

Projet N°14

Parlons recyclage !

Le recyclage est un procédé de **traitement des déchets** et de **réintroduction des matériaux dans le cycle de production** d'autres produits.
Trois problèmes principaux apparaissent: **l'usage dispersif**, **l'accessibilité** aux déchets et le **rendement** lors du processus de recyclage.

Mais voyons, à quoi bon recycler ?

Avantages du recyclage des métaux :

- Réduire le volume des déchets et leur pollution
- Éviter l'extraction des ressources naturelles ce qui réduit l'impact environnemental de l'extraction
- Créer des emplois localement

Comment rend-on le cuivre utilisable ?

2 étapes dans la transformation du cuivre suite à son extraction ou lors du recyclage :

- la **fusion** (« smelting ») : **chauffage** du cuivre à une température de 1200 °C
- **l'affinage** (« refining ») : **purification** du mélange de concentrés cuivreux issus des mines et de déchets de qualité moindre

L'utilisation de ces procédés pour le recyclage n'a pas toujours de **valeur ajoutée** intéressante en France → les **exportations de déchets métalliques** sont plus importantes que les importations correspondantes : 179 kt contre 55 kt pour le cuivre en 2019

Un exemple : le cuivre

Le cuivre en quelques chiffres

- **Réserves actuelles** (gisements découverts et jugés rentables, 2019) : environ **830 Mt**
- **Ressources mondiales** (réserves et gisements potentiels pas encore exploités en 2019) : **2 000 Mt**
- **2/3 des 550 millions de tonnes de cuivre produites depuis 1900 sont encore utilisées**
- **Besoin croissant** de cuivre : + **250 %** depuis 1960 (5 à 18 millions de tonnes)
- **Production minière** de cuivre dans le monde (2019) : **20,5 Mt**
- **41,5%** du cuivre utilisé en Europe **provient du recyclage** (ce qui représente entre 2 et 3 millions de tonnes)



Pourquoi recycler le cuivre en particulier ?

- La transition énergétique entraînera un **besoin croissant de cuivre**
- **Économie de 31 m³ d'eau** et de 300 kg eqCO₂ par tonne de cuivre recyclé (soit environ **40 millions de tonnes de CO₂ par an dans le monde**)
- Recyclage du cuivre nécessite jusqu'à 85 % moins d'énergie que la production primaire → **économie de 100 millions de MWh d'énergie électrique par an dans le monde**
- **Épuisement des ressources**: en fonction des modélisations, le **pic d'extraction serait atteint avant la fin du siècle**
- Relation exponentielle inverse entre la concentration de cuivre et l'impact environnemental lié à son extraction : **à l'avenir, l'extraction traditionnelle sera de plus en plus coûteuse en énergie.**

