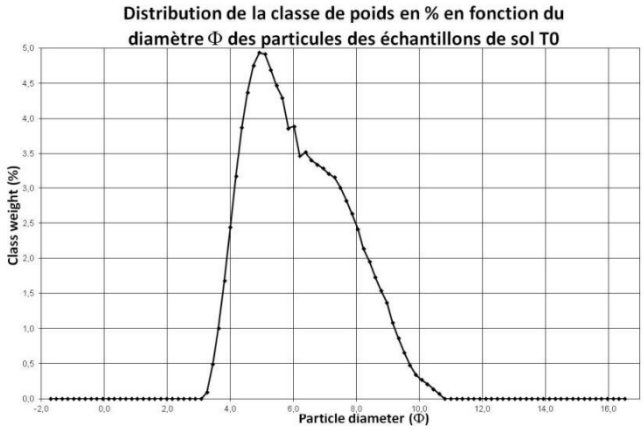
Synthèse des résultats du projet HOL INCLUSIVE

Le projet HOL INCLUSIVE, consacré à l'étude de l'impact des pratiques agricoles sur la vigne et son environnement, vise à comprendre les interactions entre le sol, les métaux et la matière organique (MO). Les analyses portent notamment sur la dynamique des métaux lourds comme le cuivre (Cu) et leur relation avec la MO. Cette étude adopte une approche globale, combinant des analyses chimiques, granulométriques et spectrales+.

Caractérisation des sols : Propriétés physiques et chimiques

L'analyse granulométrique révèle que les sols étudiés appartiennent à la classe des limons, caractérisés par une proportion significative de particules fines (<63 µm). Ces particules influencent la rétention d'eau et jouent un rôle important dans la fixation des métaux et de la MO. La texture limoneuse des sols est confirmée par des diagrammes granulométriques obtenus à partir des mesures laser. Les particules les plus fines (<63 µm) concentrent notamment la matière organique et les métaux, et sont donc privilégiées pour les analyses.



Courbe de distribution de la classe de poids en % en fonction du diamètre des particules des échantillons de sol T0

