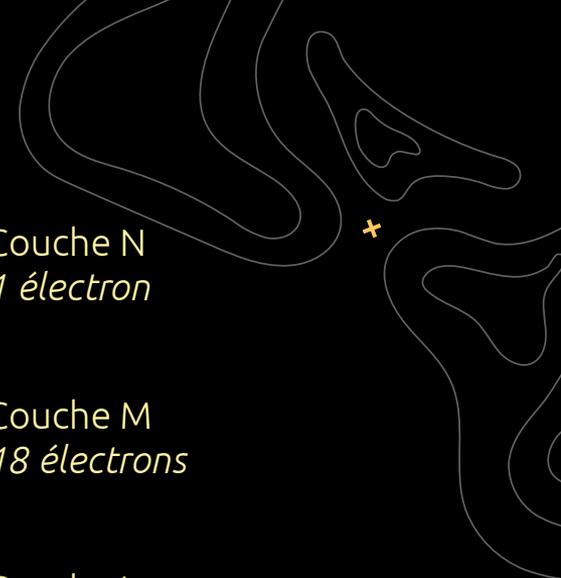
Couche N  
1 électron

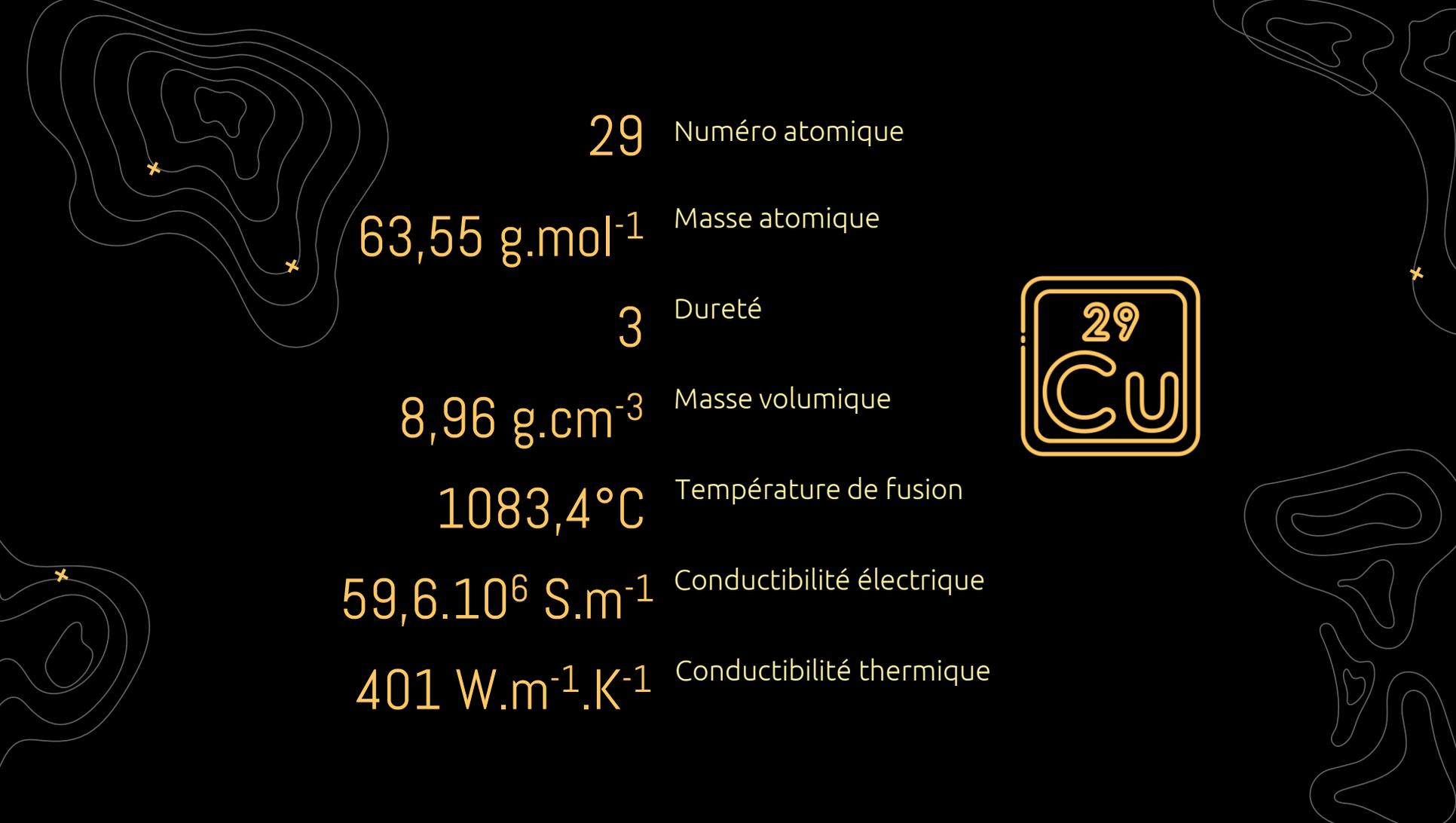
Couche M  
18 électrons

Couche L  
8 électrons

Couche K  
2 électrons

**La présence d'un électron unique sur sa couche de valence est une des raisons à l'origine de son excellente conductivité électrique**





29 Numéro atomique

63,55 g.mol<sup>-1</sup> Masse atomique

3 Dureté

8,96 g.cm<sup>-3</sup> Masse volumique

1083,4°C Température de fusion

59,6.10<sup>6</sup> S.m<sup>-1</sup> Conductibilité électrique

401 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> Conductibilité thermique



# Focus conductivité électrique

1. Argent ( $63 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
2. **Cuivre ( $59,6 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )**
3. Or ( $45,2 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
  
4. Aluminium ( $37,7 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
5. Zinc ( $16,6 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
6. Nickel ( $14,3 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
7. Fer ( $9,93 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
8. Platine ( $9,66 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
9. Palladium ( $9,5 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
10. Etain ( $9,17 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )
11. Plomb ( $4,81 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )



→ Très peu substituable, ce qui en fait un métal **indispensable** pour l'**électrification des usages**

→ En raison de cette propriété, dans un monde qui devient très électrique, le cuivre est appelé à jouer un rôle plus que central dans nos économies

# 02

## Données minières



# Les minerais de cuivre



Chalcopyrite  
CuFeS2



Chalcocite  
Cu2S



Bornite  
Cu5FeS4

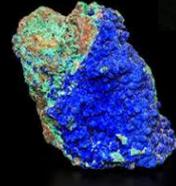


Cuivre natif  
Cu

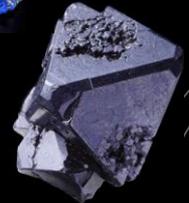
Malachite  
CuCO3, Cu(OH)2



Azurite  
2CuCO3, Cu(OH)2



Cuprite  
Cu2O



Il existe 165 variétés de minéraux de cuivre.



