



Le cuivre dans les sols viticoles : les apports du projet PHYTOCOTE

Laurence Denaix, Manon Pierdet, Frédéric Ouédraogo, Francis Macary, Edith Parlanti, Hélène Budzinski

► To cite this version:

Laurence Denaix, Manon Pierdet, Frédéric Ouédraogo, Francis Macary, Edith Parlanti, et al.. Le cuivre dans les sols viticoles : les apports du projet PHYTOCOTE. Comité de Pilotage du Projet CePages, Communauté de Communes de l'Estuaire, Jun 2022, Braud et Saint Louis, France. hal-04660727

HAL Id: hal-04660727

<https://hal.inrae.fr/hal-04660727v1>

Submitted on 24 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INRAe



Interactions Sol Plante Atmosphère



LE CUIVRE DANS LES SOLS VITICOLES : LES APPORTS DU PROJET PHYTOCOTE

Laurence DENAIX⁺, Manon PIERDET⁺,
Frédéric OUEDRAOGO⁺, Francis MACARY*,
Edith PARLANTI[#], Hélène BUDZINSKI[#]

+ INRAE Bordeaux- Bordeaux Science Agro – UMR ISPA

* INRAE Bordeaux – UR ETTIS

CNRS – Université de Bordeaux - LPTC, UMR EPOC

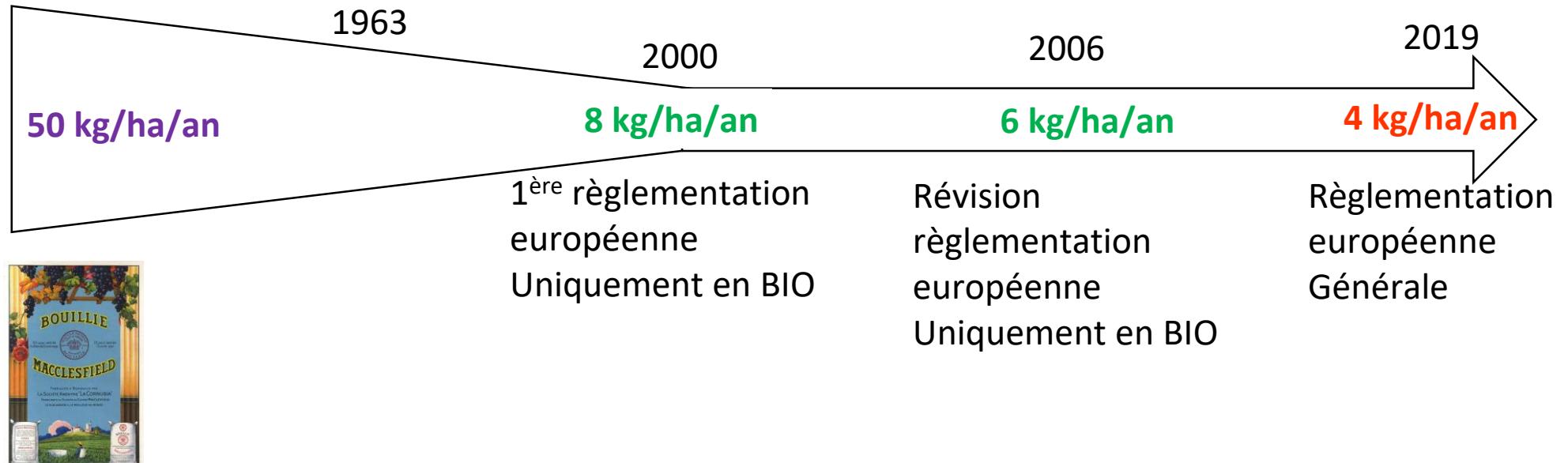
Historique



1878
Le mildiou
arrive en France

Découverte
Effet Cu
sur le mildiou
1882

1^{ères} études sur
la toxicité du Cu

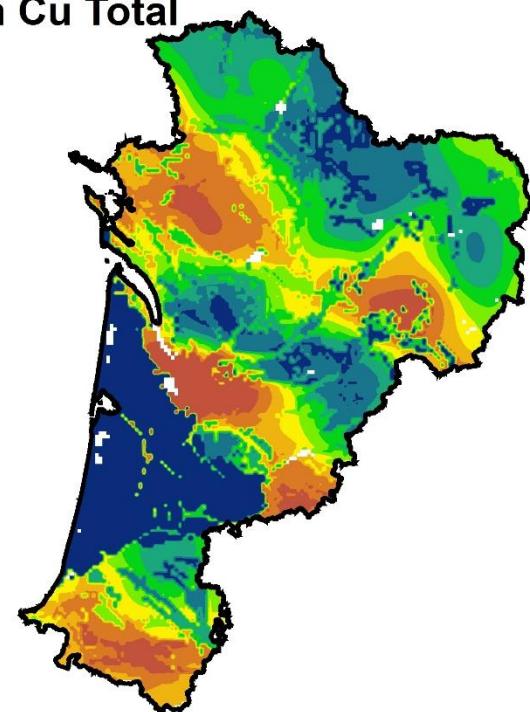


Le cuivre est la seule substance active autorisée
en Agriculture Biologique pour lutter contre le mildiou

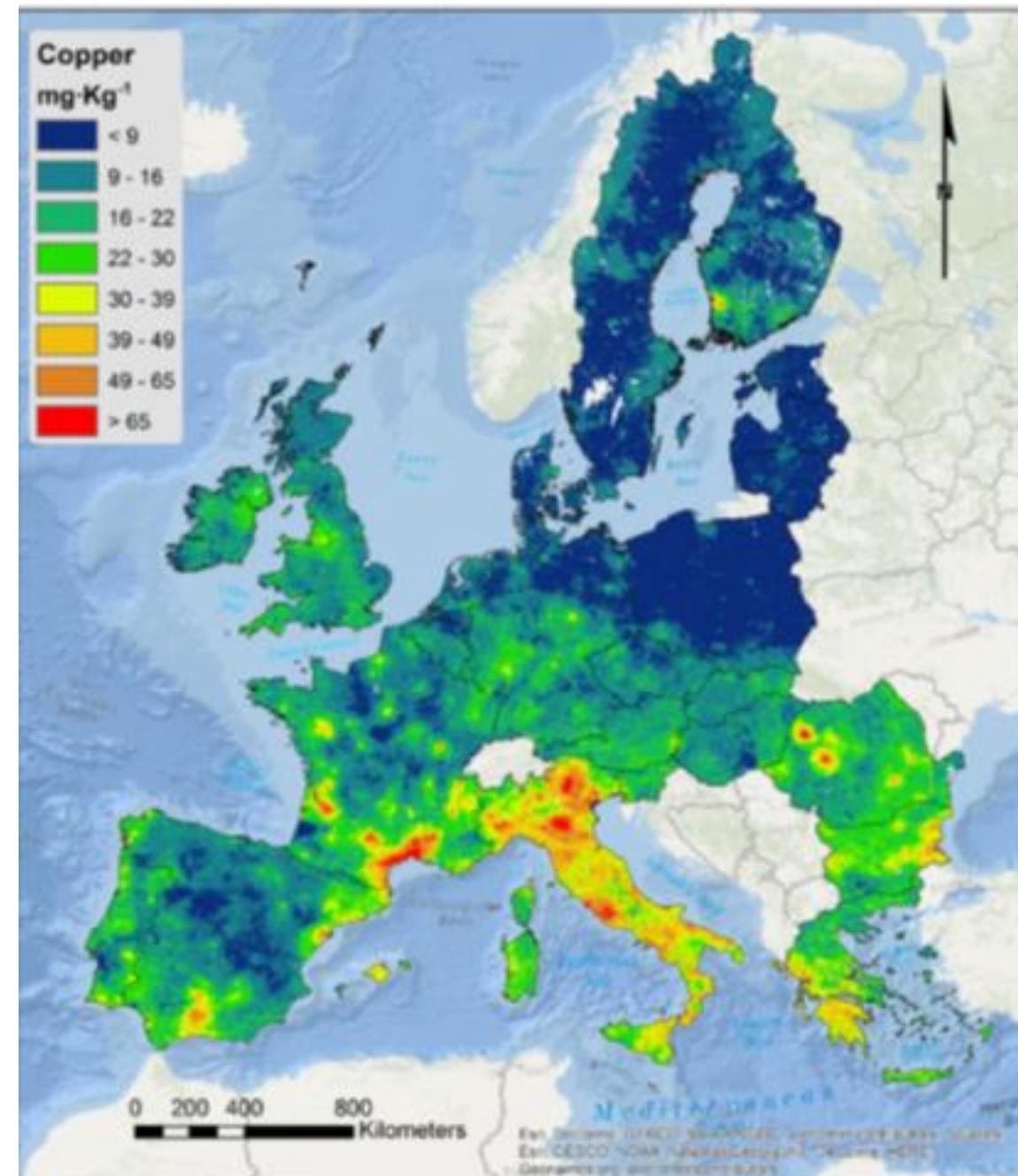
Contamination des sols

Teneurs moyennes en Cu Total
mg/kg

- 0,63 - 8,02
- 8,03 - 10,23
- 10,24 - 12,08
- 12,09 - 13,93
- 13,94 - 15,77
- 15,78 - 17,62
- 17,63 - 19,83
- 19,84 - 23,16
- 23,17 - 94,43



Saby et al., 2011

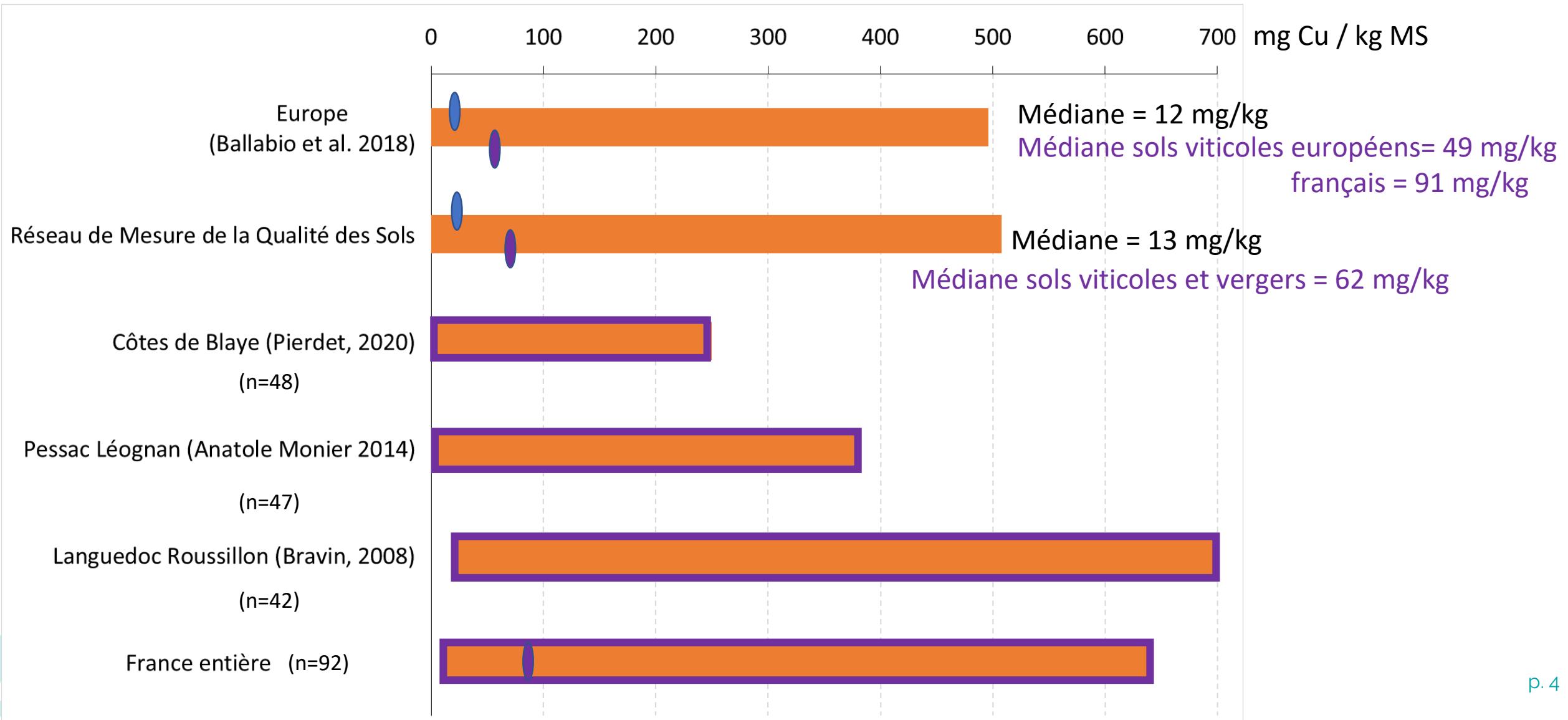


INRAe

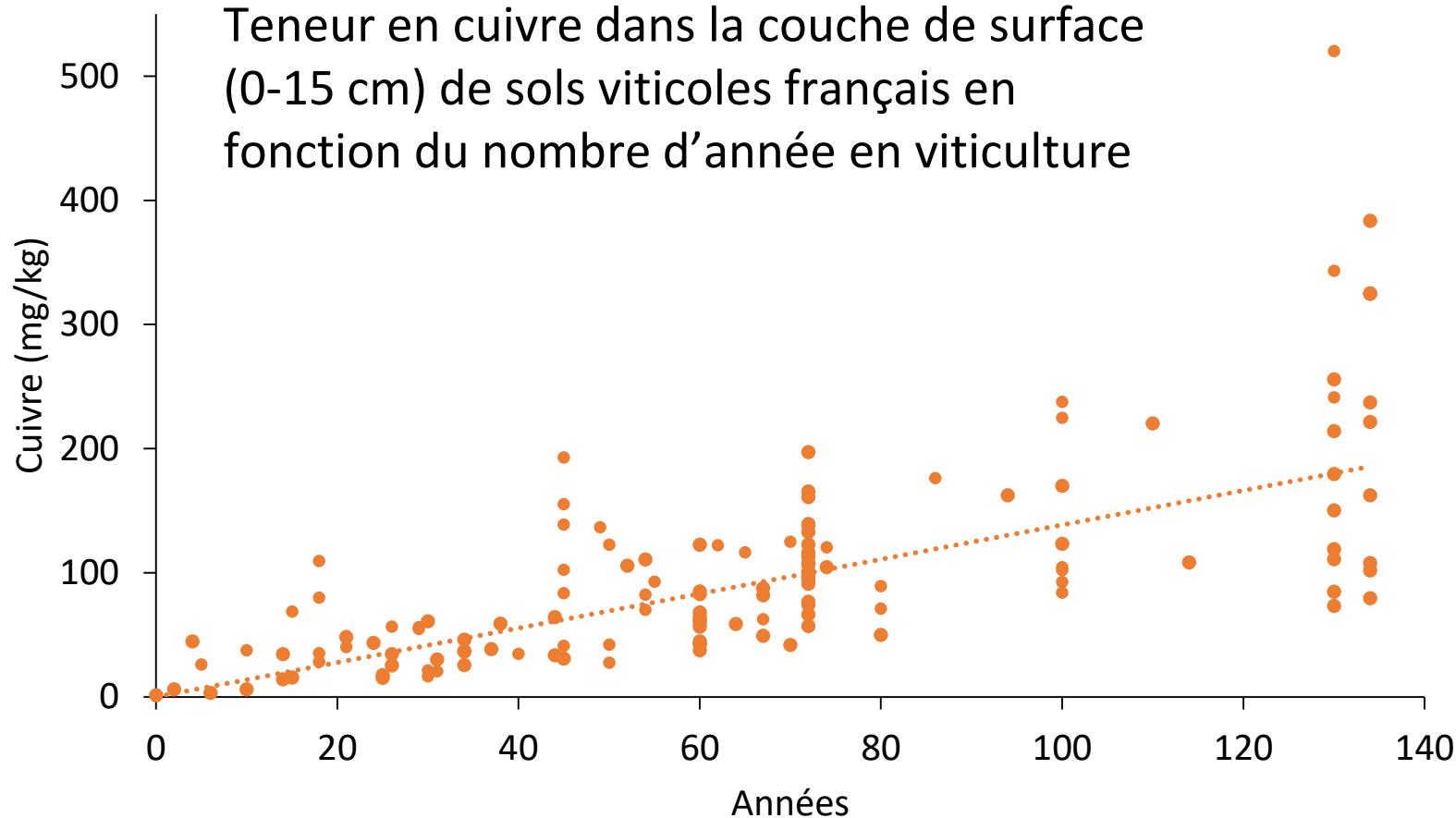
Juin 2022/ L. Denaix

Ballabio et al. 2018

Le cuivre total : niveaux de contamination rencontrés



La contamination actuelle des sols est le résultat de leurs usages passés



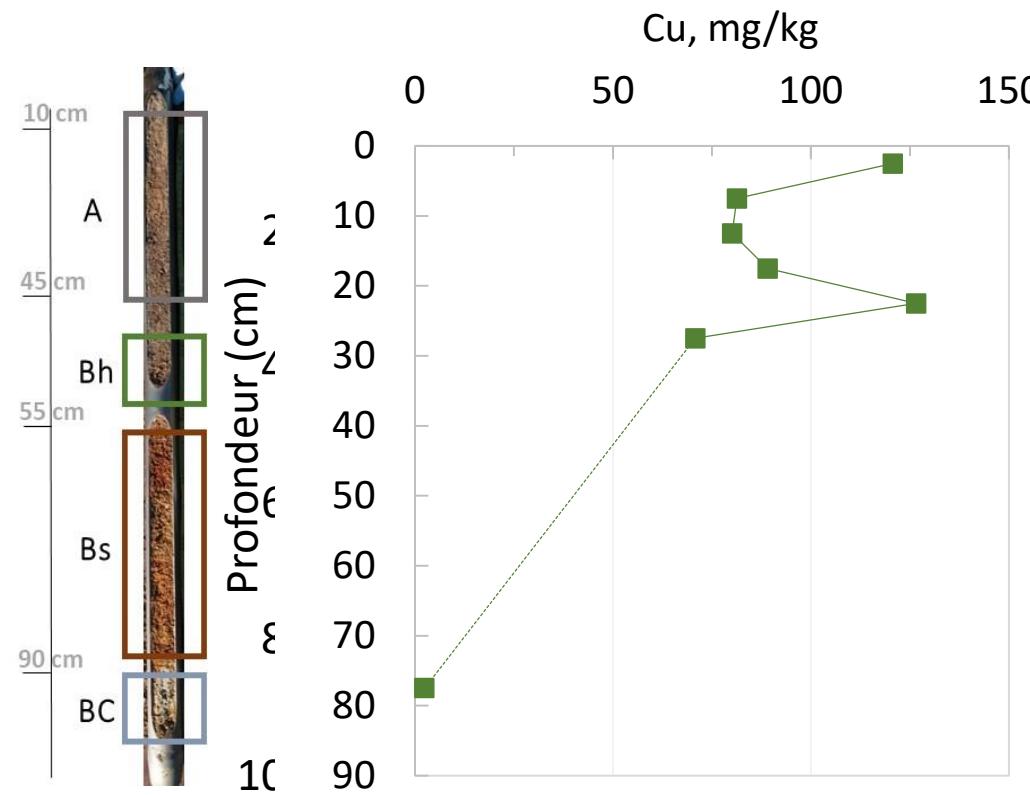
La teneur en cuivre mesurée aujourd'hui dans les sols viticoles s'explique par le cumul de la quantité de fongicide cuprique apportée (pratiques anciennes >> pratiques actuelles)

Les teneurs très élevées mesurées aujourd'hui sont principalement dues à l'application de bouillie bordelaise au début du XX^{ème} siècle

Le cuivre s'accumule dans la couche de surface du sol

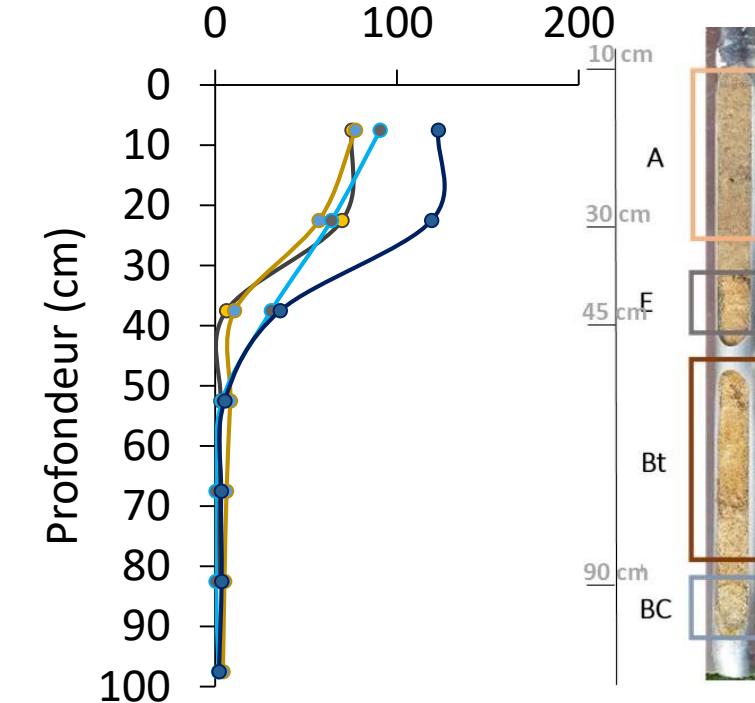
Podzol – Sol sableux acide

Concentration en cuivre total



Luvisol – Sol limono-sableux

Cuivre total (mg/kg)

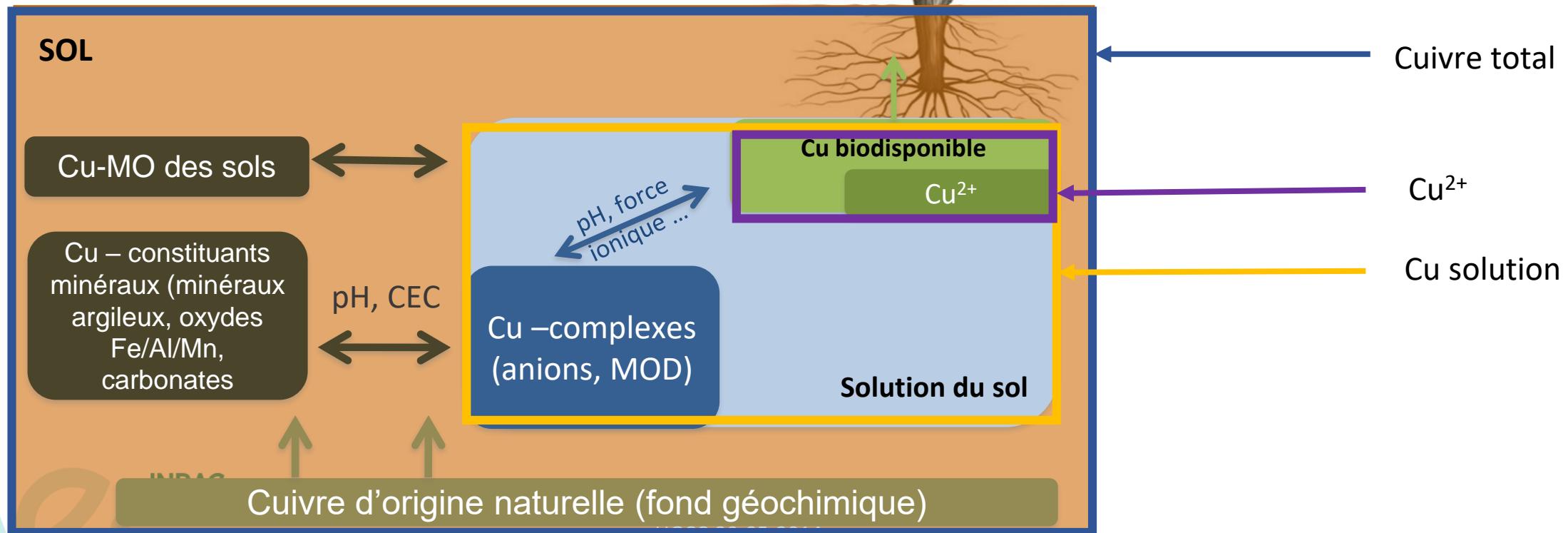


Accumulation en surface

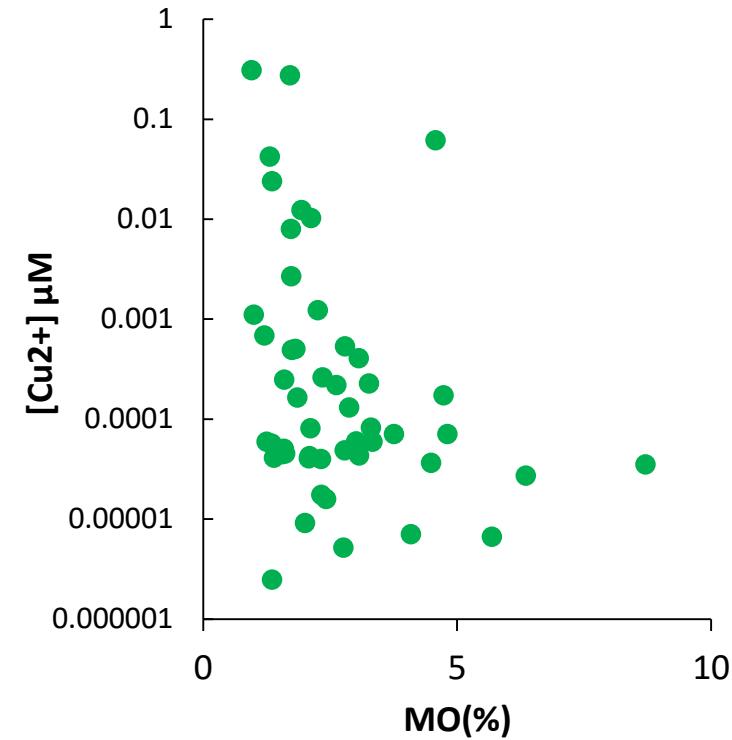
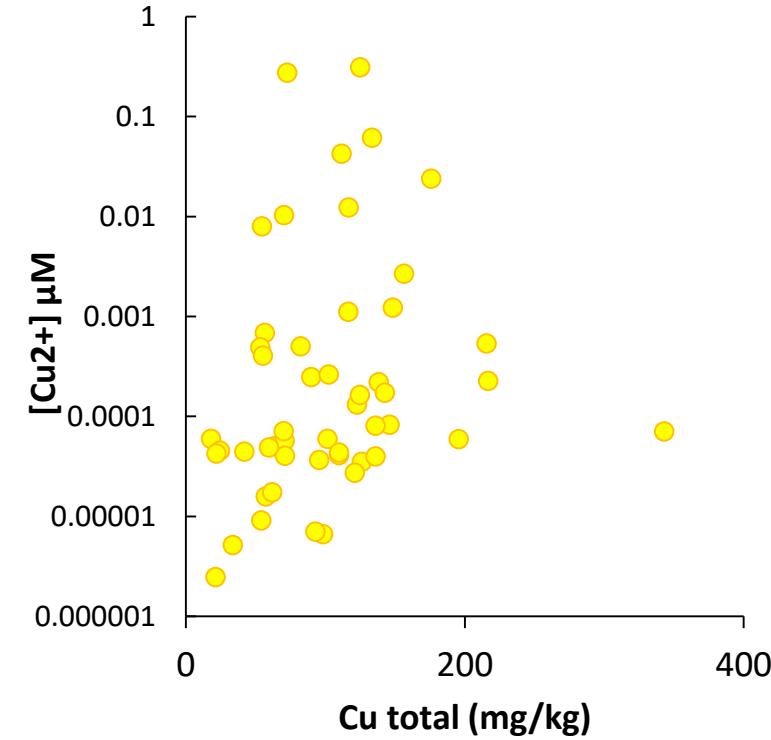
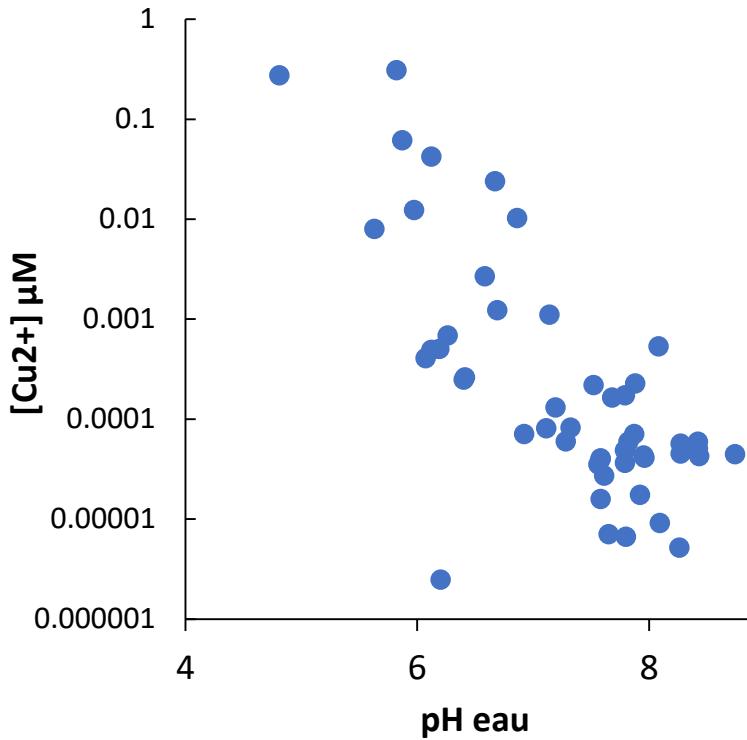
Incorporation en profondeur lors du labour