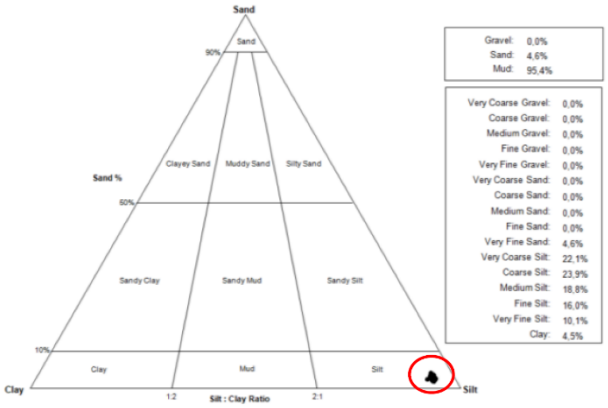


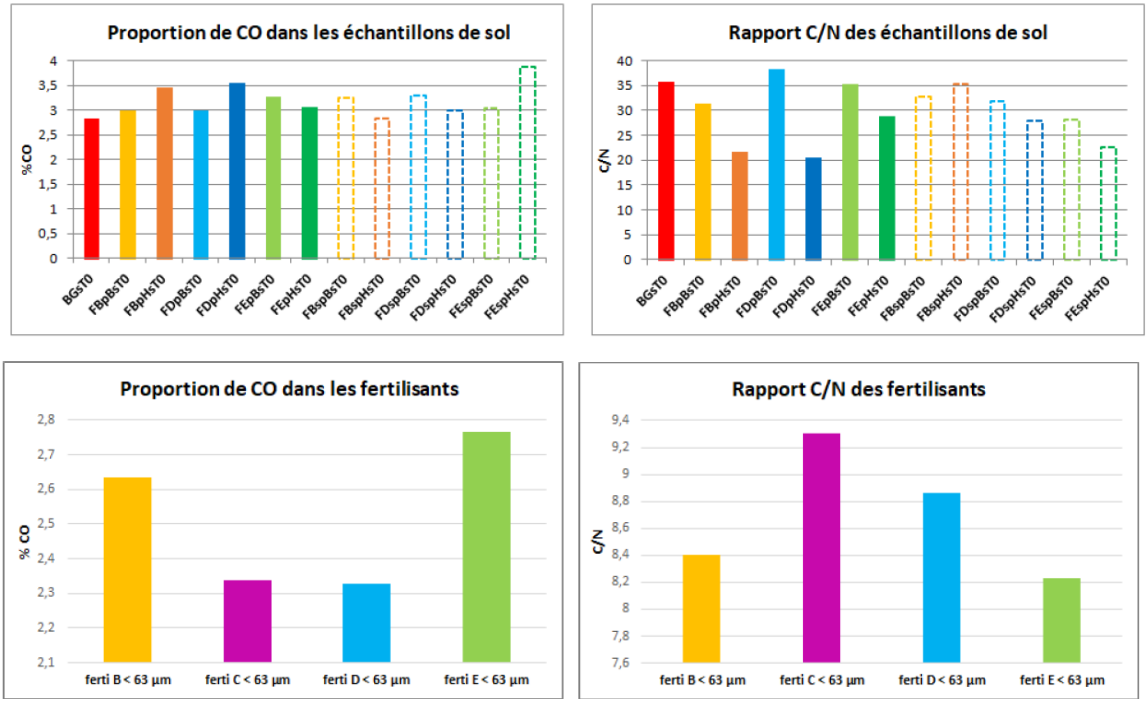
Diagramme de texture des échantillons de sol T0

Sur le plan visuel, les sols se distinguent par une couleur marron foncé, associée à une richesse en MO. Ces observations ont été réalisées à l'aide de la charte de Munsell, une référence dans l'étude des sols. Quant aux fertilisants utilisés (modalités B, D, E), leur teinte noire témoigne d'une composition fortement organique.

Nom échantillon sol/fertilisant	Code référentiel couleur
BGsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FBpBsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FBspBsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FDpBsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FDspBsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FEpBsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FEspBsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FBpHsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FBspHsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FDpHsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FDspHsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FEpHsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
FEspHsT0	7.5YR 3/4 - Dark brown
ModB	5YR 2.5/1 - Black
ModC	5YR 2.5/1 - Black
ModD	5YR 2.5/1 - Black
ModE	5YR 2.5/1 - Black

Résultats de la nature des échantillons de sol T0 et des fertilisants d'après la charte des couleurs de Munsell

En termes de composition chimique, les sols présentent un rapport carbone/azote (C/N) supérieur à 20, indiquant une lente minéralisation de la MO. Les fertilisants, quant à eux, se répartissent comme suit : les modalités E et B sont riches en carbone organique (CO), tandis que les fertilisants C et D affichent des ratios C/N plus élevés, ce qui ralentit leur dégradation et limite l'apport d'azote aux plantes.

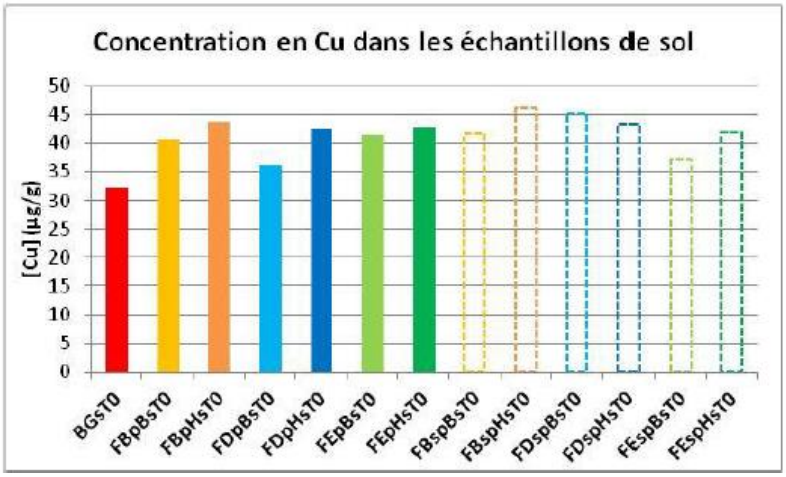


a) **Teneur en CO en % des échantillons de sol T0**
b) **Rapport C/N des échantillons de sol T0**
c) **Teneur en CO en % des fertilisants**
d) **Rapport C/N des fertilisants**