Minerais sulfurés  
80 % de la production mondiale

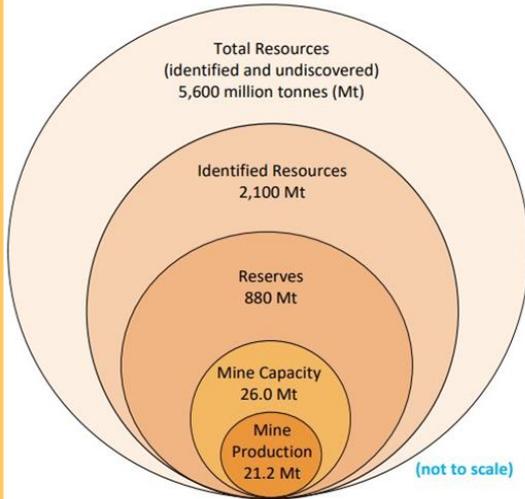


Minerais oxydés  
20 % de la production mondiale



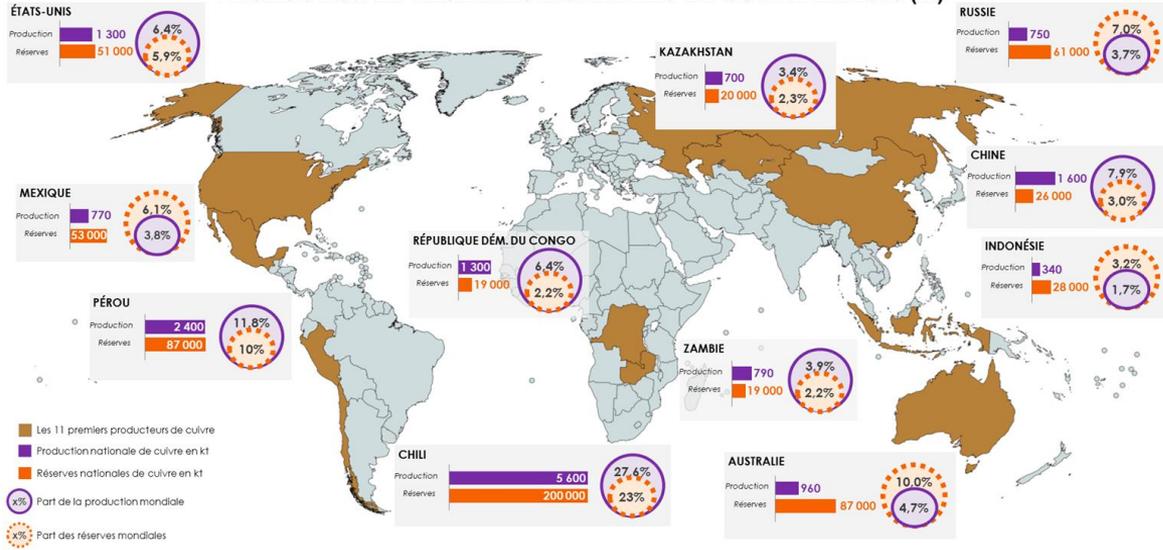
# Les réserves et ressources

**2021 World Copper Reserves & Mine Production** <sup>1/</sup>  
 (undiscovered resources not including deep sea nodules and land-based  
 and submarine massive sulphides - contained copper)



<sup>1/</sup> Source: USGS (resources/reserves data) and ICSG (capacity/production data)

## PRODUCTION ET RÉSERVES MONDIALES DE CUIVRE EN 2019 (kt)



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

Le cuivre est très répandu sur la surface de la Terre, mais si les réserves sont importantes, la teneur en cuivre des gisements est généralement faible (moins de 1%).

# Les métaux associés

Dans les gisements de cuivre, on trouve des métaux associés qui sont également exploités, tel que :



