

# LA CHICORÉE : plante intégralement récoltable pour la phytoextraction du cuivre et sa valorisation en alimentation animale

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



Culture de chicorée en inter-rang  
Pierre Gaudin



# CONTEXTE

- ✓ Mildiou causé par **champignon** :

*Plasmopara viticola*

Effets du mildou sur la vigne



IFV Occitanie



INRAE

# CONTEXTE

- ✓ Mildiou causé par **champignon** :

*Plasmopara viticola*

- ✓ **Bouillie bordelaise** : utilisé par les vignerons contre le **mildiou**

Principe actif : **cuivre**

À faible dose : oligoélément

A haute dose : antiseptique puissant

Effets du mildou sur la vigne



IFV Occitanie



INRAE



# CONTEXTE

- ✓ Bouillie bordelaise utilisée depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle → **Cu s'accumule dans les sols**

(Ballabio et al. 2018)

Sols viticoles français : 91 mg Cu.kg<sup>-1</sup> en moyenne

Fond géochimique : 15 mg Cu.kg<sup>-1</sup>

Effets néfastes sur les organismes du sol  
apparaissent dès 67 mg Cu.kg<sup>-1</sup>

(Karimi et al. 2021)



# CONTEXTE

- ✓ Bouillie bordelaise utilisée depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle → **Cu s'accumule dans les sols**

(Ballabio et al. 2018)

Sols viticoles français : 91 mg Cu.kg<sup>-1</sup> en moyenne

Fond géochimique : 15 mg Cu.kg<sup>-1</sup>

Effets néfastes sur les organismes du sol  
apparaissent dès 67 mg Cu.kg<sup>-1</sup>



(Karimi et al. 2021)

 INRAE

Réduire la charge en cuivre des sols :

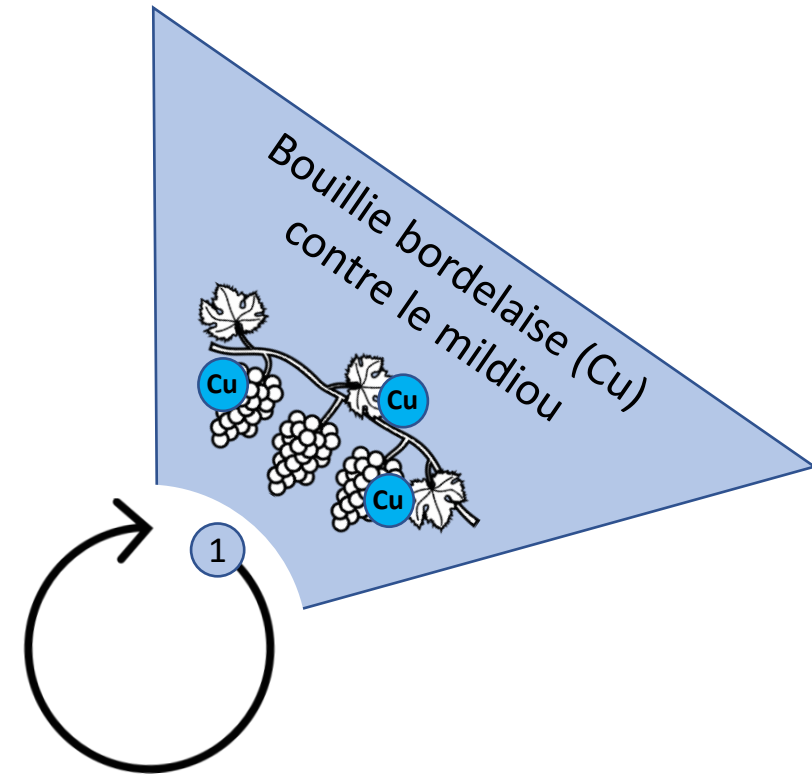
- ✓ **Nouvelle réglementation** (depuis 2018) : Dose de cuivre maximale applicable : 28 kg sur 7 ans

Soit en moyenne 4 kg Cu/ha/an

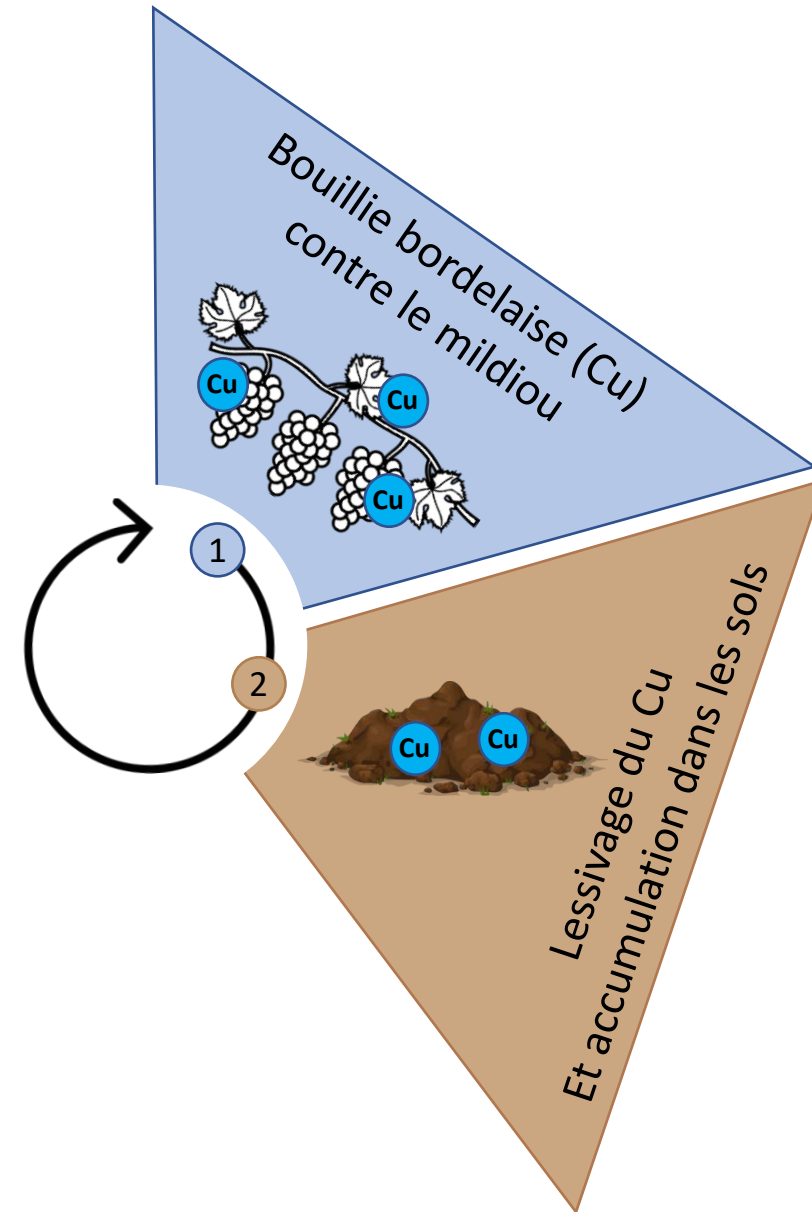
Réglementation européenne (27 novembre 2018)