Très peu de migration dans les sols

Distribution du cuivre dans les sols : le cuivre disponible



Relations entre le cuivre disponible et les paramètres du sol

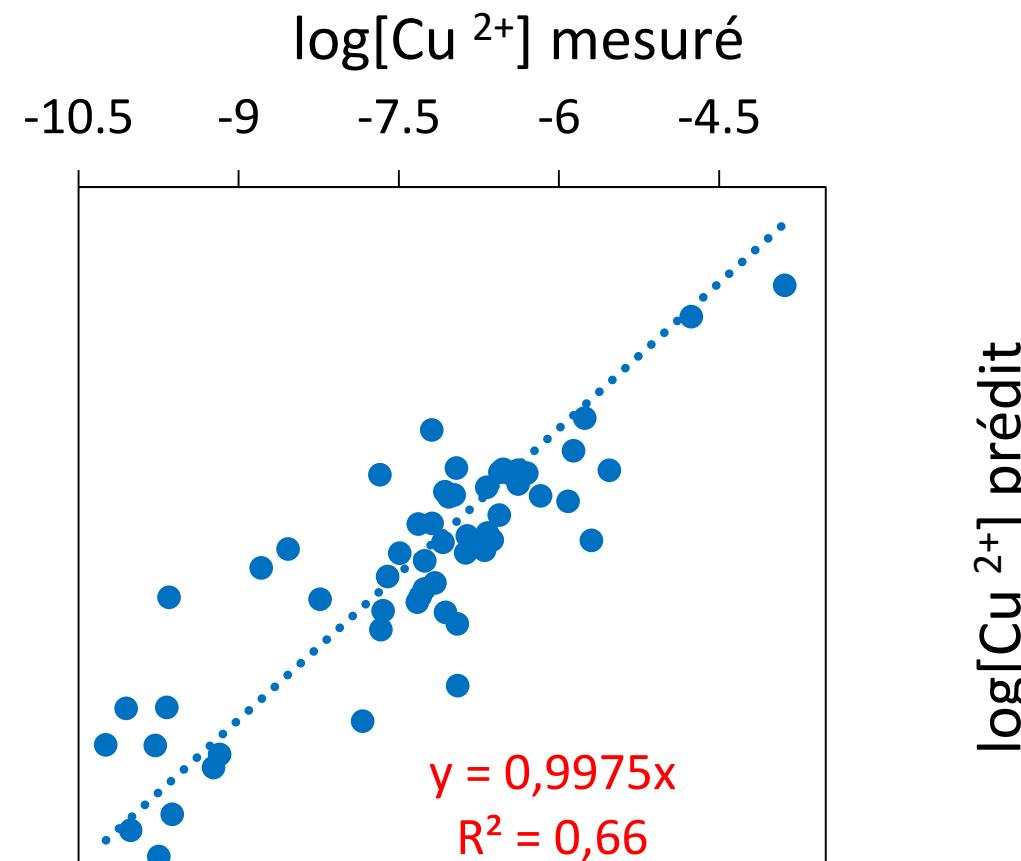


Plus le pH est alcalin, moins le cuivre est sous une forme disponible
Plus le sol est riche en MO, moins le cuivre est sous une forme disponible
Il n'y a aucune relation simple entre le cuivre total dans le sol et le cuivre disponible

Peut-on prédire le cuivre en solution ?

$$\log([\text{Cu}^{2+}]) = 3,07 - 2,64 \times \log([\text{C organique}]) + 0,93 \times \log([\text{Cu}]_{\text{sol}}) - 1,45 \times \text{pH}$$

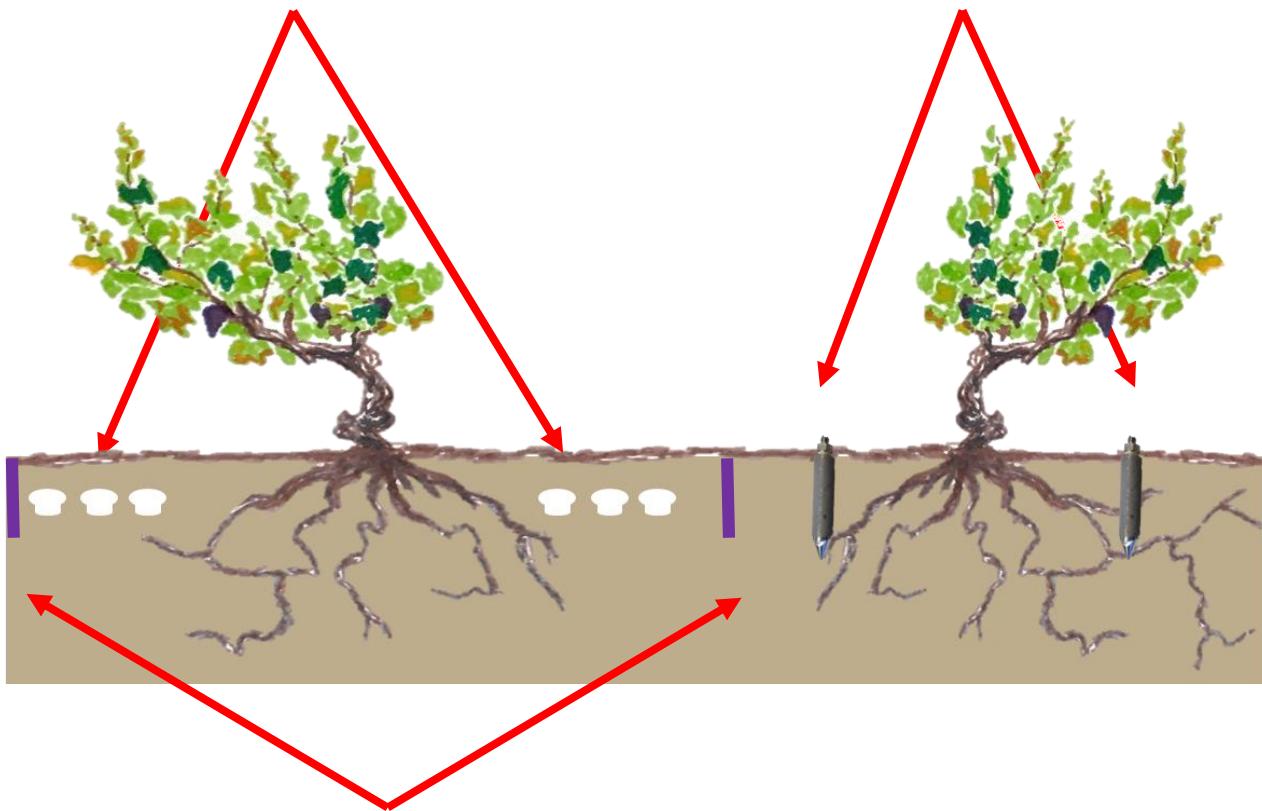
($p < 0,0001$)



Quelles sont les concentrations en solution dans les sols viticoles ?



6 capteurs passifs DGT
(24h tous les 15 jours)

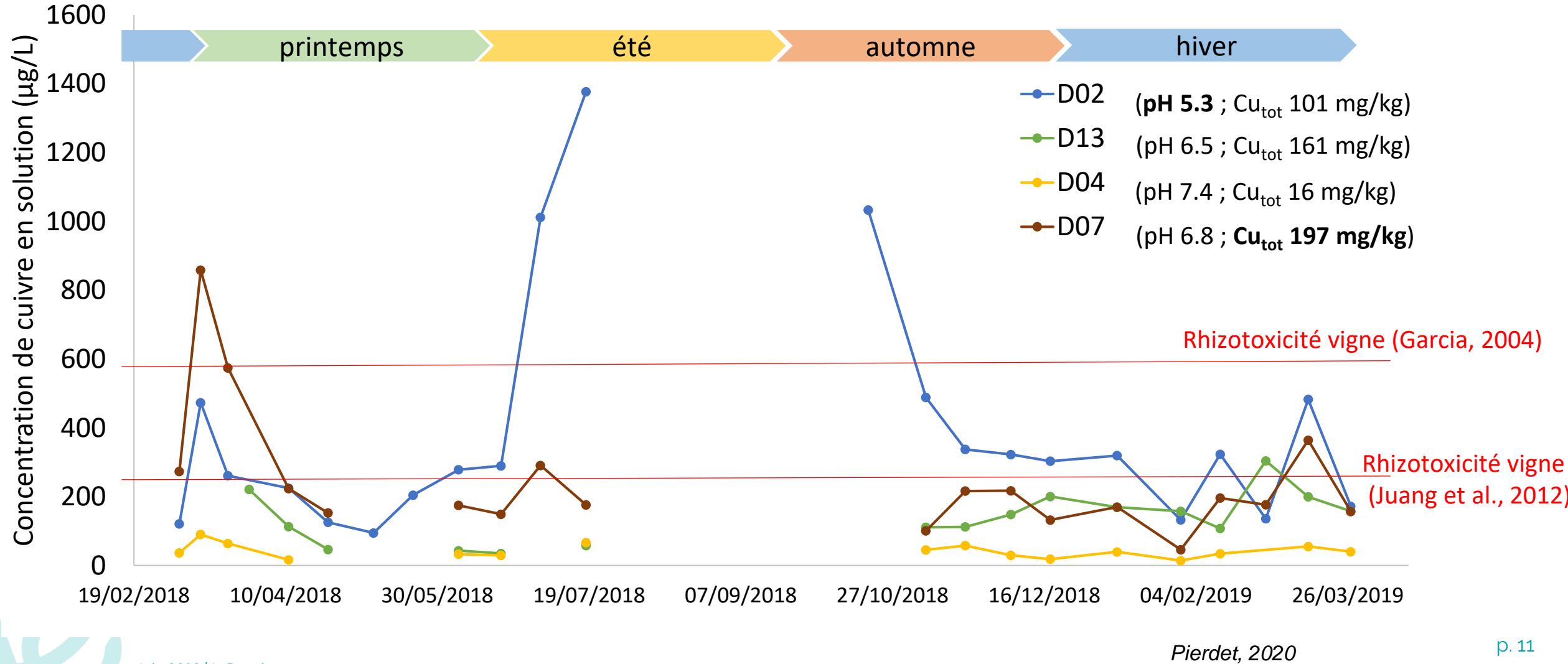


2 bougies poreuses en inox
(tous les 15 jours)

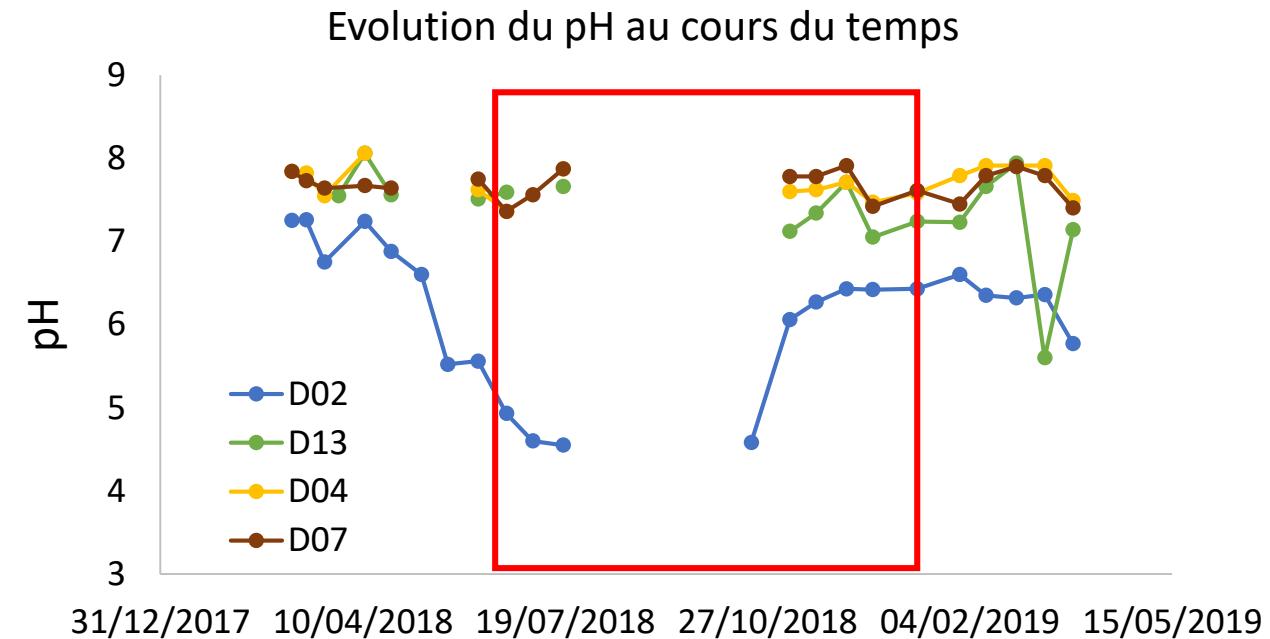
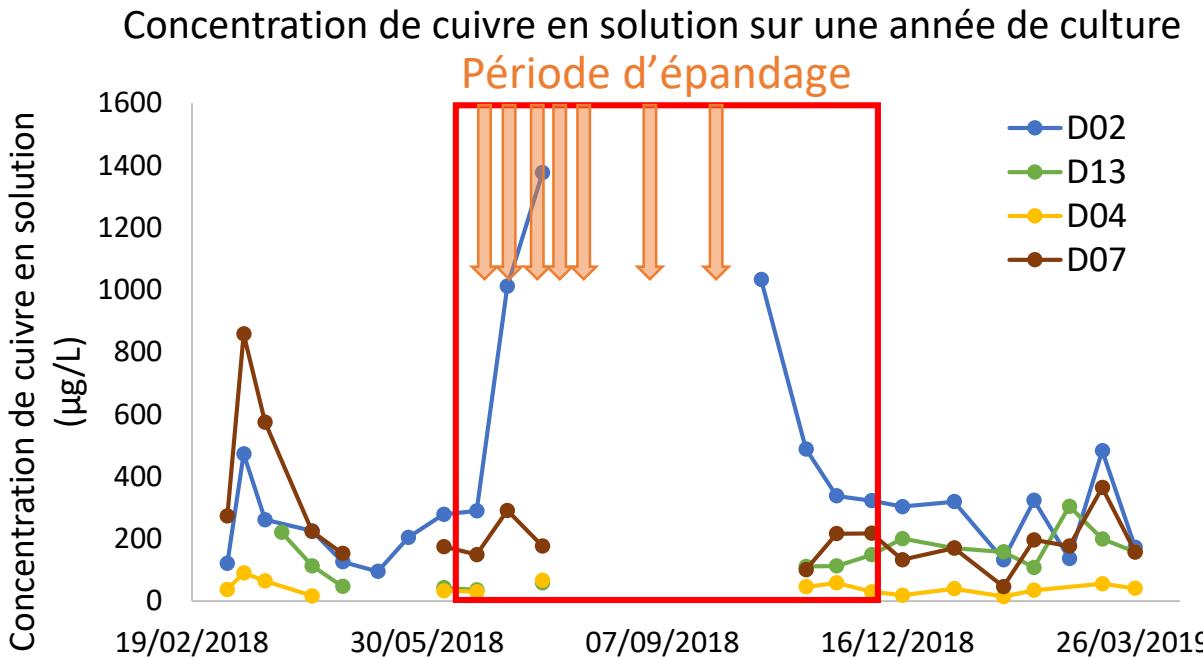


2 capteurs de température

Evolution de la concentration en cuivre de la solution de sol sur une année

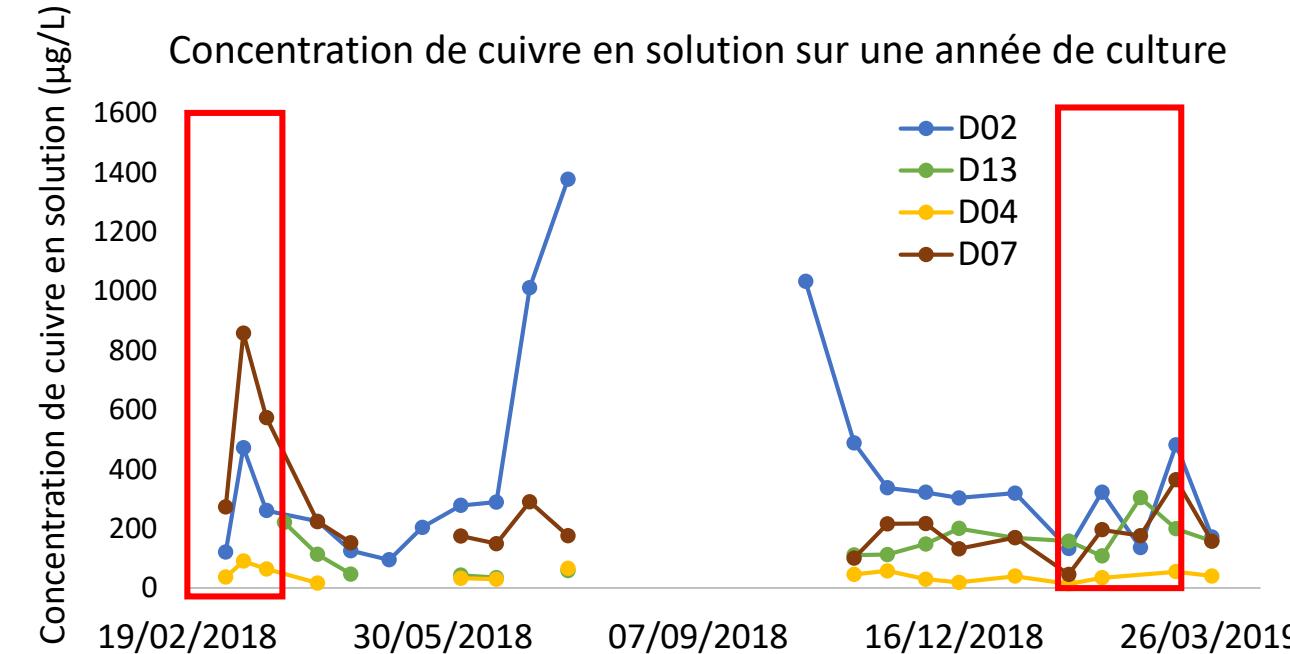


Evolution de la concentration en période d'épandage



Le transfert rapide vers la solution va dépendre des sols et ne semble important que dans les sols à pH acide

Comment expliquer le pic en fin d'hiver ?



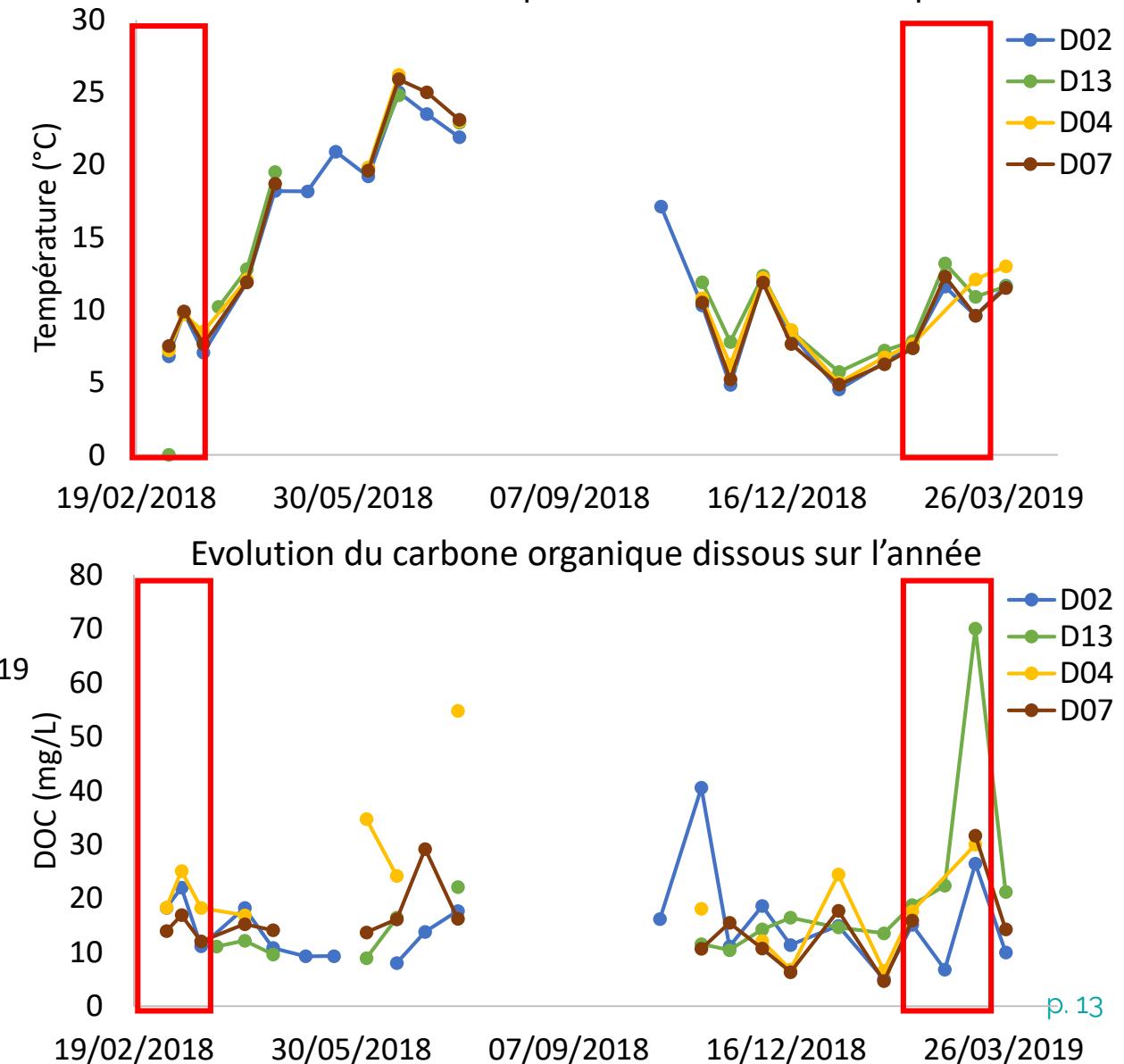
A la reprise de la minéralisation de la MO, le cuivre est libéré dans la solution du sol

Pierdet, 2020

INRAe

Juin 2022/ L. Denaix

Evolution de la température au cours du temps

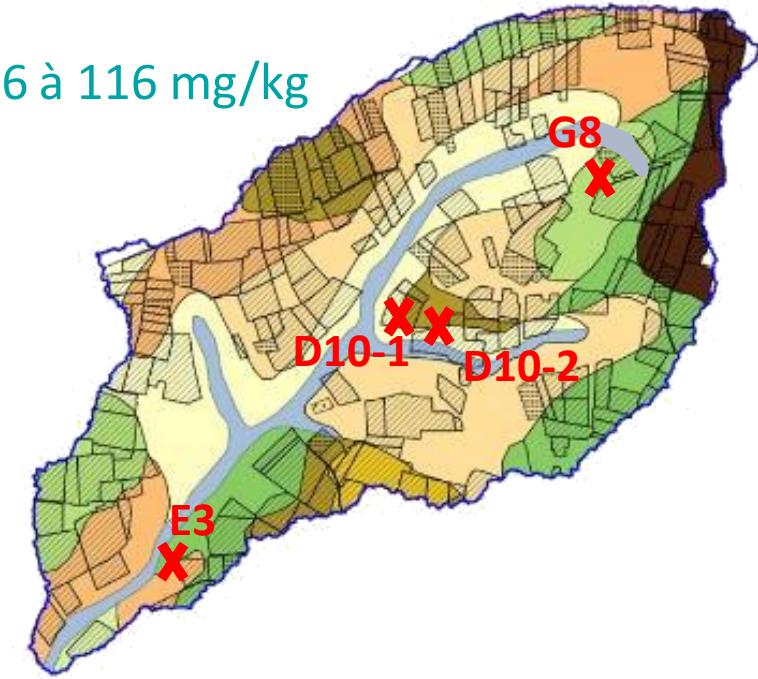
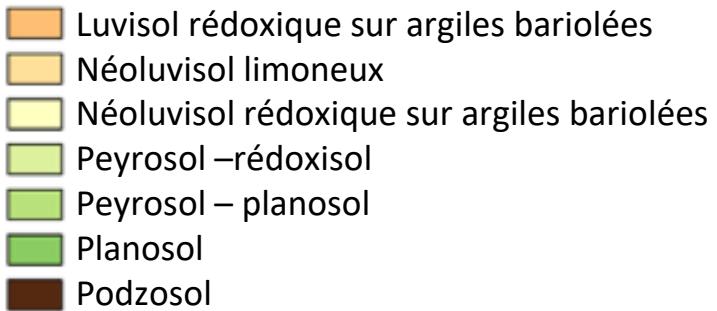