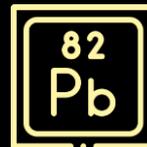
Nickel



Cobalt



Fer



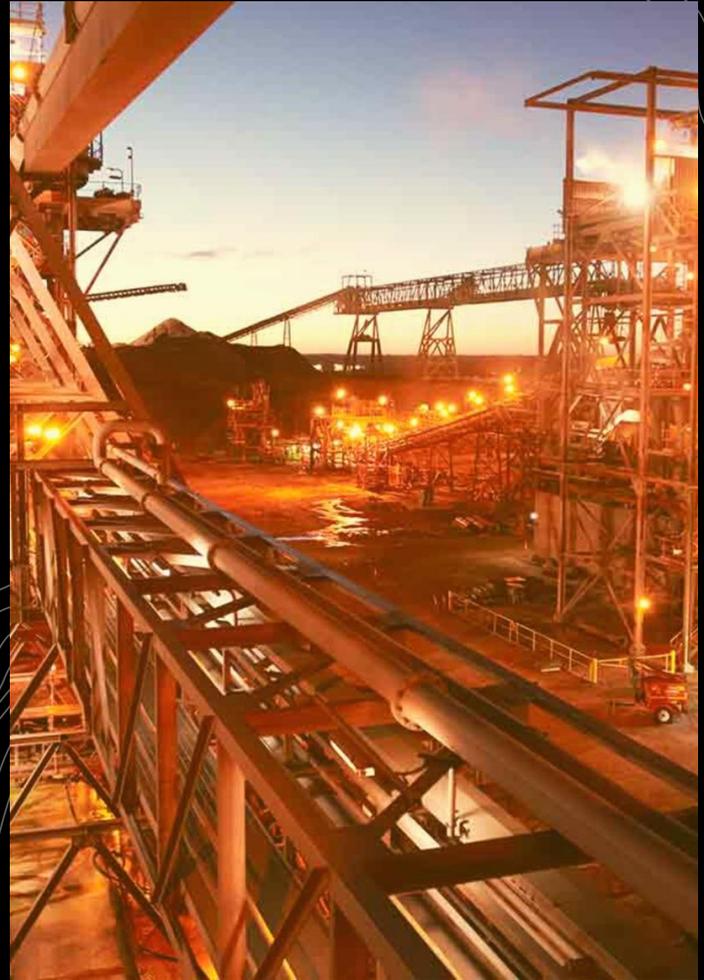
Plomb



Zinc

# 03

## Procédés industriels et usages



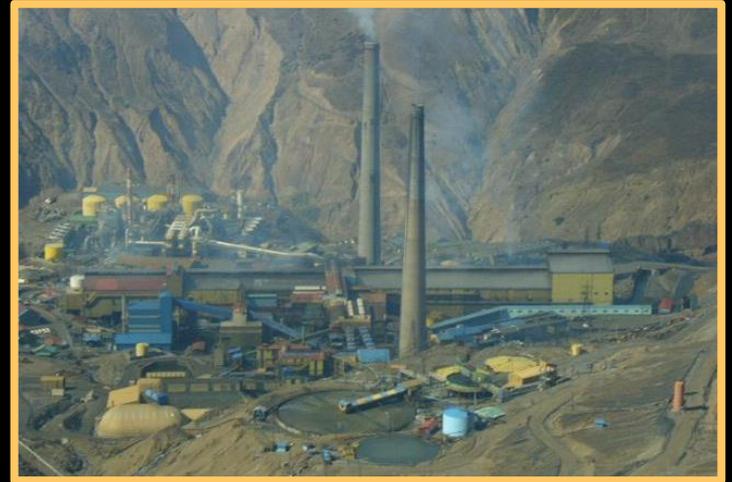
# Les formes d'extraction

## Mines à ciel ouvert (open pit)



Mine d'Escondida au Chili, dans le désert d'Atacama

## Mines souterraines (underground mining)



Mine d'El Teniente au Chili,  
plus grande mine souterraine

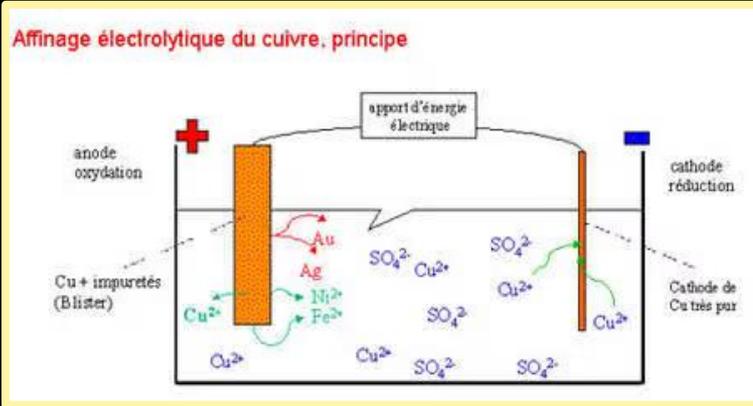
# Production de concentrés de minerai sulfuré (80 % de la production mondiale)







# Affinage électrolytique (parfois thermique)



Pureté

99,8%

(voir annexe n°1)

Obtention d'un cuivre presque pur mais poreux



Le saviez-vous ? On estime que 80 % de l'argent et 15 % de l'or produits dans le monde sont extraits de boues anodiques provenant de l'électro-affinage de métaux, principalement de cuivre.

# Refusion des cathodes

## 3 principaux types de cuivre obtenus

### Cuivre Cu-a1

(le plus courant)

Refusion à l'air :  
contient de  
l'oxygène

- Très bonne conductibilité électrique
- Mauvaise soudabilité : ne supporte pas les traitements supérieurs à 400°C

→ fils, barres, feuilles, planches (etc.) à usage électriques



### Cuivre Cu-b1

Refusion à l'air  
Désoxydé par ajout  
de phosphore

- Faible conductibilité électrique
- Ductile : Idéal pour être déformé
- Soudures sans restrictions

→ feuillard, tubes, etc. : usages mécaniques, chaudronnerie



### Cuivre Cu-c1

Refusion sous  
atmosphère réductrice  
(azote et monoxyde de  
carbone) - 99.95%

- Grande pureté et sans oxygène
- Haute conductibilité électrique et thermique.
- Résistance au soudage

→ utilisation dans le domaine de l'industrie électronique...



# Impacts environnementaux



740 sites de  
stockage

Après un siècle d'exploitation minière au Chili - plus grand producteur de cuivre, il existe 740 sites de stockage de déchets miniers.

Energie : 50%

De la consommation énergétique du cuivre est issue du processus de production

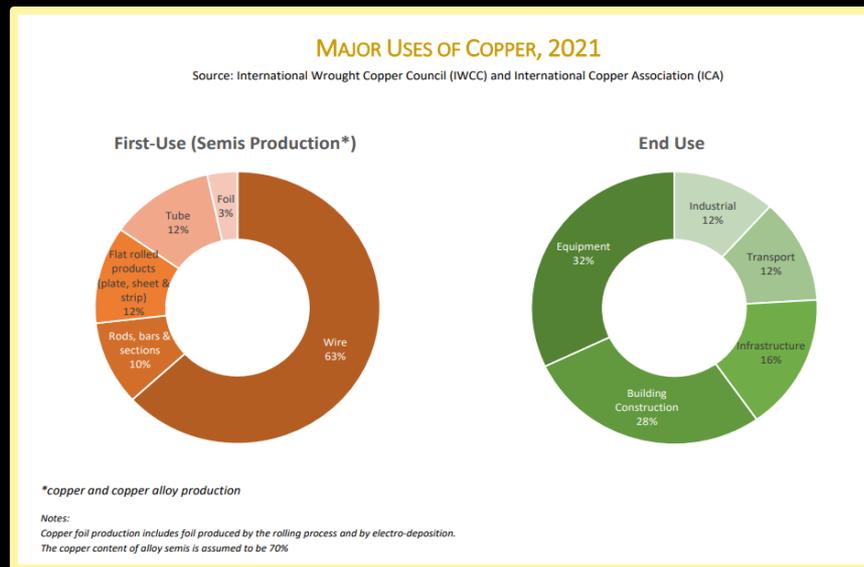
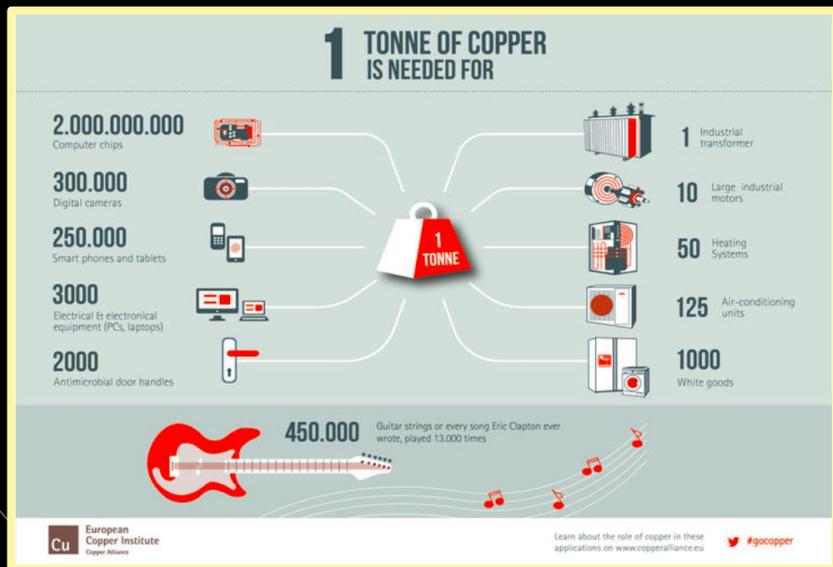
Rapport 1 à 100  
au Canada