- ✓ **Phytoextraction** : culture *in situ* de plantes qui accumulent les éléments traces dans leurs parties récoltables

# PROJET VITALICUIVRE



# PROJET VITALICUIVRE

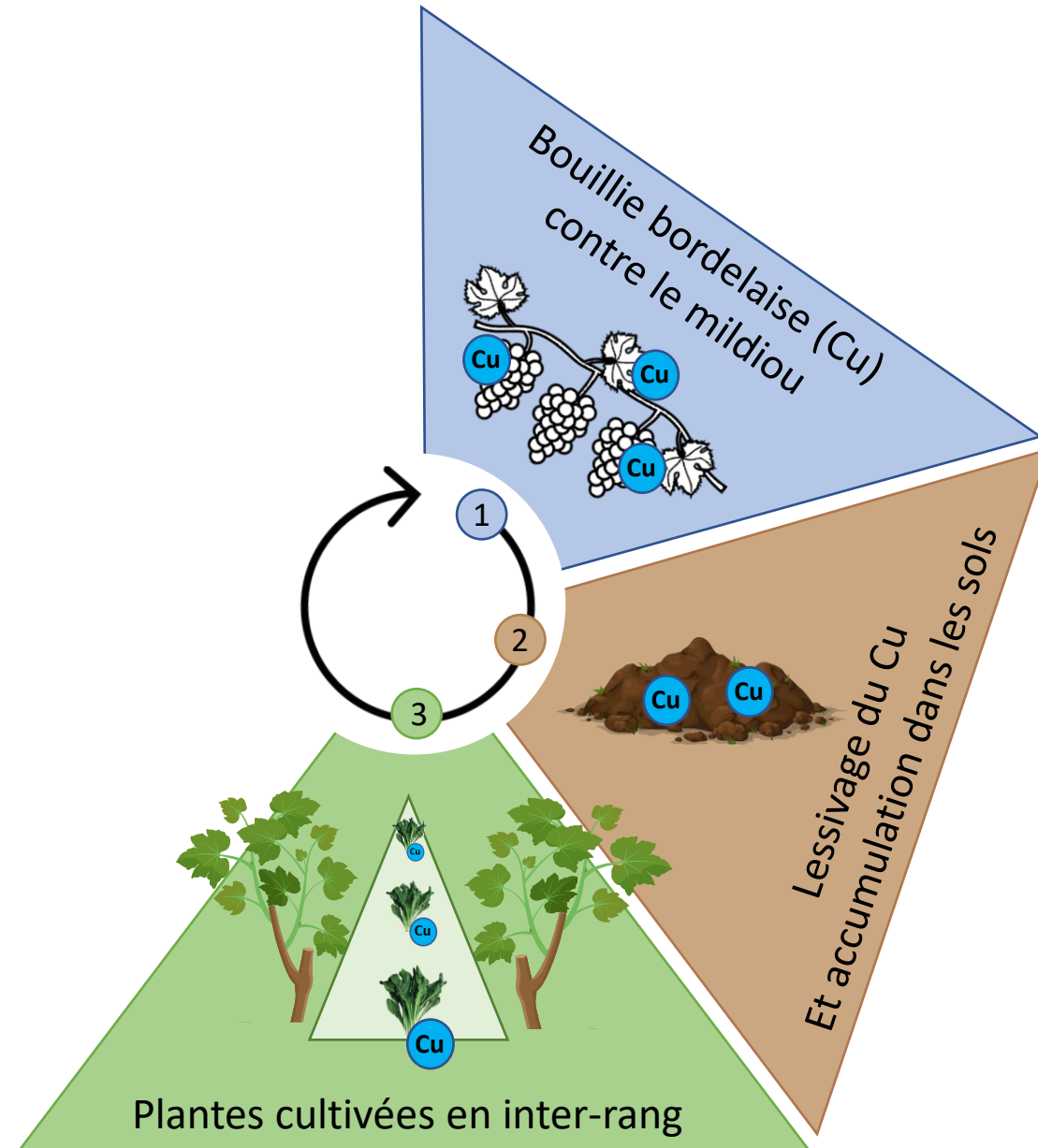


# PROJET VITALICUIVRE

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