Suivi du cuivre dans les eaux de drains : design expérimental

Choix de 4 parcelles drainées avec connexion au ruisseau :



- Variabilité pédologique
- Concentrations de cuivre allant de 46 à 116 mg/kg
- pH allant de 5,6 à 7



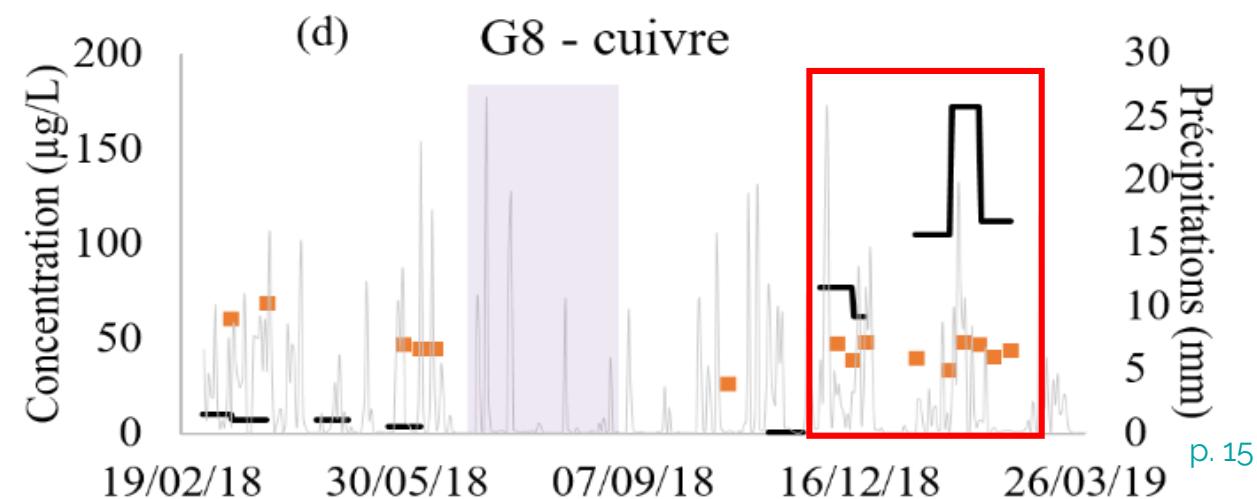
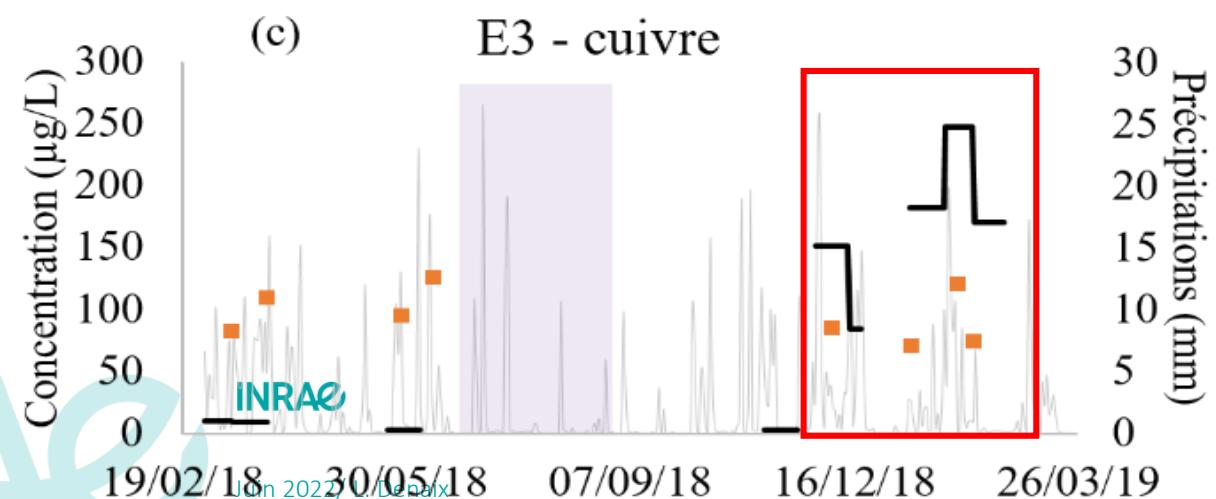
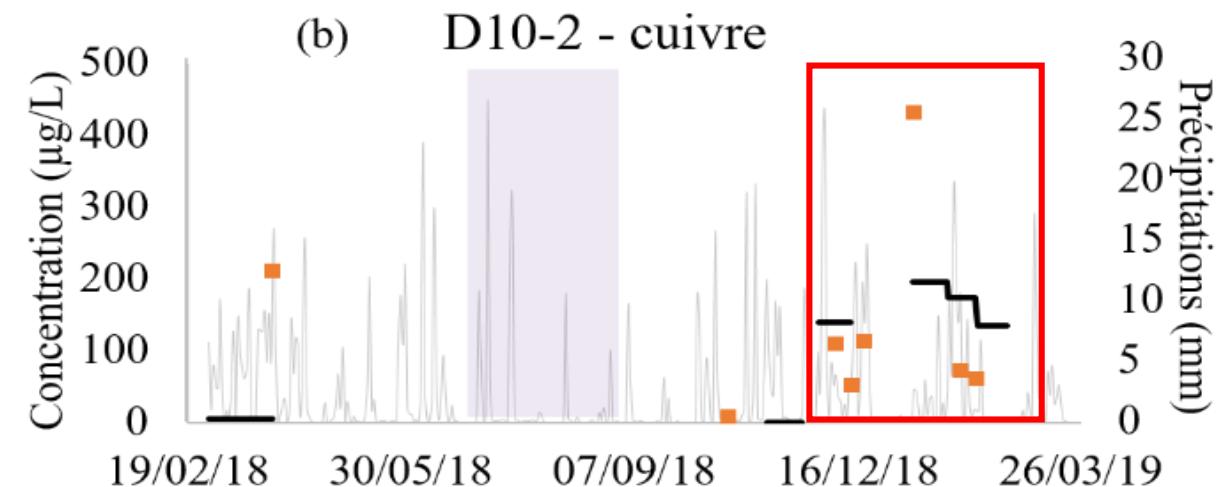
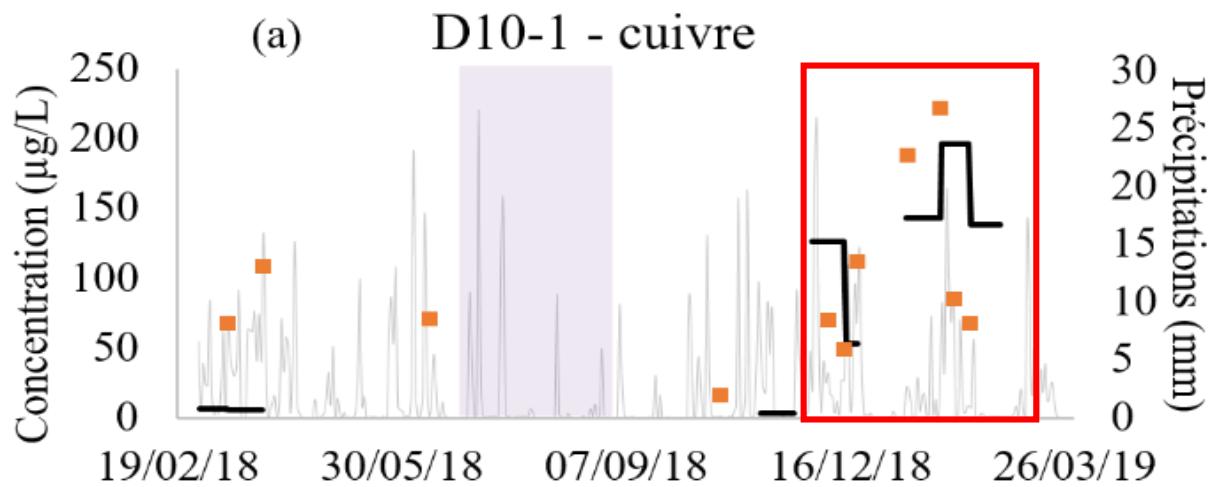
Parcelles	Age viticole (années)	pH	Cu (mg/kg)	Carbone orga (g/kg)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
D10-1	>70	6,4	79	19,7	8	29	63
D10-2	>70	5,6	88	20,4	8	32	60
E3	>70	7	116	11,7	7	21	72
G8	35	6,4	46	¹⁴ 14,3	6	19	75

Pic de concentration en cuivre dans les eaux de drains à l'automne-hiver

Pierdet, 2020

— $C_{DG\Gamma}$ ■ $C_{ponctuel}$

Période d'application de cuivre



Points importants

- La teneur actuelle en cuivre des sols dépend de leur **historique d'usage**, parfois très ancien
- Le cuivre est fortement fixé par la **matière organique des sols**
- Le cuivre s'accumule en surface et se retrouve en profondeur lors d'un labour
- La toxicité du cuivre pour les organismes dépend de sa **biodisponibilité** qui varie en fonction
 - Du **pH** du sol
 - De la teneur en MO du sol
 - De la teneur en cuivre et de sa localisation sur les constituants du sol
- Il est possible de moduler la disponibilité du cuivre par la **gestion agronomique des sols**

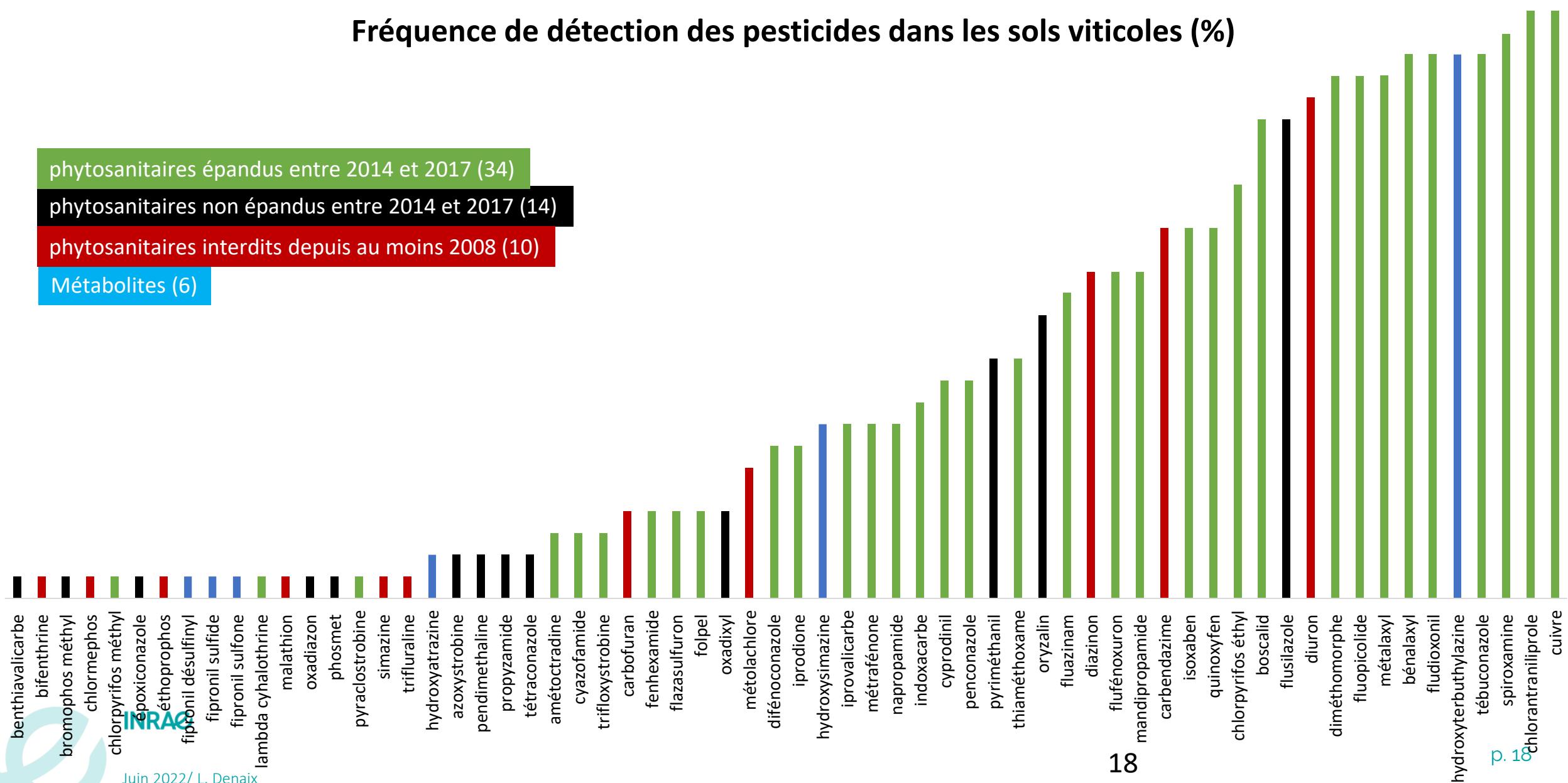




Merci de votre attention

Fréquence de détection des pesticides dans les sols viticoles (%)

phytosanitaires épandus entre 2014 et 2017 (34)
 phytosanitaires non épandus entre 2014 et 2017 (14)
 phytosanitaires interdits depuis au moins 2008 (10)
 Métabolites (6)



64 substances actives retrouvées en 2017 - 39 substances actives épandues en 2016

39 substances actives



25 substances actives



:

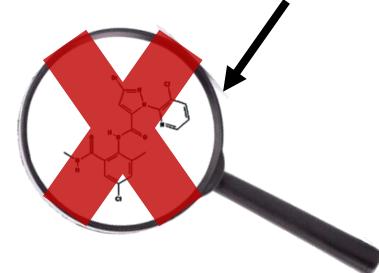
64 substances actives retrouvées en 2017 - 39 substances actives épandues en 2016

4 groupes possibles

39 substances actives



25 substances actives



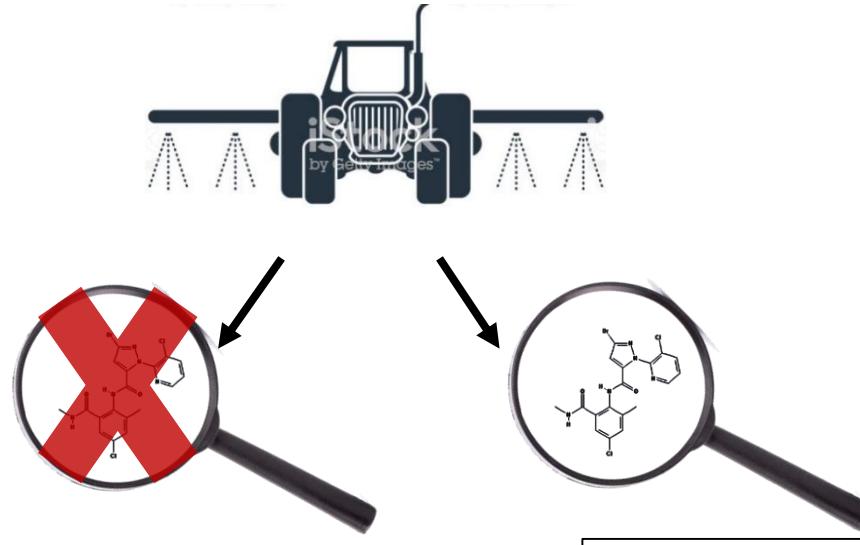
12 molécules

- non-persistantes ou modérément persistantes (DT50 <65 jours)

64 substances actives retrouvées en 2017 - 39 substances actives épandues en 2016

4 groupes possibles

39 substances actives



26 molécules

- 11 non persistantes
- 4 persistantes
(DT50 > 100 jours)

Cuivre

- Médiane 71 µg/g
- Corrélation âge viticole/quantité de cuivre

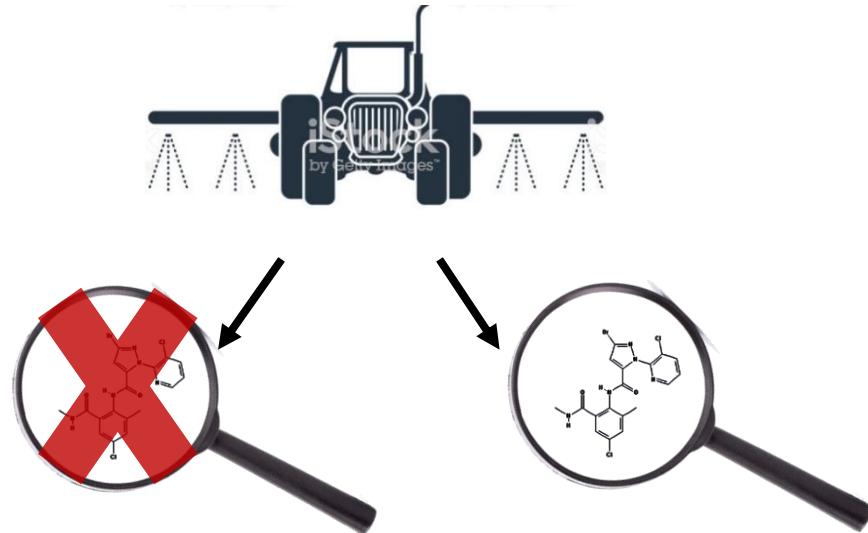
25 substances actives



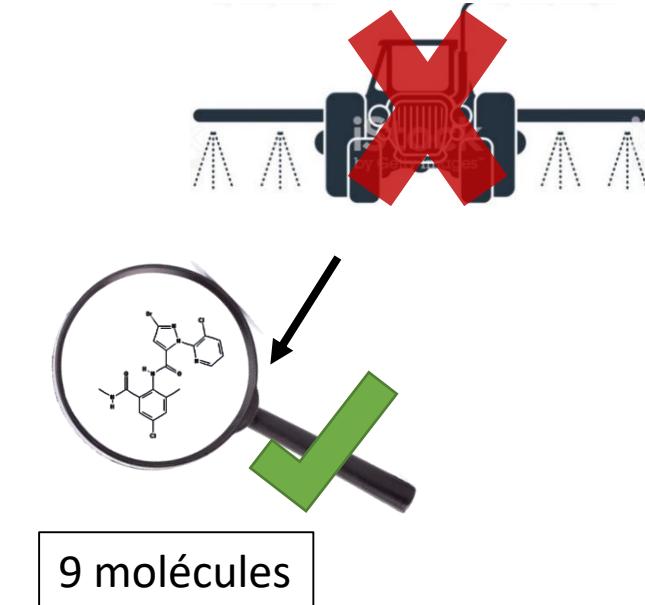
64 substances actives retrouvées en 2017 - 39 substances actives épandues en 2016

4 groupes possibles

39 substances actives



25 substances actives

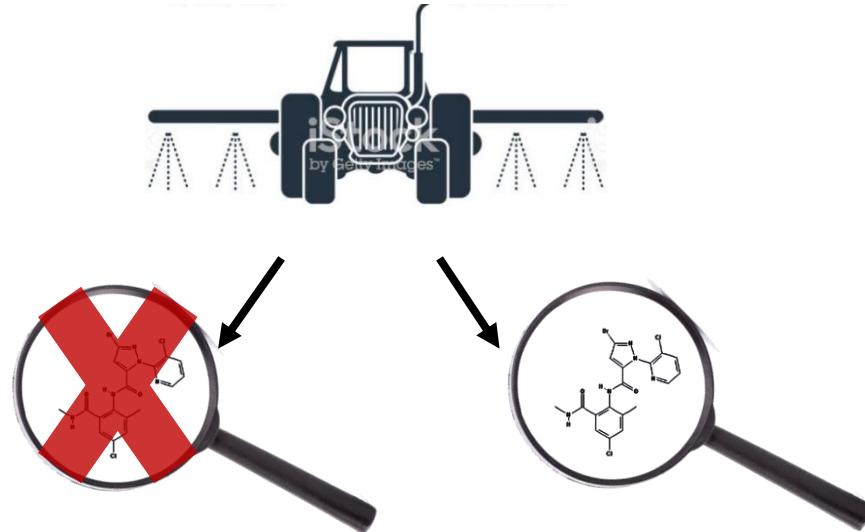


- 5 non persistantes
- Fréquentes utilisées en 2014-2015

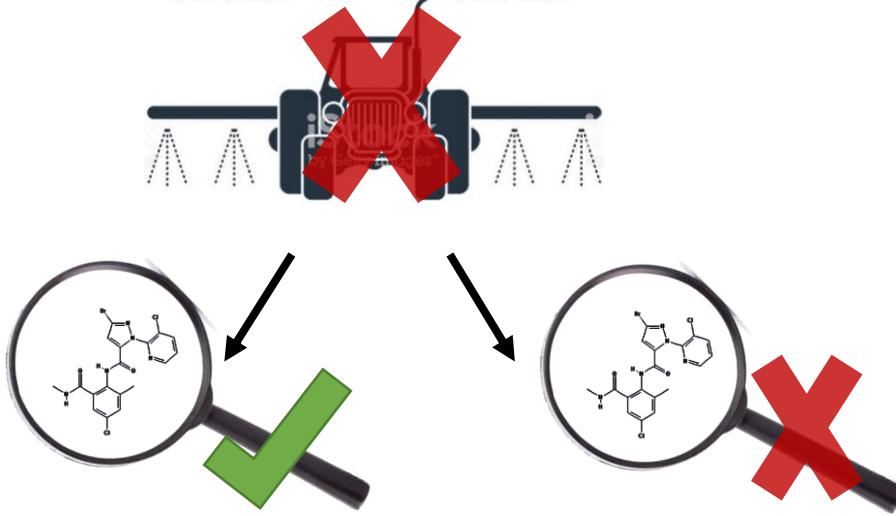
64 substances actives retrouvées en 2017 - 39 substances actives épandues en 2016

4 groupes possibles

39 substances actives



25 substances actives



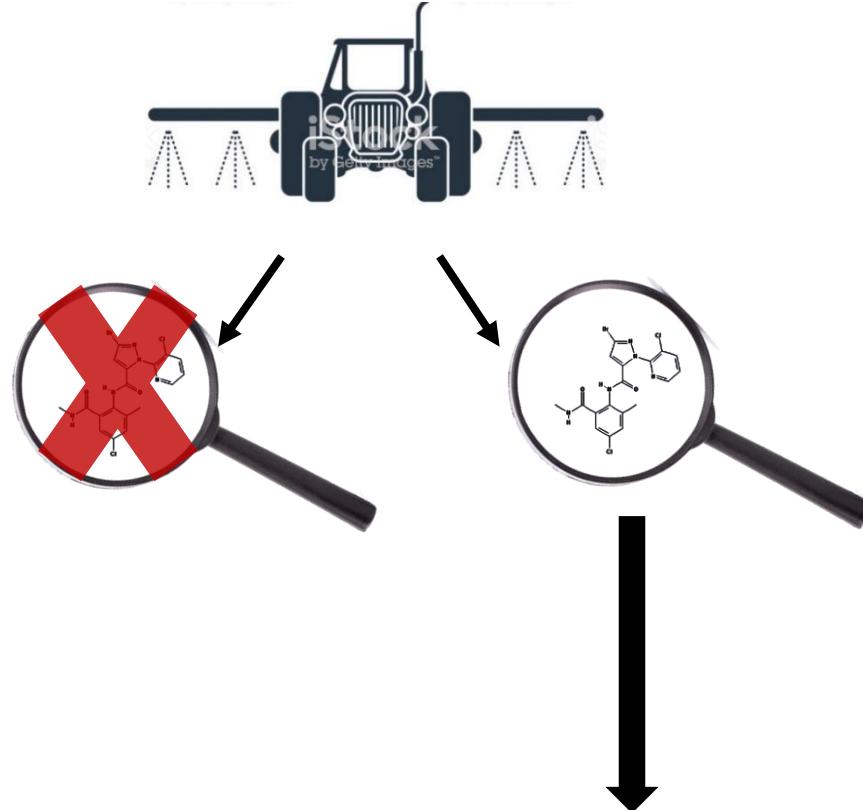
10 molécules

- 6 non-persistantes
(DT50 < 30 jours)
- 6 métabolites
- Fréquence importante de l'HTBA

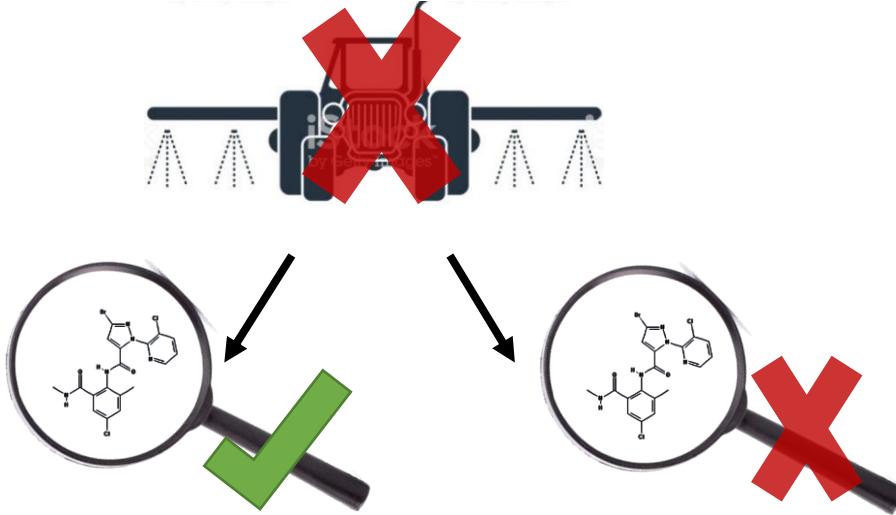
64 substances actives retrouvées en 2017 - 39 substances actives épandues en 2016

4 groupes possibles

39 substances actives



25 substances actives



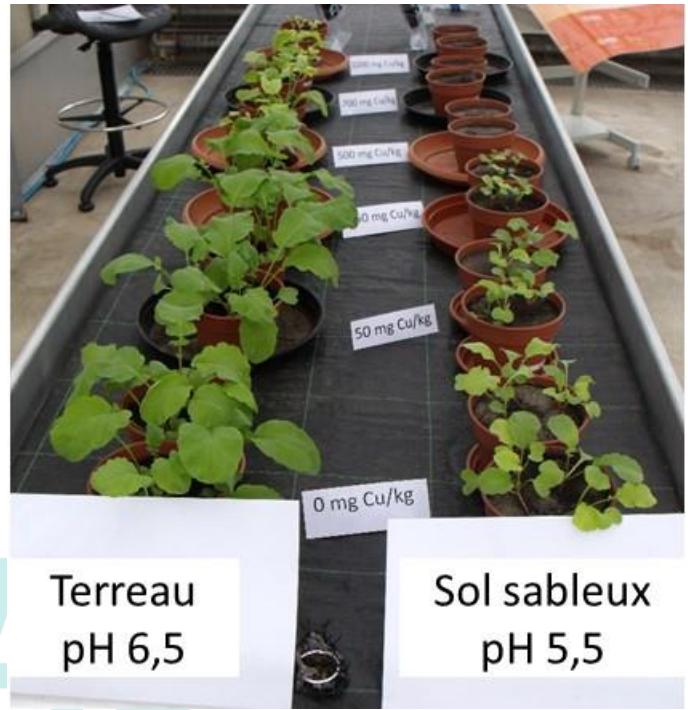
Les quantités retrouvées correspondent-elles aux quantités épandues ?

