



#JMS2025

Peut-on valoriser le cuivre des sols viticoles dans une économie circulaire ?

Restitution et projection autour du projet Vitalicuvivre

VITALICUIVRE : phytoextraction du cuivre et valorisation en alimentation animale

Clémentine Lapie, Justine Garraud, Hugo Luzi, Pierre Gaudin, Éric Schetelat, Marie Bonnisseau, Hervé Capioux, Cécile Le Guern, Thierry Lebeau



Journée Mondiale des Sols 2025

Santé des sols : un continuum de l'urbain au rural

15/12/2025

Contexte viticole



- ✓ **Mildiou** -> **champignon** : *Plasmopara viticola*
- ✓ **Bouillie bordelaise** : utilisé par les vignerons contre le **mildiou** depuis la fin du XIX^{ème} siècle

Principe actif : **cuivre**

À faible dose : oligoélément

À haute dose : antiseptique puissant

- ✓ **Cu s'accumule dans les sols** (Ballabio et al. 2018)

Sols viticoles français : 91 mg Cu.kg⁻¹ en moyenne

Fond géochimique : 15 mg Cu.kg⁻¹



<https://dico-du-vin.com/mildiou-maladie-de-vigne-et-ses-consequences/>

Contexte viticole



✓ Contamination : $[\text{Cu sol}] > [\text{fond géochimique}]$

Origine : lessivage

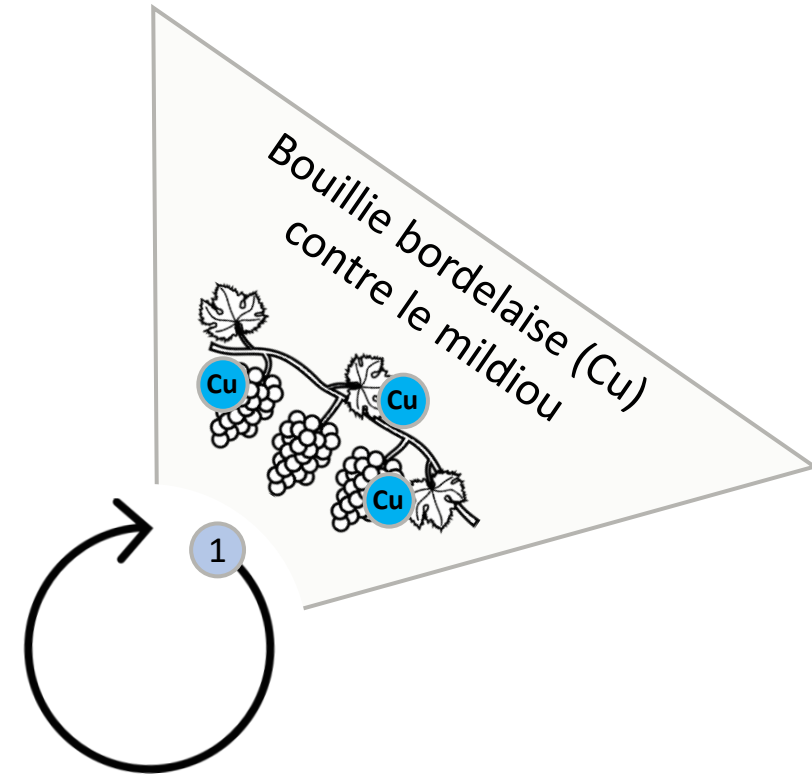
Accumulation dans les premiers horizons et fonction du nombre d'année d'utilisation du Cu (Denaix et al. 2022)

Ecotoxicologie dose apport : la notion d'utilisation inoffensive du cuivre à une dose spécifique est délicate (contexte)

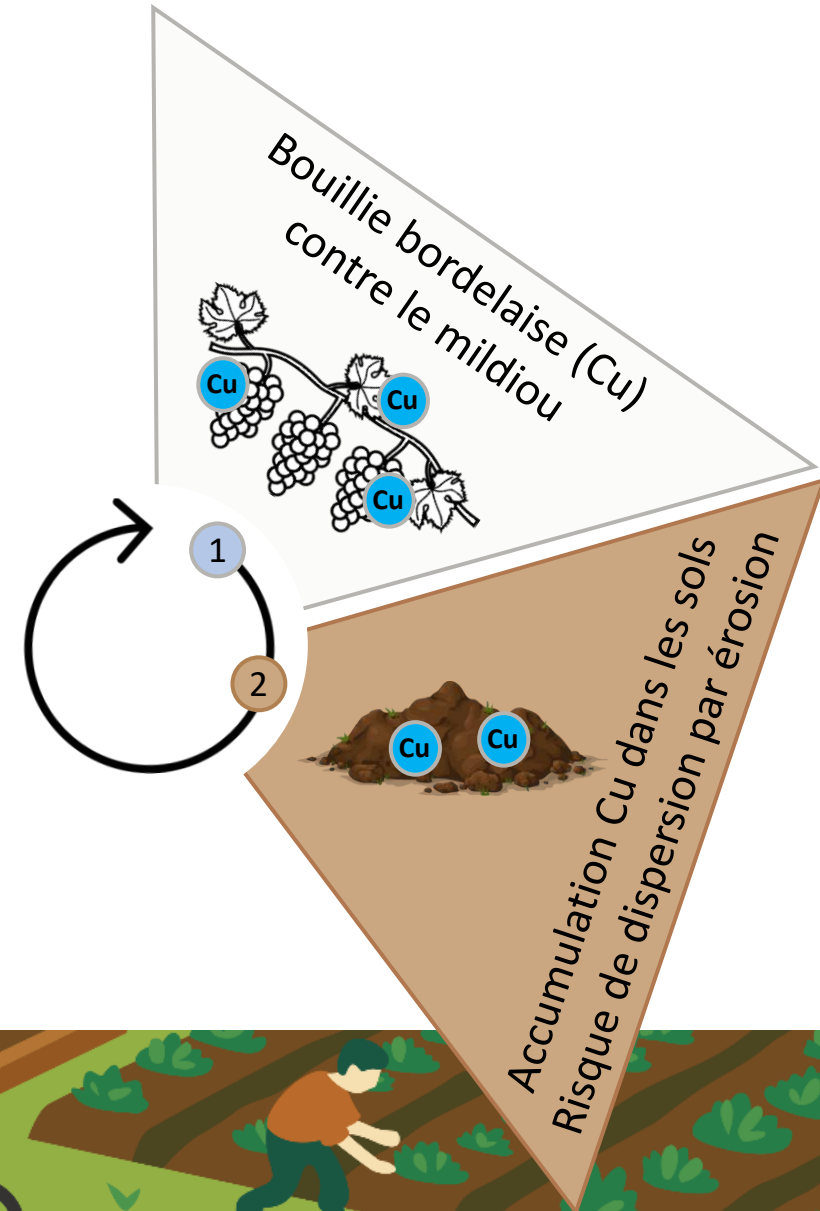
Les cas de toxicité sur vigne sont rares (système racinaire impacté) (Karimi et al. 2021 ; G. Imfeld et al. 2021)

✓ **Nouvelle réglementation** (depuis 2018) : Dose de cuivre maximale applicable : 28 kg sur 7 ans
soit en moyenne 4 kg Cu/ha/an -> contexte de réduction des doses de Cu