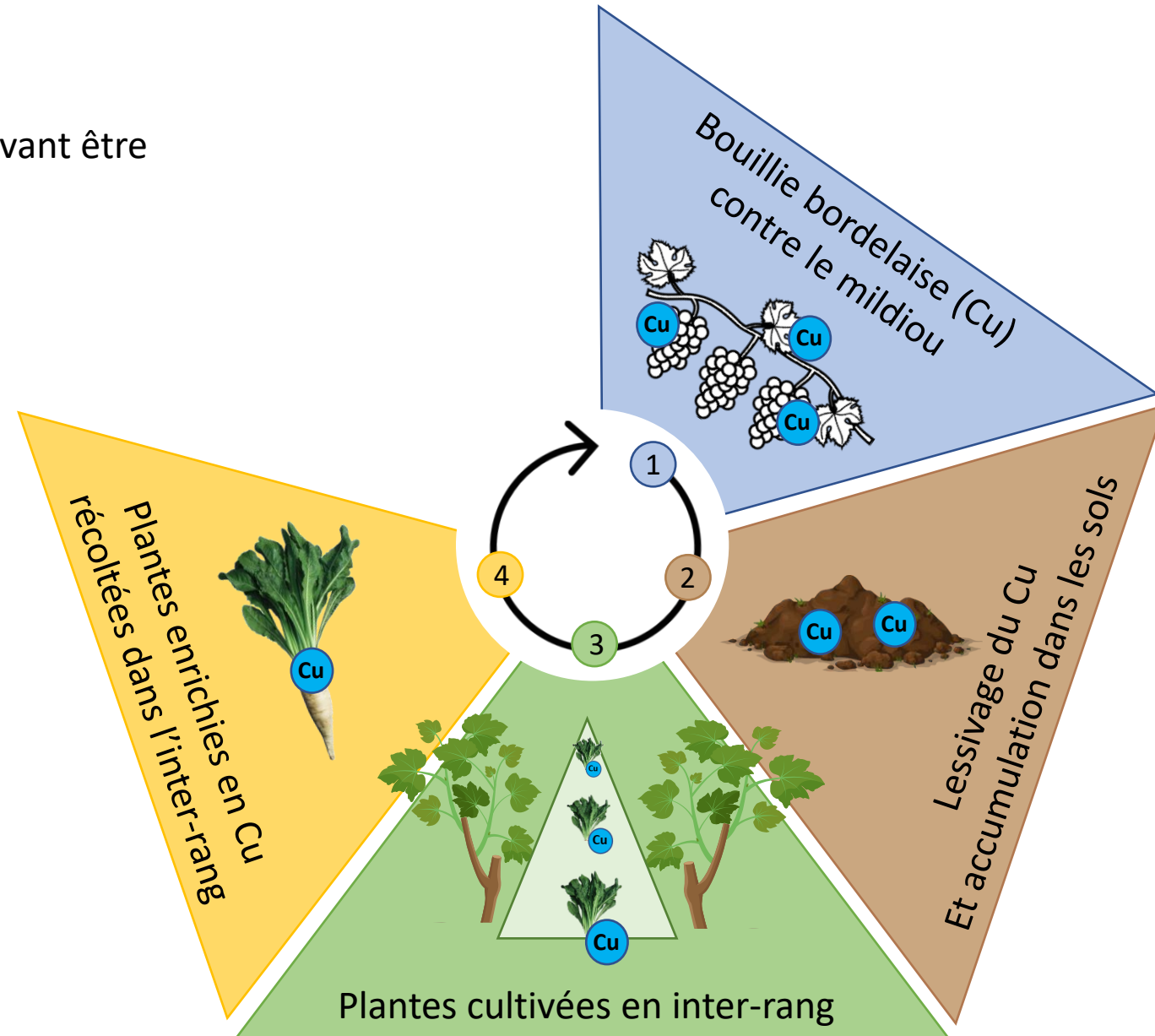


# PROJET VITALICUIVRE

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

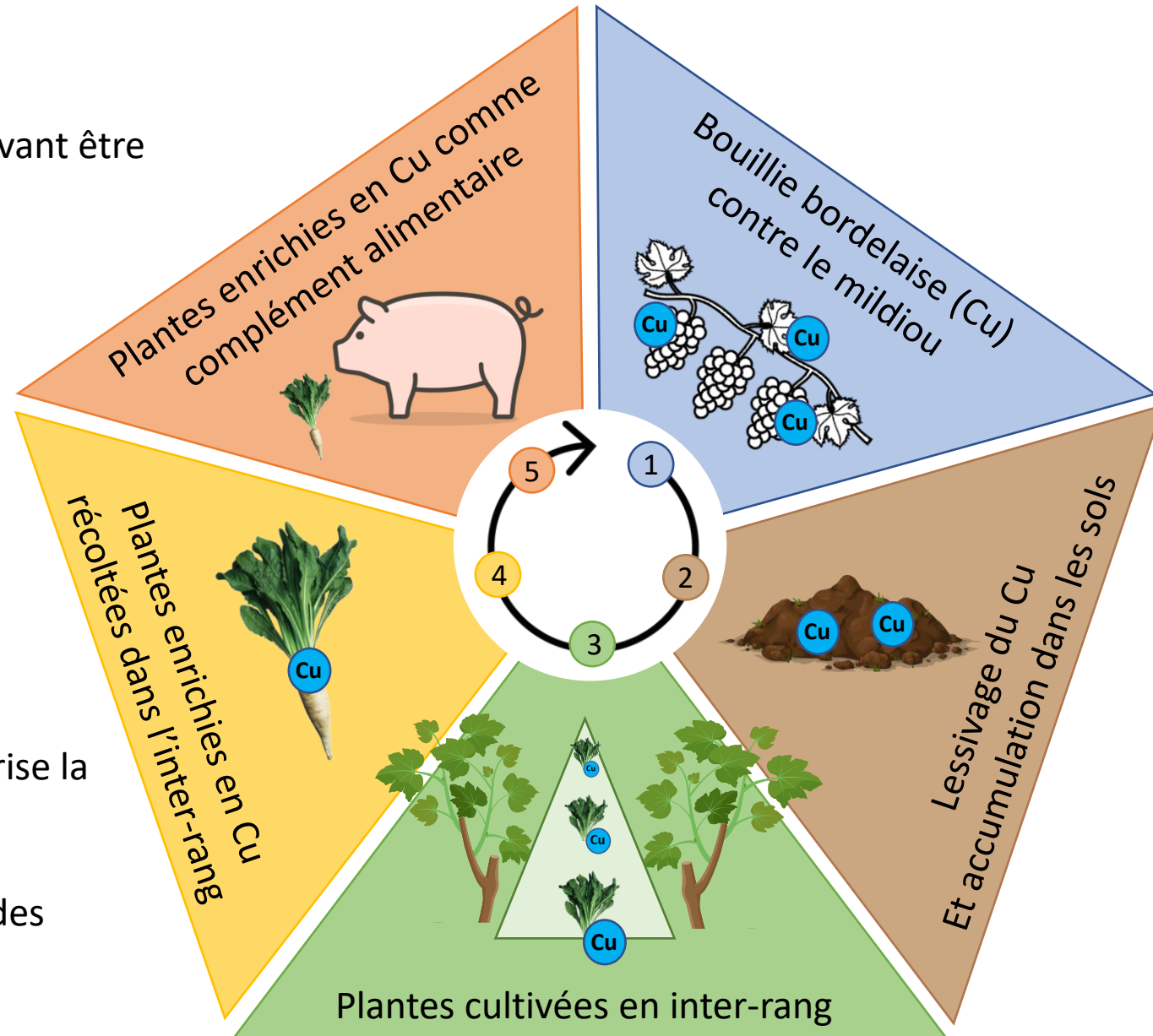
**Sélectionner des plantes accumulant le cuivre** et pouvant être cultivées dans l'inter-rang des vignobles