Phytotoxicité du Cuivre

Jaunissement en lignes (Chlorose)



Jaunissement des pointes sur blé



[Cu_{total}]

2 μ M



5 μ M



0.5 μ M



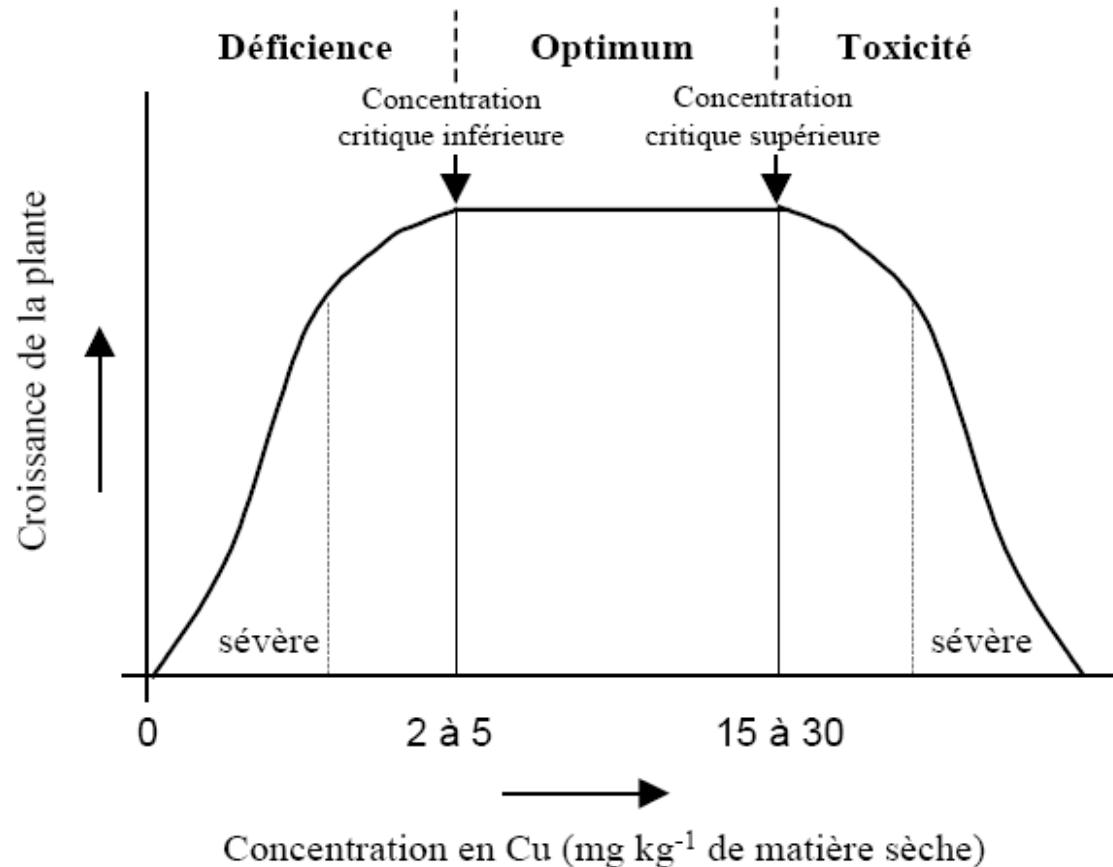
1.3 μ M



Epaississement des racines

Symptômes de rhizotoxicité de Cu chez le porte-greffe
Gravesac en conditions hydroponiques (Garcia, 2004)

Le cuivre est un oligoélément, essentiel à la vie



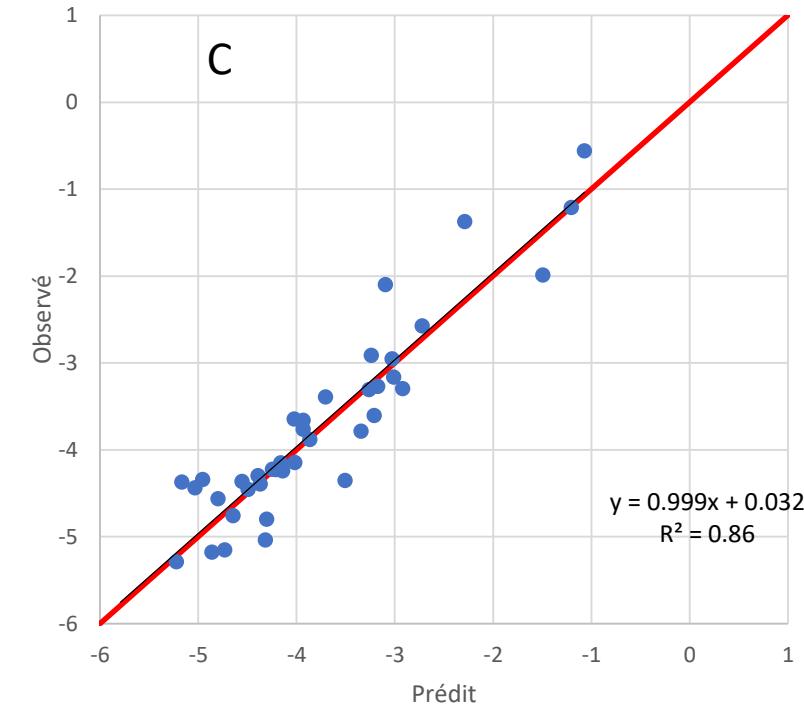
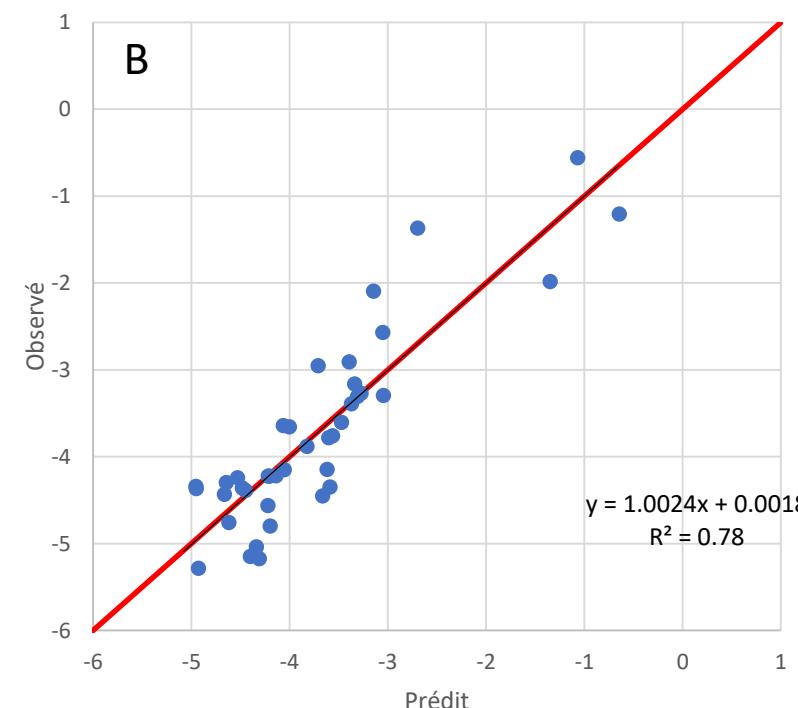
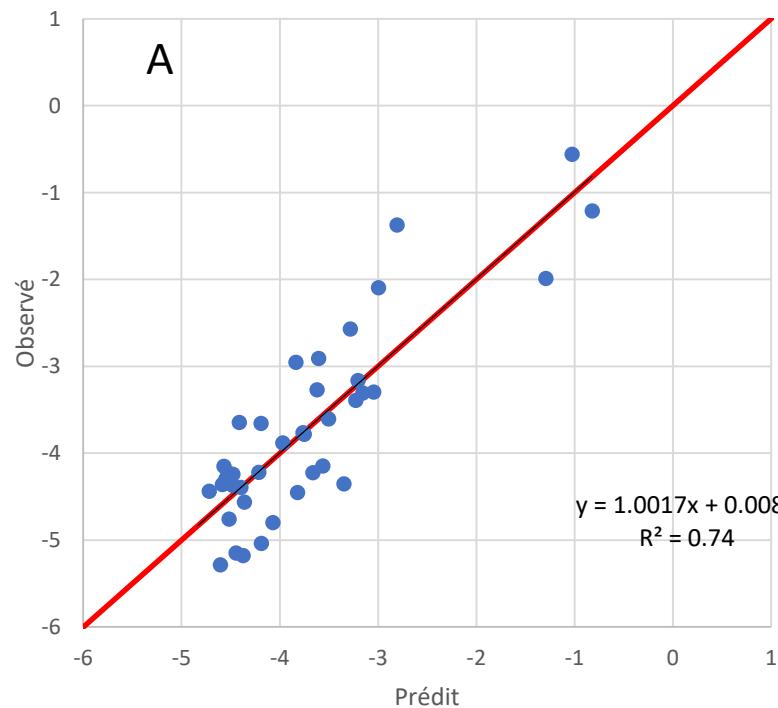
- Photosynthèse
- Respiration mitochondriale
- Cofacteurs d'enzymes
- Synthèse de lignine
- Détoxification de radicaux superoxydés
- Mécanismes de résistance aux maladies
- Contrôle hydrique

Prédiction avec les équations de pédotransfert

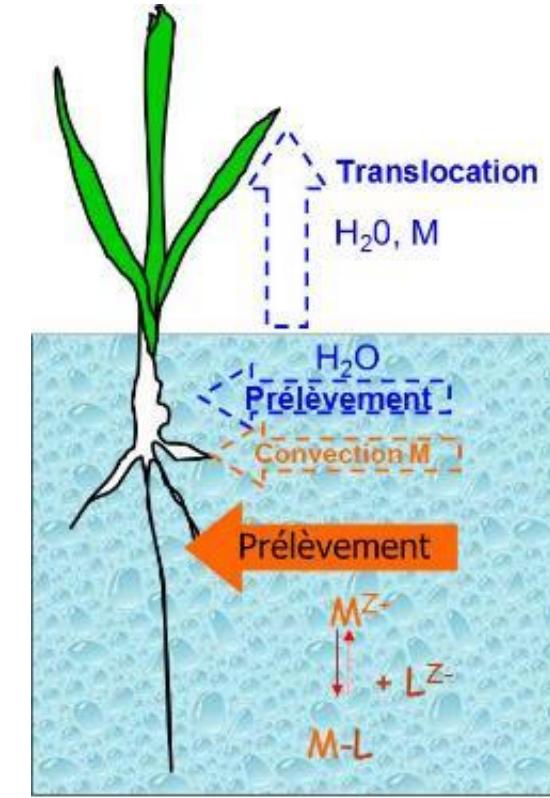
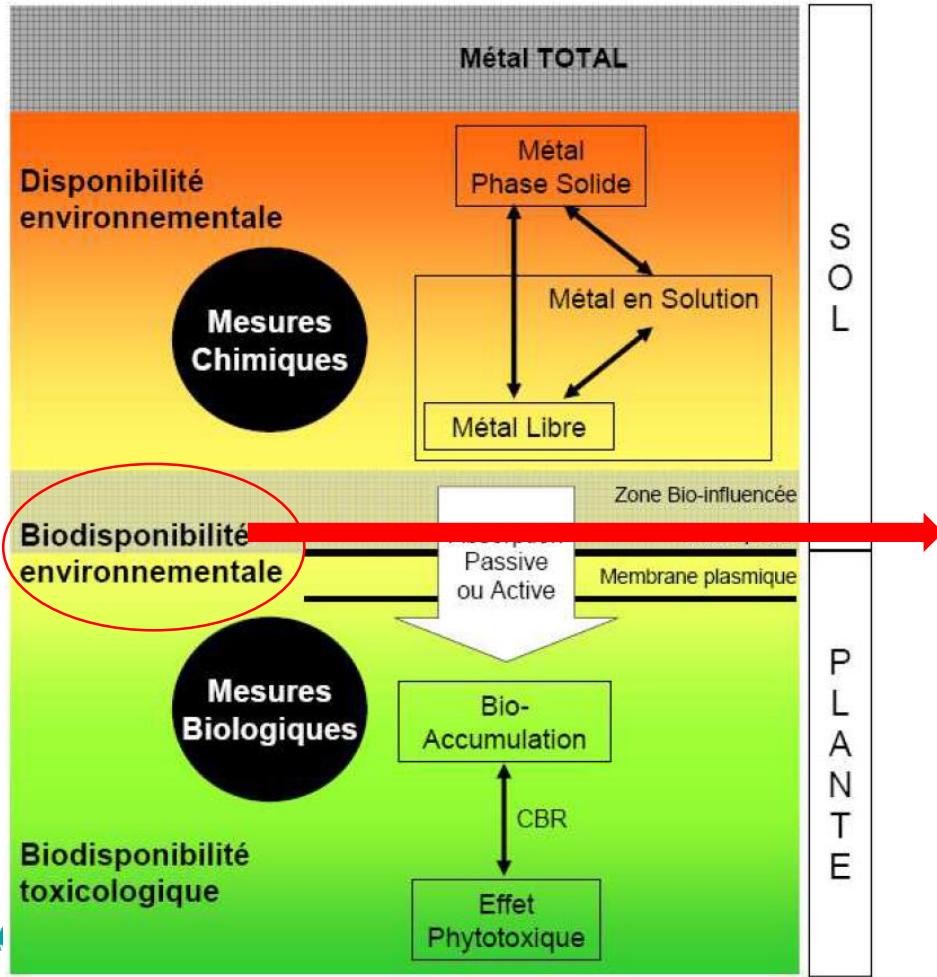
A) $\log(Cu^{2+}) = -1.21(\pm 0.12)pH_{KCl} + 4.57(\pm 0.82)$

B) $\log(Cu^{2+}) = -1.21(\pm 0.11)pH_{KCl} + 0.83(\pm 0.32)\log(Cu_{total}) + 2.98 (\pm 0.97)$

C) $\log(Cu^{2+}) = -1.13(\pm 0.09)pH_{KCl} + 1.41(\pm 0.28)\log(Cu_{total}) - 1.63(\pm 0.36)\log(MO) + 3.54(\pm 0.78)$



Transfert vers les organismes vivants : Notion de Biodisponibilité



La biodisponibilité représente la quantité susceptible d'être absorbée par un organisme vivant.

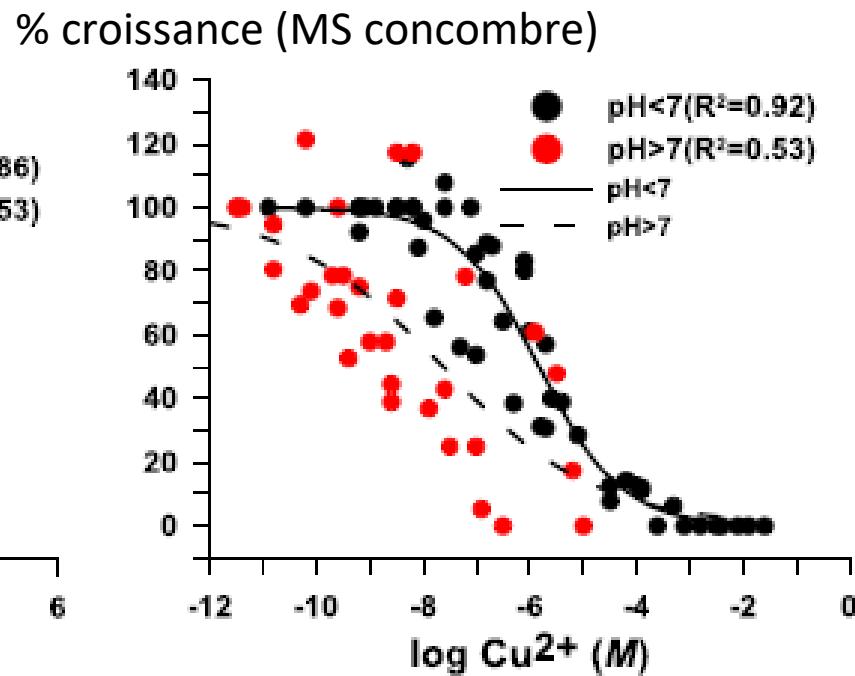
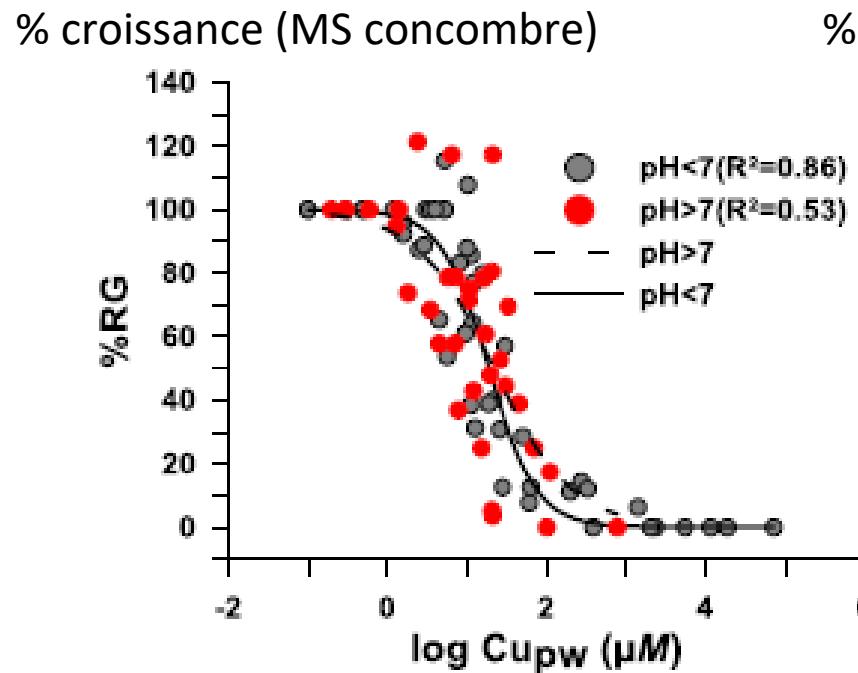
Indicateurs possibles :

Eau porale : $[Cu]_{\text{solution}}$ ou $[Cu^{2+}]_{\text{solution}}$

Capteurs passifs : DGT (métaux)

Quels indicateurs peuvent prédire la phytotoxicité ?

Cuivre mesuré dans l'eau porale des sols

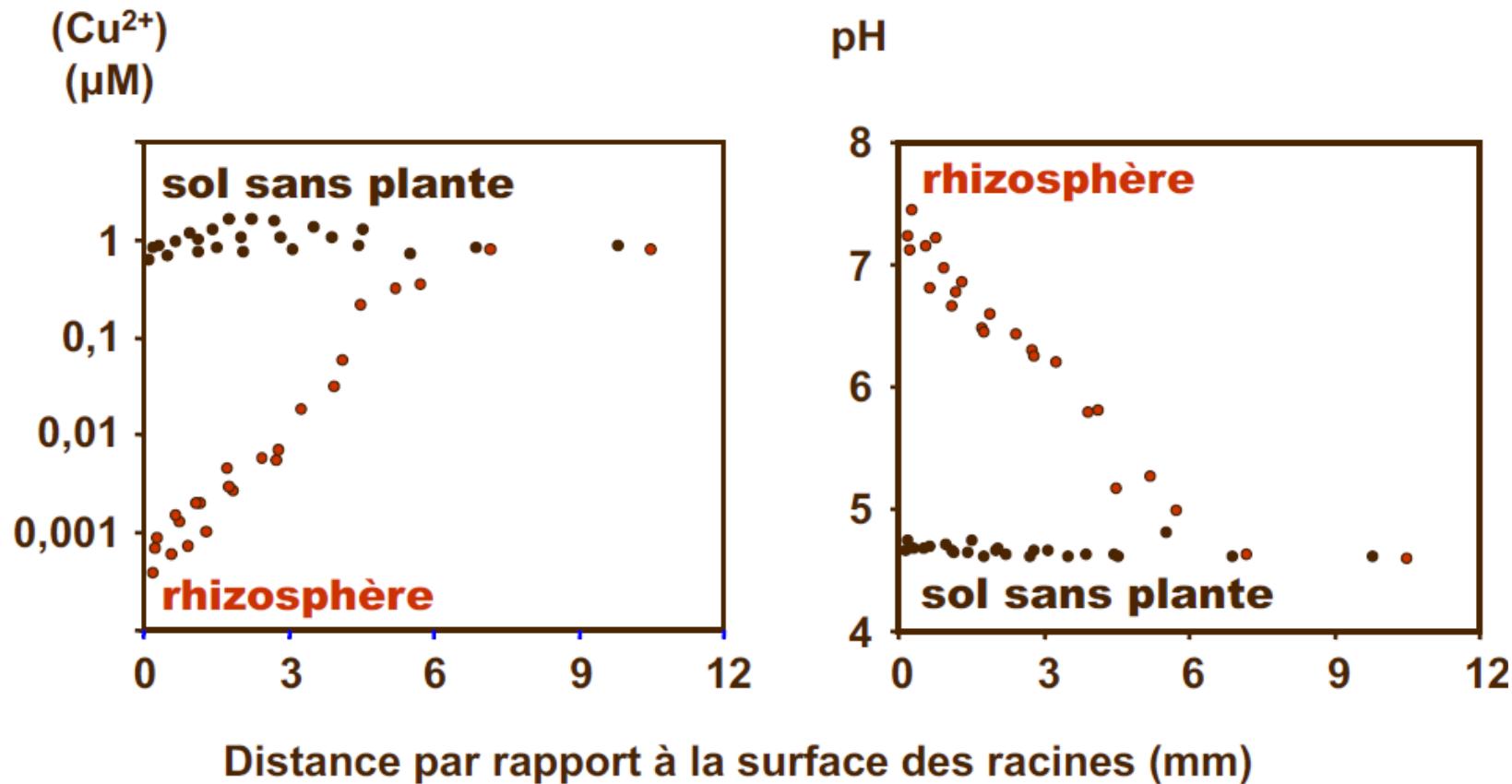


Kader et al. 2016



Effets rhizosphériques

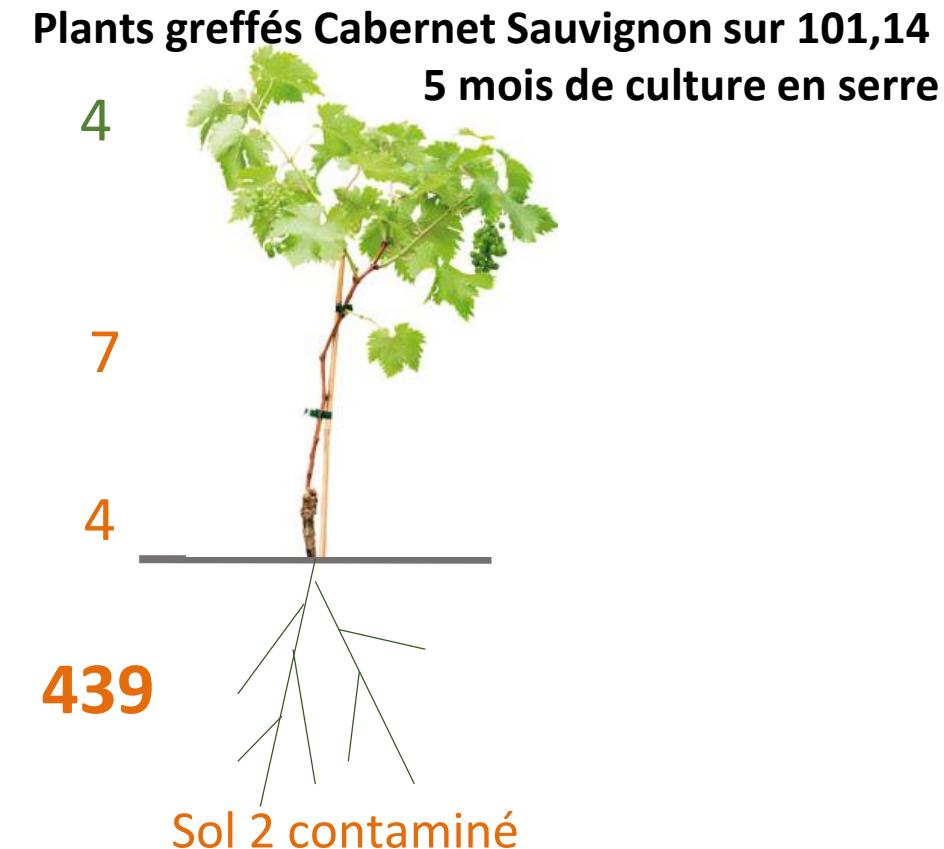
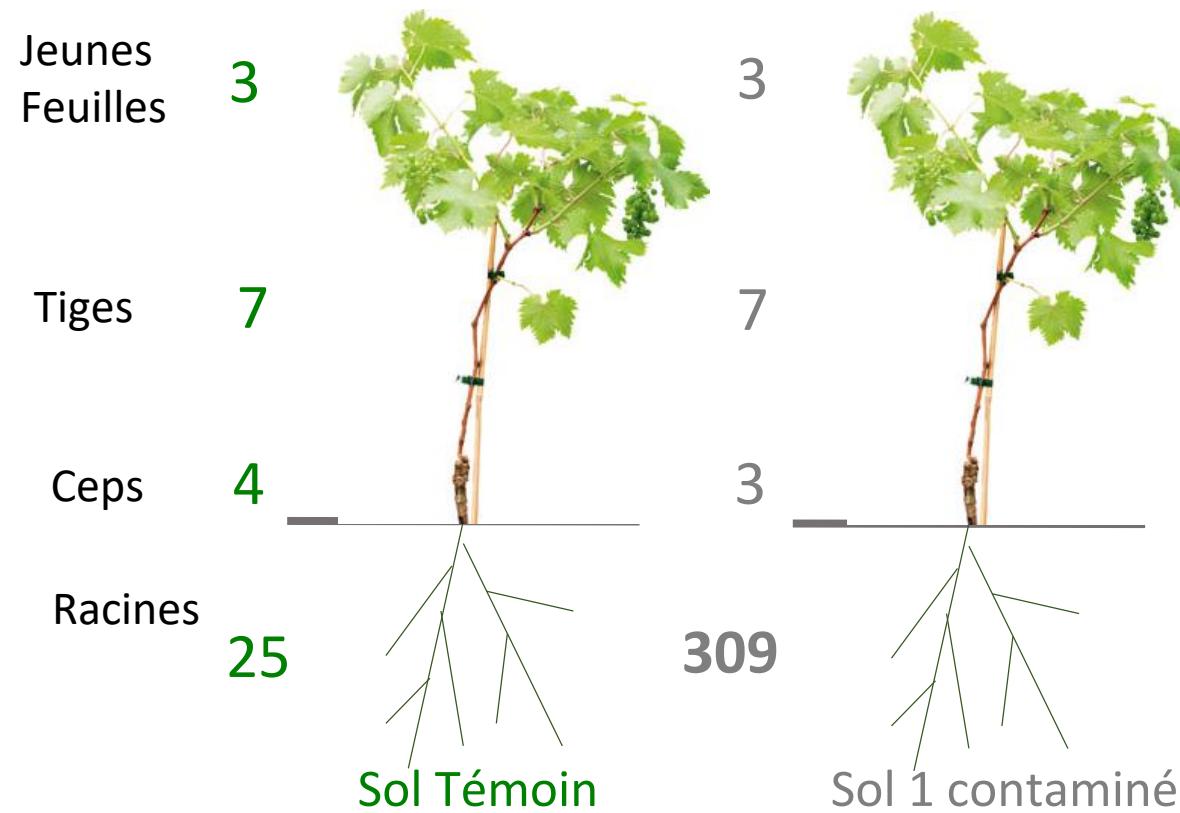
Analyse de la rhizosphère du blé dur