Projet VITALICUIVRE



Projet VITALICUIVRE

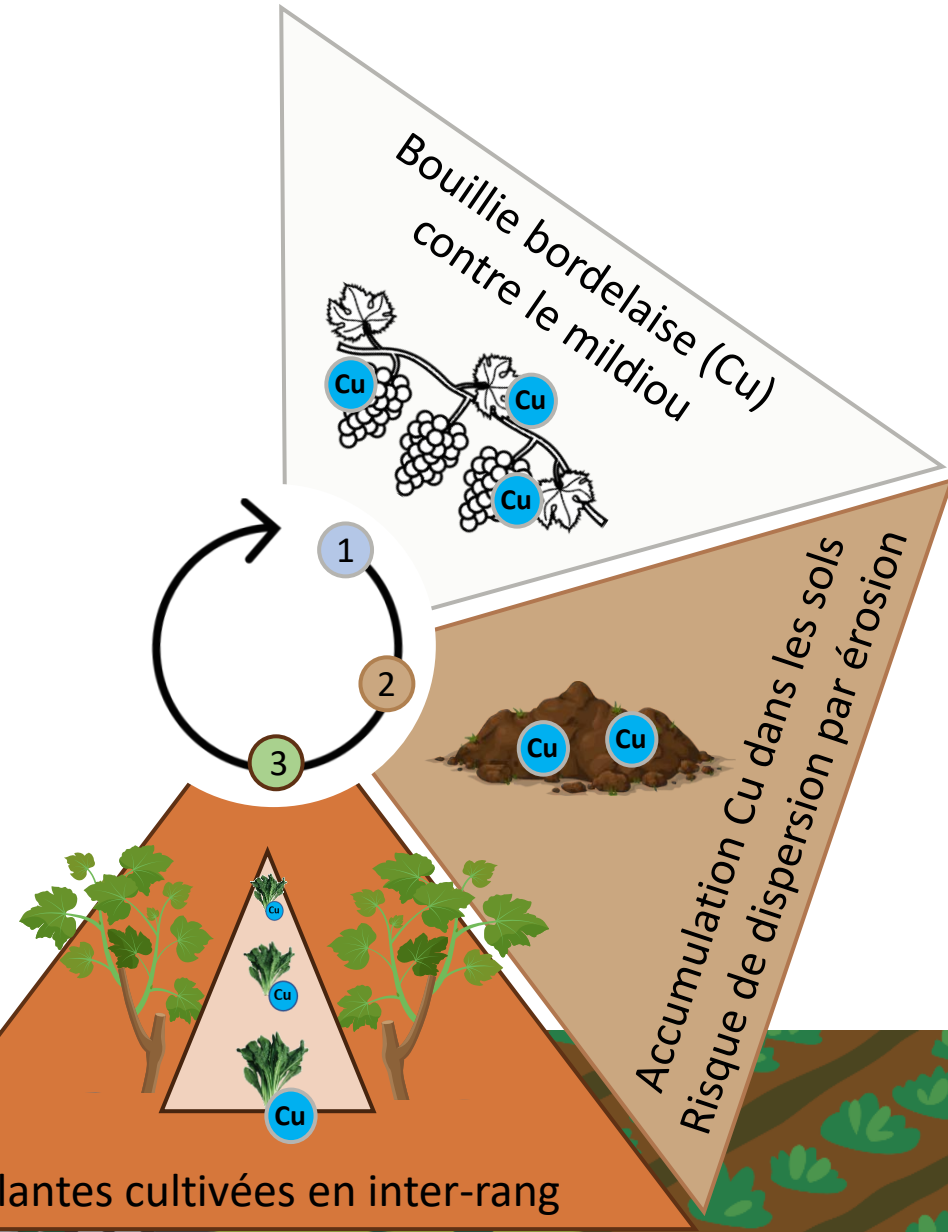


Projet VITALICUIVRE

3

Sélectionner des plantes accumulant le cuivre et pouvant être cultivées dans l'inter-rang des vignobles

- Dépollution sols viticoles
- Limitation érosion avec couvert végétal

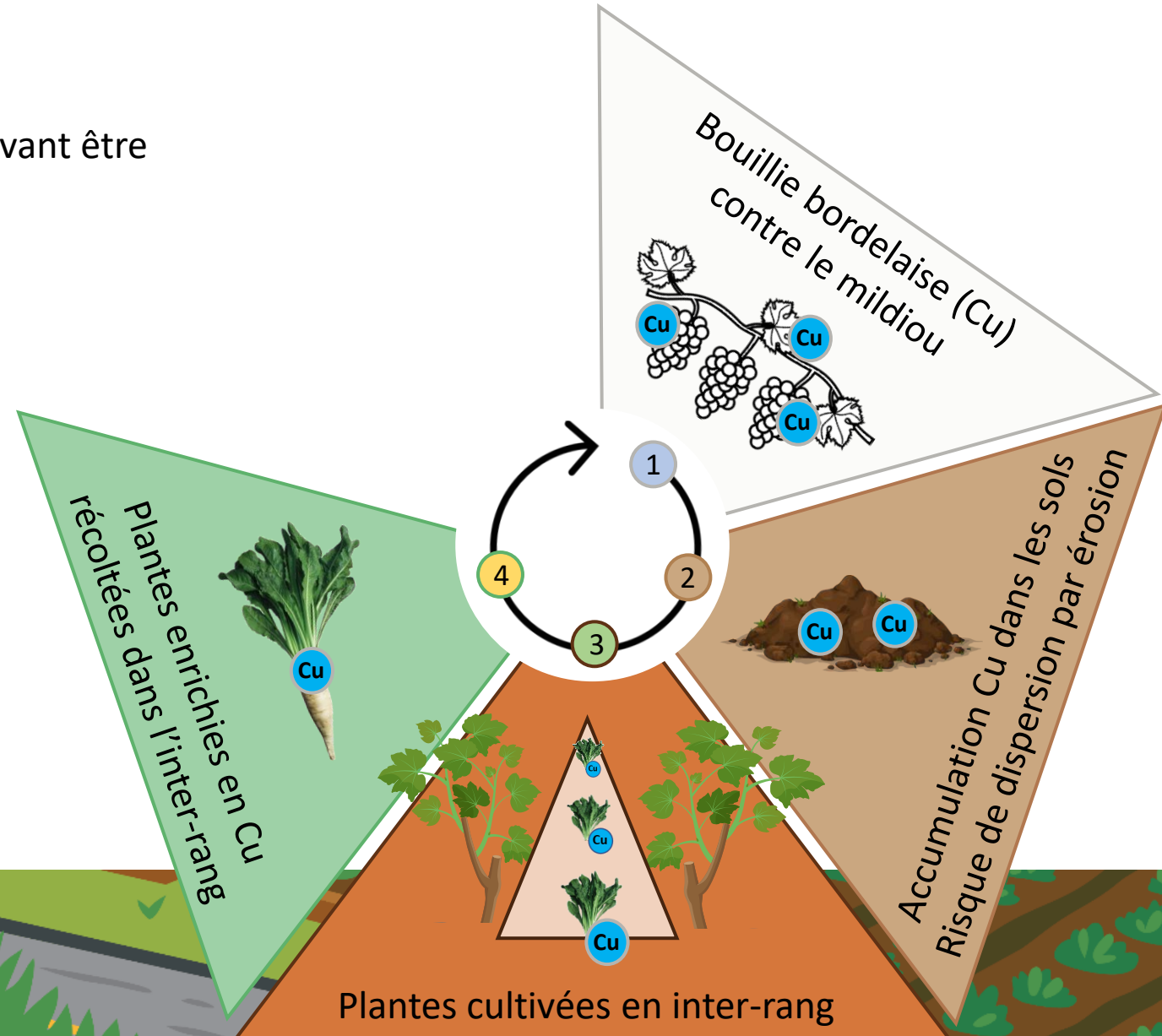


Projet VITALICUIVRE

3

Sélectionner des plantes accumulant le cuivre et pouvant être cultivées dans l'inter-rang des vignobles