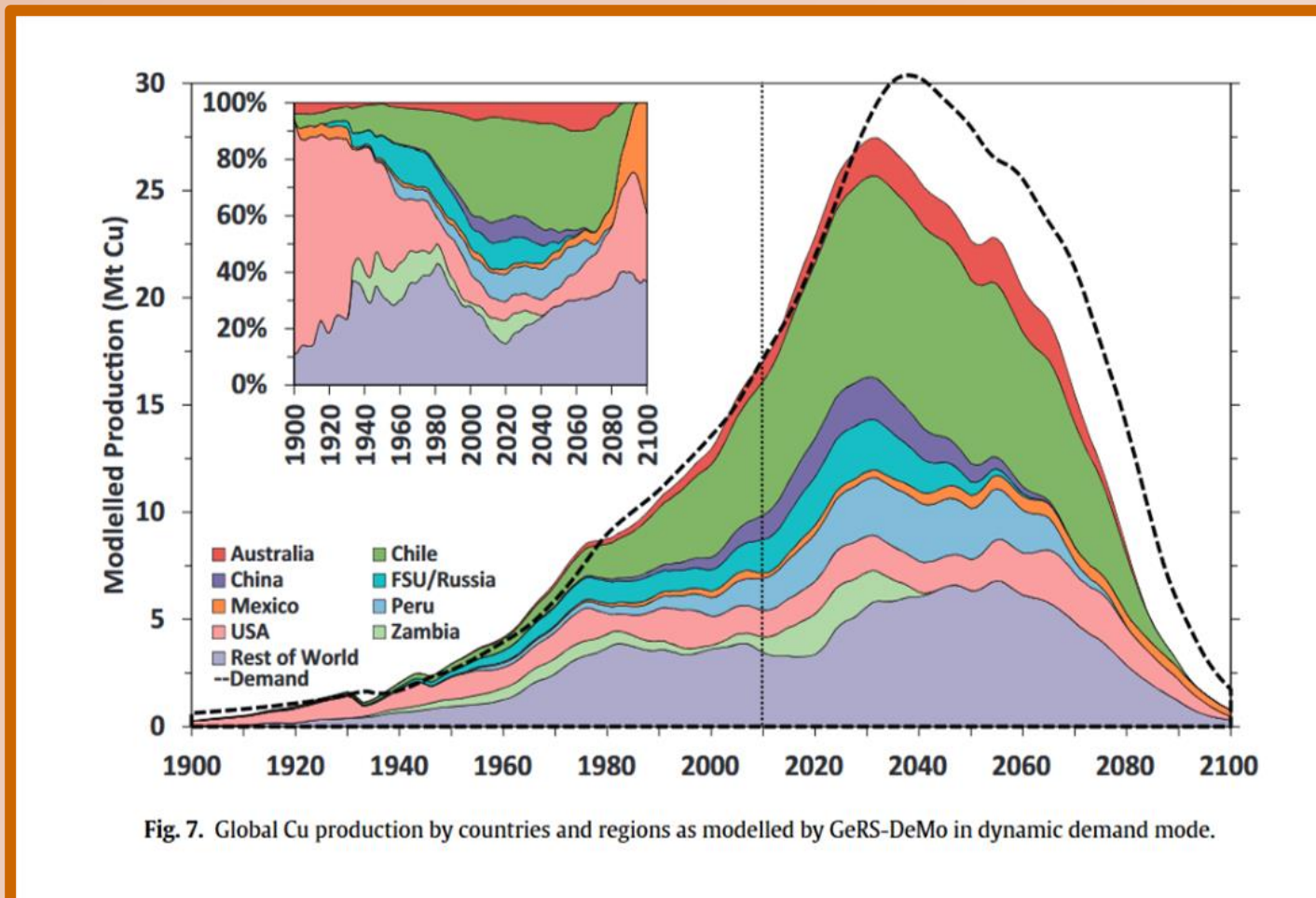
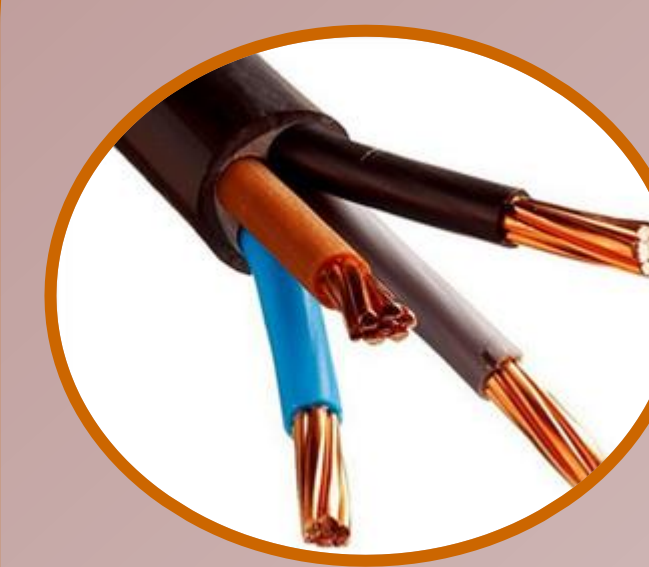


Fig. 7. Global Cu production by countries and regions as modelled by GeRS-DeMo in dynamic demand mode.