- 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



# METHODOLOGIE

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

Tournesol



Avoine



Ray-grass



Sarrasin



Chanvre



Moutarde



Chicorée



## 2. Culture des plantes en conditions contrôlées (phytotron)

## 3. Culture des plantes sur le terrain (trois parcelles sélectionnées)

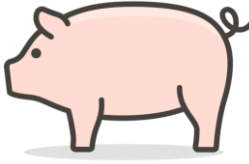
## 4. Sélection d'une plante avec de bons rendements de phytoextraction

## 5. A partir des concentrations obtenues → formulation alimentation animaux

## 6. Analyse de cycle de vie de la phytoremédiation

# Scénario I : Cu issu des compléments alimentaires

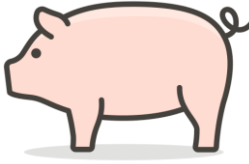
→ Scénario conventionnel



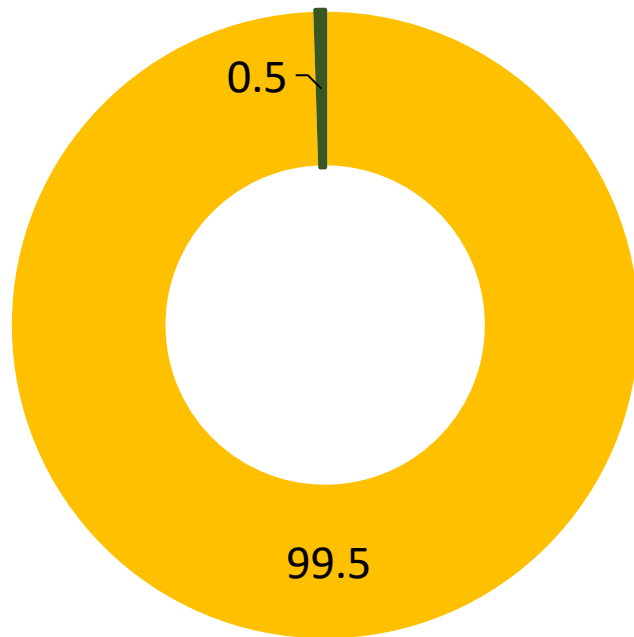
## Alimentation des porcs :

- Céréales : blé, orge, avoine
- Graines oléagineuses : colza, tournesol, soja
- Vitamines et minéraux donc  $\text{CuSO}_4$

# Scenario I : Cu issu des compléments alimentaires



Ration alimentaire des porcs

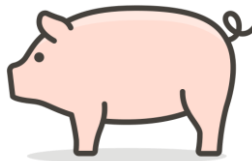


■ Céréales & graines oléagineuses (concentration en cuivre :  $11,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ )

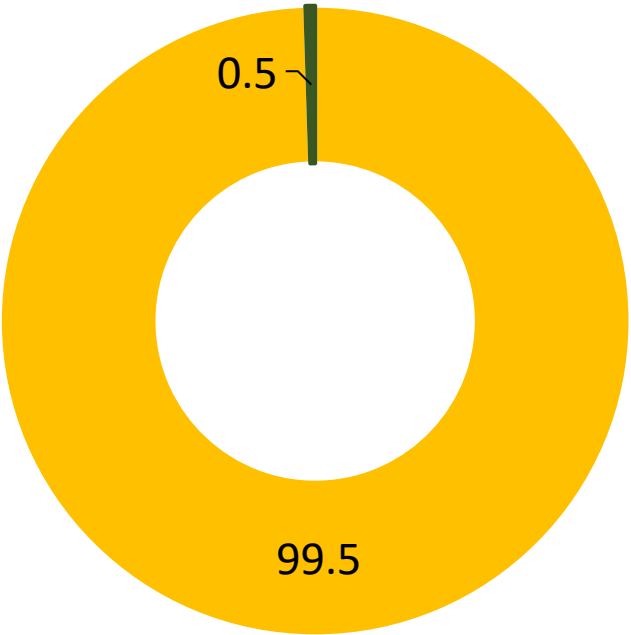
■ Complément alimentaire (concentration en cuivre :  $18\,000 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) → Vitamines et minéraux donc  $\text{CuSO}_4$