- Dépollution sols viticoles
- Limitation érosion avec couvert végétal



Projet VITALICUIVRE

3

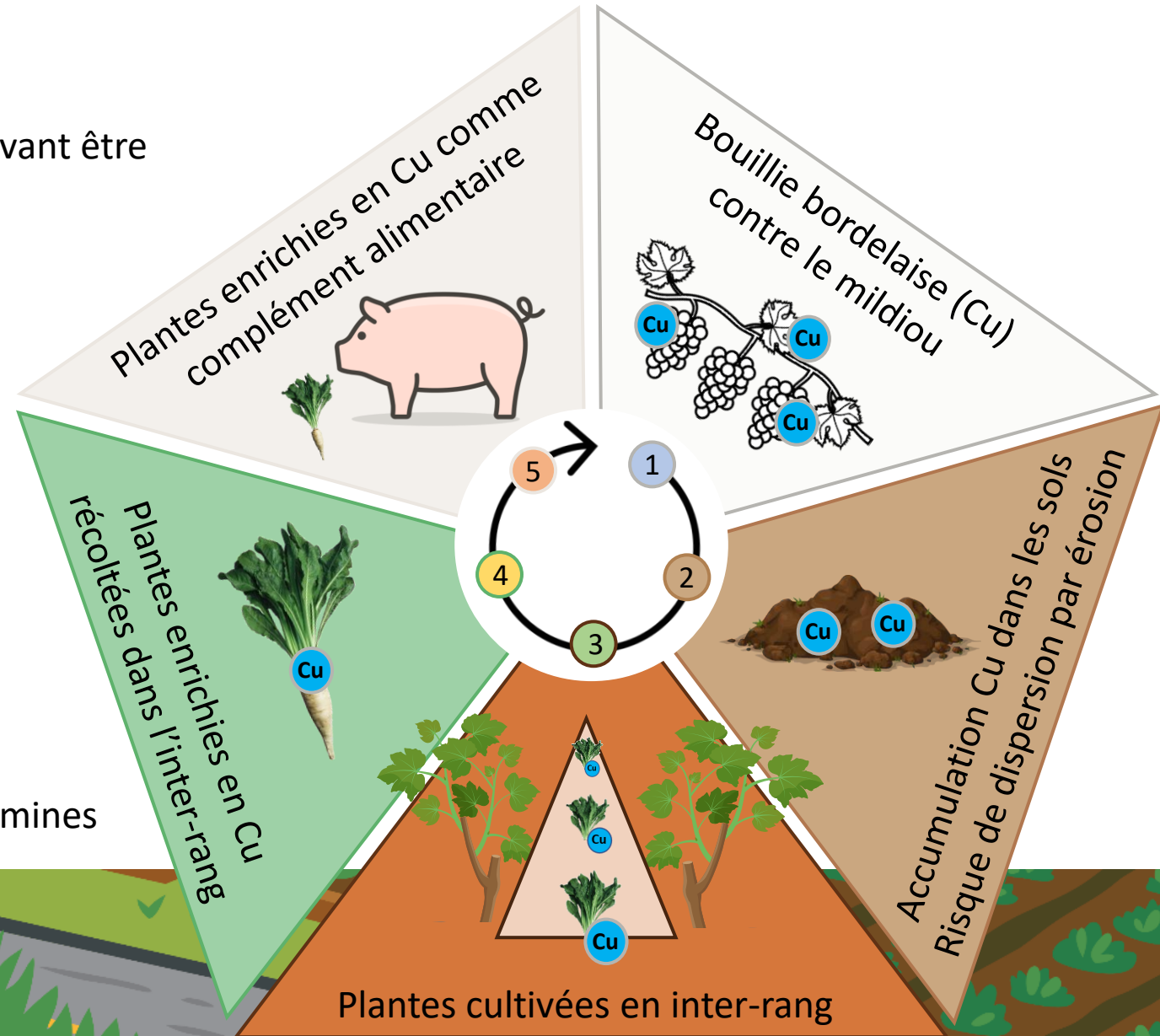
Sélectionner des plantes accumulant le cuivre et pouvant être cultivées dans l'inter-rang des vignobles

- Dépollution sols viticoles
- Limitation érosion avec couvert végétal

5

Intégrer les chicorées à l'alimentation des animaux d'élevage pour contribuer à couvrir leurs apports en cuivre

- Oligo-élément
- Action sur le microbiote des porcelets (favorise la croissance)
- Réduction de la dépendance au cuivre issu des mines



Méthodologie

1. Sélection de plantes sur la base de la littérature :

Avoine



Ray-grass



Sarrasin



Moutarde



Chicorée



Tournesol



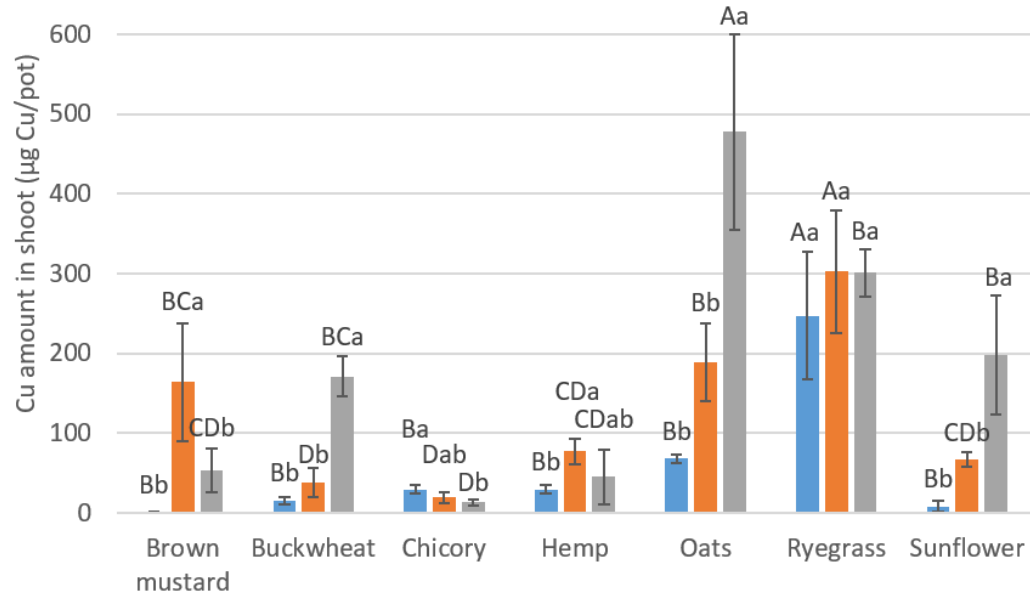
Chanvre



2. Culture des plantes en conditions contrôlées (phytotron) pour estimer rendements de phytoextraction (LPG)
3. Relevé du [Cu] au sol (BRGM)
4. Culture des plantes dans l'interrang de vignes (IFV)
5. Formulation d'aliments pour porc intégrant des plantes accumulatrices de Cu (WISIUM)
6. Analyse de cycle de vie du procédé (IFV)

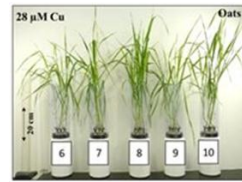
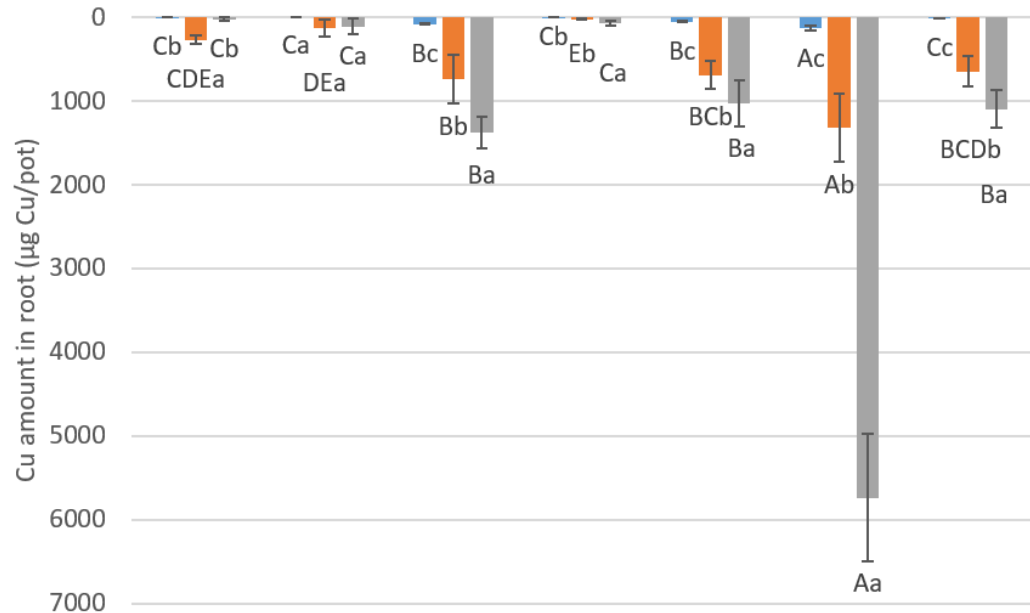