Sol ant. viticole acide $\text{Cu}_{\text{total}} \# 185 \text{ mg kg}^{-1}$ sol

(Bravin, Tentscher, Rose & Hinsinger, 2009 – Environ. Sci. Technol. 43)

Concentration dans la vigne sur sols contaminés



SOL	Cu total (mg/kg)	3	108	325
	pH	7,7	5,6	7,8
	Cu soluble (μM)	0,1	3,5	1,2 μM
	Cu _{DGT} disponible (μM)	0,5	1,2	6,9

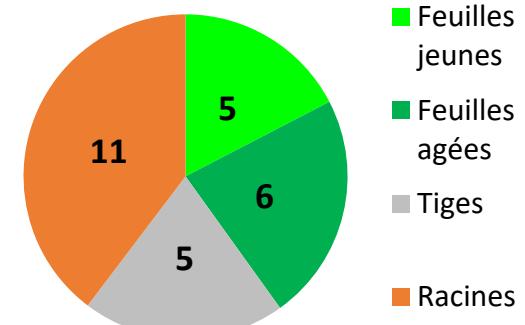
Anatole-Monier, 2014

Répartition du Cu (μg) dans différents cépages

15 jours de culture de boutures en hydroponie

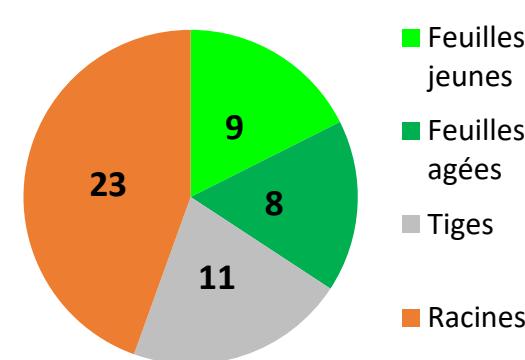
Cabernet-Sauvignon

0,2 μM

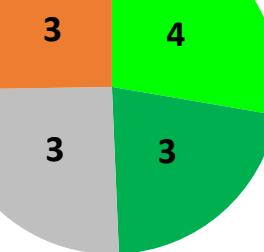


Merlot

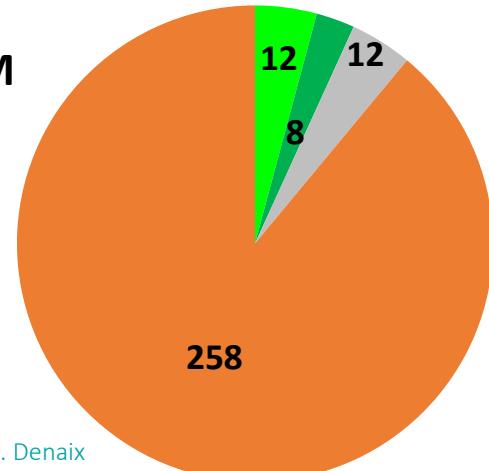
23



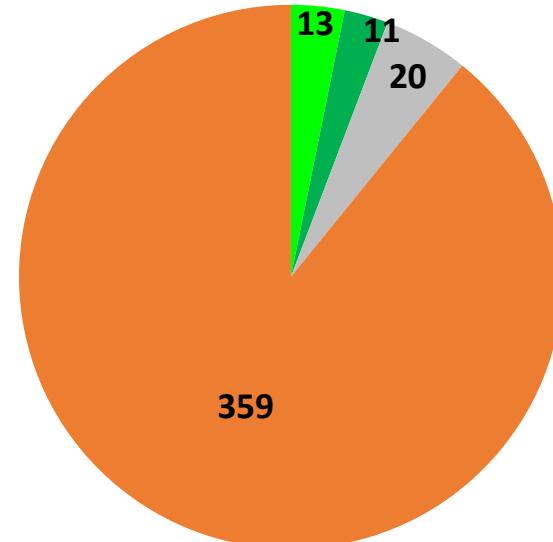
Porte-greffe 101.14



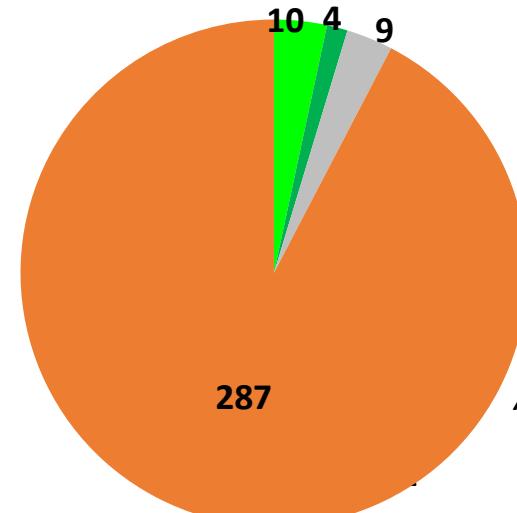
10 μM



359



287



Anatole-Monier, 2014

Répartition du cuivre dans la vigne



BOUTURES

- Merlot, Cabernet Sauvignon, Porte greffe 101.14
- 15 jours d'exposition en serre après 4 semaines de préculture
- Gamme de [Cu] réaliste (0,2 - 1 - 2,5 - 10 μM) en solution nutritive
- 5 étages foliaires + tiges + racines

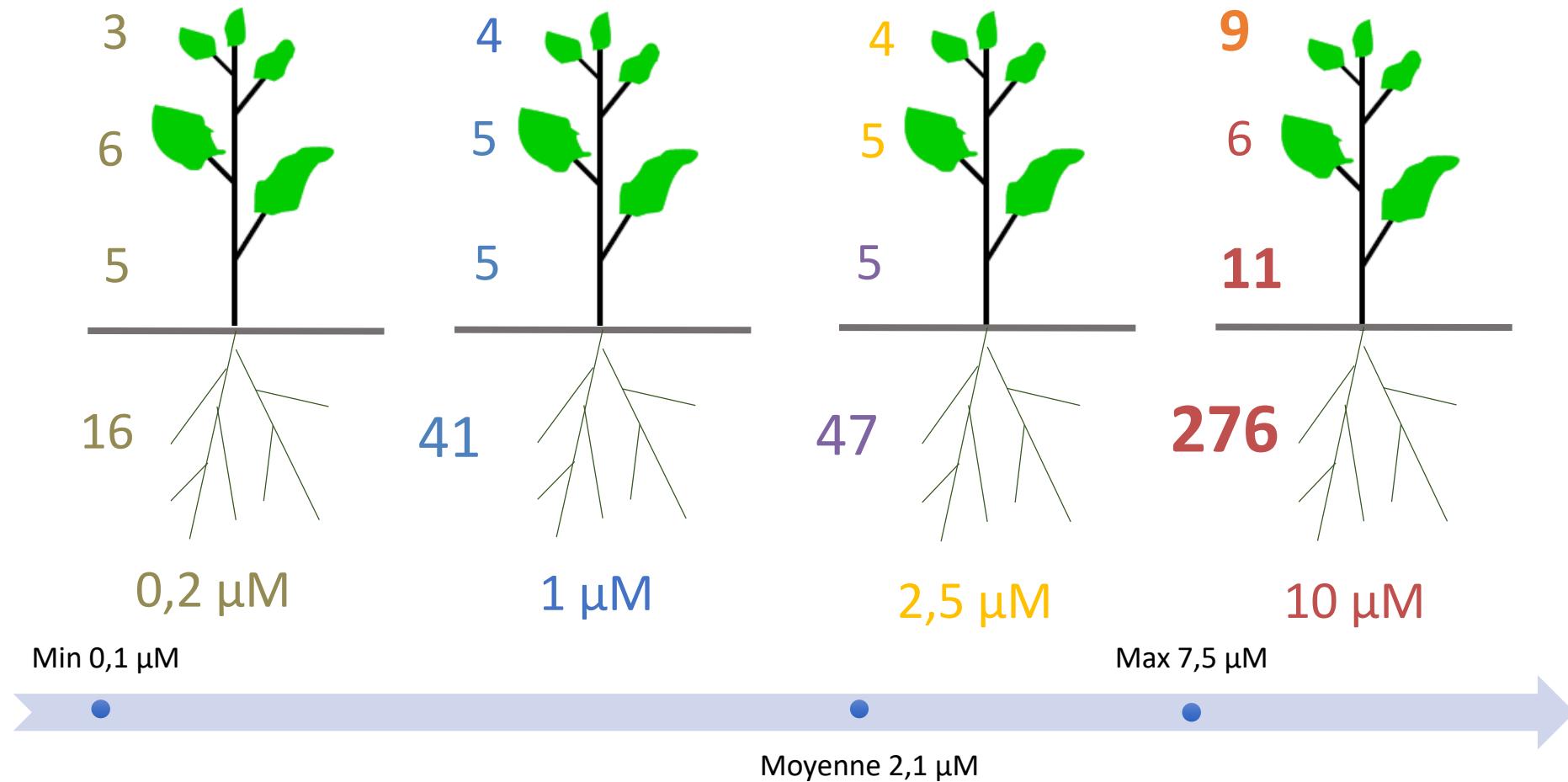
PLANS GREFFES

- Cabernet Sauvignon sur 101.14
- 3 sols de contamination variable

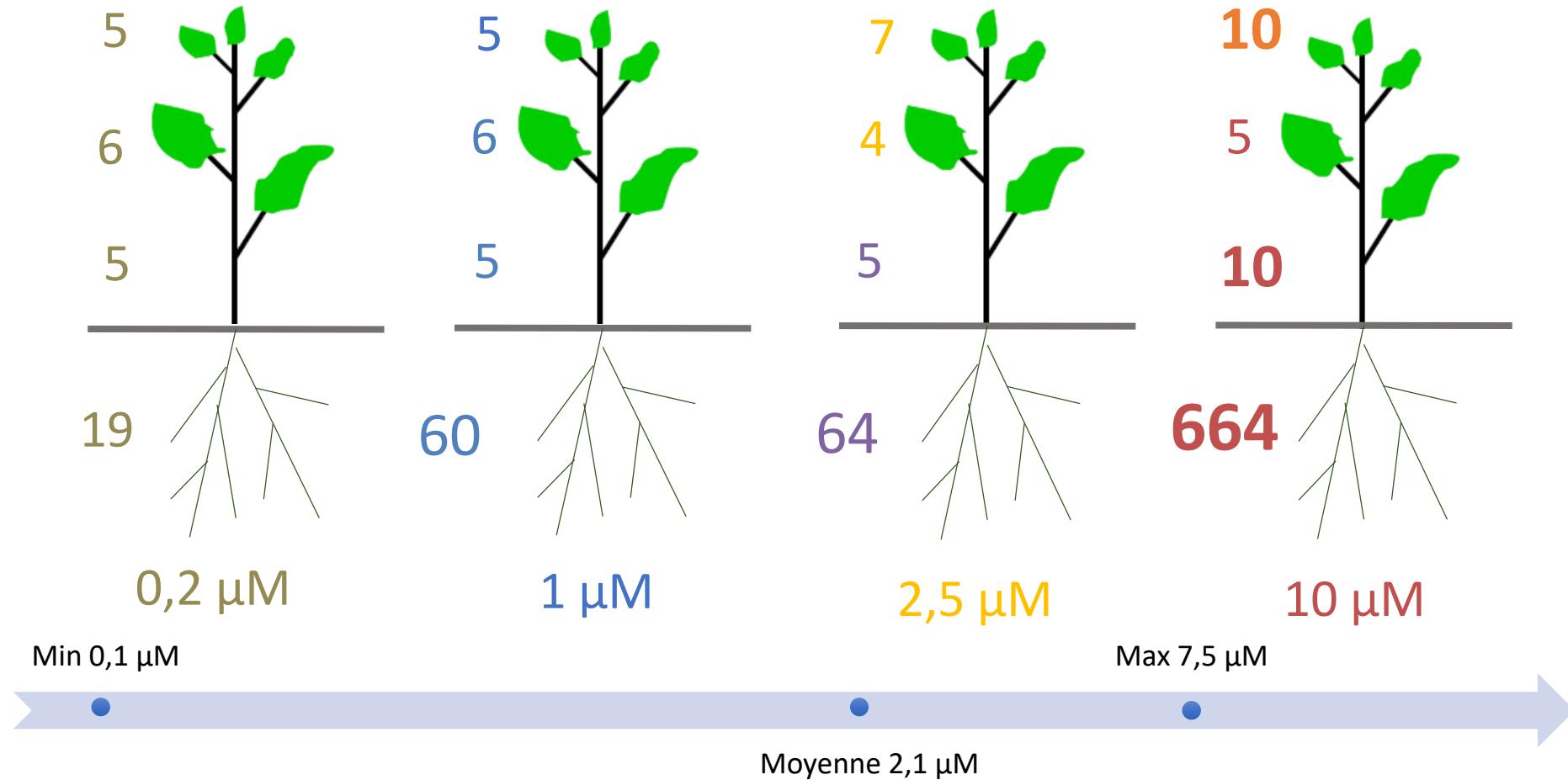
	Témoin	Sol 1	Sol 2
Cu soluble	0,1 μM	3,5 μM	1,2 μM
Cu _{DGT} disponible	0,5 μM	1,2 μM	6,9 μM

- 5 mois d'exposition
- Feuilles + tige + cep + racine

Distribution du cuivre ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) du Cabernet Sauvignon



Distribution du cuivre ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) dans le porte-greffe

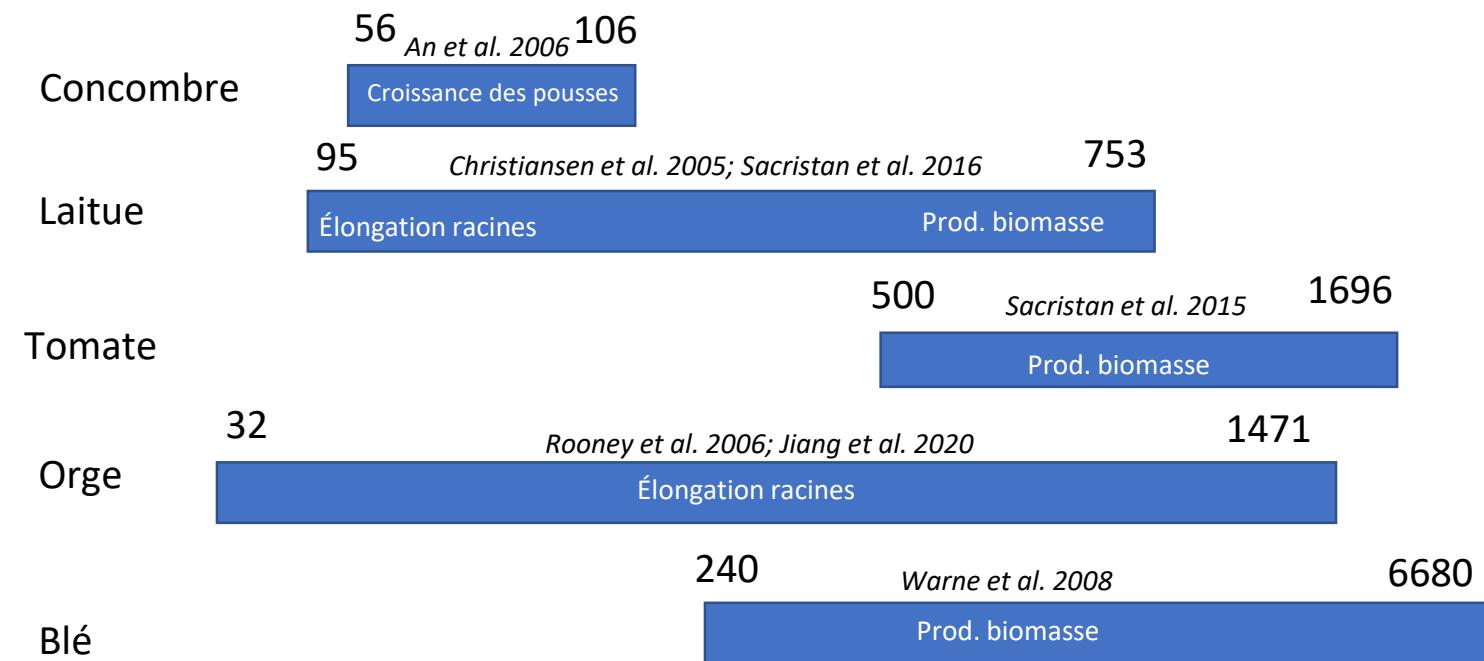


→ + de Cu accumulé dans ses racines et + transfert vers les parties aériennes

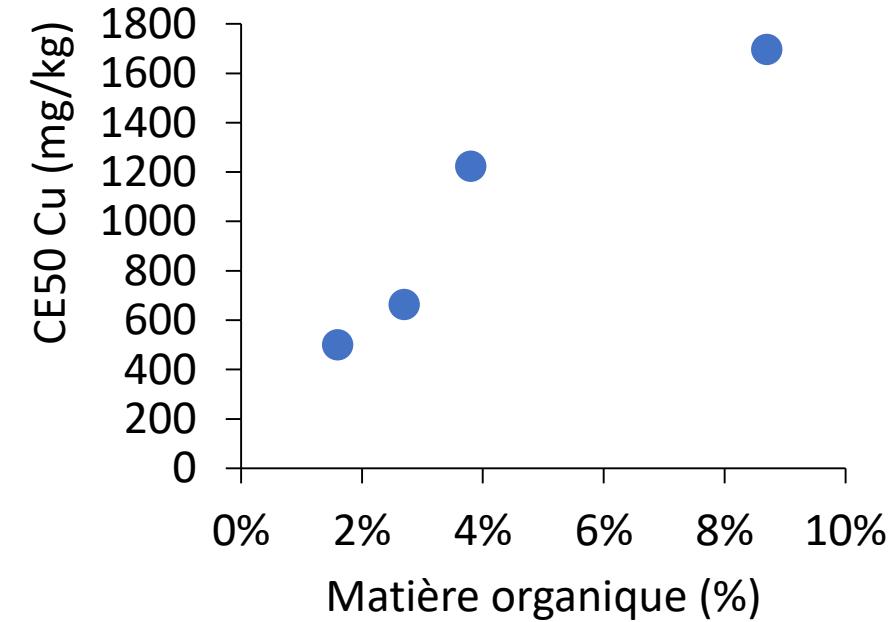
35

Valeurs écotoxiques pour les plantes (Cu total mg/kg)