Ce n'est pas si simple...

Procédé de récupération en fonction de l'objet :



Câble électrique : granulation, tamisage et fonderie

Carte électronique :



Procédé mécanique :

Micronisation : broyage puis séparation par différence de densité, récupération de seulement 90% des métaux

Procédé chimique :

Pyro-métallurgie : broyage et pyrolyse, **très énergivore** (fours chauffés à 500 degrés)

Hydrométallurgie : dissolution avec acides, dégage dioxines et furanes (**gaz nocifs** pour l'environnement)



Nanofils de cuivre dans les chaussettes :

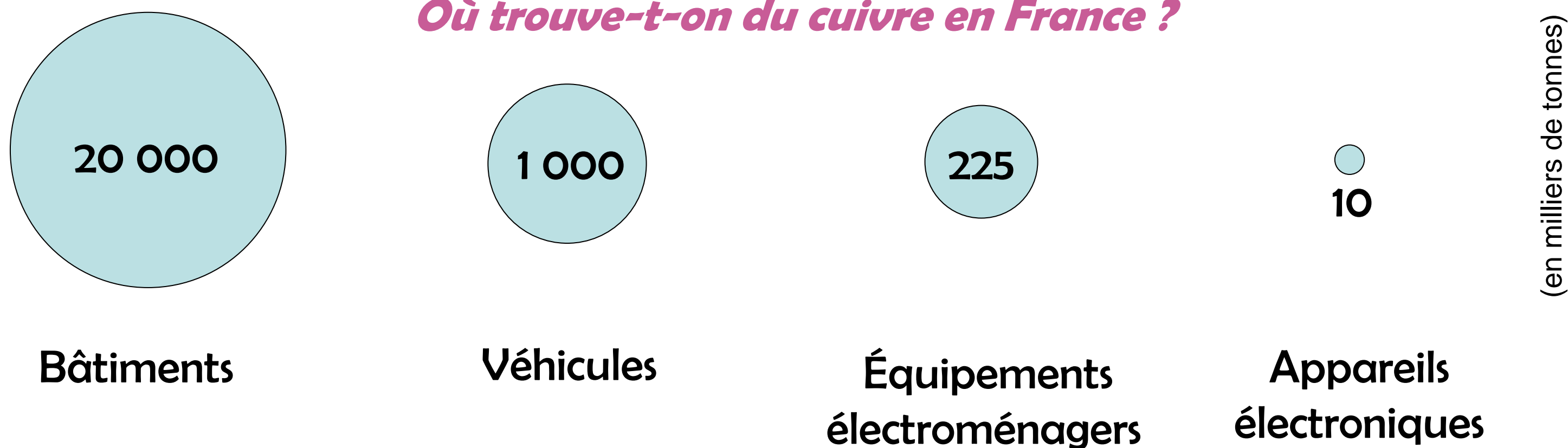
Utilisés pour limiter le développement de bactéries. C'est un usage dispersif dans lequel le **cuivre ne peut pas être récupéré**

Différence de recyclabilité selon les produits (usage dispersif ou non)

Quelle part de la demande française en cuivre peut être satisfaite à partir du recyclage des objets en fin de vie sur le territoire national ?
La France pourrait-elle même devenir autonome en cuivre ?