Résultats en laboratoire

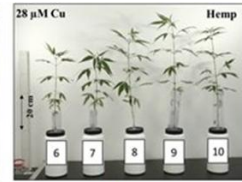


C1 0.32 µM Cu
 C2 28 µM Cu
 C3 280 µM Cu

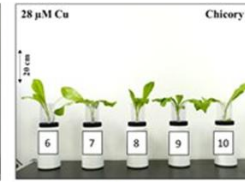
Quantité de Cu extrait



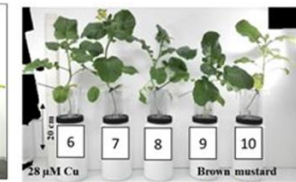
Oats



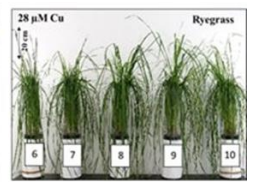
Hemp



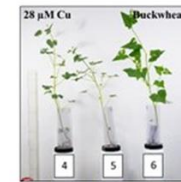
Chicory



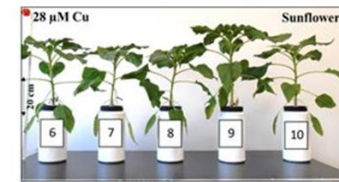
Brown mustard



Ryegrass

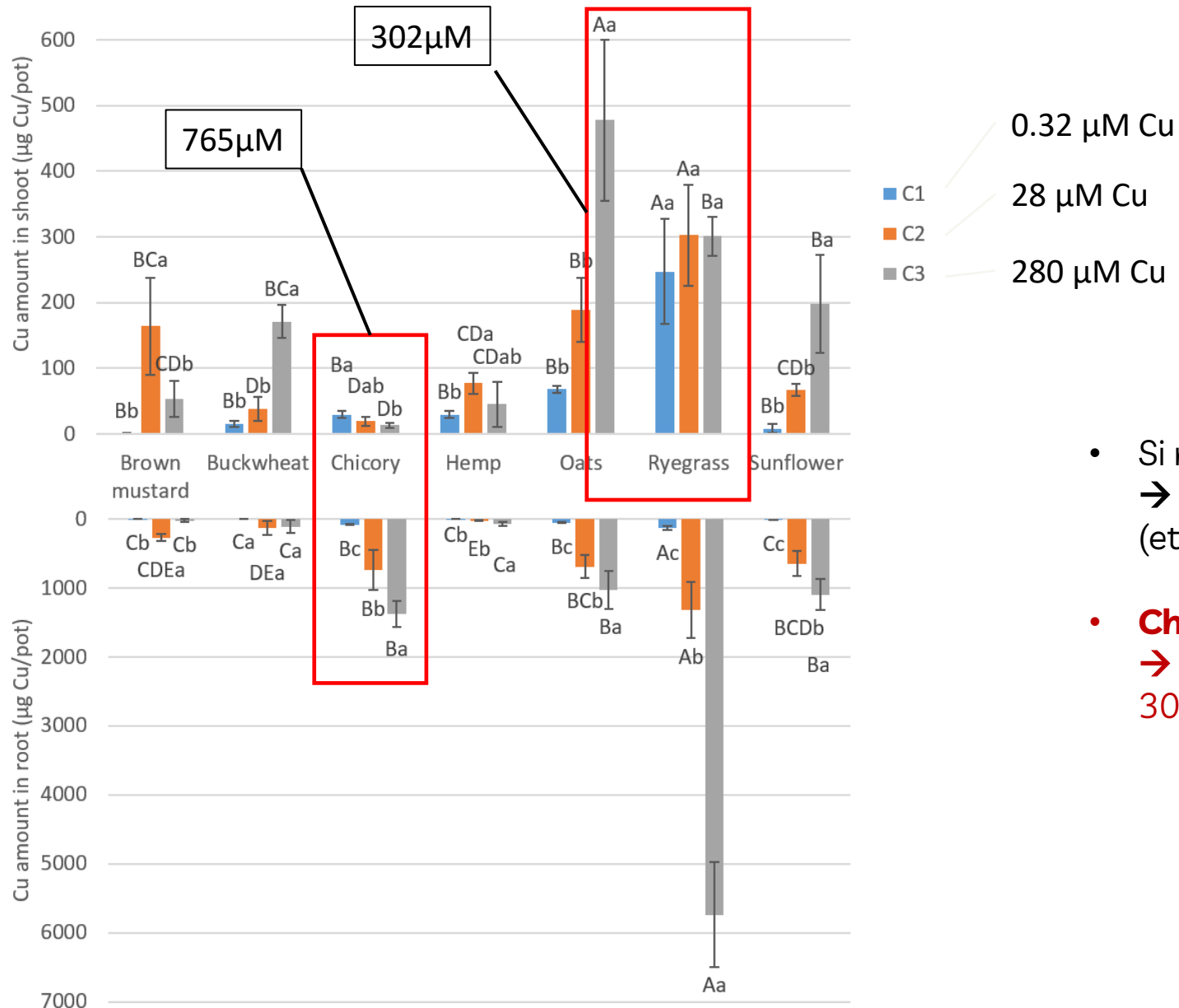


Buckwheat



Sunflower

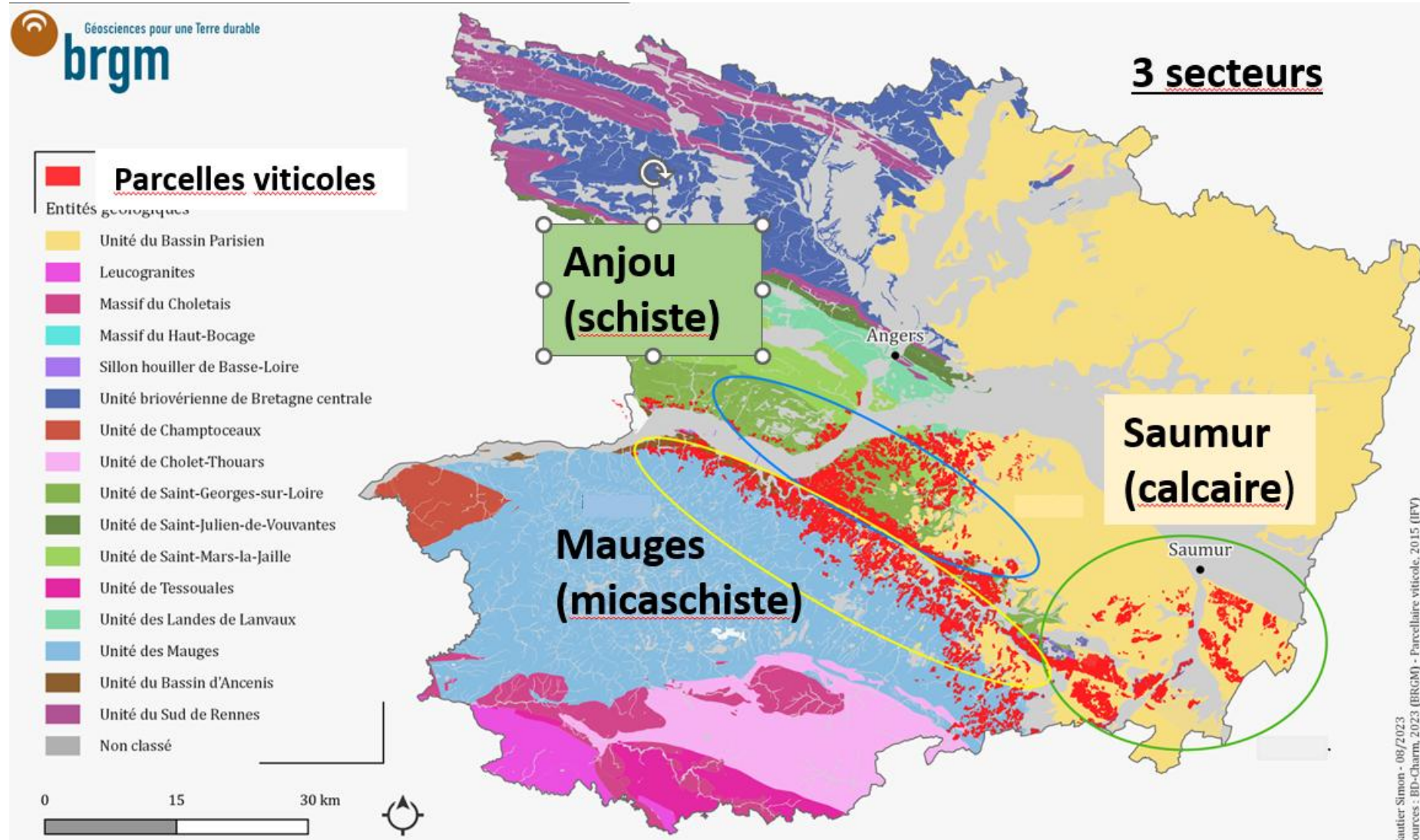
Résultats en laboratoire



Quantité de Cu extrait

- Si récolte des parties aériennes
→ **meilleur candidat = raygrass**
(et avoine à 280 $\mu\text{M Cu}$)
- Chicorée = plante intégralement récoltable**