# Scenario I : Cu issu des compléments alimentaires



Ration alimentaire des porcs



Contribution	Concentration de cuivre dans la ration finale	Teneur maximale en cuivre
	mg.kg <sup>-1</sup> (88 % MS)	mg.kg <sup>-1</sup> (88 % MS)
Céréales & graines oléagineuses	11,3	
Complément alimentaire	90	
Total	101,3	113,6

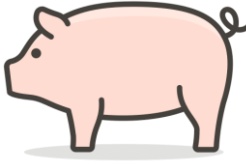
\*Réglementation : 100 mg de Cu.kg<sup>-1</sup> (MS)  
soit 113.6 mg à 88% de MS

■ Céréales & graines oléagineuses (concentration en cuivre : 11,4 mg.kg<sup>-1</sup>)

■ Complément alimentaire (concentration en cuivre : 18 000 mg.kg<sup>-1</sup>) → Vitamines et minéraux donc CuSO<sub>4</sub>

# Scénario II : Cu issu des chicorées cultivées en hydroponie

## Scénario optimiste




### Concentrations en cuivre maximales

- Issues d'une culture en hydroponie en **conditions contrôlées idéales**
  - bonne luminosité
  - Nutriments renouvelés régulièrement : pas de carence
  - Pas de stress hydrique
- Dans la solution hydroponique : tout le **cuivre est disponible**

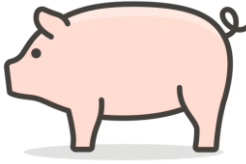
### Pourcentage d'incorporation : 18,1 %

→ Incorporation possible jusqu'à 25 %

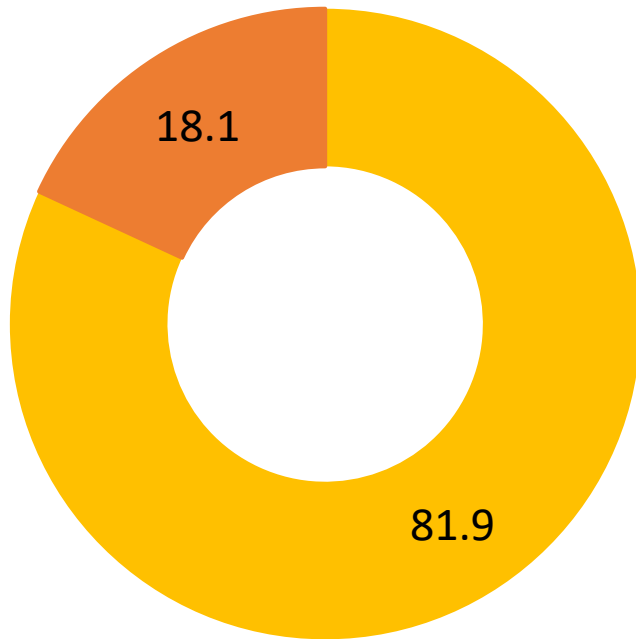


Culture de chicorée en phytotron  
Pierre Gaudin 

# Scenario II : Cu issu des chicorées cultivées en hydroponie

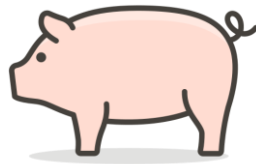


Ration alimentaire des porcs

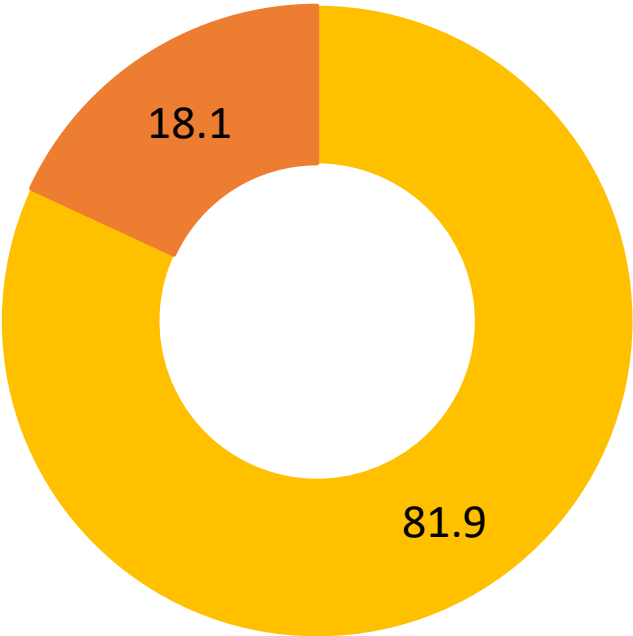


- Céréales & graines oléagineuses (concentration en cuivre :  $11,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ )
- Racines de chicorée (concentration en cuivre :  $576 \text{ mg.kg}^{-1}$ )

# Scenario II : Cu issu des chicorées cultivées en hydroponie



Ration alimentaire des porcs



Contribution	Concentration de cuivre dans la ration finale	Teneur maximale en cuivre
	mg.kg <sup>-1</sup> (88 % MS)	mg.kg <sup>-1</sup> (88 % MS)
Céréales & graines oléagineuses	9,3	
Racines de chicorée	104,3	
Complément alimentaire	0	
Total	113,6	113,6*

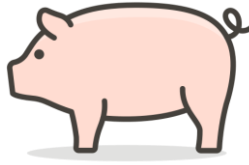
■ Céréales & graines oléagineuses (concentration en cuivre : 11,4 mg.kg<sup>-1</sup>)