Dynamique des métaux dans les sols et les fertilisants

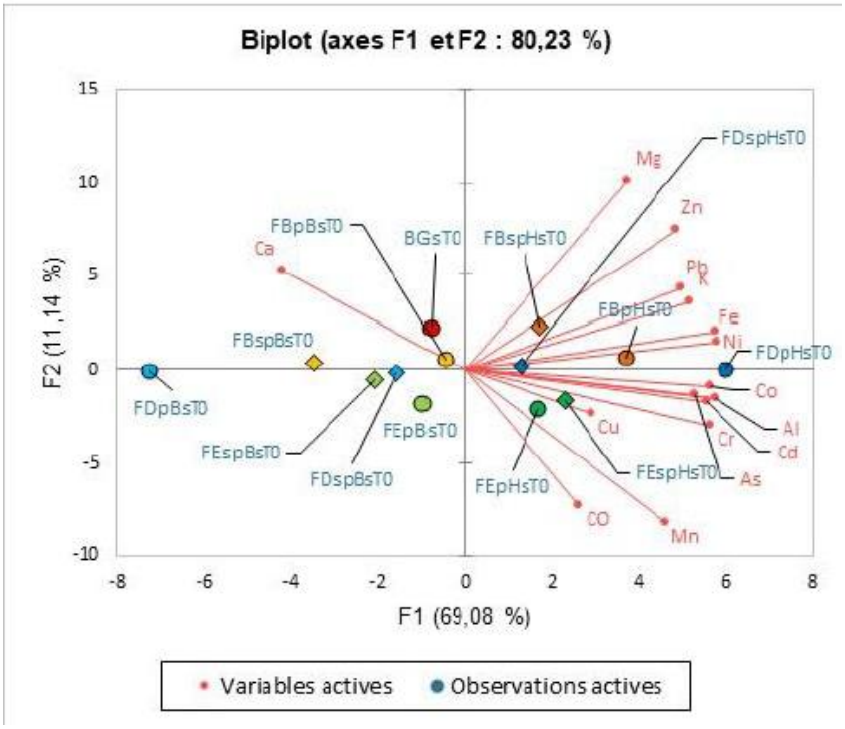
Concentrations métalliques dans le sol brut

Les sols étudiés contiennent divers métaux lourds, notamment cuivre (Cu), magnésium (Mg), aluminium (Al), et d'autres éléments comme le zinc (Zn) et le plomb (Pb). Parmi ces métaux, le cuivre est analysé de manière détaillée en raison de son importance en viticulture. Dans les sols témoins (BGsT0), la concentration minimale en Cu est de 32 µg/g, tandis que dans les parcelles traitées, les concentrations varient entre 36 et 46 µg/g. La répartition du cuivre est homogène dans la parcelle, indépendamment des traitements appliqués ou de la position (haut ou bas de parcelle).



Concentrations en Cu (µg/g) dans les échantillons de sol brut

Pour mieux comprendre la dynamique des métaux dans les sols, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée. Cette ACP montre que certains métaux (Fe, Ni, Co, Al, Cd, As, et Cr) sont fortement corrélés avec la première composante (F1), tandis que le magnésium (Mg), le manganèse (Mn) et le carbone organique (CO) dominent la seconde composante (F2). Certaines stations se distinguent par des concentrations maximales en métaux lourds : par exemple, la station FDpHsT0 présente des teneurs élevées en Al, Fe, Cr, Co, Ni, et Cd.