Pour une tonne de cuivre, 99 tonnes de déchets



# Usages actuels

## Quelques ordres de grandeur

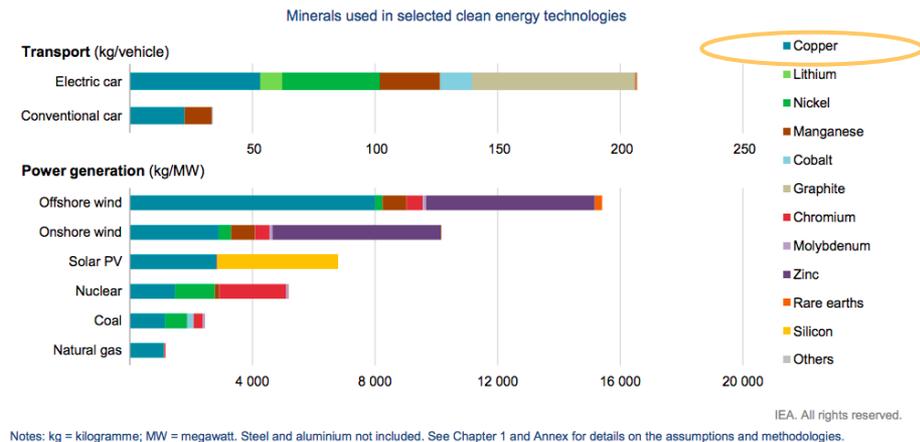


Le saviez-vous ? Le corps adulte contient entre 1,4 et 2,1 milligrammes de cuivre par kilogramme de poids corporel.

# Usages futurs

## Une application directe à la transition énergétique ...

The rapid deployment of clean energy technologies as part of energy transitions implies a significant increase in demand for minerals



Voitures électriques, éolien en mer, panneaux solaires, énergie nucléaire, ... les technologies inhérentes à la transition énergétique sont dépendantes du cuivre dans leur phase de production et d'opération.

En France : 50 parcs offshore prévus à l'horizon 2050.

Dans le monde : Le scénario Net Zéro 2050 prévoit un parc de voitures électriques de plus de 300 millions d'unités en 2030 et des voitures électriques représentant 60 % des ventes de voitures neuves.

Les besoins d'électrification futurs ne pourront se passer d'un minerai essentiel, et déjà largement connu et utilisé ... le cuivre.



# 04

## Enjeux géopolitiques

Chine, Chili et Pérou au centre du jeu

# La Chine domine le marché... hors extraction

1er importateur

46% des importations mondiales  
(2017)

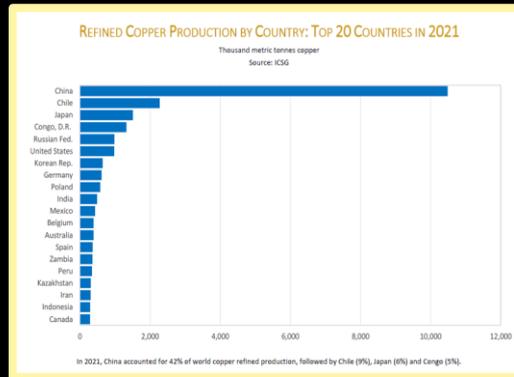


1er raffineur

>10 millions de tonnes  
(42% du total mondial) (2021)

1er consommateur

11,8 millions de tonnes  
50% du total mondial (2017)

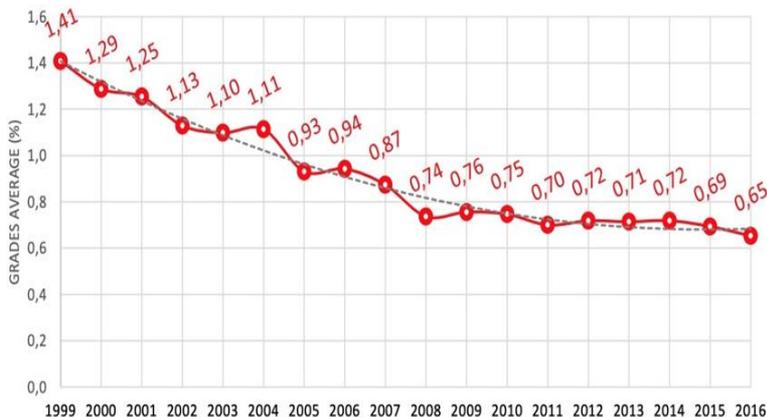


...grâce à la "Going out strategy" mise en place début 2000 pour établir des accords "Ressources contre infrastructures"

Depuis 2005 : 35 Mds\$ investis en Amérique du Sud, dont 18 Mds\$ de projets miniers pour le Cu, dont 14 Mds\$ pour le Pérou seul.  
Sources IFPEN,; ICSG

# Chili et Pérou, premiers producteurs de minerais primaires, au centre des tensions ?

Un effet ciseau entre, d'une part, **la diminution de la concentration en cuivre** des gisements qui implique des **besoins croissants en énergie et en eau douce**...