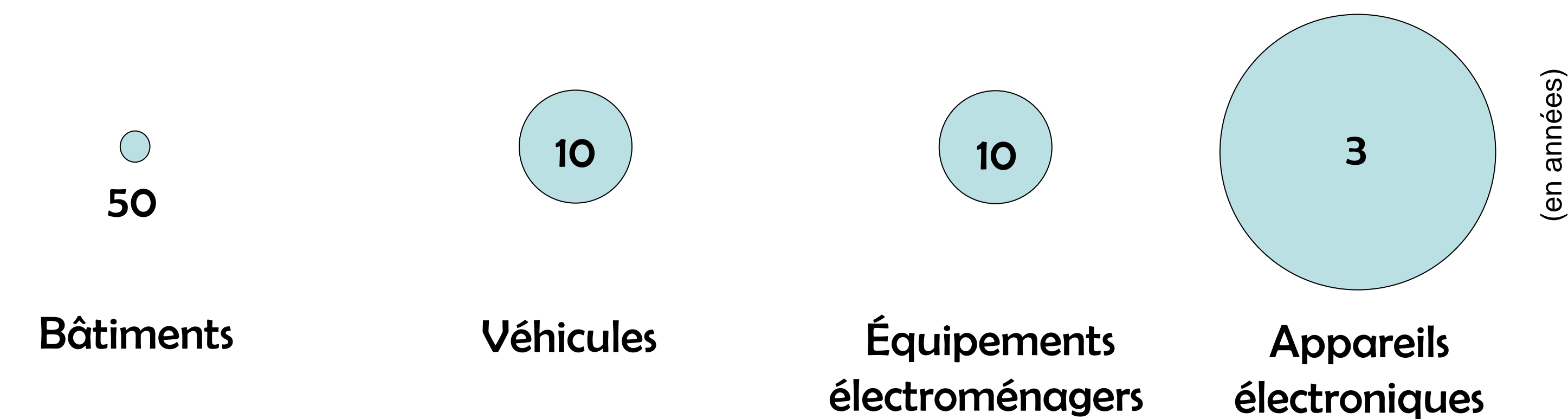
Constat : la France possède un **stock de cuivre important** sur son territoire
Objectif : établir **deux scénarios** du recyclage et de la consommation en France pour les 30 prochaines années. Pour chaque scénario, déterminer si **le recyclage permettrait de répondre à la demande toujours croissante.**

Où trouve-t-on du cuivre en France ?