Biplot des variables et observations pour les échantillons de sol brut

Station	[Métaux]/ %CO max	[Métaux]/ %CO min
BGsT0	Pb	Cu/CO
FBspBsT0	Ca	
FDpBsT0		Mg, Al, Fe, K, Cr, Mn, Co, Ni, As, Cd, Zn, Pb
FBspHsT0	Cu, Mg, Zn	
FDpHsT0	Al, Fe, K, Cr, Co, Ni, As, Cd	Ca
FEpHsT0	Mn	
FEspHsT0	CO	

Résumé des teneurs max et min (ETM et %CO) dans les échantillons de sol brut

Extraction et mobilité du cuivre dans les sols

Différentes méthodes d'extraction (eau, acide acétique et EDTA) ont permis de mesurer la mobilité du Cu dans les sols. Les résultats montrent que le rendement d'extraction est significativement plus élevé avec l'EDTA (23 à 39 %) qu'avec l'eau (0 à 10 %) ou l'acide acétique (0,09 à 0,22 %). Les concentrations de Cu extraites par l'EDTA sont jusqu'à 70 fois supérieures à celles obtenues avec l'eau et jusqu'à 400 fois plus élevées qu'avec l'acide acétique.

Station	[Métaux] max	[Métaux] min	Station	[Métaux] max	[Métaux] min	Station	[Métaux] max	[Métaux] min
BGsT0 eau	Zn, Pb	As	BGsT0 acide acétique	Cr, Pb	Mn, As	BGsT0 EDTA		Cu, Al, Fe, Mn, Ni, As
FBpBsT0 eau		Cu, Mg, K, Co, Ni	FBpBsT0 acide acétique		K	FBpBsT0 EDTA		Ca, Co
FBspBsT0 eau		Ca, Cr, Cd, Zn	FBspBsT0 acide acétique	Fe, Zn	Al, Ni, Cd	FBspBsT0 EDTA		Cr, Cd
FDpBsT0 eau	Cu, As		FDpBsT0 acide acétique	Cu, Ca, As		FDpBsT0 EDTA		Pb
						FDspBsT0 EDTA	Cu, Ca, Mn, Co	
			FEpBsT0 acide acétique	Mg	Co			
FEspBsT0 eau	Al, Cr, Co, Ni							
						FBpHsT0 EDTA	Al, Fe, Cr	
						FBspHsT0 EDTA	As	
FDpHsT0 eau	Fe		FDpHsT0 acide acétique	Cd	Cu, Ca, Mg, Fe, Cr	FDpHsT0 EDTA	Ni, Cd, Zn, Pb	Mg
FDspHsT0 eau	Mn					FDspHsT0 EDTA		Cr
FEpHsT0 eau	Cd		FEpHsT0 acide acétique	Al, Ni	Zn, Pb	FEpHsT0 EDTA		K, Zn
FEspHsT0 eau	Ca, Mg, K	Al, Fe, Mn, Cd, Pb	FEspHsT0 acide acétique	K, Mn, Co	Cr	FEspHsT0 EDTA	Mg, K	

Résumé des teneurs max et min (ETM) dans les différents lixiviats de sol brut

provenant de certaines stations (par exemple FDspBs), ce qui met en évidence la variabilité spatiale de la disponibilité du cuivre dans la parcelle.

Concentrations métalliques dans les fertilisants bruts

Les fertilisants analysés montrent également une large gamme de concentrations en Cu, variant de 29 µg/g pour le fertilisant D à 43 µg/g pour le fertilisant C. Les fertilisants B et E affichent des teneurs intermédiaires d'environ 35 µg/g. L'analyse ACP des fertilisants révèle que le Cu est fortement corrélé avec plusieurs autres métaux tels que l'Al, le Fe, le Cr, le Co, et le Zn. Cette corrélation indique une composition homogène en termes de métaux lourds dans ces fertilisants, en lien avec leur teneur en MO.

Station	[Métaux]/CO max	[Métaux]/CO min
ferti B < 63 µm	Cd	Ca, Mg, Mn
ferti D < 63 µm		Cu, Al, Fe, Co, As, Cd, Zn, Pb/CO
ferti E < 63 µm	CO	K, Cr, Cd
ferti C < 63 µm	Cu, Ca, Mg, Al, Fe, K, Cr, Mn, Co, As, Zn, Pb	

Résumé des teneurs max et min (ETM et %CO) dans les fertilisants bruts

La granulométrie influence également la répartition des métaux. Les fractions grossières (> 2 mm) montrent une meilleure capacité à piéger le cuivre, réduisant sa mobilité potentielle.