→ **meilleur candidat avec 765 $\mu\text{g Cu}$ comparé aux 302 μg pour le raygrass**

Relevé Cuivre terrain



Relevé Cuivre terrain

✓ Acquisition de données

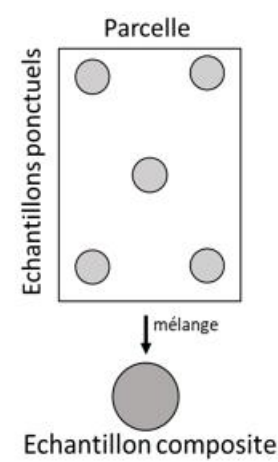
25 à 30 échantillons par secteur

Mesures pXRF sur zone

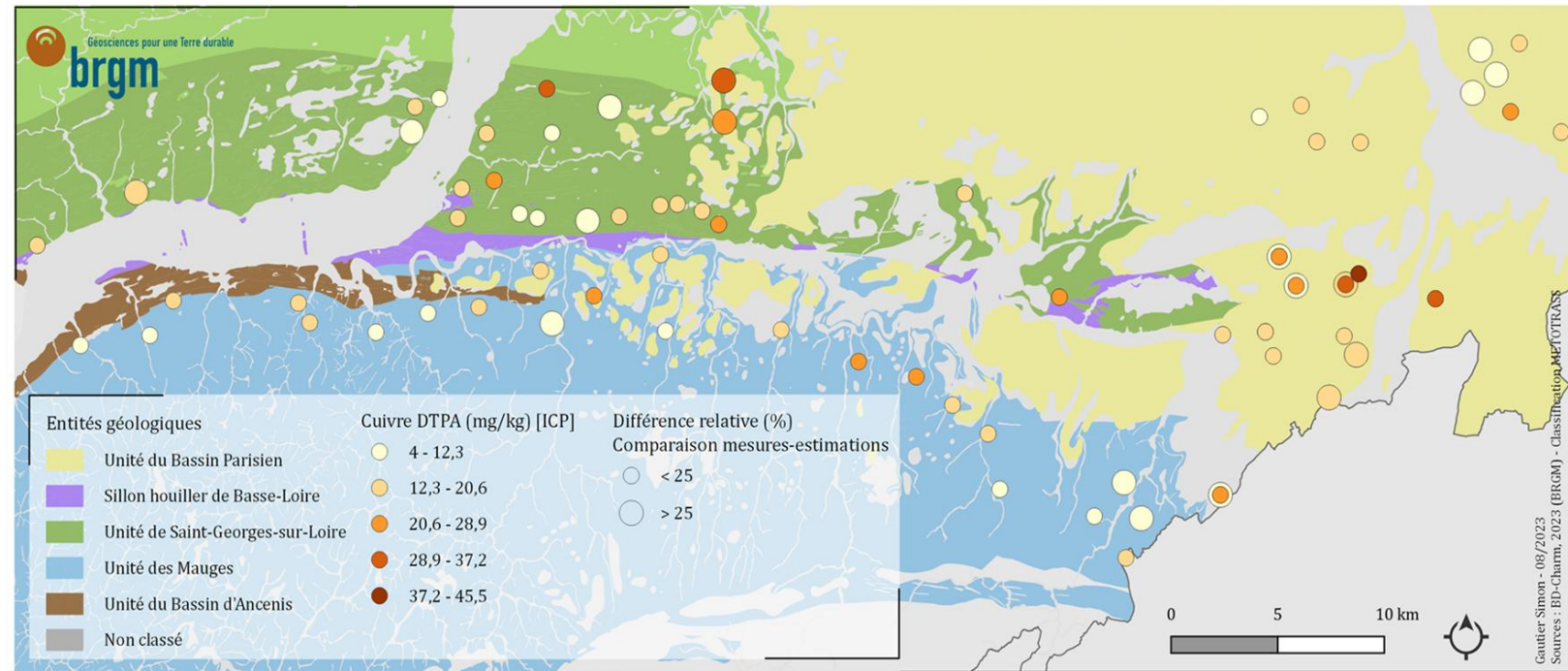
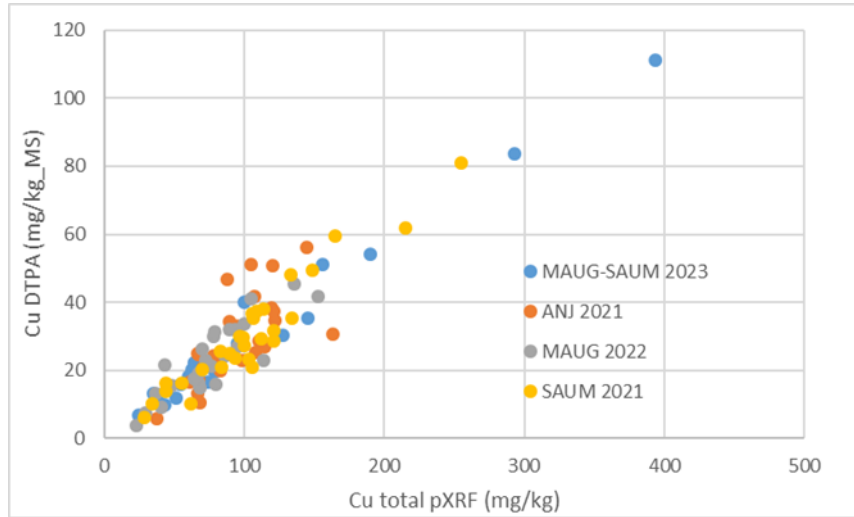
Parcelles riches en Cu

Tarière à main (0-20 cm) : composite

Analyses au laboratoire Cu DTPA et Cut



Relevé Cuivre terrain



- ✓ Validation du modèle de corrélation : permet d'approcher Cu phytoaccessible et de faciliter/accélérer la cartographie du Cu de surface (0-20)

Relevé Cuivre terrain

- ✓ Sélection de 3 parcelles expérimentales

Cu DTPA et Cu total proches
Contrastes sur Fe, pH, argile, CEC
20 à 90 points de mesures pXRF
in situ