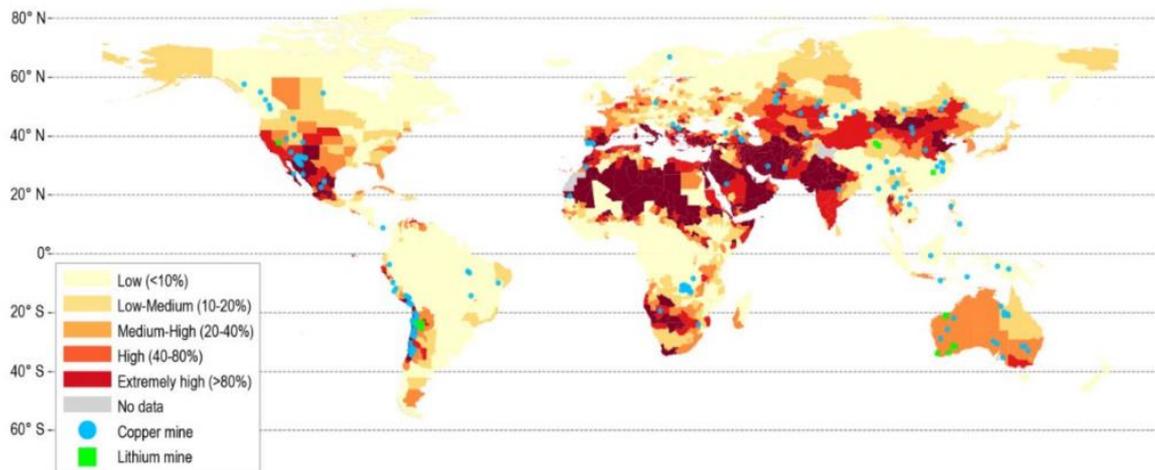
- Une baisse de concentration de 1,41 à 0,65% implique de plus que doubler la consommation d'eau et d'énergie pour extraire une quantité donnée.
- Option du dessalement de l'eau de mer :
  - Coût énergétique et environnemental (l'eau est transportée par pipeline jusqu'aux mines à plus de 3000m d'altitude)

Concentration moyenne en cuivre des gisement du Chili, 1999-2016.  
Source : Cochilco

# Chili et Pérou, premiers producteurs de minerais primaires, au centre des tensions ?

...et d'autre part, des pays déjà dans une situation de **stress hydrique**, qui va s'aggraver à l'avenir.

Location of copper and lithium mines and water stress levels, 2020



IEA. All rights reserved.

Localisation des mines de cuivre (points bleus) et stress hydrique, 2020. Source : IEA

- Risque de conflits d'usage croissants pour l'eau douce.
- Mine d'Escondida : entre 2020 et 2030, l'autorisation de pompage d'eau doit passer de 1400 à 640l/s

La ressource en eau sera-t-elle le **facteur limitant** de la production mondiale de cuivre ?

# Chili et Pérou, au centre des tensions ?

Des tensions sociales et environnementales se cristallisent autour de l'exploitation des mines de cuivre

Pérou : le gouvernement est instable



INTERNATIONAL · PÉROU

Au Pérou, le président déchu Pedro Castillo placé en détention, la vice-présidente, Dina Boluarte, investie à la tête du pays

Une motion de destitution pour « incapacité morale » a été largement approuvée mercredi contre le chef de l'Etat péruvien, quelques heures après sa tentative de dissolution du Parlement.

Le Monde avec AFP

Publié le 07 décembre 2022 à 20h01, mis à jour le 08 décembre 2022 à 06h02 · 🕒 Lecture 3 min.



Le Monde

Le Monde (site web)

économie, mercredi 19 mai 2021 - 11:04 UTC +0200 1806 mots

Matières premières : au Chili, la flambée du cuivre divise le pays

**Partage des richesses**

**Chili : les travailleurs de la plus grande mine de cuivre au monde votent une grève**



Risques sur la stabilité des cours ?

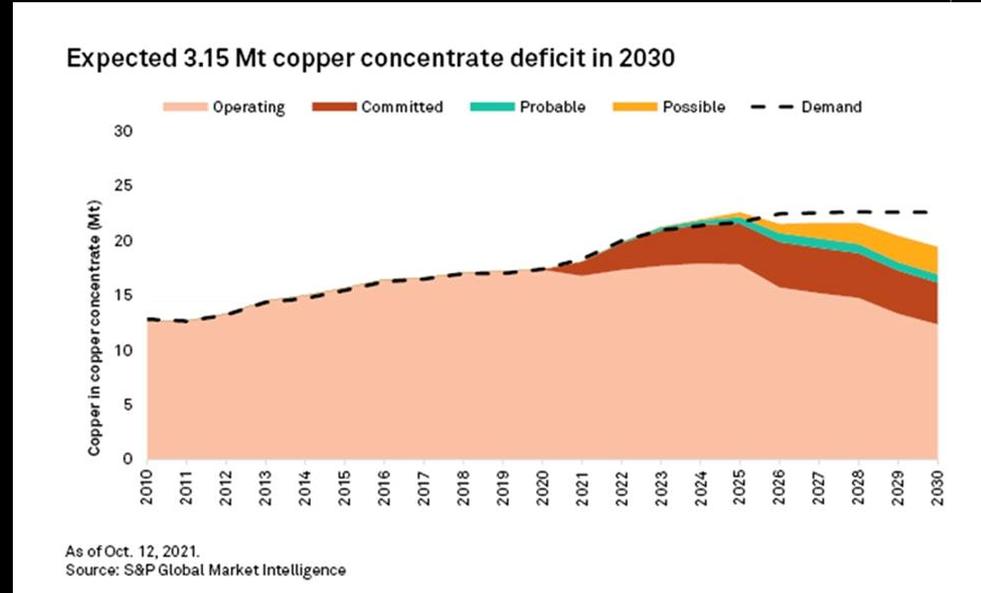
# Transition Énergétique : Tension sur la demande

D'ici 2050, sommes-nous capables de produire le cuivre nécessaire à la transition énergétique ?

La demande en cuivre doit passer de 20 à 100 millions de tonnes par an entre 2020 et 2050<sup>1</sup>.

Cela pose un problème de capacité de production à court-moyen terme : certaines analyses projettent un besoin supérieur à la production dès 2026 !

Risque d'explosion des prix ?