CE50 – Concentration pour un effet sur 50 % de la population

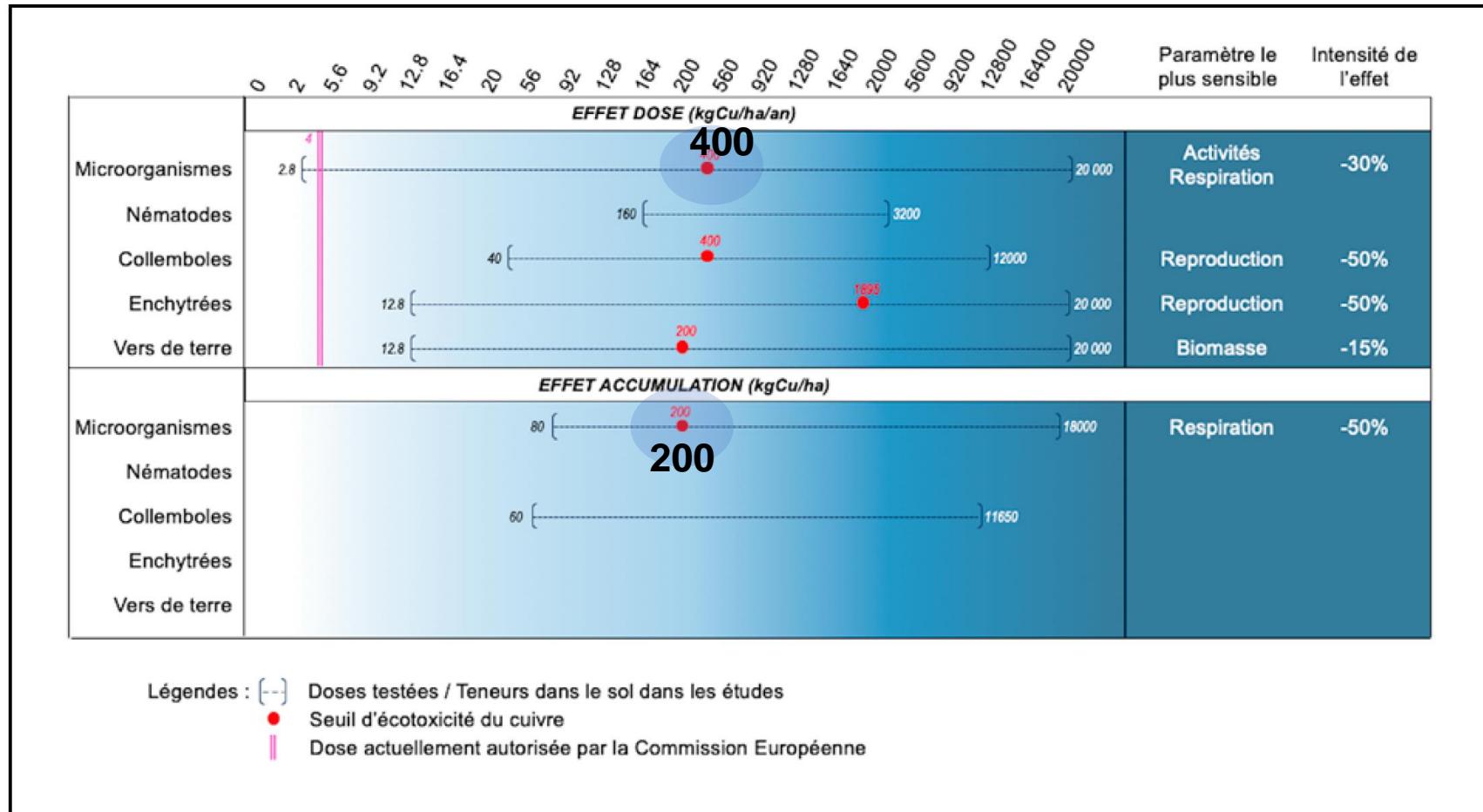


Teneur pour 50% d'effet
sur la croissance de la tomate

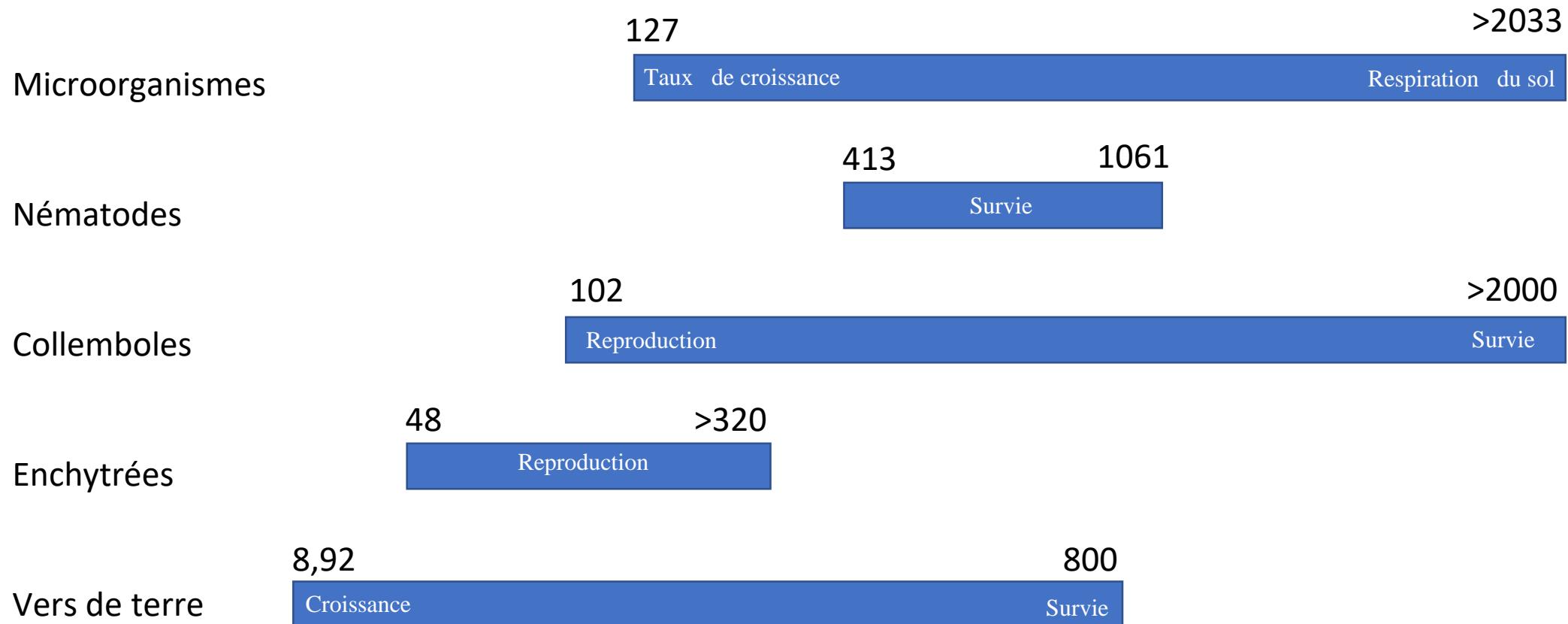


Sacristan et al. 2015

Ecotoxicité du cuivre pour les organismes du sol

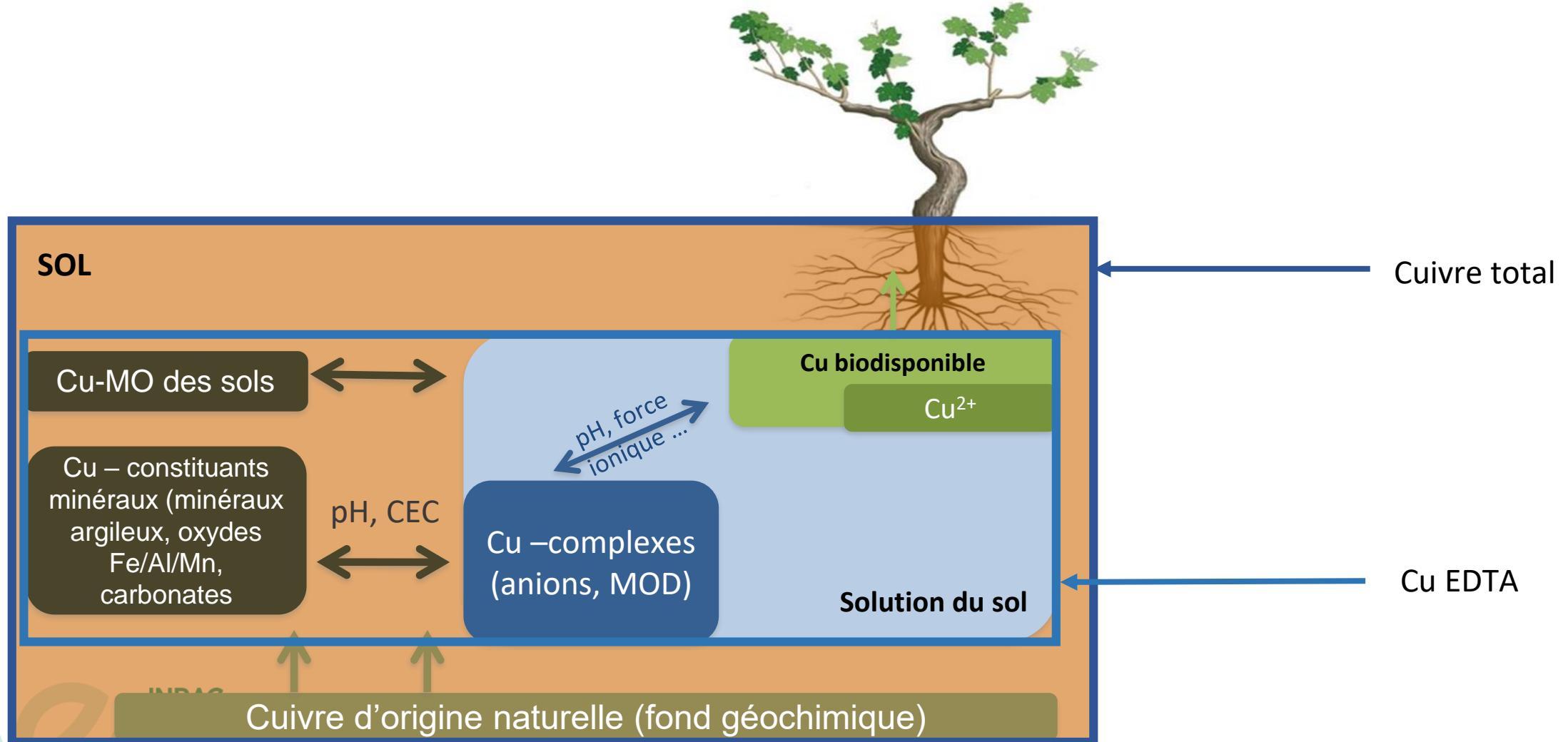


Valeurs écotoxiques pour les organismes du sol



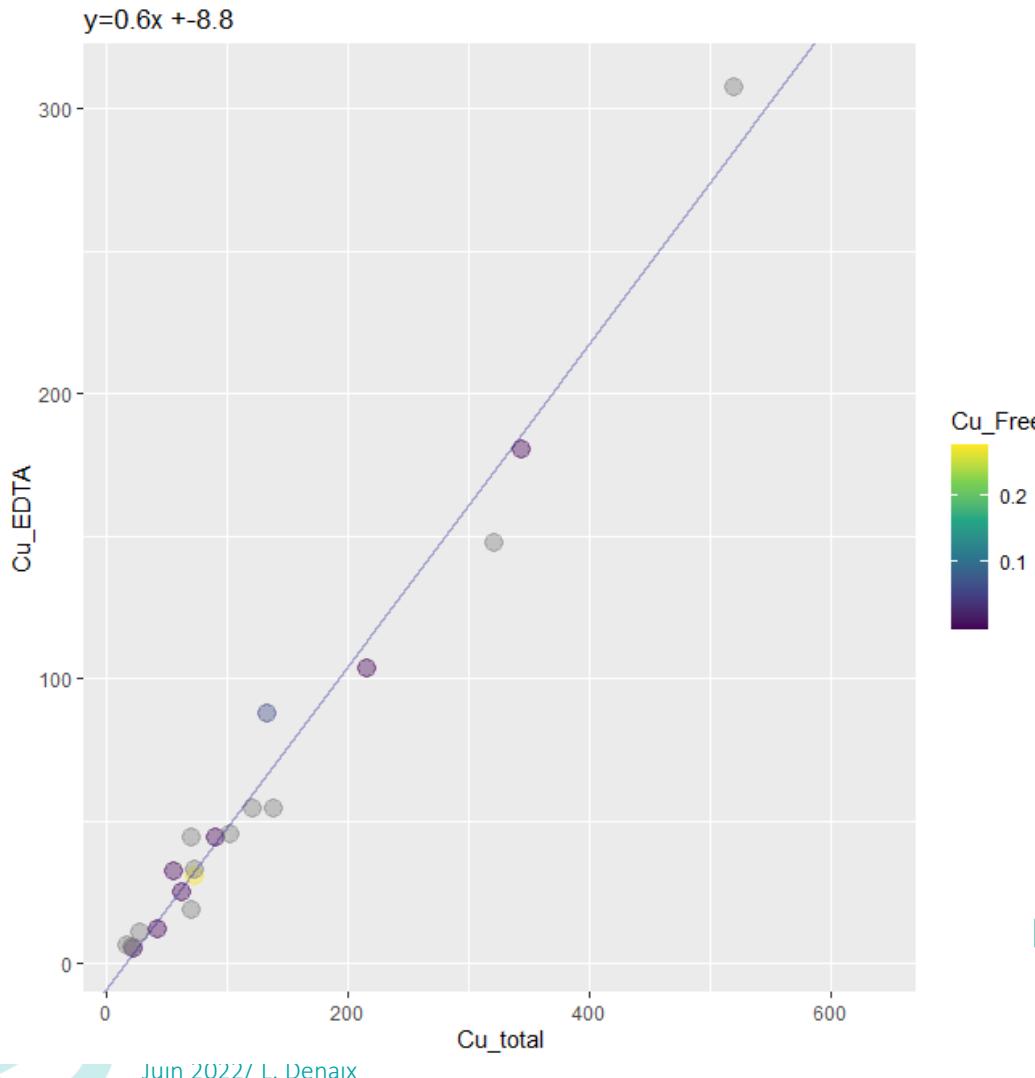
Vers du fumier *Eisenia fetida*:
[Cu²⁺] = 1µM

Distribution du cuivre dans les sols

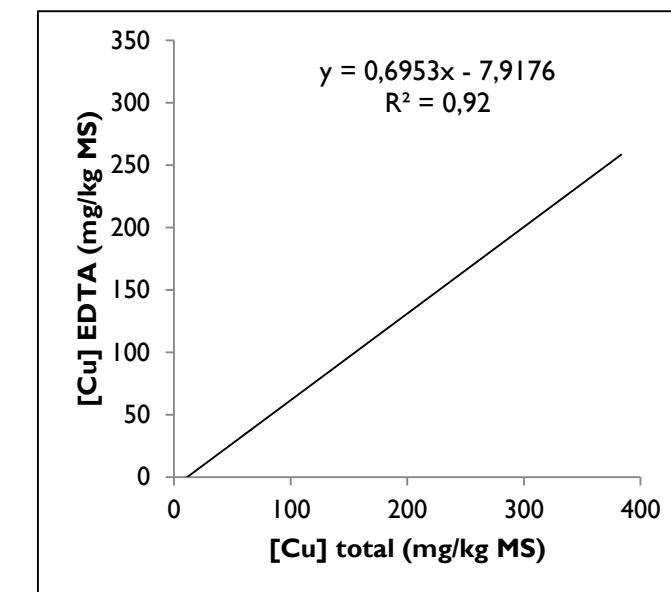


Cuivre extractible EDTA

Méthode AFNOR (NF X 31-120)



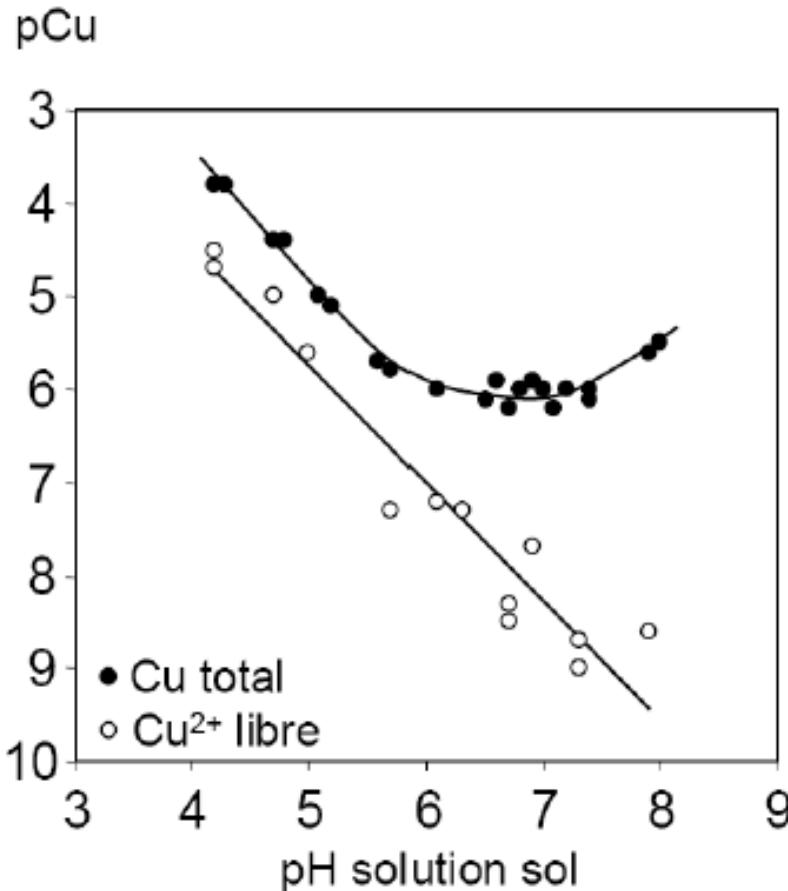
$$Cu_{EDTA} = 0.57 Cu_{total} - 8.77$$



Méthode BCR
Anatole-Monnier, 2014

Extraction EDTA n'est pas un bon indicateur de la biodisponibilité

A faible pH, le cuivre est plus disponible

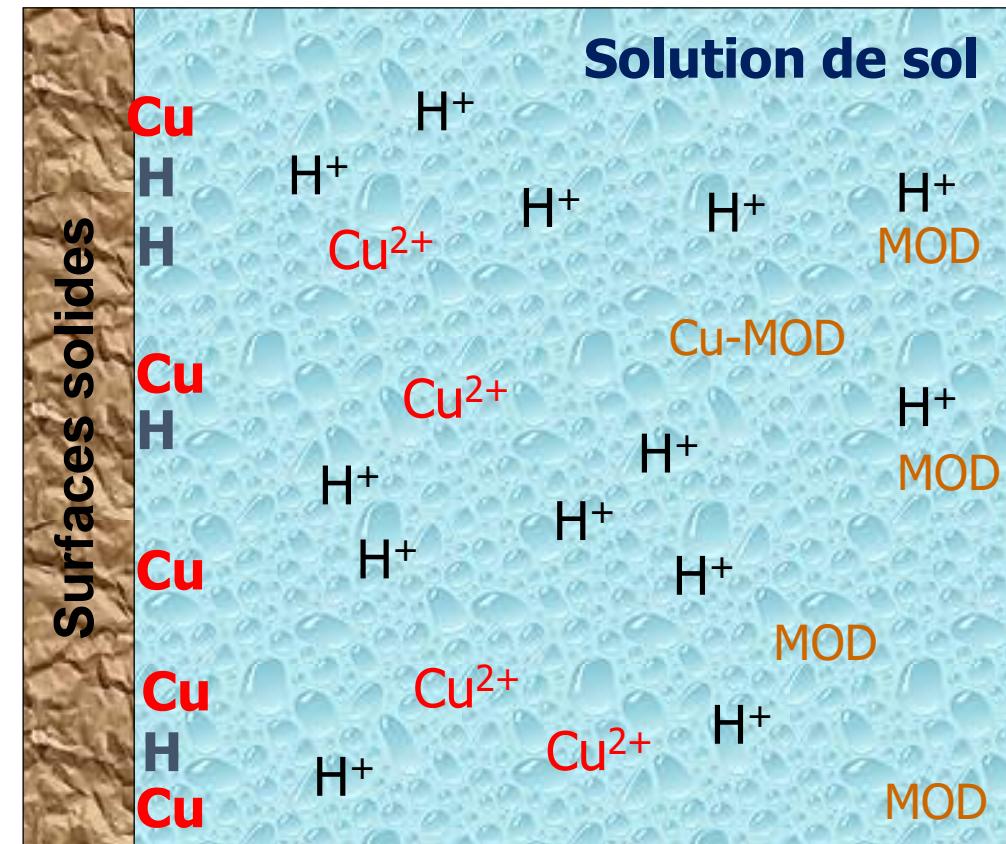


INRAe

Juin 2022/ L. Denaix

Bravin, 2008

Si acidification => Plus de Cu²⁺ en solution



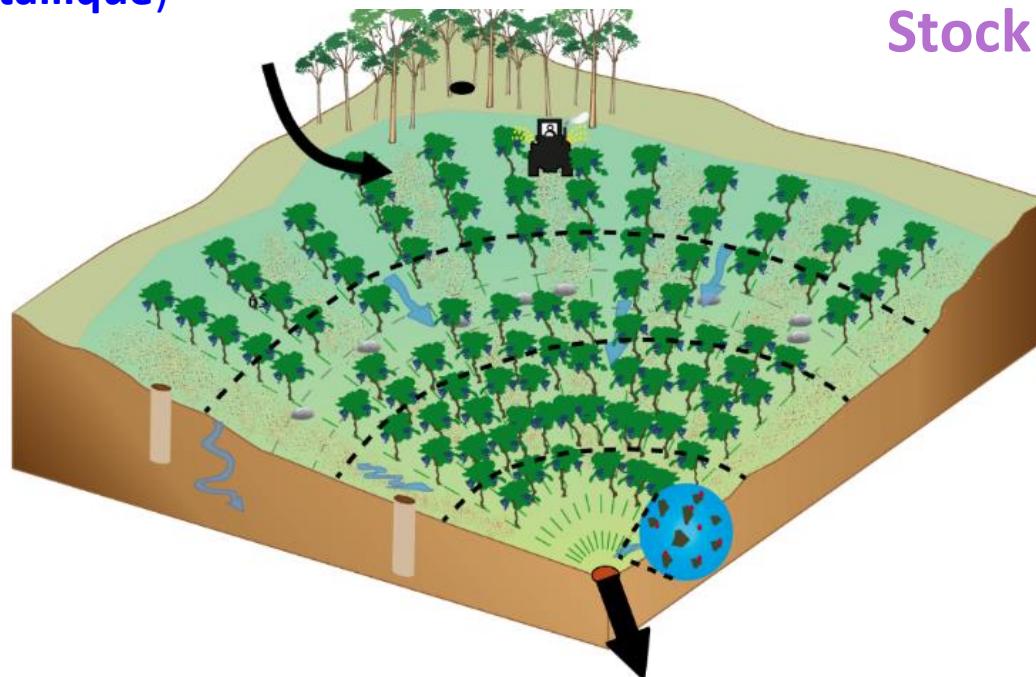
Accumulation et flux au niveau d'un bassin versant

**Apport Fongicides cupriques
env. 1,65 kg/ha : Cu métallique**



**Stock dans la végétation:
5.2 kg : 0.2 kg/ha**

Apports atmosphériques:
6 g/ha/an
(négligeable)



**Stock actuel sol (10 cm): 120 kg/ha
190 mg Cu/kg**

**Taux accumulation
(apport-export) :**
Environ 1.63 kg Cu/ha/an

**Export dans les eaux de ruissellement: 16 g/ha/an
<1% de la masse de cuivre appliquée**

Quels effets d'un apport régulier de 4 kg Cu/ha/an ?

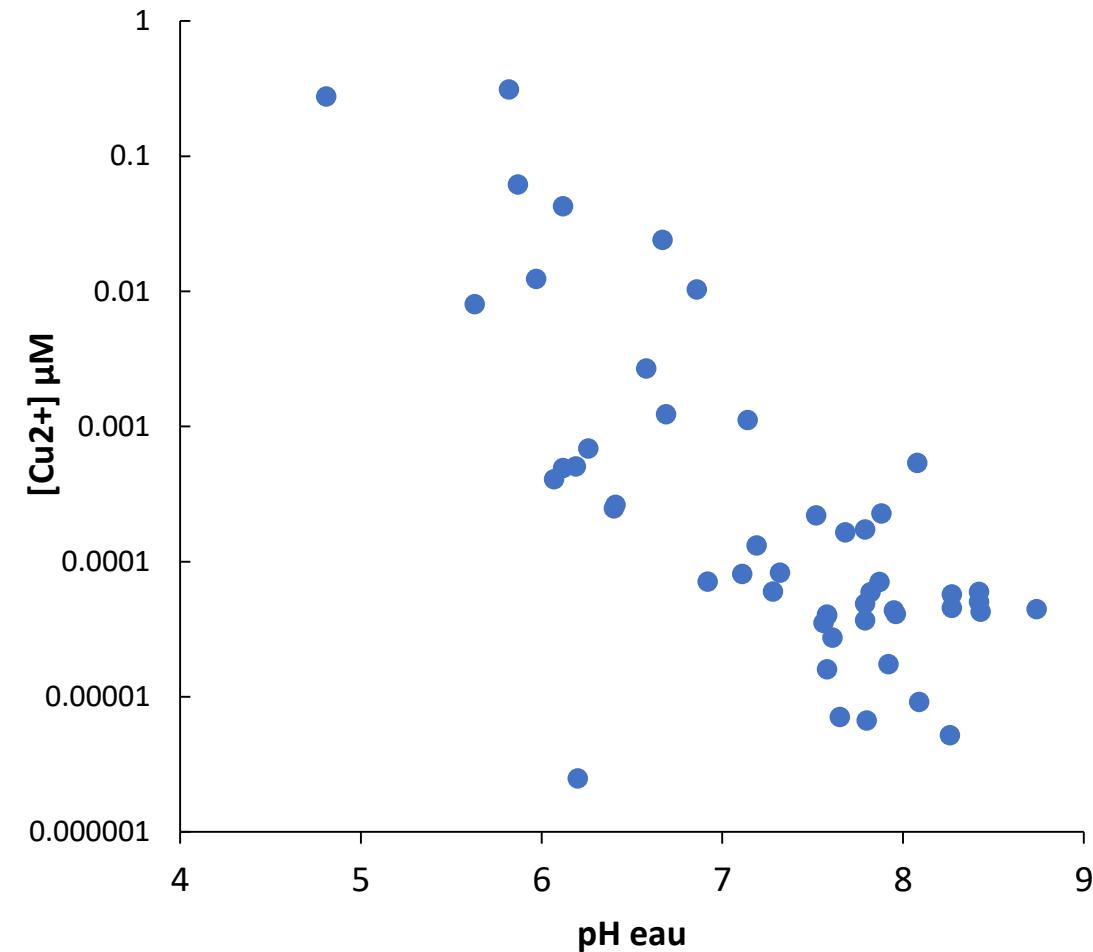
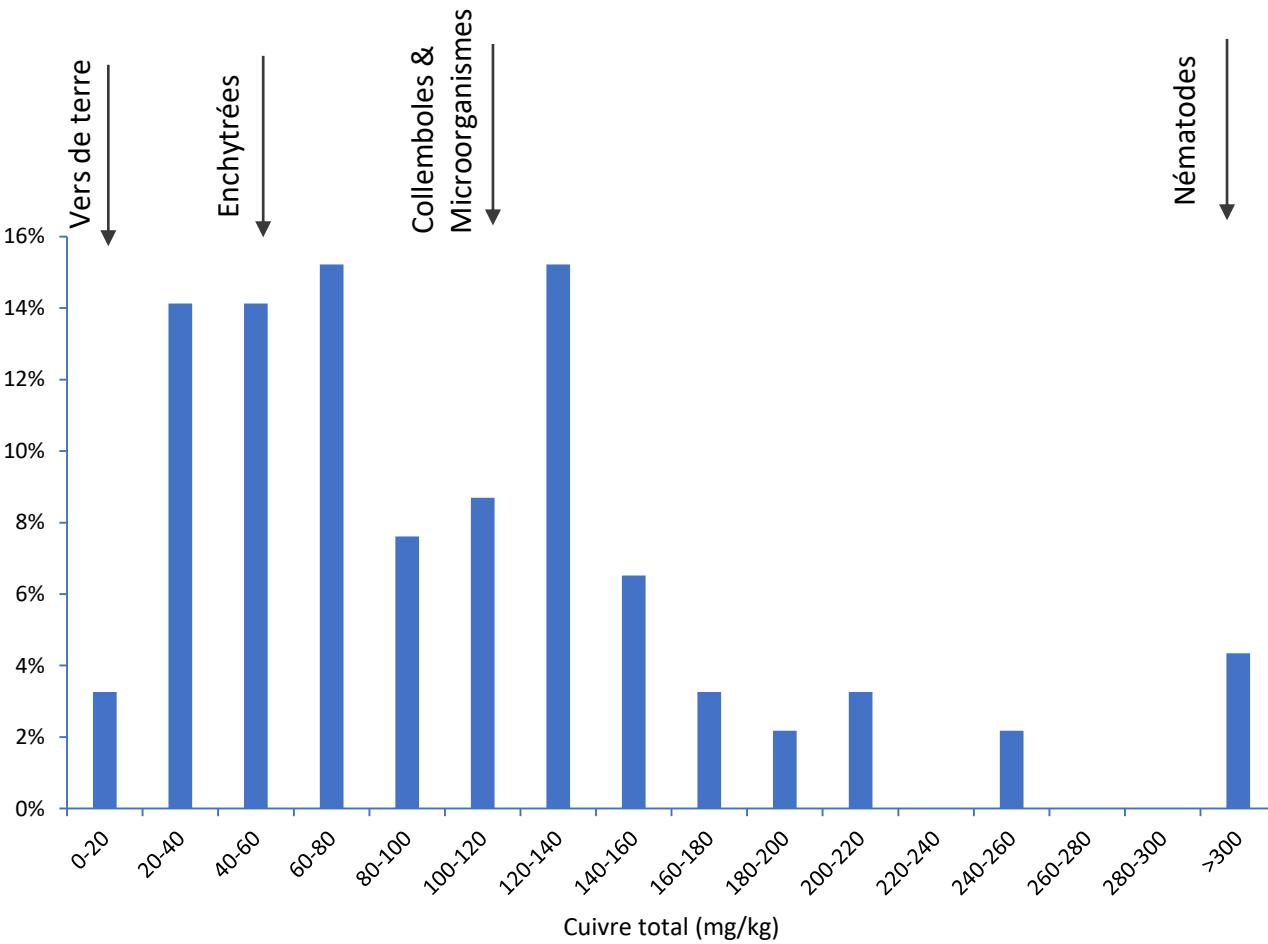
- Sur la teneur totale

0-15 cm	n	Min.	Médiane	Max.
Cu total (mg/kg)	104	1,4	79	383
Stock Cu (kg/ha)	104	4,4	226	1188
Stock après 1 an d'apport		8,4 (48%)	230 (1,7 %)	1192 (0,3 %)

- Sur la teneur disponible :

- Cela dépend aussi des autres facteurs (pH, MO)

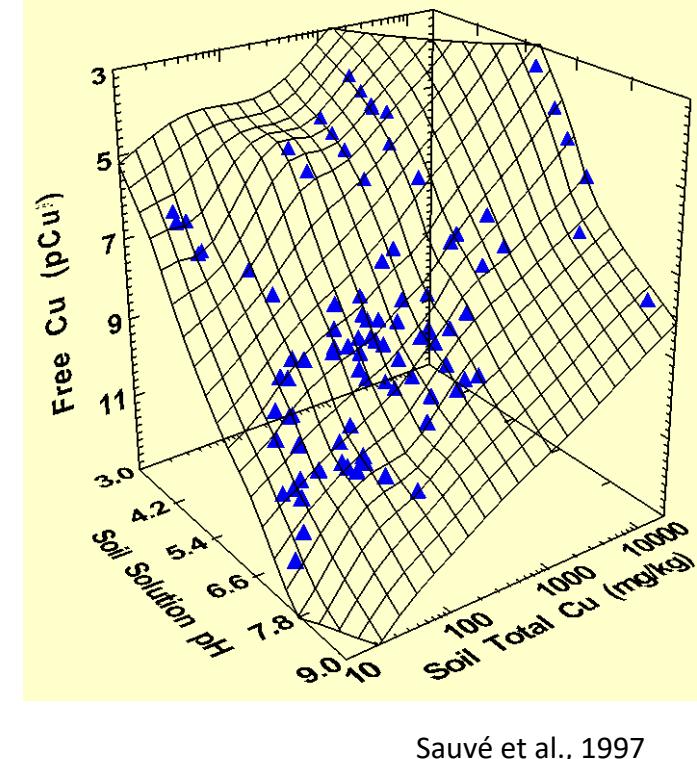
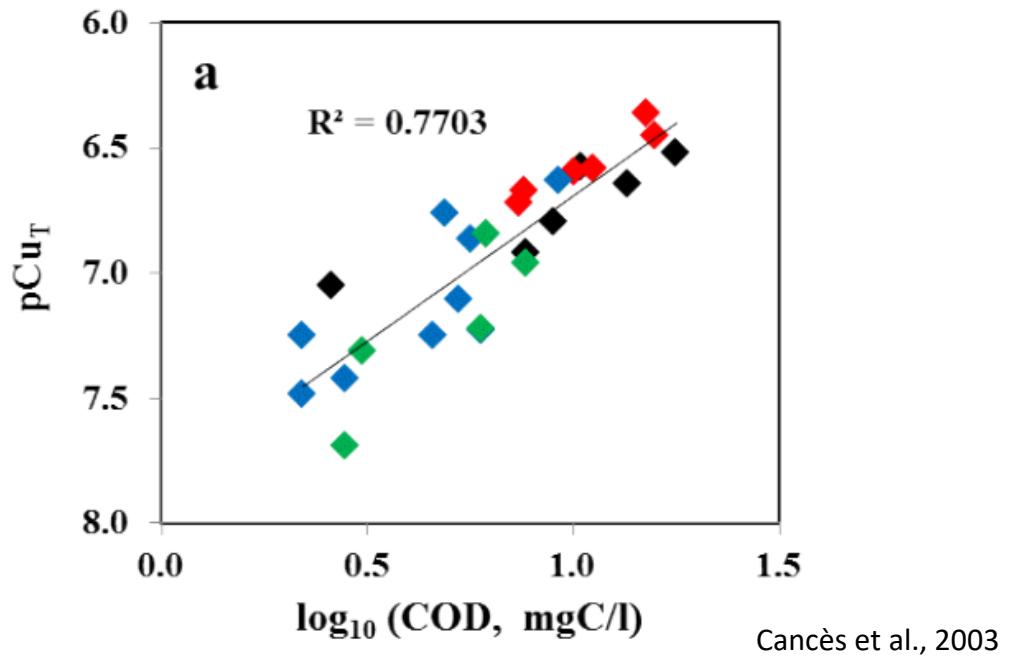
Comparaison avec nos données