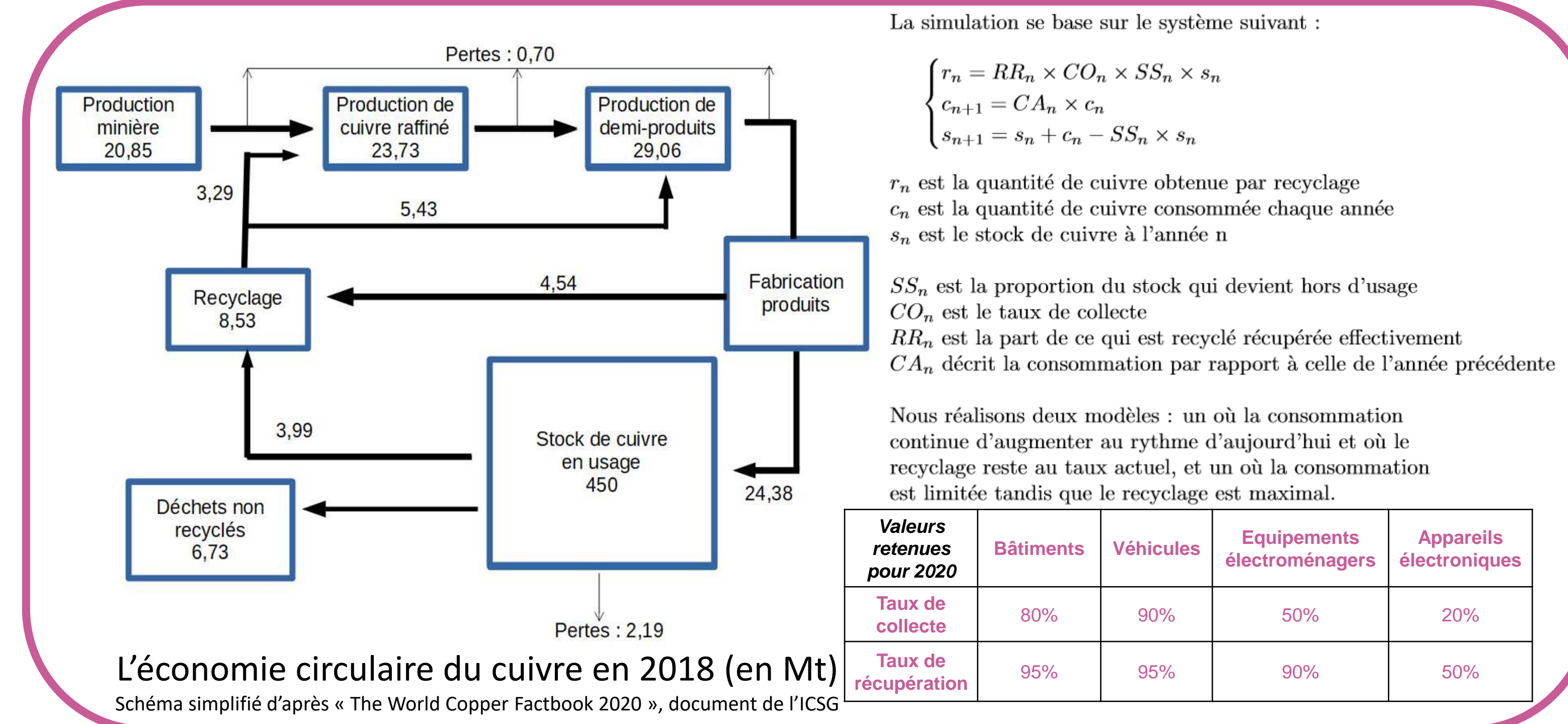
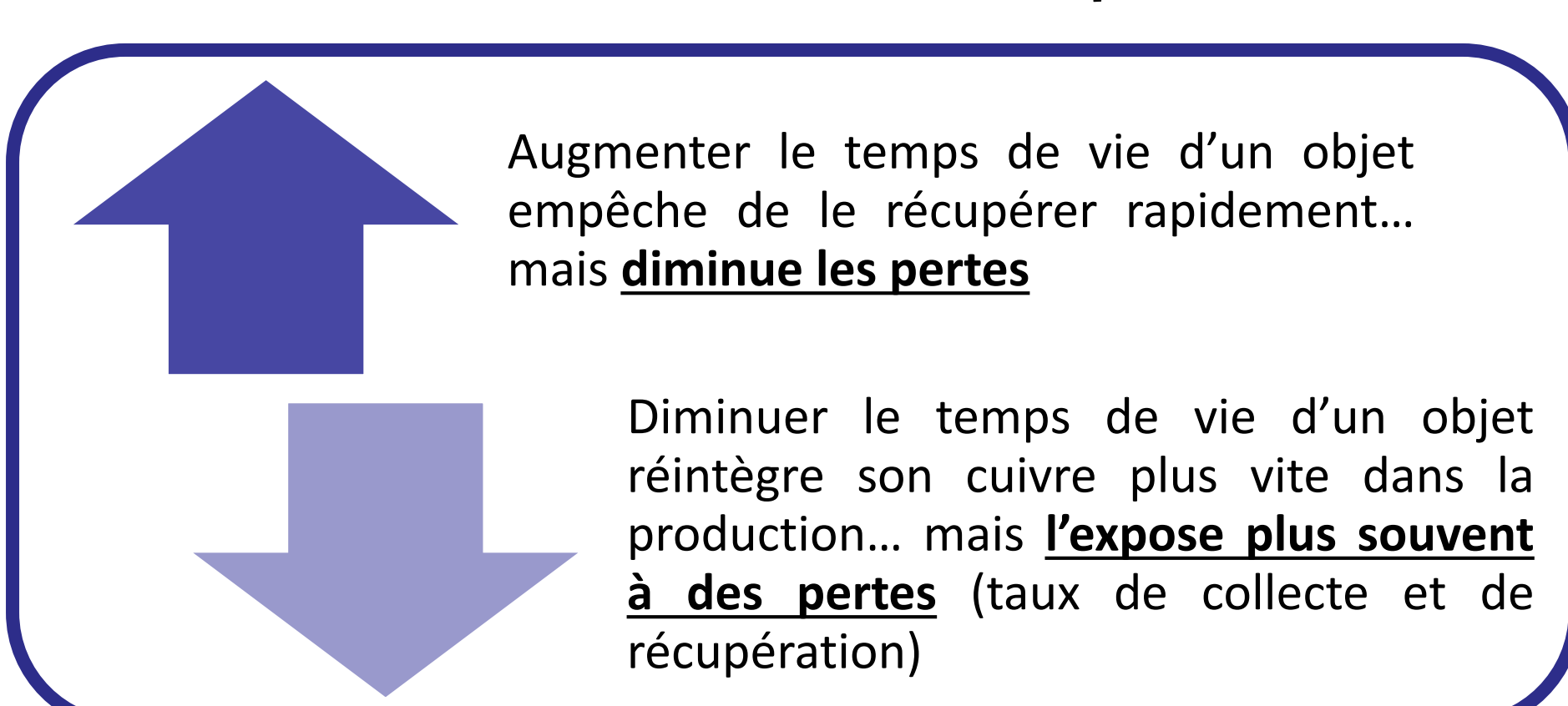
Pour chacun de ces secteurs, quels facteurs prendre en compte ?