Source: S&P Global Market Intelligence, cité par aheadoftheherd.com

<sup>1</sup>Sources : IFPEN (voir annexe n°2)

# Transition Énergétique : Tension sur la demande

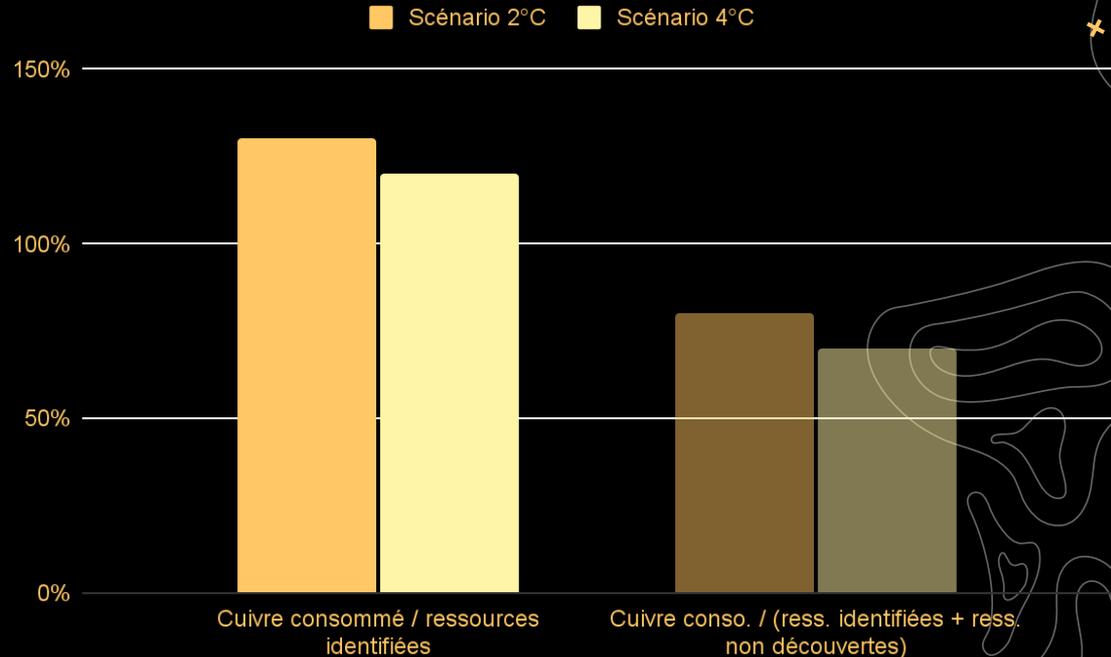
A l'horizon 2050,

aurons-nous assez de cuivre pour faire la transition énergétique ?

Certains scénarios prévoient l'extraction de la totalité des ressources identifiées à ce jour : 2,1 milliards de tonnes (barres pleines).

Répondre au besoin impose la découverte - *hypothétique* - de nouvelles ressources ! (barres translucides).

Une manière de réduire ce besoin d'extraction est de compter sur le recyclage, mais ce n'est pas si simple...



Ratio entre consommation cumulée de cuivre d'ici 2050 et ressources disponibles pour 2 scénarios de transition. Source : IFPEN (voir annexe n°2)



# 05

## Le potentiel de recyclage

Vers l'infini et l'au-delà !

Théoriquement oui, est-ce vraiment le cas  
dans la pratique ?

# Un métal au potentiel énorme



Cuivre recyclable à 100% et à “l’infini”

- Il fait partie des rares matériaux qui ne peuvent pas se dégrader ou perdre leurs propriétés chimiques ou physiques au cours du processus de recyclage.



Sécurité d’approvisionnement



Réduction des coûts



Amélioration relative des conséquences environnementales



# Une empreinte environnementale fortement réduite

D'après une étude de l'UNEP (*United Nation Environmental Program*), l'économie d'énergie entre un métal de cuivre issu de l'extraction et un métal issu du recyclage est comprise entre **84 et 88%** <sup>1</sup>

Une autre étude scientifique a essayé de quantifier la différence de coûts énergétiques et en eau selon ces deux procédés, il en ressort que :

- Il est **difficile d'estimer réellement les coûts énergétique et en eau** des procédés d'extraction, traitement et raffinage comme en témoigne les incertitudes obtenus.
- Les chiffres obtenus ne sont peut être pas à prendre comme tels mais permettent d'observer **une nette différence entre les coûts environnementaux du cuivre issu de l'extraction de minerai et du cuivre issu de la réutilisation de déchets de l'industrie.**

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 (M <sup>3</sup> /tonne)	
	Déchets	Minerai	Déchets	Minerai
<b>Cuivre</b>	14	31 - 2040	15	40 - 200

<sup>1</sup> UNEP (2013), *Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles*

# Malgré ses avantages certains, le taux de recyclage est encore "faible"

En quelques chiffres

10 %

< La proportion de métal recyclé entrant dans la production de métal<sup>1</sup> (RC)

< 25 %

~ 17 %

Part actuelle de la consommation assurée à partir de cuivre recyclé sur des biens de consommation en fin de vie

~ 40 %

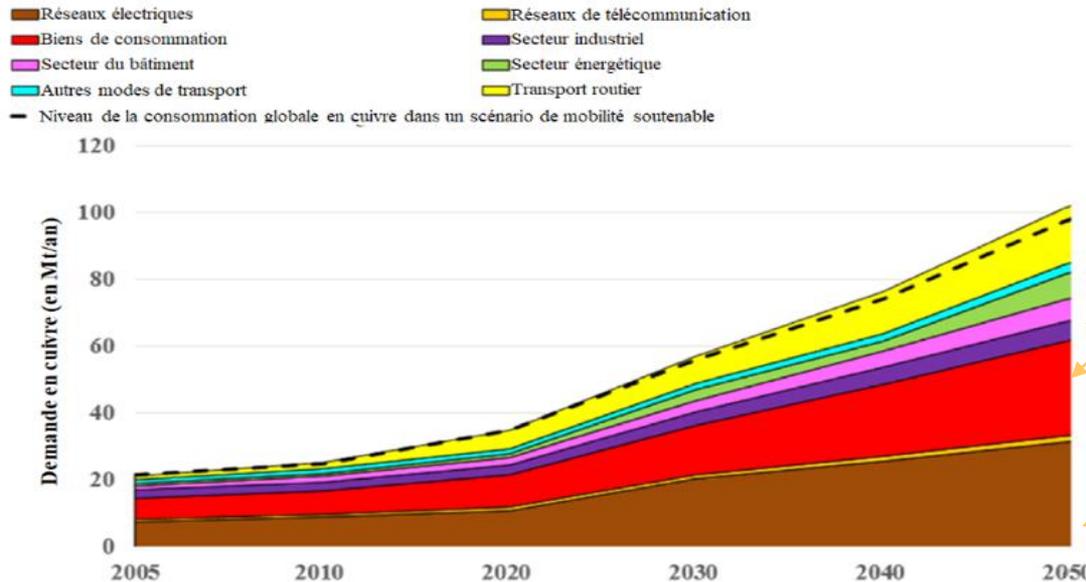
Taux de cuivre fonctionnel recyclé par rapport à la quantité de métal introduit dans le flux de recyclage (EOL-RR)<sup>2</sup> → notion d'efficacité du recyclage (Annexe 3)

<sup>1</sup> UNEP, *Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles*.