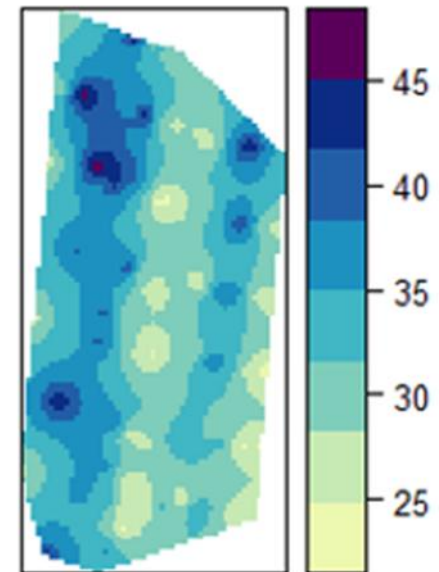
Code	Cu total mg/kg	CuDTPA mg/kg	Fer DTPA mg/Kg	pH	C org (%)	CEC	Tx argile (%)	Texture
SAUM -13	164	49,3	28,7	8,1	1,5	18	20	SLA
SAUM-24	142	59,6	111	6,7	1,5	8	10	SLA
ANJ-30	139	38,3	52,4	7,4	1,9	13	15	SLA

- ✓ Au sein d'une même parcelle : variabilité

remembrement
âge/durée culture
retournement tracteur



Teneurs en cuivre biodisponibles
estimés (mg/kg)



Mise en culture

- ✓ Mesures -> indicateurs pour évaluer l'impact des concurrences des plantes semées sur la vigne

Vigueurs

Statuts nutritionnels et hydrique

Composantes du rendement

→ pas de concurrence hydro-nutritive dans les conditions de l'essai :

- semis peu denses avec fauche précoce
- des conditions climatiques peu favorables à la concurrence
- temps essai court (2 années)
- production de biomasse faible



Avoine



Moutarde



Chicorée



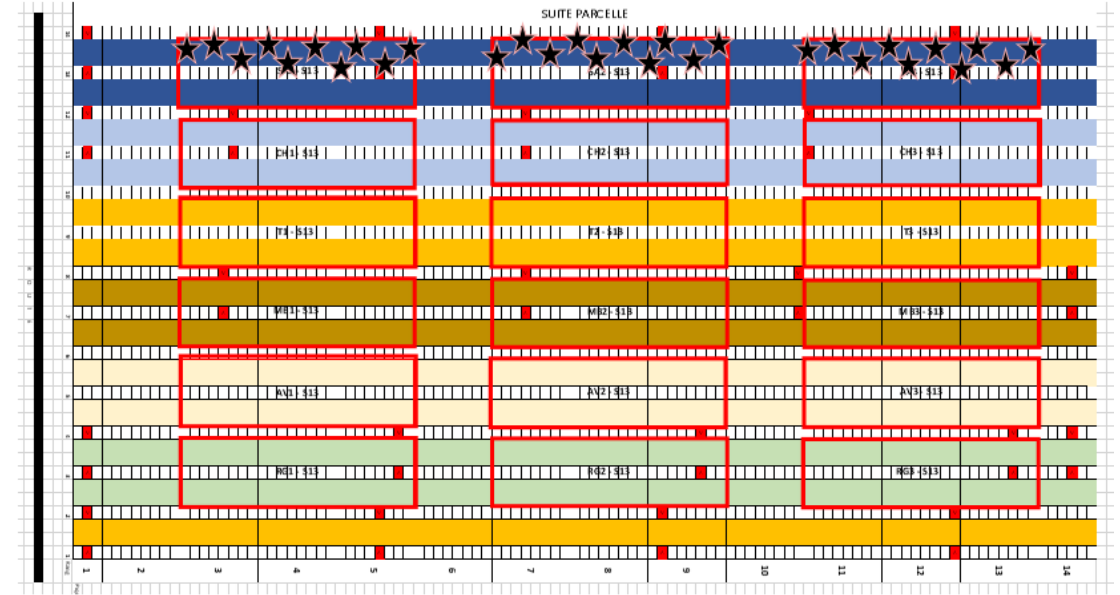
Ray-grass



Sarrazin

Rendement biomasse

- ✓ Prélèvement :
 - surface donnée
 - séparation des espèces naturelles et espèces semées
 - partie aérienne sauf chicorée (partie aérienne + racinaire)
 - séchage puis pesée
 - témoin : enherbement naturel

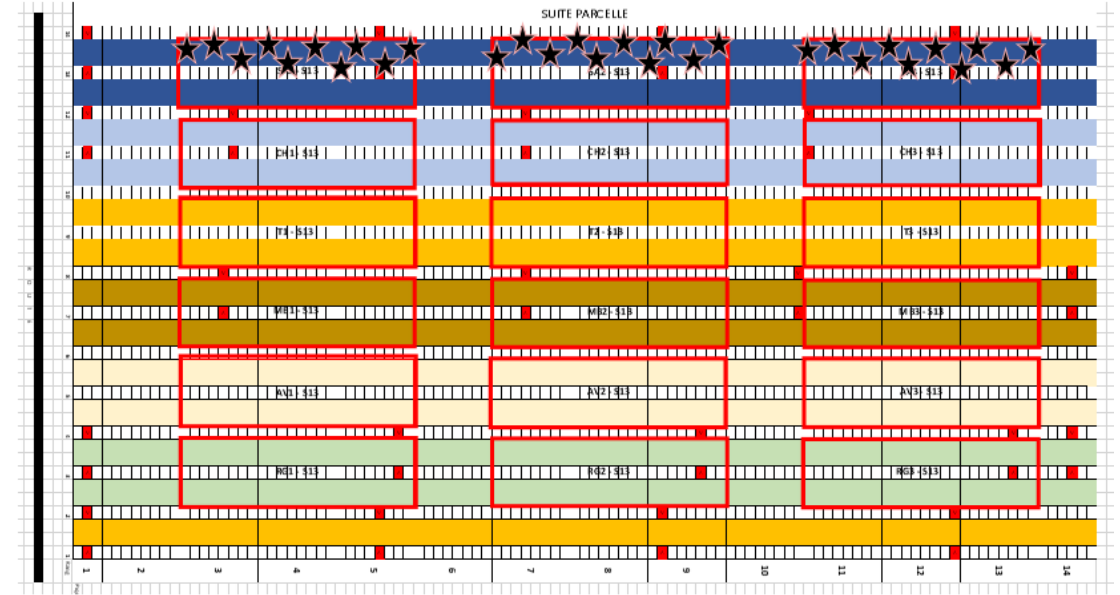


- ✓ production de biomasse faible : rendements loin de ceux retrouvés en agriculture conventionnelle (jusqu'à 10 fois moins)