Comme pour les sols, l'EDTA est le solvant le plus efficace pour extraire le cuivre des fertilisants, avec des rendements variant de 47 à 73 %. En comparaison, les rendements d'extraction sont beaucoup plus faibles avec l'eau (1,9 à 3,2 %) et l'acide acétique (1,9 à 2,2 %). Les fertilisants bruts présentent une tendance similaire à celle des sols, avec des concentrations de Cu extraites à l'EDTA jusqu'à 60 fois plus élevées que celles obtenues avec l'eau.
L'ACP des fertilisants montre que les fractions grossières (> 2 mm) présentent une rétention plus élevée du Cu, en particulier dans les échantillons analysés avec l'acide acétique et l'eau. Cette rétention accrue réduit la mobilité immédiate du cuivre, le rendant moins disponible pour les processus lixiviants ou les plantes.

Station	[Métaux] max	[Métaux] min
ferti D > 2 mm eau		Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Co, Cd, Zn, Pb
ferti E > 2 mm eau	Cu, Fe, Co, Ni, Cd, Zn	Cr, As
ferti B < 63 µm eau	Ca, Mg	Cu
ferti D < 63 µm eau		Ni
ferti E < 63 µm eau	Cr, As	
ferti C < 63 µm eau	Al, Mn, Pb	
ferti B > 2 mm CH3COOH	Ni	Fe, Mn
ferti D > 2 mm CH3COOH		Ca, Mg, Al, Cr, Co, As, Cd, Zn, Pb
ferti E > 2 mm CH3COOH	Cu	
ferti B < 63 µm CH3COOH		Cu, Ni
ferti D < 63 µm CH3COOH	Mg, Al, Fe, Mn, Cd, Zn	
ferti E < 63 µm CH3COOH	Ca, As, Pb	
ferti C < 63 µm CH3COOH	Cr, Co	
ferti D > 2 mm EDTA		Al, Fe, Co
ferti E > 2 mm EDTA		Cu, Ca, Mg, Cr, Mn, Ni, As, Cd, Zn, Pb
ferti C > 2 mm EDTA	Cu	
ferti D < 63 µm EDTA	Cr, As	
ferti C < 63 µm EDTA	Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Co, Ni, Cd, Zn, Pb	

Résumé des teneurs max et min (ETM) dans les différents lixiviats des fertilisants bruts

Fractionnement et répartition des métaux dans la matière organique

Les analyses de fractionnement ont permis de distinguer trois principales catégories de MO dans les sols : les acides fulviques (AF), les acides humiques (AH) et les humines (HU). Les AF, solubles à tous les pH, sont de couleur marron clair et constituent la fraction la plus mobile. Les AH, solubles en milieu basique mais précipitant à pH acide, affichent une teinte brun foncé à noire. Enfin, les HU, insolubles, forment la fraction la plus stable et la plus résistante aux processus de dégradation.

Dans les sols, la majorité des métaux lourds, notamment le Cu, se concentre dans les fractions AH et HU, limitant ainsi leur mobilité et leur biodisponibilité. À l'inverse, les AF contiennent les métaux les plus mobiles, contribuant à leur disponibilité pour les plantes. Une dynamique similaire est observée dans les fertilisants, bien que leurs teneurs globales en Cu soient supérieures.

Station	[Métaux]/IF(C) max	[Métaux]/IF(C) min
AF BGsT0	Cr, Co, Ni, As, Cd	Cu, Ca/C2
AF FDpBsT0	Cu	C1
AF FDspBsT0		Al
AF FEpBsT0		Co, Ni
AF FEspBsT0		Cr, As, Cd, Pb/C3
AF FBpHsT0		Mg, Fe, Mn
AF FBspHsT0	K, Pb	
AF FEpHsT0	Al	K
AF FEspHsT0	Ca, Mg, Fe, Mn/C1, C2, C3	

Composants fluorescents dans la matière organique des sols et fertilisants

Les composants fluorescents de la matière organique des sols et fertilisants ont été étudiés pour comprendre leur composition chimique et leur interaction avec les métaux. Ces analyses se basent sur les spectres obtenus par traitement PARAFAC et les concentrations en métaux lourds.