■ Racines de chicorée (concentration en cuivre : 576 mg.kg<sup>-1</sup>)

\*Réglementation : 100 mg de Cu.kg<sup>-1</sup> (MS)  
soit 113.6 mg à 88% de MS

# Scénario III : Cu issu des chicorées cultivées en champs

## → Scénario pessimiste



### Concentrations en cuivre dans la plante : faible

- Issues d'une culture en plein champs
  - Cuivre peu disponible (environ 1% immédiatement disponible pour la plante)
  - En 2022 : sécheresse exceptionnelle
    - + 2,5 °C au dessus des normales de saison et 450 mm de pluie en 2022 versus 800 mm en 2023

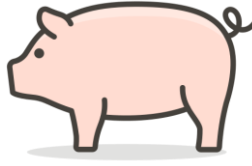
### Pourcentage d'incorporation : 7 % maximum

- Conseillé par l'industriel :
  - Bonne diversité des aliments
  - Ne pas dépendre d'un seul aliment permet d'amortir les coûts en cas de flambée du prix d'une des matières premières

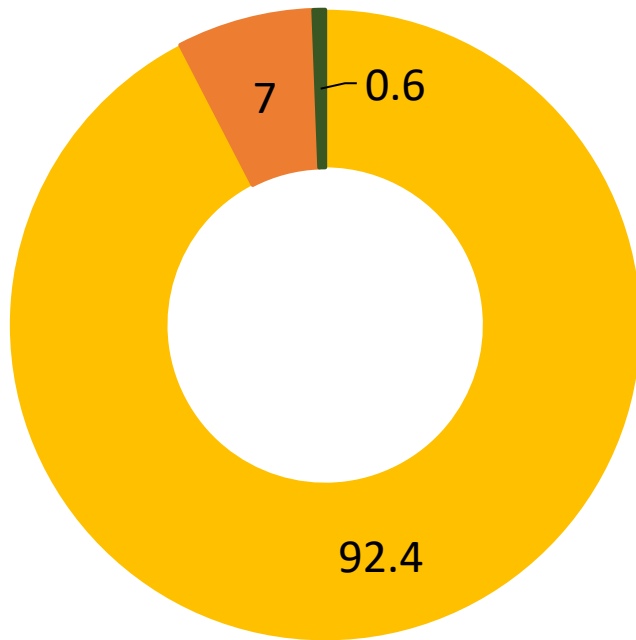




# Scenario III : Cu issu des chicorées cultivées en champs

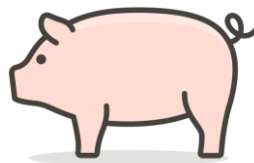


Ration alimentaire des porcs

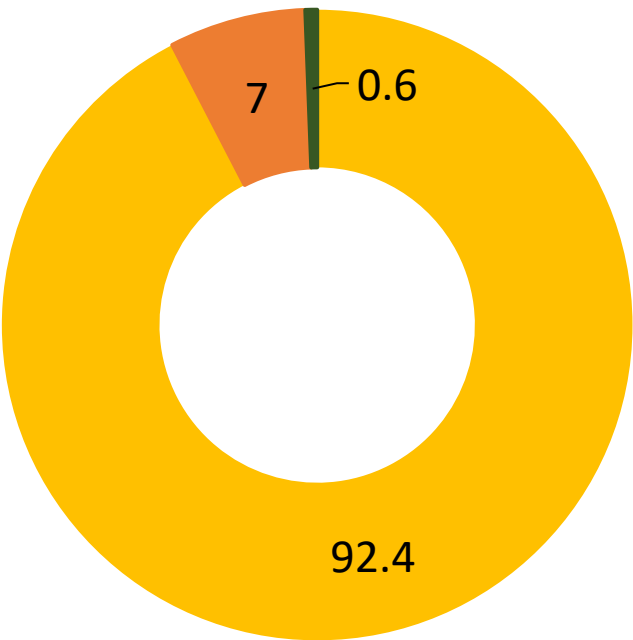


- Céréales & graines oléagineuses (concentration en cuivre : 11,4 mg.kg<sup>-1</sup>)
- Racines de chicorée (concentration en cuivre : 34 mg.kg<sup>-1</sup>)
- Complément alimentaire (concentration en cuivre : 18 000 mg.kg<sup>-1</sup>)

# Scenario III : Cu issu des chicorées cultivées en champs



Ration alimentaire des porcs



- Céréales & graines oléagineuses (concentration en cuivre : 11,4 mg.kg<sup>-1</sup>)
- Racines de chicorée (concentration en cuivre : 34 mg.kg<sup>-1</sup>)
- Complément alimentaire (concentration en cuivre : 18 000 mg.kg<sup>-1</sup>)

Contribution	Concentration de cuivre dans la ration finale	Teneur maximale en cuivre
	mg.kg <sup>-1</sup> (88 % MS)	mg.kg <sup>-1</sup> (88 % MS)
Céréales & graines oléagineuses	10,5	
Racines de chicorée	2,4	
Complément alimentaire	100,7	
Total	113,6	113,6*

\*Réglementation : 100 mg de Cu.kg<sup>-1</sup> (MS)  
soit 113.6 mg à 88% de MS

# Analyse du cycle de vie (ACV)

Méthode d'évaluation environnementale multicritères :

- Permet de **quantifier les impacts** associés à une activité, un produit, un processus
- Evaluer 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 + un système classique (désherbage de l'inter-rang)

ACV réalisée par **Hugo Luzi**, chargé de mission environnementale et analyse du cycle de vie à l'IFV