<sup>2</sup> *End Of Life-Recycling Rate (World Copper Factbook 2022* de l'ICSG).

# Quels sont les freins à son recyclage aujourd'hui ?

Le recyclage est indispensable mais est aujourd'hui limité par les facteurs structurels.



Biens de consommation (près de 30 % de la demande en cuivre) sont trop peu recyclés

Secteurs (près de 50 % de la demande en cuivre) avec un taux de recyclage général élevé mais immobilisation longue durée du cuivre (30 ans en moyenne)

Evolution de la consommation en cuivre dans un scénario 2°C : impact du choix de politique de mobilité (IFPEN, décembre 2020)

**Le potentiel de croissance du recyclage du cuivre apparaît donc limité sans une politique publique attractive pour la filière.**

# Conclusion

- Excellente conductivité électrique : un métal “de structure” indispensable à l'électrification des usages.
- Les prévisions de consommation les plus contraignantes prévoient un besoin supérieur aux ressources actuellement identifiées d'ici 2050 !
- Le marché est polarisé entre la Chine (raffineur et consommateur) et le couple Chili-Pérou (production de minerais primaires) faisant peser un risque d'instabilité.
- L'accès à la ressource en eau pourrait être un facteur limitant de la production de cuivre, créant des tensions internes aux pays producteurs et sur le marché du cuivre.
- Important potentiel de recyclage mais limité par des contraintes hors filières.

# Sources (1)

- Hache, Emmanuel ; Barnet, Charlène ; Seck, Gondia-Sokhna « *Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique !* », Les métaux dans la transition énergétique, n° 2, IFPEN, Décembre 2020. [Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique ! | IFPEN](#)
- Site internet : [International Copper Study Group](#)
- Site internet : [L'elementarium - Cuivre](#) (et divers autres éléments pour le comparatif conductivité électrique)
- Richard H. Sillitoe, "Why No Porphyry Copper Deposits in Japan and South Korea?", Resource Geology, Février 2018 <https://doi.org/10.1111/rge.12156>
- Minéral info, le portail français des ressources minérales non énergétiques, « *Les activités de premières transformations* ». <https://www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/activites-de-premiere-transformation>
- Cu Copper Alliance, « *Cycle de vie du cuivre* », 2022. <https://copperalliance.org/fr/sustainable-copper/about-copper/copper-life-cycle/>
- Hache et al., « *Cuivre : quel avenir pour ce métal essentiel à la transition énergétique ?* », Iris, Juillet 2019. <https://www.iris-france.org/139214-cuivre-quel-avenir-pour-ce-metall-essentiel-a-la-transition-energetique/>
- Guide du cuivre, 2022. <https://www.prix-cuivre.com/>
- Daziano, Laurence ; Touazi François-Aïssa « *Pékin-Dubai-Lagos : la nouvelle Route de la soie* », LaTribune, 2014. <https://www.latribune.fr/opinions/20141020trib29cfb60ee/pekin-dubai-lagos-la-nouvelle-route-de-la-soie.html>

## Sources (2)

- Bourbon, Jean-Claude « *Alerte sur le cuivre et cobalt d'ici 2050* », LaCroix, 2021. <https://www.la-croix.com/Economie/Alerte-cuivre-cobalt-dici-2050-2020-06-21-1201100980>
- Bonnet et al., « *Copper at the crossroads: assessing the interactions of the low carbon energy transition with a non-ferrous and structural metal* », IFPEN, working paper, 2019. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/NEWSROOM/Actualit%C3%A9s/GENERATE%20-%20Working%20Paper%20%235-EHACHE.pdf>
- The conversation « *Les pressions sur l'eau, face ignorée de la transition énergétique* », Février 2021. <https://theconversation.com/les-pressions-sur-leau-face-ignoree-de-la-transition-energetique-154969>
- Genoux, Flora « *Matières premières : au Chili, la flambée du cuivre divise le pays* », Le Monde, Mai 2021. [https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/05/19/matieres-premieres-le-cuivre-divise-le-chili\\_6080713\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/05/19/matieres-premieres-le-cuivre-divise-le-chili_6080713_3234.html)
- AFP, Libération « *Partage des richesses. Chili : les travailleurs de la plus grande mine de cuivre au monde votent une grève* », Août 2021. [https://www.liberation.fr/international/amerique/chili-les-travailleurs-de-la-plus-grande-mine-de-cuivre-au-monde-votent-une-greve-20210801\\_FWJUT2AKRFAYTKI7GNX0BZR6LQ/](https://www.liberation.fr/international/amerique/chili-les-travailleurs-de-la-plus-grande-mine-de-cuivre-au-monde-votent-une-greve-20210801_FWJUT2AKRFAYTKI7GNX0BZR6LQ/)
- Boy, Vincent « *Cours du cuivre : les grèves au Chili, le conflit commercial et la Fed avant les PMI en Chine* », Octobre 2019. <https://www.ig.com/fr/marche-actualites-et-idees-de-trading/cours-du-cuivre---les-greves-au-chili--le-conflit-commercial-et--191030>
- International Copper Study Group « *The world copper factbook 2022* », 2022.