Extraits de sol

Dans les extraits de sol, trois composants fluorescents principaux (C1, C2, et C3) ont été identifiés. Les composants C1 et C3 sont présents dans toutes les fractions de la matière organique (MO) : WEOM (substances humiques extraites à l'eau), SH (substances humiques), AF (acides fulviques), et AH (acides humiques). En revanche, le composant C2 est limité aux fractions WEOM et AF, ce qui suggère une spécificité liée à des composés plus mobiles.

L'intensité de fluorescence varie selon les stations et les fractions étudiées. Les stations sans paillage présentent des intensités plus élevées que celles avec paillage. L'analyse en composantes principales (ACP) révèle une forte corrélation entre les composants fluorescents (C1-C3) et certains métaux comme le Mn, Al, Fe, et Pb. Toutefois, le cuivre (Cu) montre peu de corrélation avec ces composants, mais est fortement associé au métalloïde As.

Les concentrations en Cu varient selon les fractions :

- **WEOM** : Les concentrations sont stables, sauf pour la station FEpHsT0 qui présente des valeurs minimales (~3 µg/L).
- **SH** : Le Cu varie entre 632 et 1376 µg/L, atteignant des concentrations maximales dans le sol témoin.
- **AF** : Les concentrations en Cu oscillent entre 212 et 483 µg/L, avec des maxima observés à la station FDpBs.
- **AH** : Les valeurs de Cu vont de 73 à 172 µg/L, la station FEspHs présentant les concentrations les plus élevées.

Extraits de fertilisants

Les spectres des fertilisants montrent que le composant C1 est présent dans toutes les fractions, tandis que le C2 est absent dans les fractions AH et que le C3 est absent des SH extraites à l'eau. Les analyses révèlent des intensités de fluorescence maximales dans les SH et minimales dans les AH.

Les concentrations en Cu extraites des fertilisants varient selon leur granulométrie :

- Les fractions grossières (>2 mm) retiennent davantage le Cu, comme le fertilisant E >2 mm avec 45 µg/L dans les WEOM.
- Les fractions fines (<63 µm) montrent des concentrations moyennes en Cu plus élevées, avec des valeurs maximales dans les SH (223 à 603 µg/L).

L'ACP des fertilisants met en évidence une corrélation entre le Cu et d'autres métaux comme le Fe, As, Ni, et Zn, mais peu de corrélation avec les composants fluorescents. Les rendements d'extraction du Cu révèlent une plus grande rétention dans les fractions fines et grossières, ce qui pourrait limiter sa mobilité.

Conclusions et perspectives

Dans cette étude, des échantillons de sols et de fertilisants issus du domaine viticole de Calce ont été analysés afin de caractériser leurs teneurs en éléments traces métalliques (ETM), avec une attention particulière portée au cuivre (Cu). Les différentes fractions de matière organique (MO) des sols ont été étudiées pour déterminer à la fois leurs teneurs en ETM et leur répartition avant l'épandage des fertilisants. Cette double approche a permis de fournir non seulement des concentrations totales en ETM, mais également une vue d'ensemble de leur distribution au sein des fractions de la MO et de leur interaction avec les fluorophores identifiés. Ces résultats offrent une meilleure compréhension des dynamiques métalliques et de leur relation avec la MO dans les sols viticoles.

À l'avenir, une analyse approfondie des fertilisants, incluant leur comportement vis-à-vis des ETM et leur impact sur la biodisponibilité des métaux, serait essentielle pour affiner la gestion des sols et optimiser les pratiques culturales. Une telle perspective permettrait de mieux évaluer les risques environnementaux et de concevoir des stratégies durables pour une viticulture responsable.