Le temps de vie de l'objet : quantifie la **vitesse de retour** du cuivre dans la production



Le taux de collecte : un objet en fin de vie ou hors d'usage n'est pas nécessairement **apporté au recyclage ou collecté.**

Le taux de récupération : même si un objet est recyclé, on ne peut pas récupérer la **totalité du cuivre qu'il contient.**



La simulation se base sur le système suivant :

$$\begin{cases} r_n = RR_n \times CO_n \times SS_n \times s_n \\ c_{n+1} = CA_n \times c_n \\ s_{n+1} = s_n + c_n - SS_n \times s_n \end{cases}$$

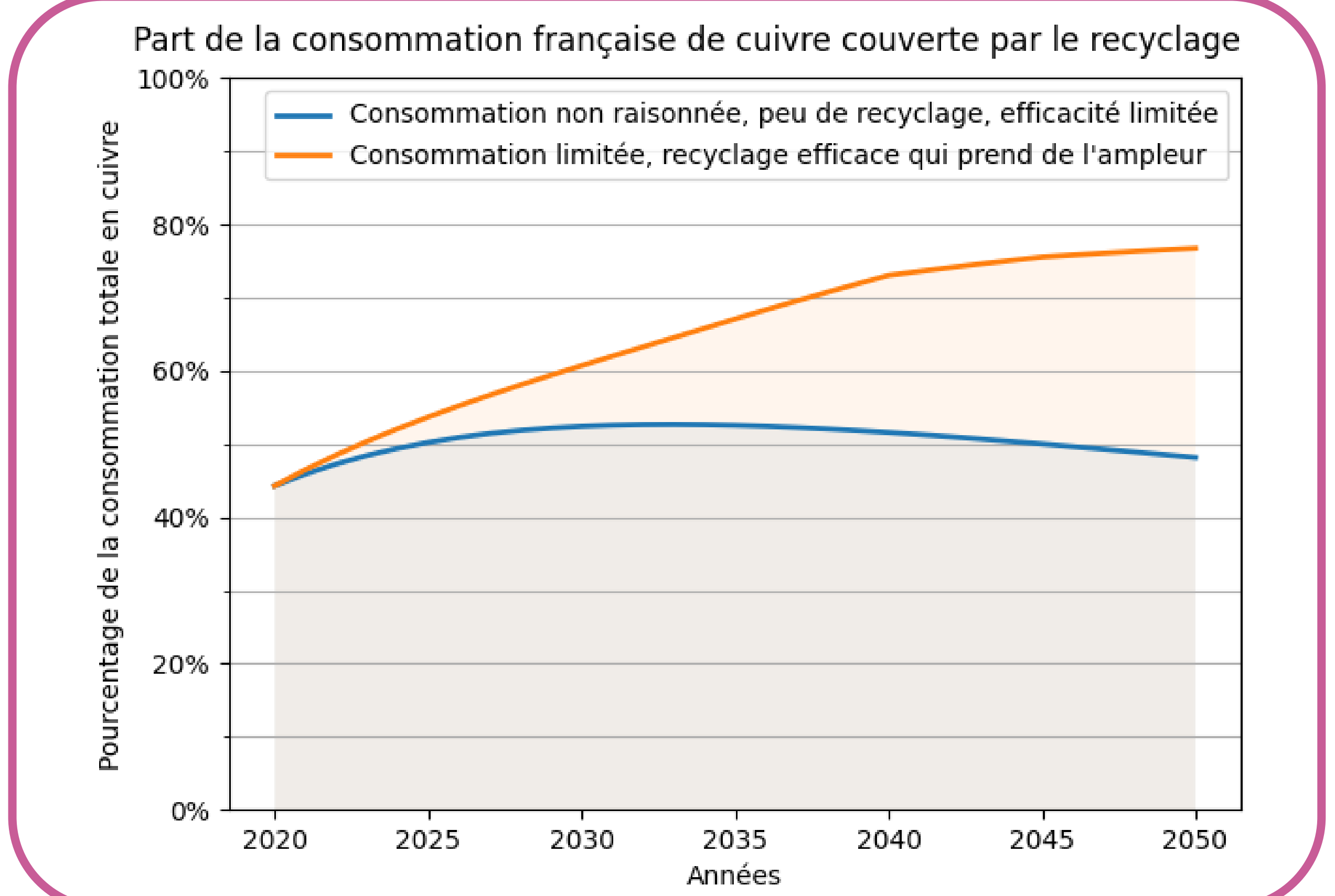
r_n est la quantité de cuivre obtenue par recyclage
 c_n est la quantité de cuivre consommée chaque année
 s_n est le stock de cuivre à l'année n

SS_n est la proportion du stock qui devient hors d'usage
 CO_n est le taux de collecte
 RR_n est la part de ce qui est recyclé récupéré effectivement
 CA_n décrit la consommation par rapport à celle de l'année précédente

Nous réalisons deux modèles : un où la consommation continue d'augmenter au rythme d'aujourd'hui et où le recyclage reste au taux actuel, et un où la consommation est limitée tandis que le recyclage est maximal.

Valeurs retenues pour 2020	Bâtiments	Véhicules	Équipements électroménagers	Appareils électroniques
Taux de collecte	80%	90%	50%	20%
Taux de récupération	95%	95%	90%	50%

L'économie circulaire du cuivre en 2018 (en Mt)
Schéma simplifié d'après « The World Copper Factbook 2020 », document de l'ICSG



La **plus grande marge de manœuvre** se trouve dans le **taux de collecte** de produits qui ne représentent pas la part la plus importante des réserves de cuivre recyclable (par exemple, les appareils électroniques).
Même dans le cas le plus optimiste, **le cuivre recyclé ne parviendra pas à satisfaire la demande en France.**
Cependant, les choix en terme de consommation et de recyclage pourront aboutir à un **écart décroissant entre la demande et l'approvisionnement en recyclage**, ce qui permettra de **s'adapter** à une diminution de la quantité de cuivre extractible.