# 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

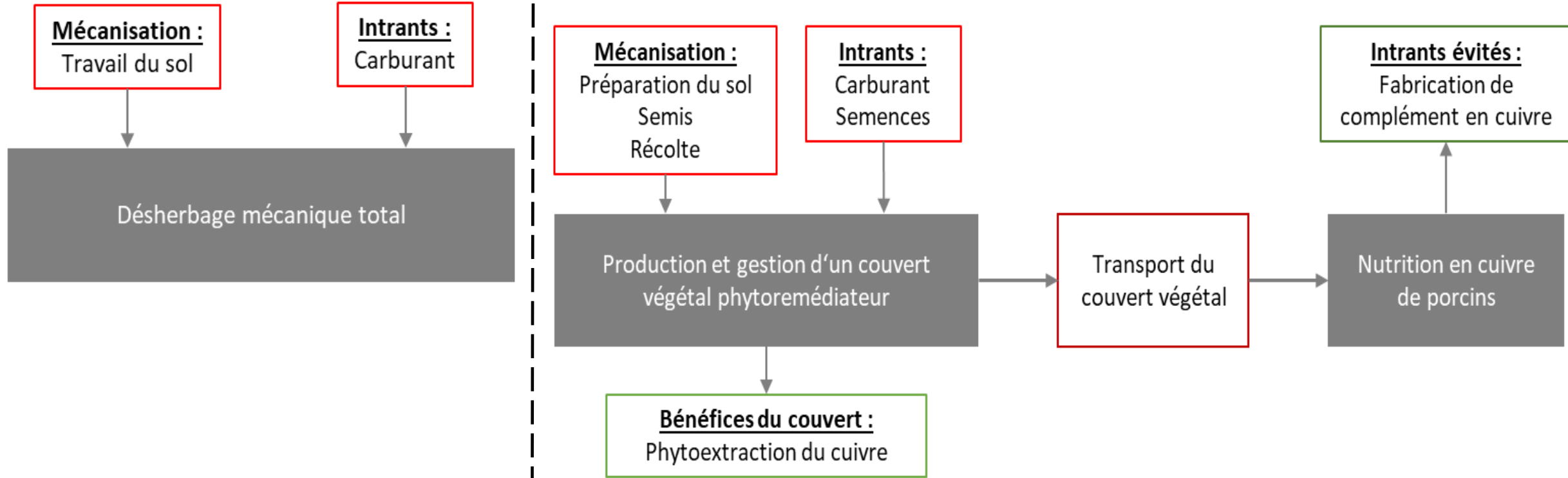
Production et gestion d'un couvert  
végétal phytoremédiateur

Bénéfices du couvert :  
Phytoextraction du cuivre

Transport du  
couvert végétal

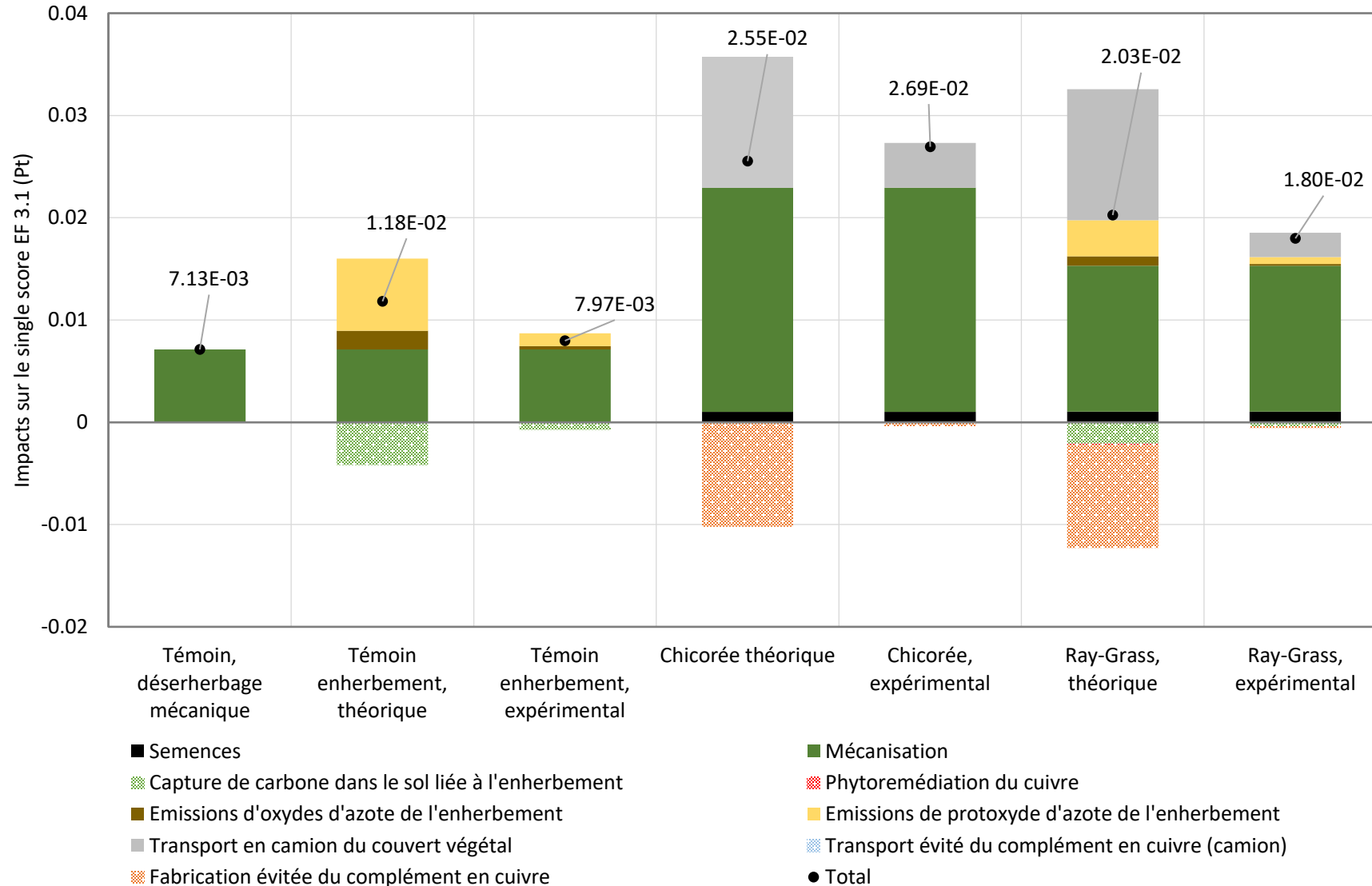
Intrants évités :  
Fabrication de  
complément en cuivre