Conclusions totalement différentes suivant l'indicateur

Facteurs jouant sur la disponibilité du cuivre

- pH
- Matières organiques



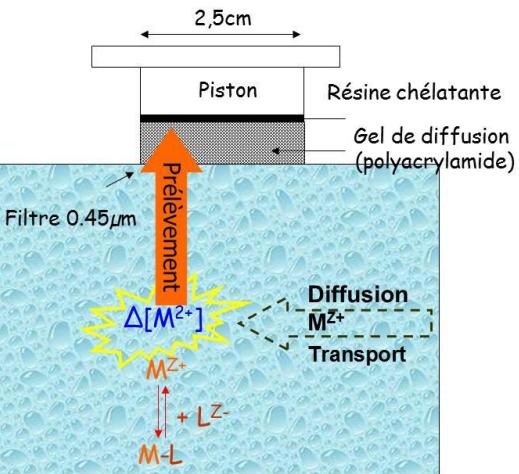
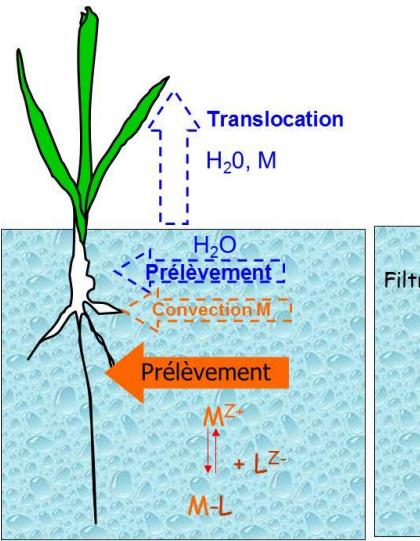
Evolution du stock de cuivre dans les sols avec l'âge viticole

- Densité apparente des 3 premières couche (0-15, 15-30, 30-45)
Calcul du stock (kg/ha) pour chaque couche :
$$\text{Epaisseur (cm)} * \text{Masse volumique (kg/cm}^3) * [\text{Cu}] (\text{kg/kg}) * 10^4$$
- Cumul des stocks pour un stock 0-45 cm et soustraction du stock forêt
- Apport théorique (kg/ha/an) : Stock divisé par les années de viticulture

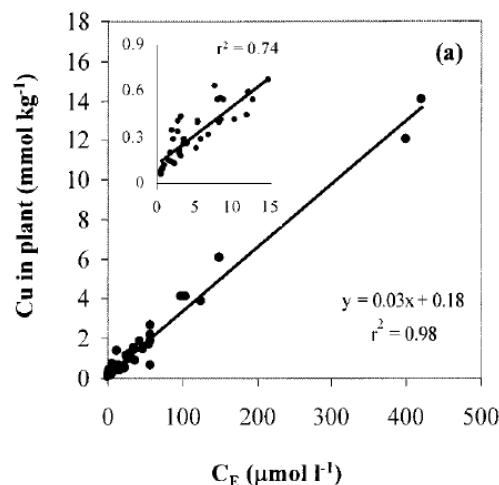
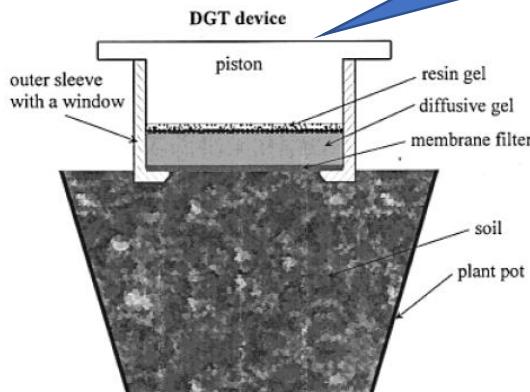


Age viticole	Stock 0-45 (kg/ha)	Apport théorique (kg/ha/an)	Apport réel connu (kg/ha/an)
Forêt (0)	11		
3 ans	22	3.6	3.8
15 ans	43	2.1	2.4
72 ans	885	12.5	
135 ans		6.6	

Différents indicateurs pour mesurer la disponibilité

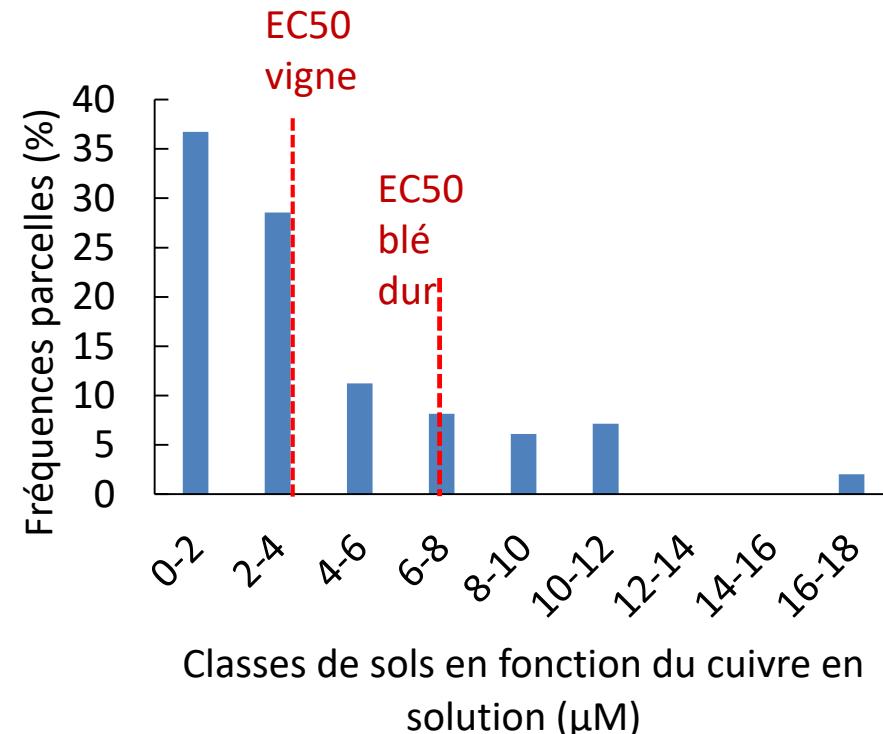


Capteur passif
DGT



Quelles sont les concentrations en cuivre disponible retrouvées dans les sols viticoles ?

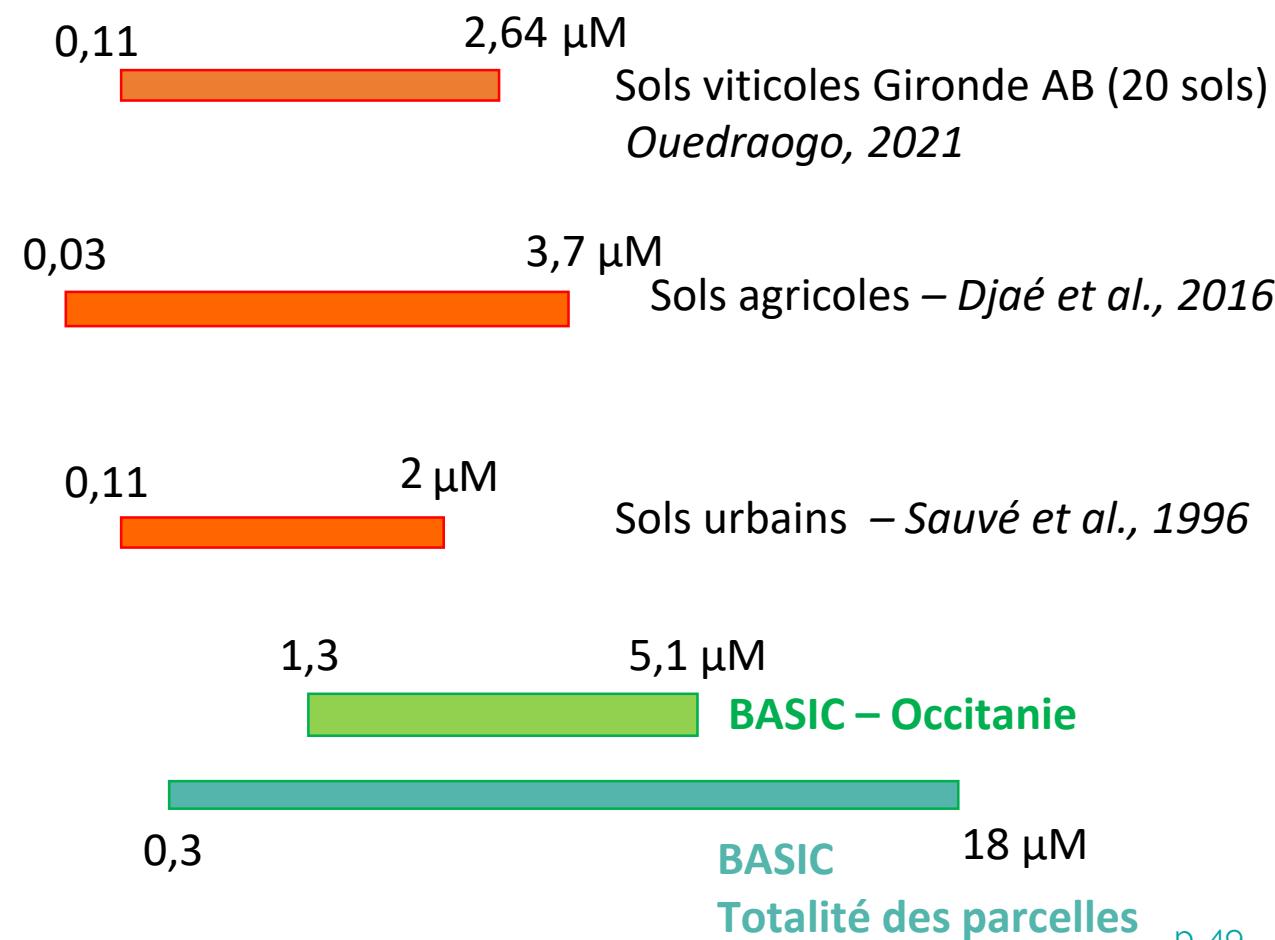
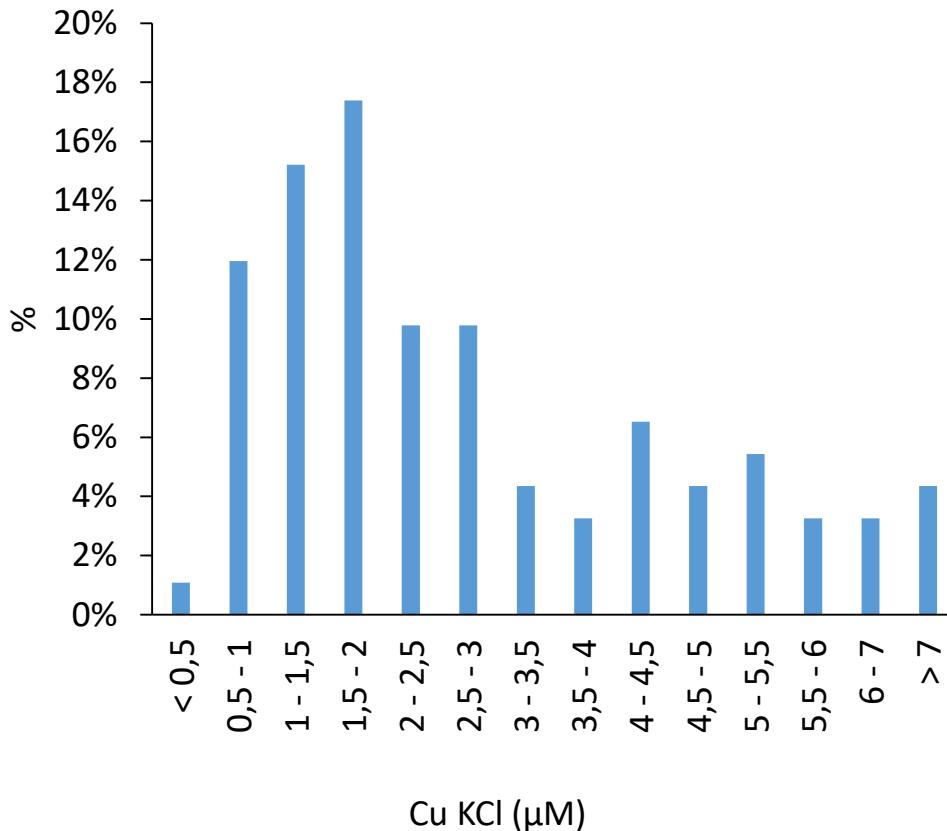
0-15 cm	n	Min.	Médiane	Max.
Cu total (mg/kg)	104	1,4	79	383
Stock Cu (kg/ha)	104	4,4	226	1188
Cu DGT ($\mu\text{g/L}$)	100	1,8	38,6	315
Cu solution (μM)	99	0,1	2,8	17,6
Cu $^{2+}$ (μM)	51	0,0001	0,086	2



Organisme	EC50	Critère	Auteur
Maïs	7,5 μM	Biomasse racinaire	Ouzounidou et al., 1995
Blé dur	7,7 μM	Biomasse racinaire	Michaud et al., 2008
Vigne	3,9 μM	Croissance racinaire	Juang et al., 2012

Distribution du cuivre en solution (Cu KCl)

Distribution en fréquence des sols choisis

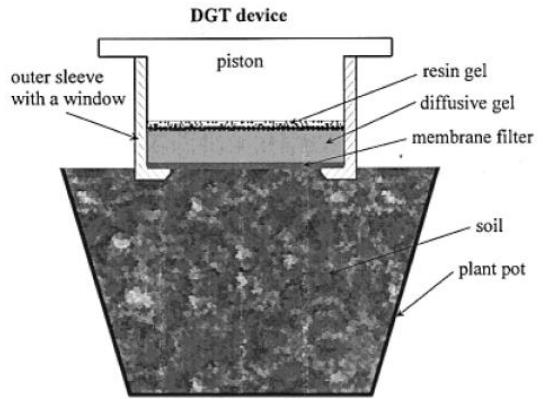


Distribution du cuivre en solution (Cu^{2+})

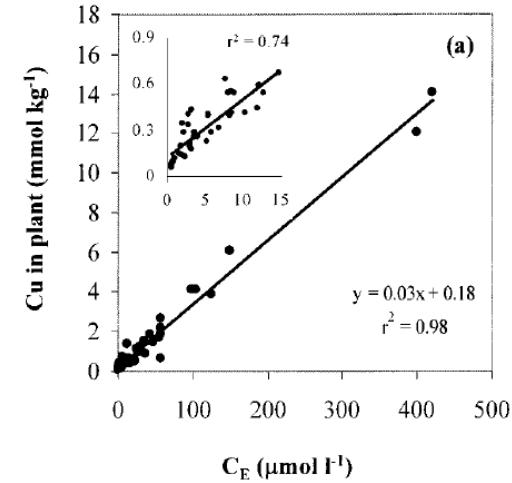
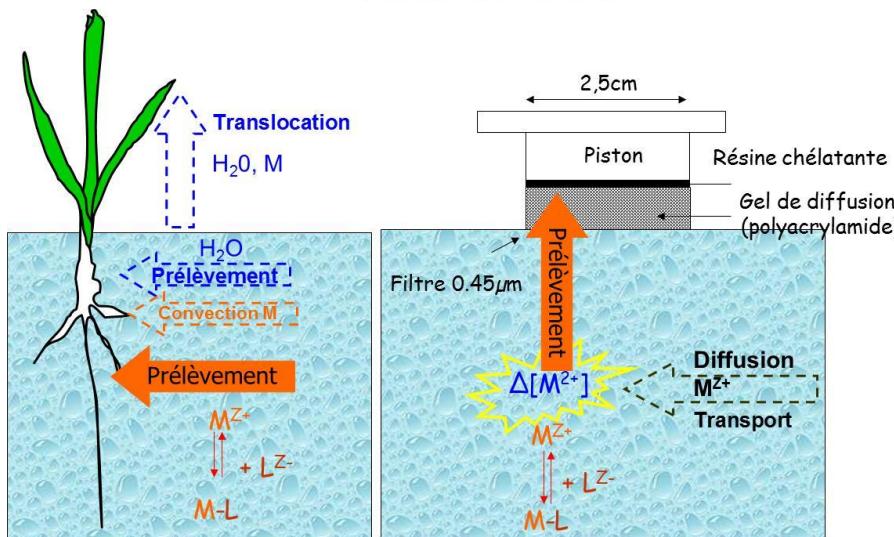
Cu $^{2+}$ μM		Minimum	Maximum
Notre étude (BASIC)		2.10$^{-8}$	0,31
BASIC- Occitanie		1.10 $^{-6}$	2,5.10 $^{-4}$
Sols viticoles AB Gironde	<i>Ouedraogo 2021</i>	2.10 $^{-4}$	0,95
<i>Sols viticoles Gironde</i>	<i>Cornu et al. 2019</i>	6.10 $^{-5}$	0,3
Sols agricoles France	<i>Djaé et al. 2016</i>	3.10 $^{-7}$	2
Sols agricoles Chine	<i>Luo et al. 2006</i>	9. 10 $^{-4}$	15

Faible niveau de contamination par rapport aux données de la littérature

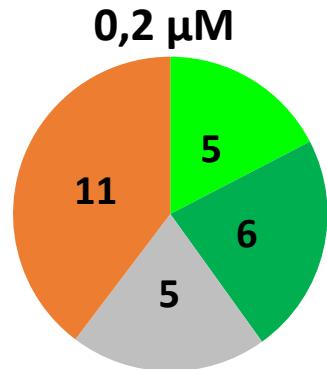
Des capteurs passifs (DGT) pour mesurer la disponibilité



Zhang et al., 2001



Evolution de la minéralomasse avec la contamination

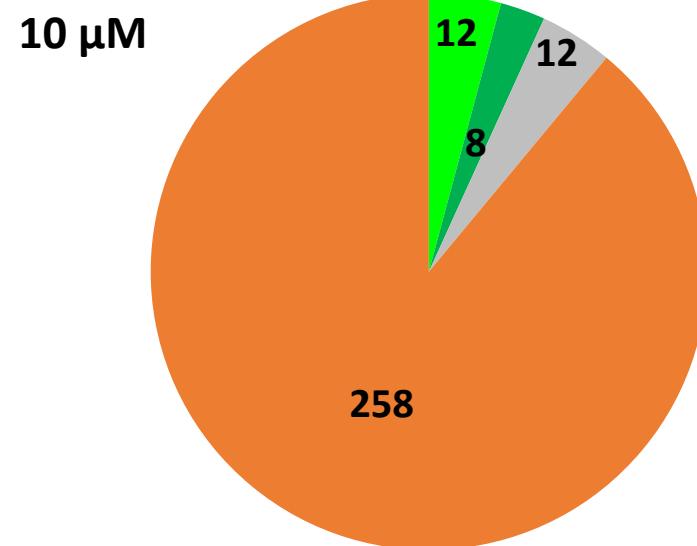
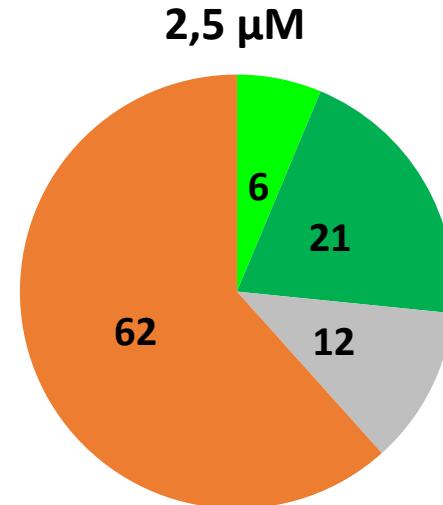
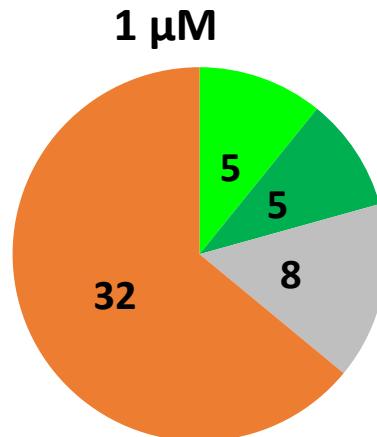


Feuilles jeunes

Feuilles agées

Tiges

Racines

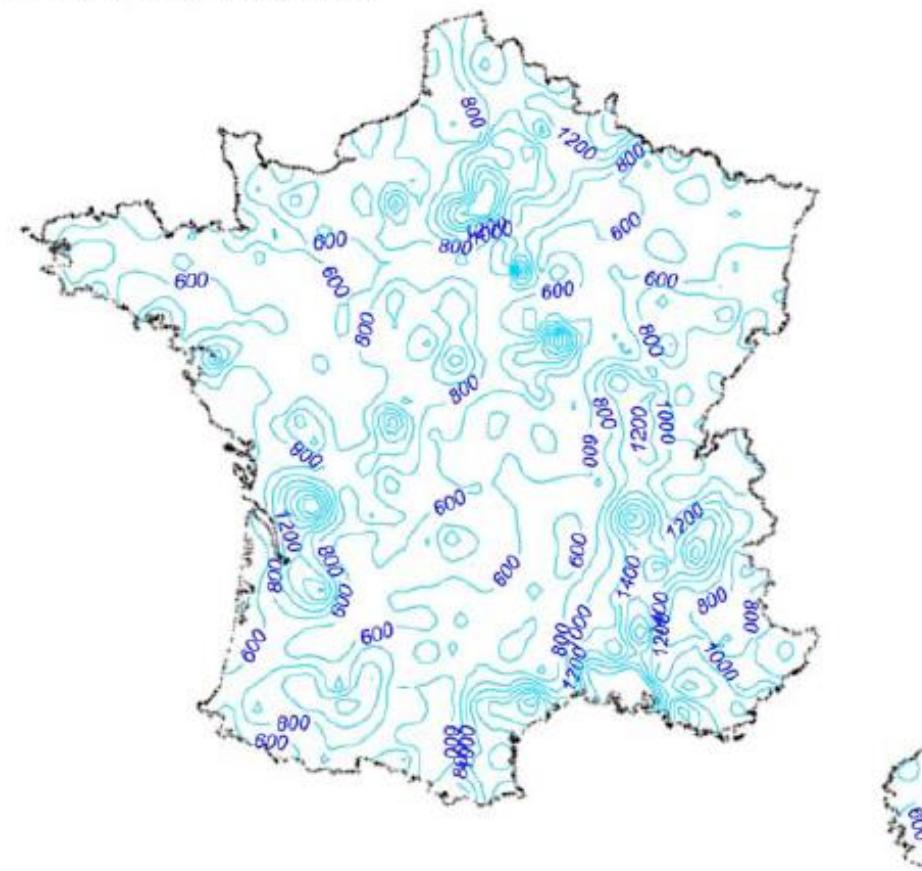


Quantité de Cu (μg) dans les organes du Cabernet-Sauvignon en fonction de la contamination

Retombées atmosphériques

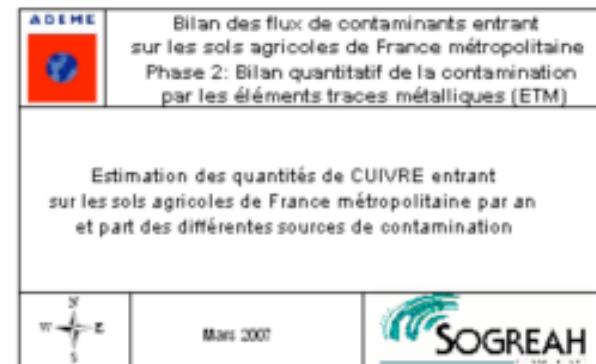
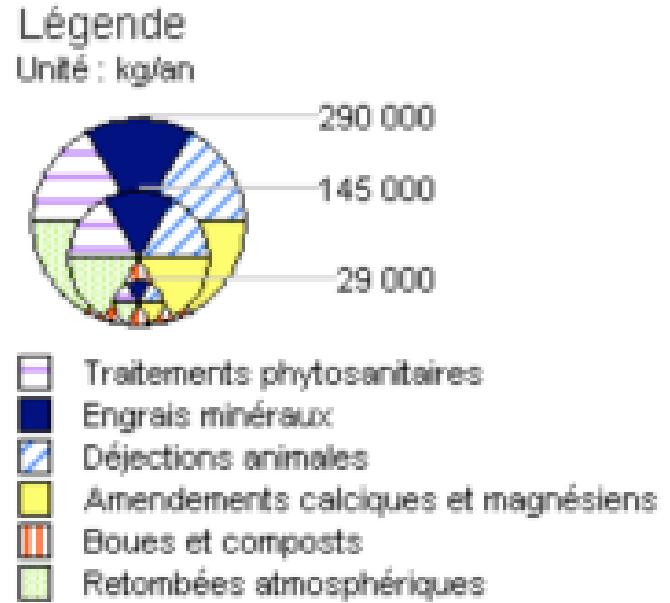
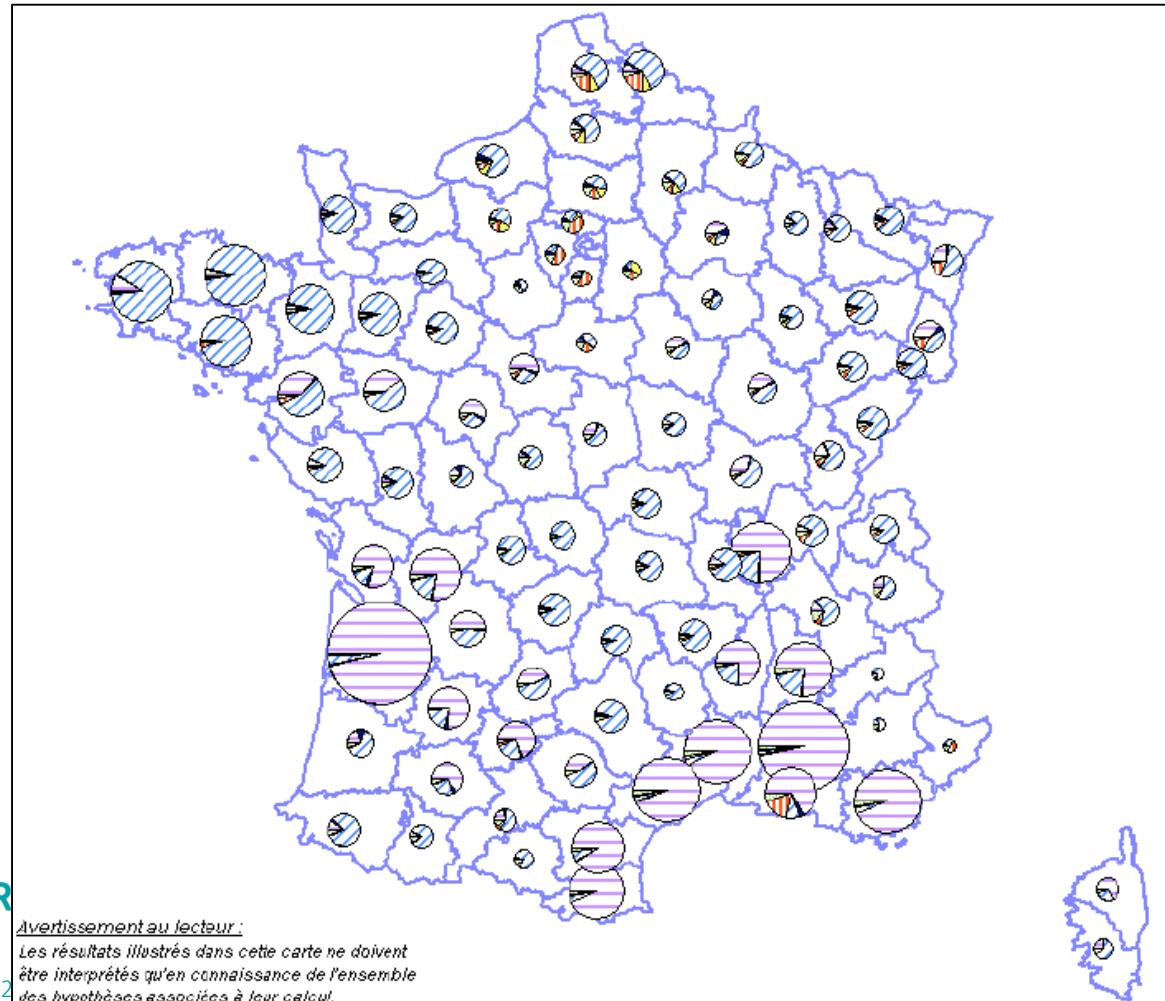
Cuivre

Carte des isovaleurs des flux
de retombées atmosphériques ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$)



Source : Carte obtenue par krigeage à partir des
données du réseau mousse-métaux *, campagne 2000.