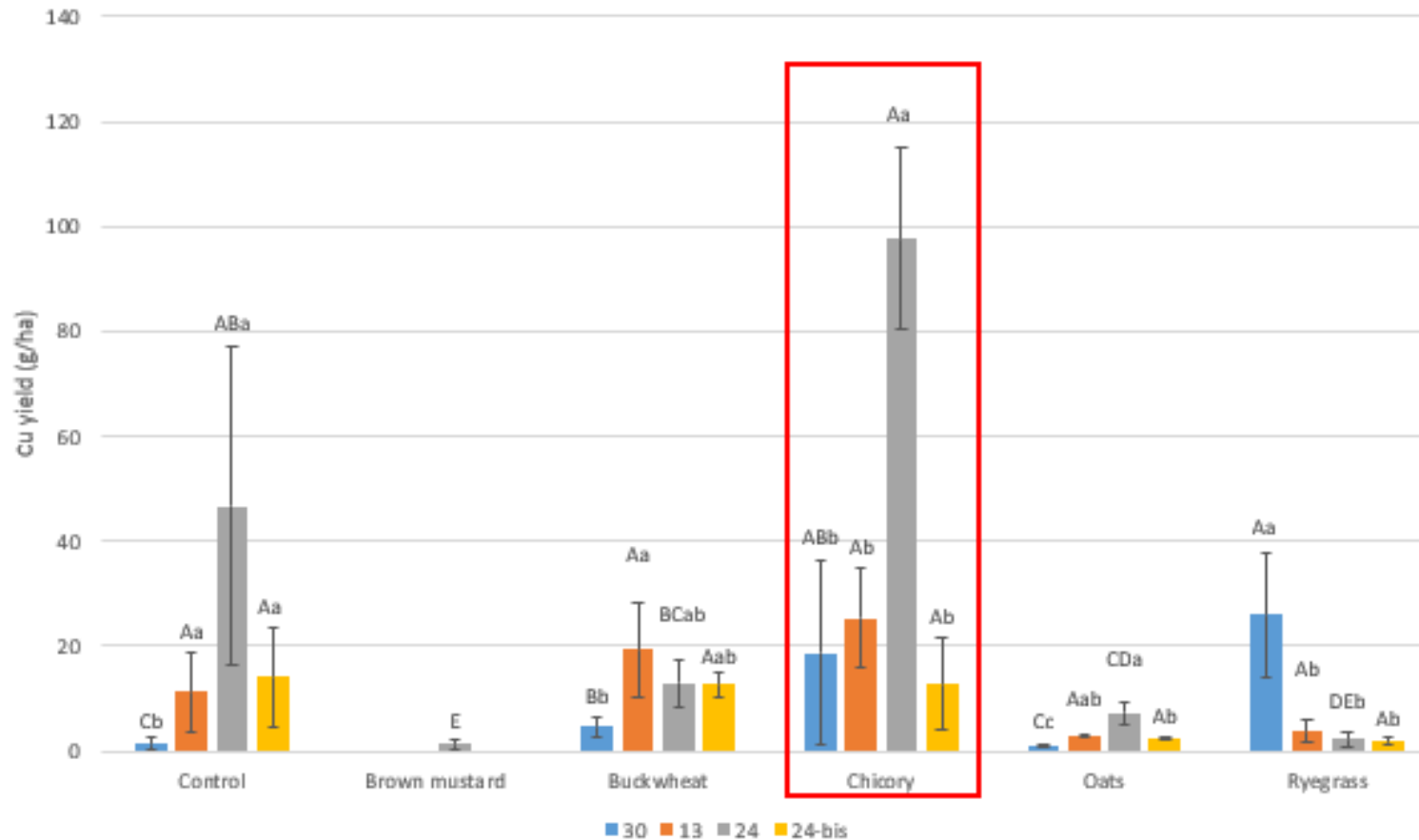
Rendement cuivre

- ✓ Prélèvement :
 - lavage des plantes
 - séchage
 - broyage
 - minéralisation
 - mesure ICP-AES : majeurs (P, K, ...) et éléments traces métalliques (Cu, Zn, Pb, ...)



- ✓ Plantes moins concentrées sur le terrain, en particulier la chicorée qui est 10x plus concentrée en hydroponie

Rendement phytoextraction

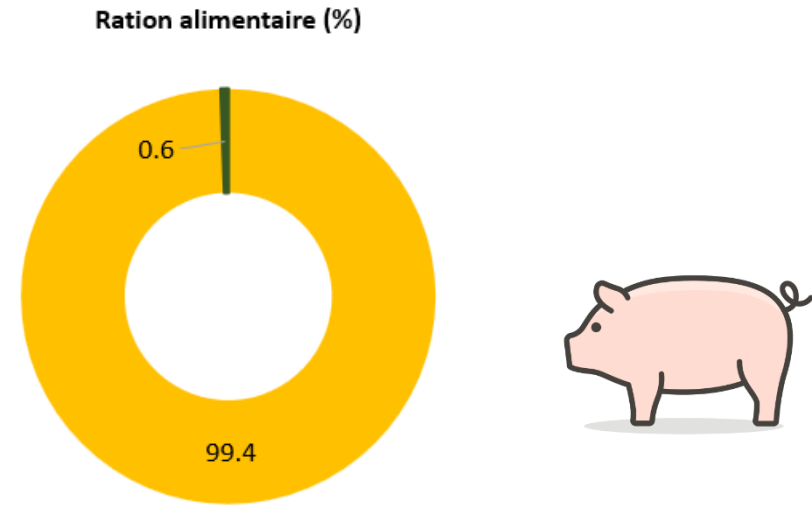


- Quantité de Cu plus importante avec la chicorée (max. 98 g/ha) grâce à sa partie racinaire
- Comparée aux quantités Cu annuelles autorisées (4 kg Cu/ha ; EU 2018/1981)
 - 2.5% de Cu extrait (max. 10%)
 - Facteur limitant : faible biomasse

Valorisation chicorée en complémentation

Concentration en Cu dans l'alimentation des porcs
 $\approx 113 \text{ mg/kg}$

Scénario actuel : Supplémentation des porcs en Cu avec des compléments alimentaires

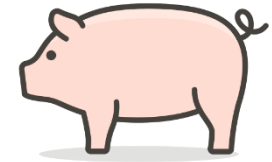
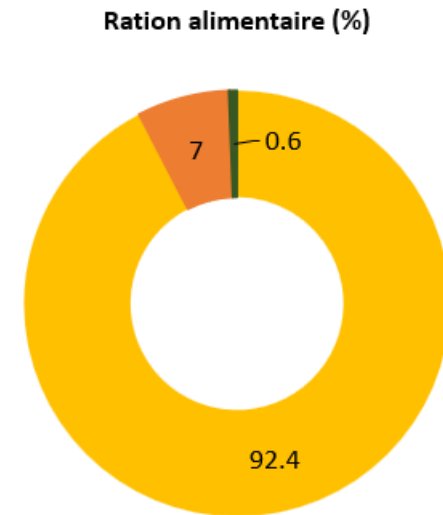


- Céréales et graines oléagineuses ($11,4 \text{ mg Cu.kg}^{-1}$)
- Complément alimentaire ($18000 \text{ mg Cu.kg}^{-1}$)

Lapie et al. in the process of submission

Valorisation chicorée en complémentation

Scenario valorisation chicorée : Introduction dans l'alimentation



- Céréales et graines oléagineuses (11,4 mg Cu.kg⁻¹)
- Racines de chicorée (34 mg Cu.kg⁻¹)
- Complément alimentaire (18000 mg Cu.kg⁻¹)

Analyse du cycle de vie (ACV)

Méthode d'évaluation environnementale multicritères :

- Permet de **quantifier les impacts environnementaux associés à une activité, un produit, un processus**
- Permet d'évaluer la pertinence du système « phytoextraction du cuivre en viticulture et valorisation de la biomasse en alimentation porcine »

ACV réalisée sur 1 ha de vigne sur notre système de phytoextraction comparé à un système classique (désherbage de l'inter-rang)



Journée Mondiale des Sols 2025

Santé des sols : un continuum de l'urbain au rural



Analyse du cycle de vie (ACV)

Périmètre de l'ACV

Modalité témoin désherbage mécanique

Mécanisation :
Travail du sol

Intrants :
Carburant

Désherbage mécanique total

Modalité avec phytoremédiation (chicorée)