Nutrition en cuivre  
de porcs



# Analyse du cycle de vie (ACV)

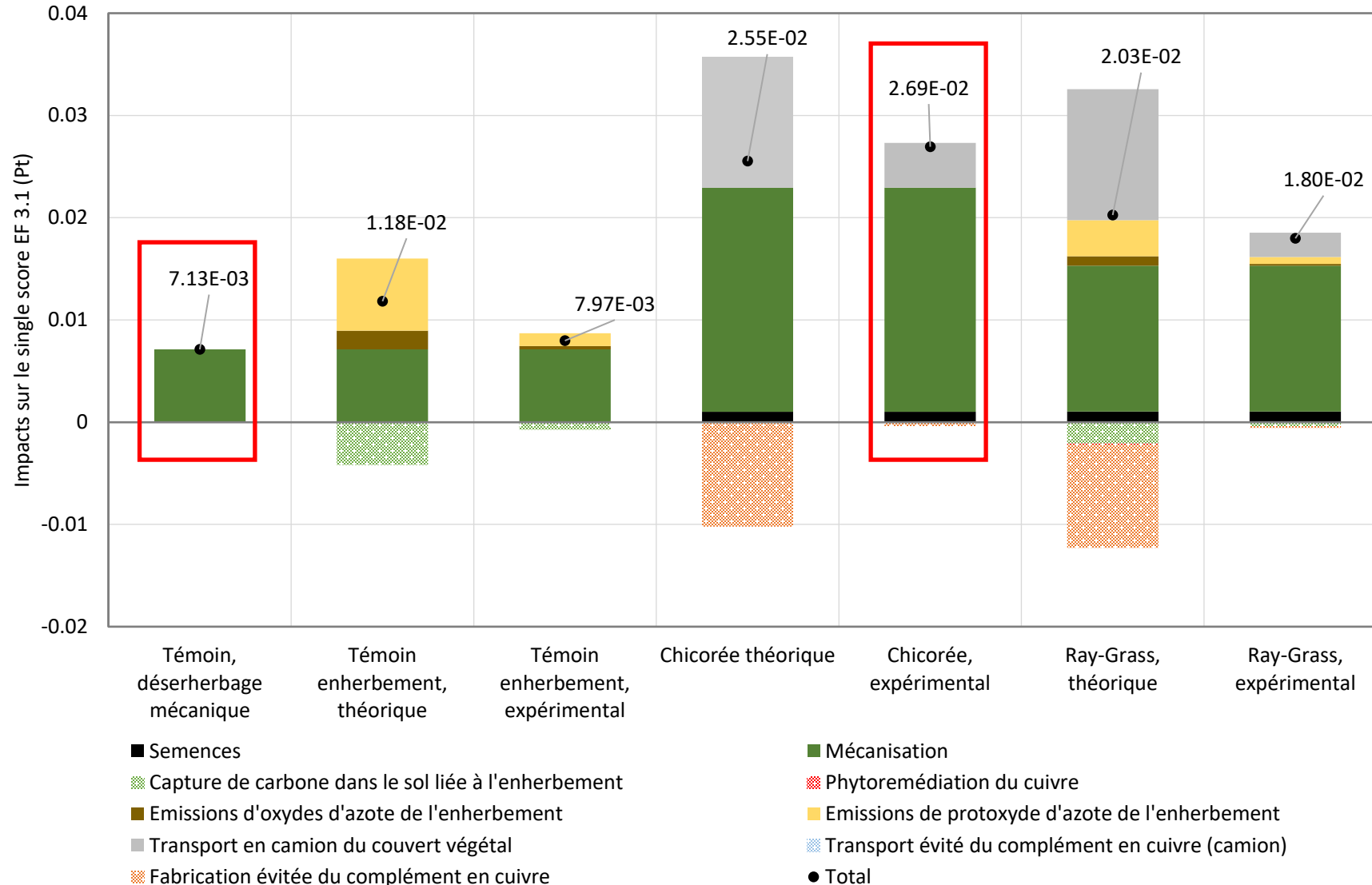
## Résultats de l'ACV





# Analyse du cycle de vie (ACV)

## Résultats de l'ACV



- Single score → compiler les 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

## Alimentation animale :

- **Incorporation possible de la chicorée** dans l'alimentation animale porcine
- Simulation en plein champs : chicorée ne permet pas d'être la seule source de cuivre
- Simulation également réalisée dans l'alimentation bovine : possibilité d'apporter la chicorée comme fourrage

# Conclusions et perspectives

## Alimentation animale :

- **Incorporation possible de la chicorée** dans l'alimentation animale porcine
- Simulation en plein champs : chicorée **ne permet pas d'être la seule source de cuivre**
- Simulation également réalisée dans l'**alimentation bovine** : possibilité d'apporter la chicorée comme fourrage

## Analyse de cycle de vie :

- En l'état : phytoremédiation plus impactante que l'itinéraire classique
- Limites de l'ACV : si on continue l'apport de cuivre sans autre solution → sols non cultivables
- Possibilité de comparer : phytoremédiation *versus* autres solutions de dépollution