Apport de cuivre suivant les sources dans les départements français



Remonter le temps pour connaître l'âge viticole des parcelles

2019



1970



1975



<https://www.geoportail.gouv.fr/>
<https://remonterletemps.ign.fr/>

Remonter le temps pour connaître l'âge viticole des parcelles

1970



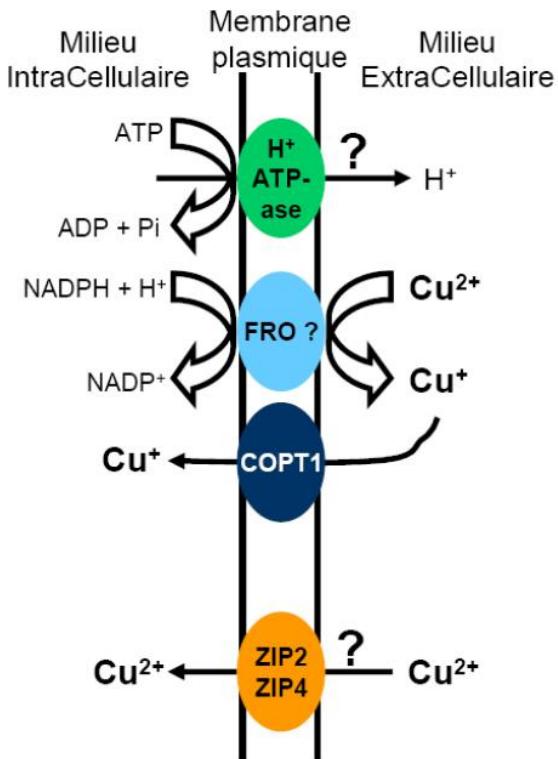
1975



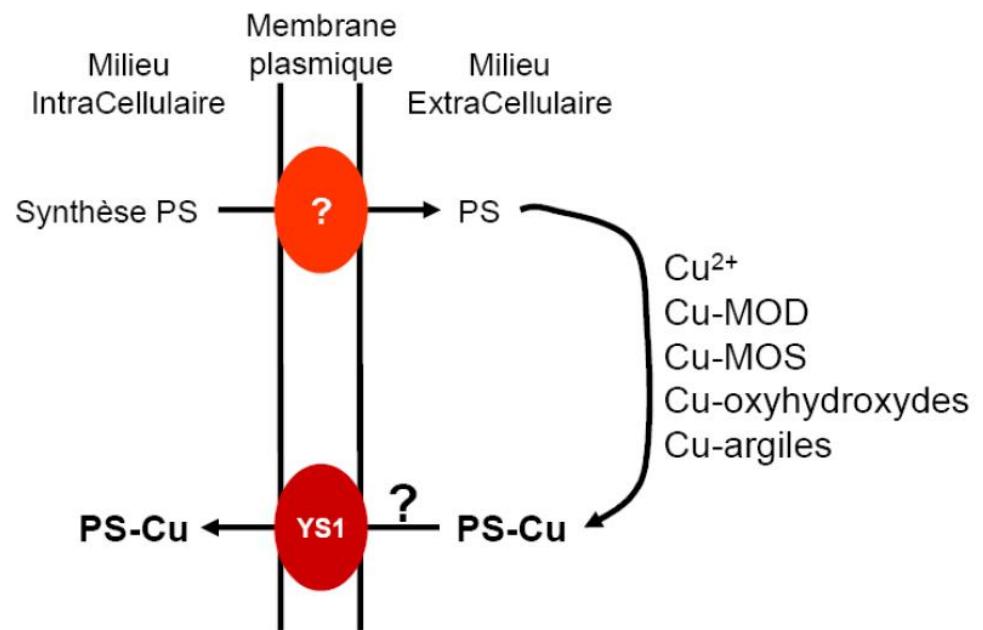
1981



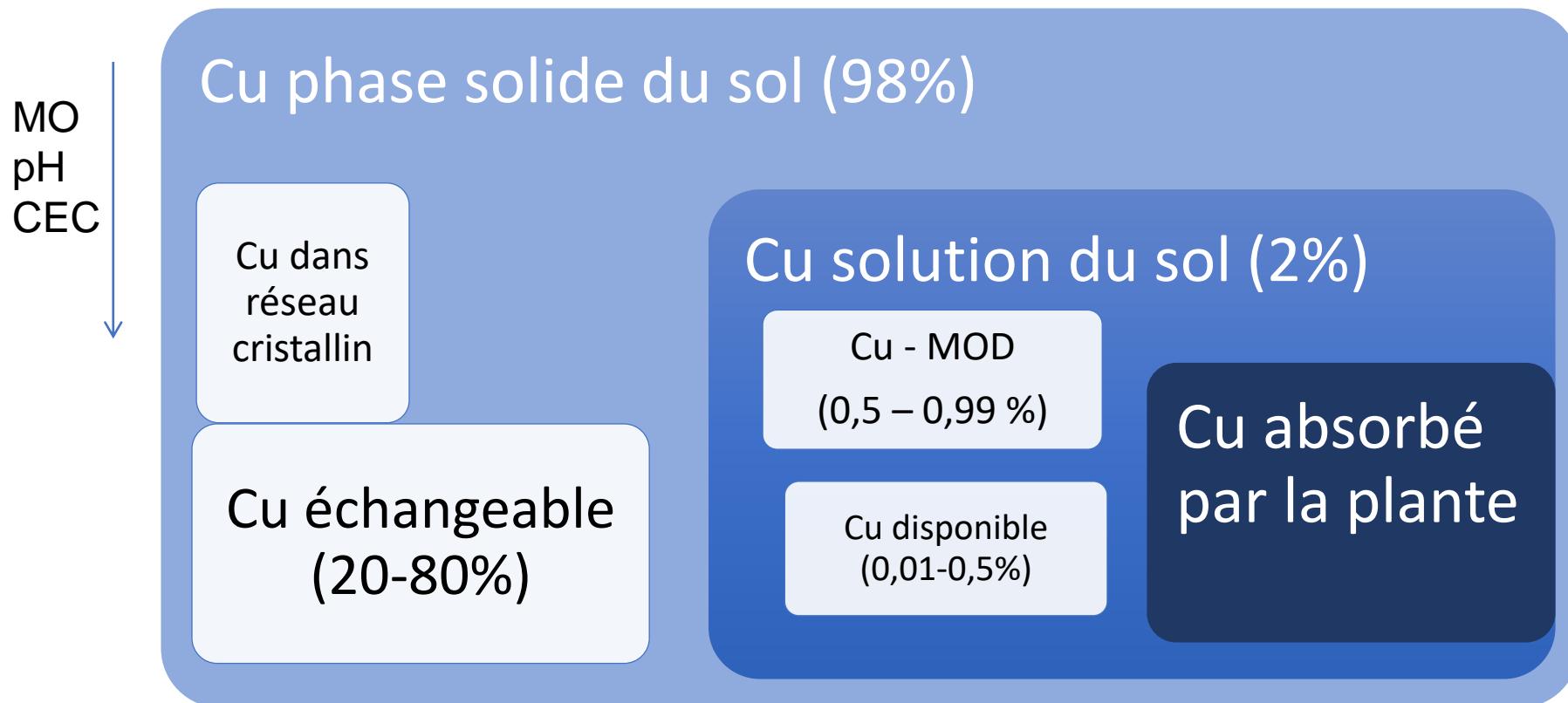
a.



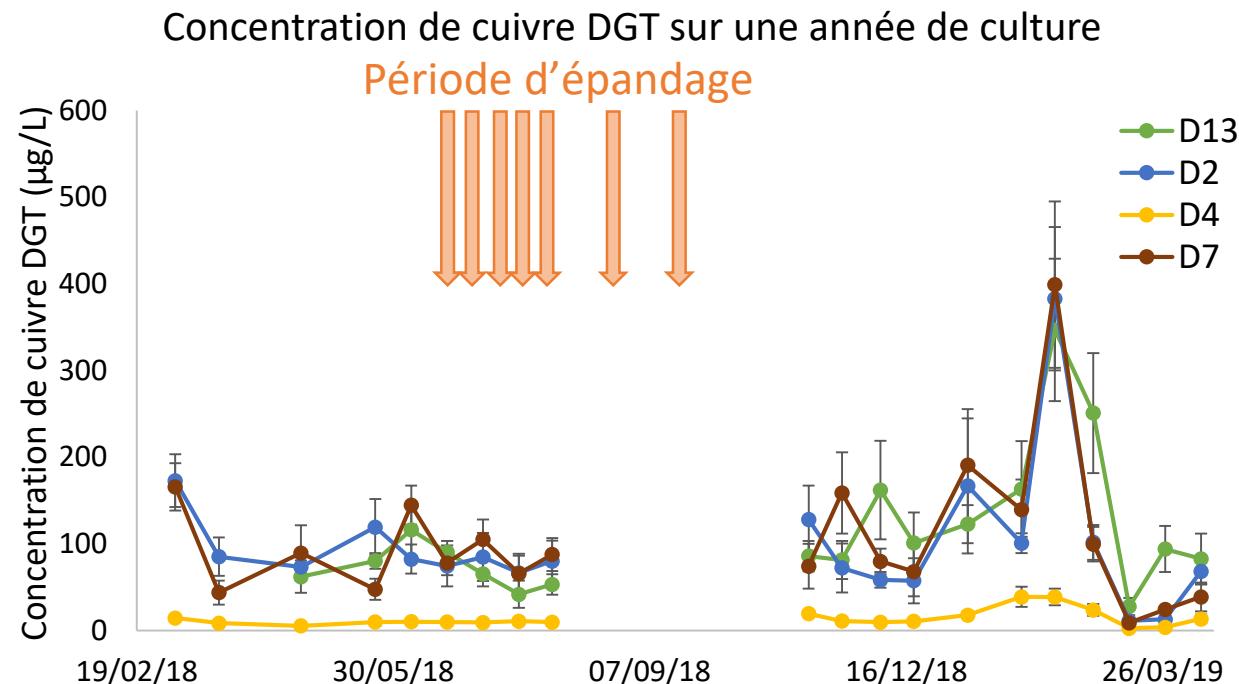
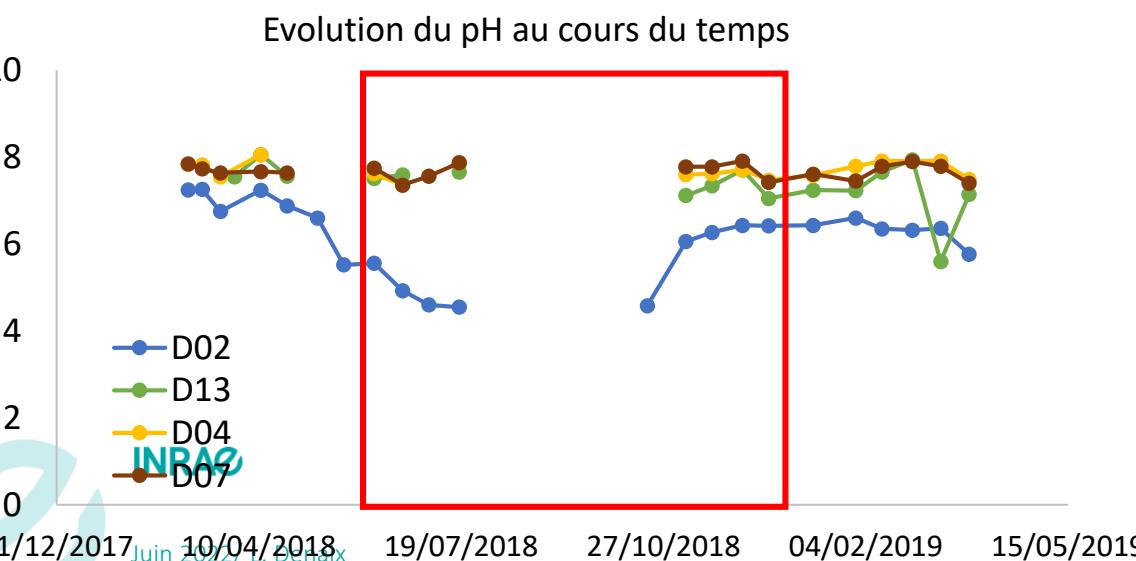
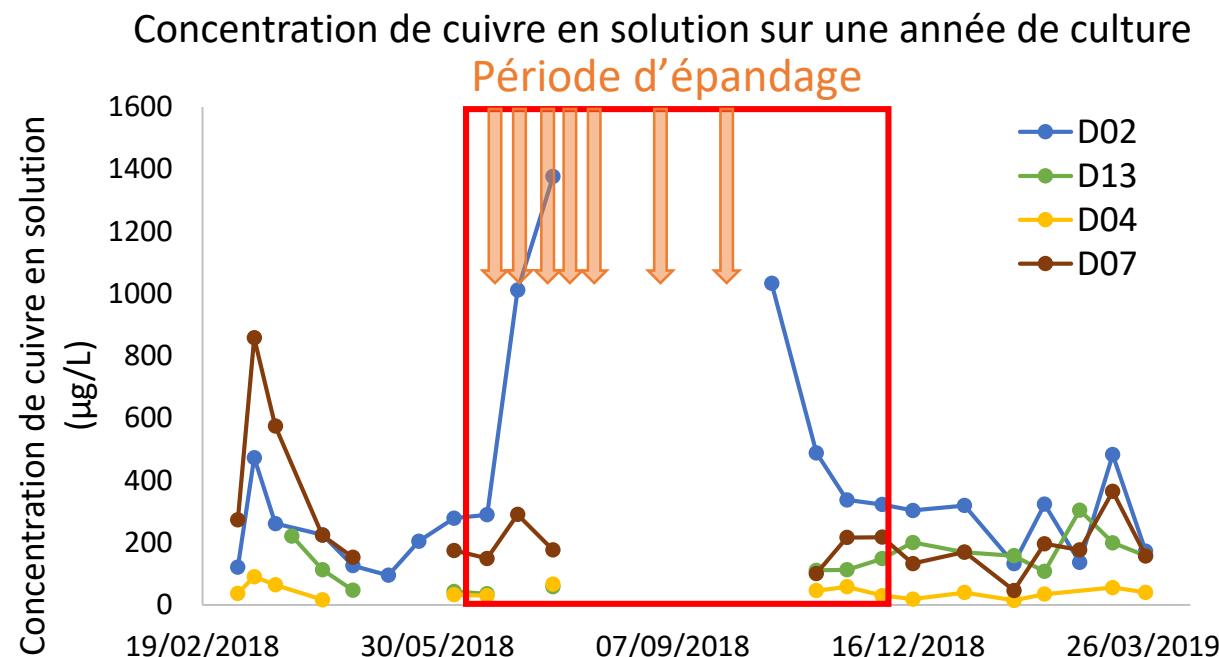
b.



Répartition du cuivre dans les sols



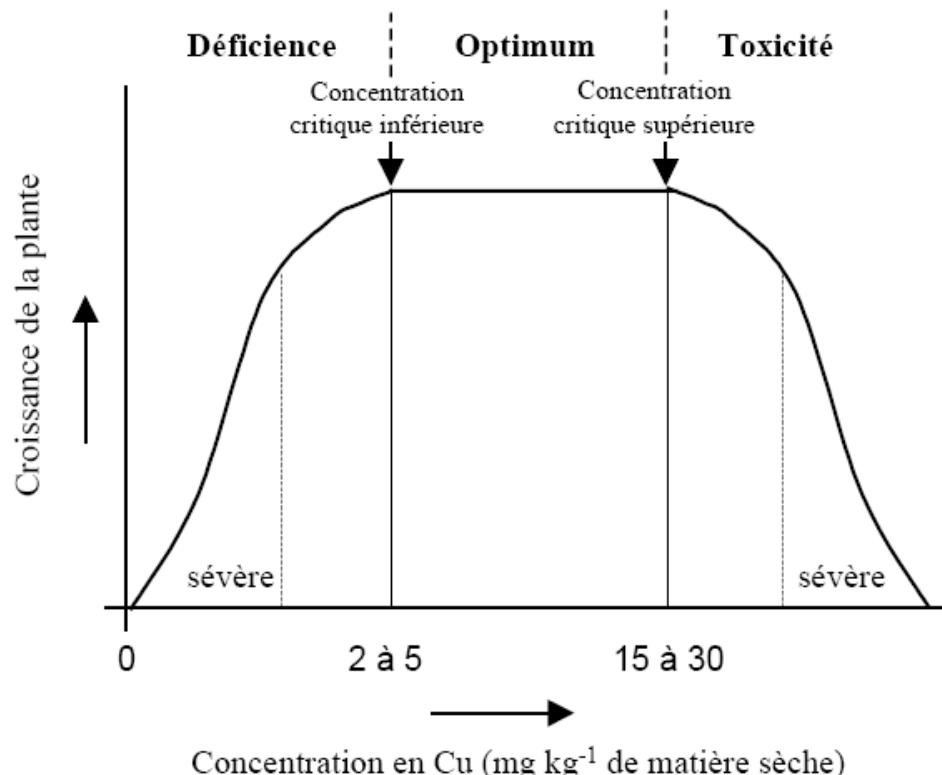
Impact de l'épandage sur la concentration de cuivre en solution



⇒ Impact de l'épandage pour la parcelle la plus acide du fait d'un faible pouvoir tampon du sol

⇒ Stabilité du cuivre DGT pendant la période d'épandage

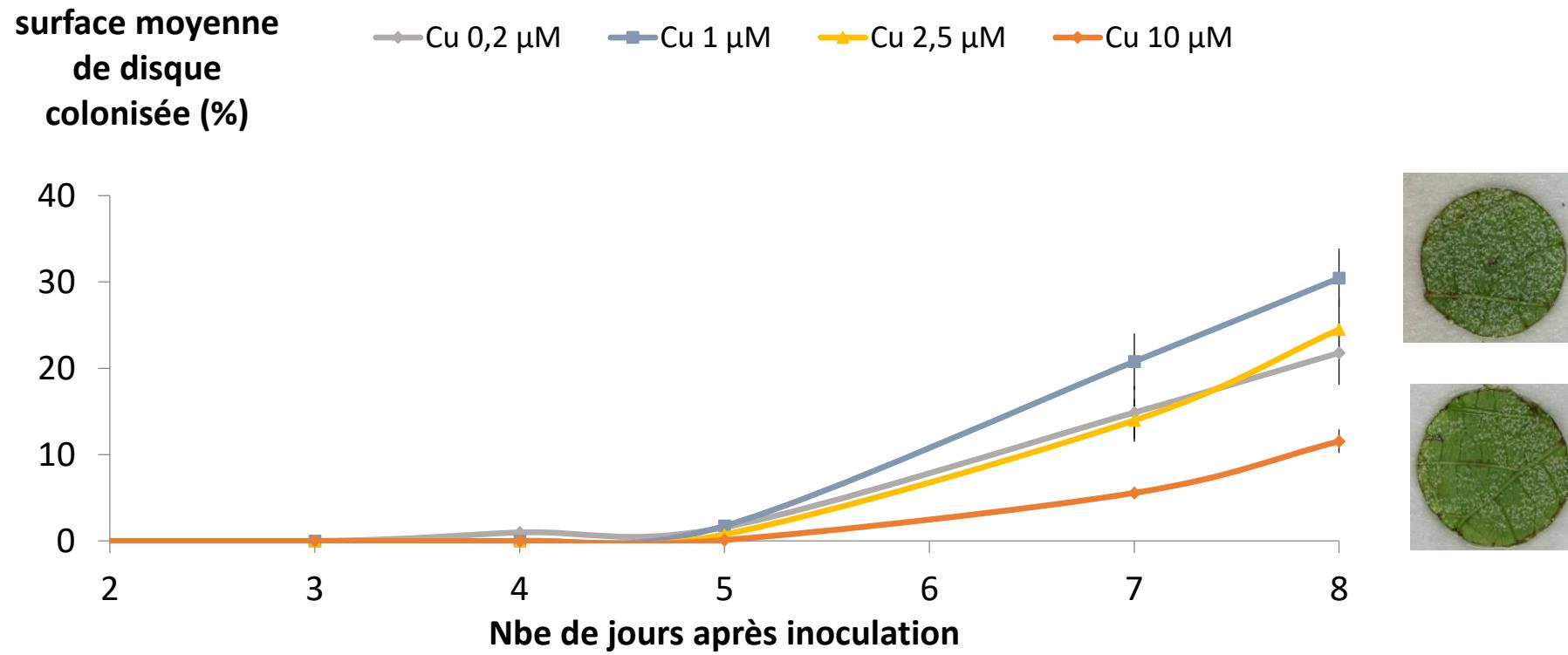
Nécessité du Cuivre = oligo-élément



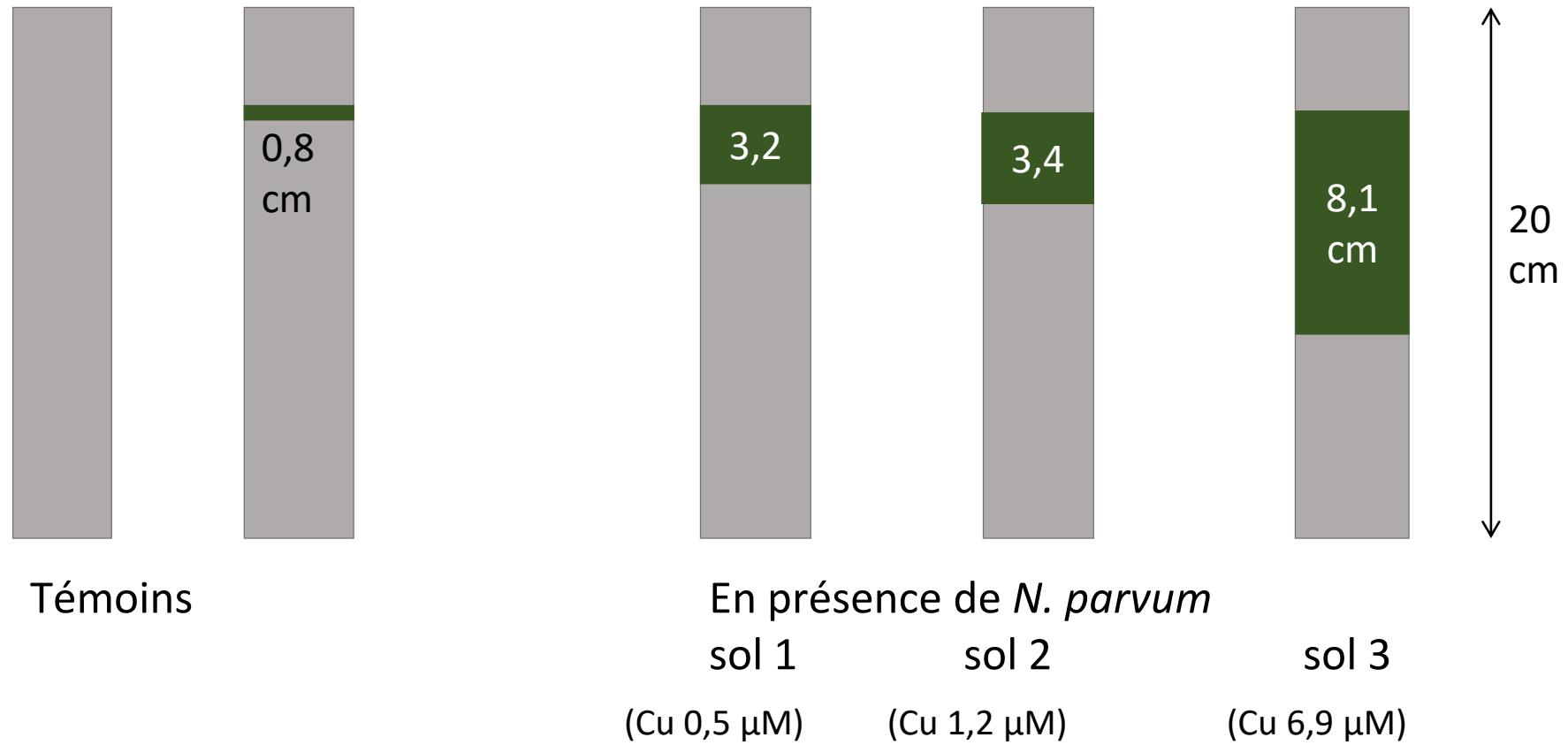
(Source: Reuter et Robinson, 1997)

- Photosynthèse
- Respiration mitochondriale
- Cofacteurs d'enzymes
- Synthèse de lignine
- Détoxification de radicaux superoxydés
- Mécanismes de résistance aux maladies
- Contrôle hydrique

Effet sur la croissance mycélienne de *P. viticola* sur Merlot



Effet sur la taille des nécroses (cm)



↗ exposition Cu, la taille des nécroses ↗

La phytotoxicité dépend de la teneur en MO et du pH des sols