Mécanisation :
Préparation du sol
Semis
Récolte

Intrants :
Carburant
Semences

Production et gestion d'un couvert
végétal phytoremédiateur

Transport du
couvert végétal

Intrants évités :
Fabrication de
complément en cuivre

Nutrition en cuivre
de porcs

Bénéfices du couvert :
Phytoextraction du cuivre



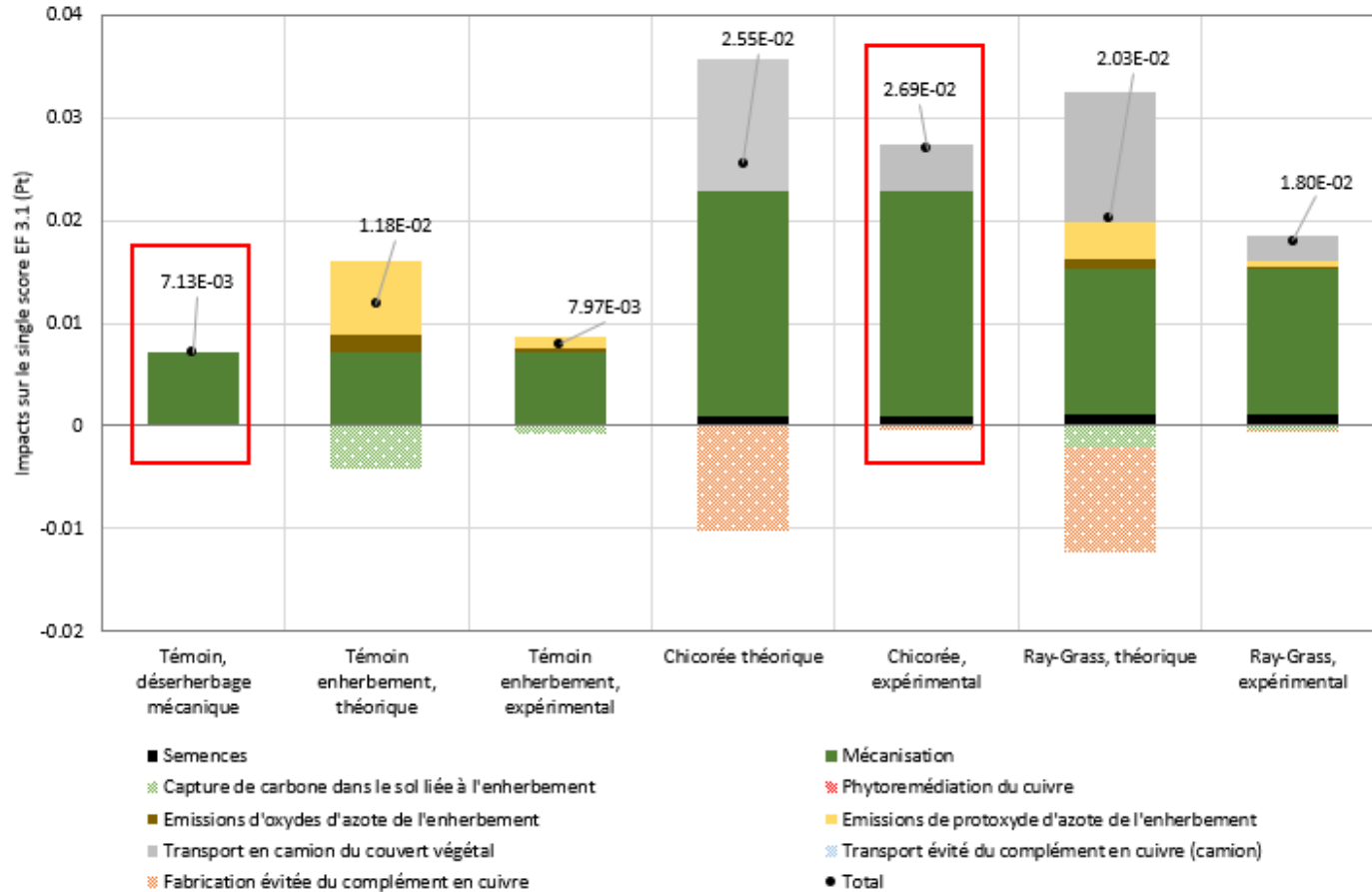
Journée Mondiale des Sols 2025

Santé des sols : un continuum de l'urbain au rural



Analyse du cycle de vie (ACV)

Résultats de l'ACV



- Single score → compilation des résultats en un seul indicateur agrégé
- Impact supérieur de la phytoremédiation
- Principaux postes d'émission : mécanisation et transport
- En pratique, résultats peuvent varier considérablement :
 - ✓ Distance de transport (150 km)
 - ✓ Météo : désherbage plus important, etc
 - ✓ Concentration en cuivre dans la plante



Conclusions et perspectives

- **Cu phytodisponible** des sols viticoles peut être **rapidement cartographié avec p-XRF**
- En l'absence d'hyperaccumulateurs de Cu, **cultiver des plantes entièrement récoltables (comme la chicorée)** est une alternative pour augmenter la quantité de Cu extraite des sols
- Il est possible de **compléter l'alimentation porcine** (ou les vaches) avec des **plantes enrichies en Cu**
- L'ACV montre que la **phytoextraction Cu + valorisation Cu en alimentation animale** pourrait être **pertinente sous certaines conditions**
- La phytodisponibilité du Cu, la croissance des plantes et donc la quantité de Cu extraite par les plantes peuvent être accrues en bioaugmentant les sols (e.g. *Pseudomonas putida*)



Merci de votre attention !

Me contacter : marie.bonnisseau@vignevin.com / esteban.fortin@vignevin.com



#JMS2025

Atelier

Quelles pratiques d'entretien du sol favorisent la biodisponibilité du Cu ?

Quelles pratiques d'entretien du sol pour améliorer la production de biomasse des plantes phytoextractrices ?

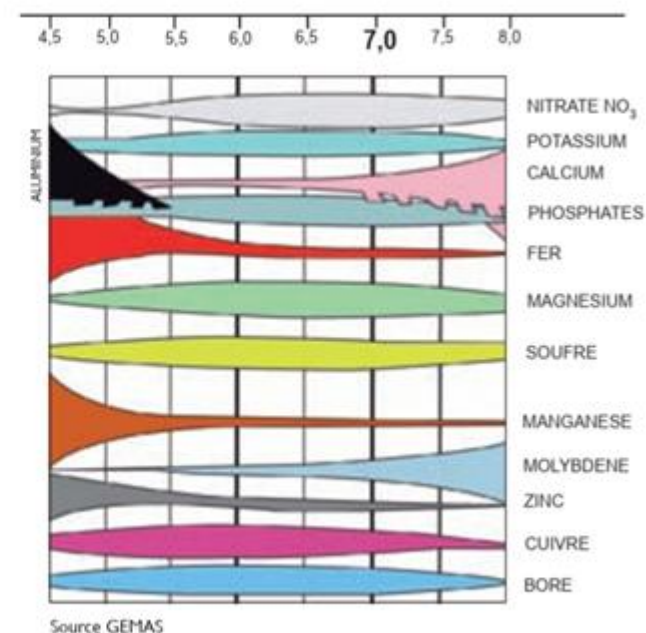
Comment faire adhérer la filière viticole à cette pratique de plantes phytoextractrices ?



Quelles pratiques d'entretien du sol favorisent la biodisponibilité du Cu ?

- ✓ Quantité de Cu dans une parcelle est fonction du nombre d'année d'usage et des quantités
- ✓ Disponibilité du Cu dans le sol dépend fortement du pH du sol, de la teneur en MO [thé de compost, sidérophore, activité biologique ...] <-> sorption Cu dans le sol dépend fortement du pH du sol, de la teneur en MO, oxydes de fer [chaulage, ajout de MO ...]
- ✓ Rendre le Cu disponible ou le fixer ?


Diagramme d'assimilation
des éléments minéraux
en fonction du pH
(Truog, 1948)



Quelles pratiques d'entretien du sol pour améliorer la production de biomasse des plantes phytoextractrices ?

- ✓ Densité de semis
- ✓ Fertilisation des semis
- ✓ Choix des plantes
- ✓ Si 10T de biomasse MS/ha et 200mg de Cu/kg de MS, alors rendement en Cu de 2kg/ha/an = apport annuel moyen

Comment faire adhérer la filière viticole à cette pratique de plantes phytoextractrices ?

- ✓ Choix des plantes
- ✓ Dépasser les freins techniques à la récolte
- ✓ Filière porcine pas la plus pertinente -> 
- ✓ Autre filière : Biochar
- ✓ Comment structurer la filière locale pour valoriser ces plantes ? ACV pertinente