## Sources (3)

- Transition(s) 2050 : Choisir maintenant agir pour le climat, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, ADEME, 2022  
[https://librairie.ademe.fr/cadic/6842/feuilleton\\_materiaux\\_de\\_la\\_te\\_transitions2050\\_ademe.pdf](https://librairie.ademe.fr/cadic/6842/feuilleton_materiaux_de_la_te_transitions2050_ademe.pdf)
- Les déchets miniers au Chili, une bombe à retardement ?, AFP, GEO, 24/07/2019  
<https://www.geo.fr/environnement/les-dechets-miniers-au-chili-une-bombe-a-retardement-196720>
- "Cuivre", OpenRessource  
[https://open-ressources.fr/dossier/la-filiere-du-cuivre/#:~:text=L'eau%20et%20l'%C3%A9lectricit%C3%A9,eau%20\(ADEME%2C%202017\).](https://open-ressources.fr/dossier/la-filiere-du-cuivre/#:~:text=L'eau%20et%20l'%C3%A9lectricit%C3%A9,eau%20(ADEME%2C%202017).)
- "L'enjeu du cuivre", FuturaScience  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-enjeu-cuivre-6872/>
- aheadoftheherd.com "Copper mines becoming more capital-intensive and costly to run"  
<https://aheadoftheherd.com/copper-mines-becoming-more-capital-intensive-and-costly-to-run/>
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions  
<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

# Annexe n°1

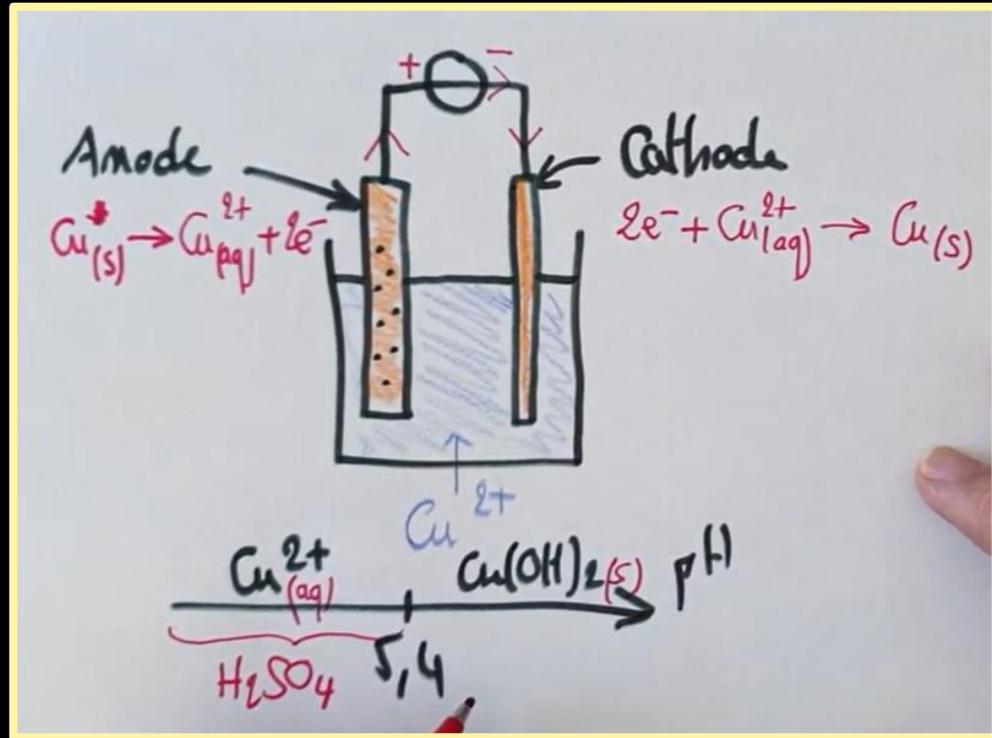
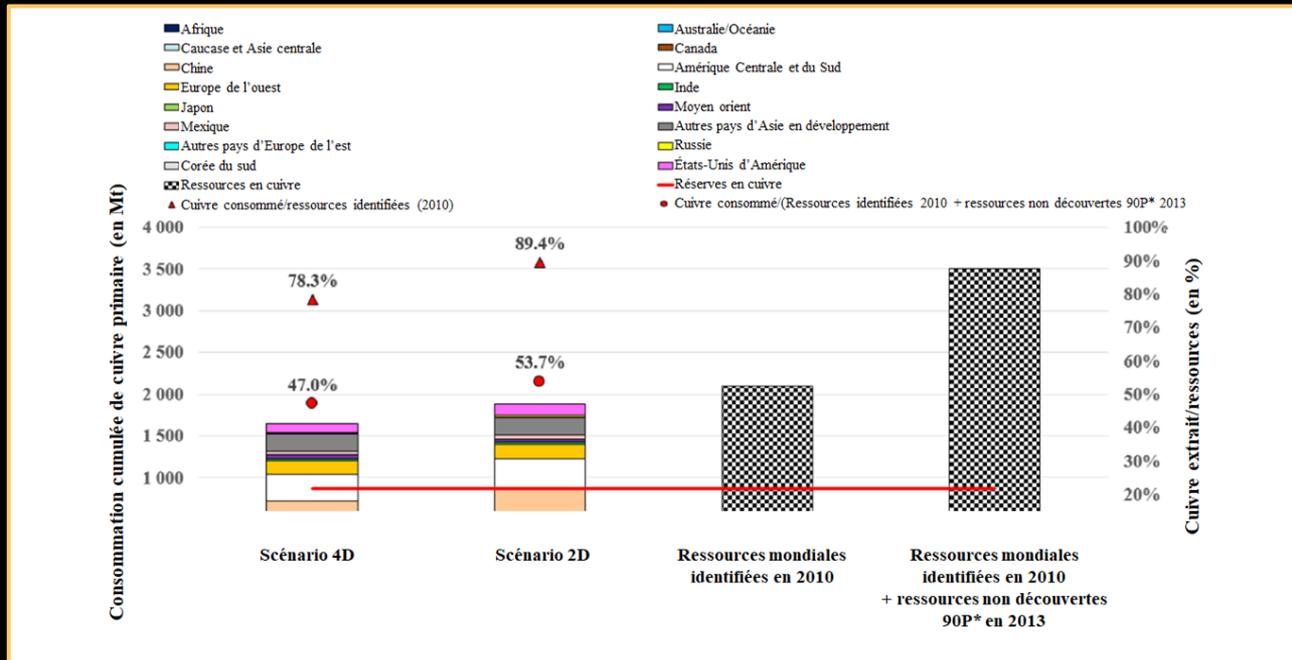


Schéma de l'affinage électrolytique du cuivre.

# Annexe n°2



Comparaison entre la consommation cumulée de cuivre primaire à l'horizon 2050 selon deux scénarios climatiques et les ressources de cuivre (IFPEN, décembre 2020).

# Annexe n°3



Note: As of 2020, the global flow model and the recycling indicators will be updated periodically by the ICA and Fraunhofer

Flux mondiaux de cuivre dans l'industrie (2018) et taux de recyclage dérivés  
 (International Copper Study Group « The world copper factbook 2022 », 2022)