

Résumé

La présente thèse de doctorat évalue les effets synergétiques des stress hydrique (sécheresse, inondation et alternance sécheresse-inondation), thermique, et métallique sur le fonctionnement du système sol-plante en utilisant la luzerne (*Medicago sativa* L.) comme bioindicateur.

Le travail expérimental s'articule autour de quatre grands principaux volets. Le premier analyse les effets des différents scénarios de stress hydriques (sécheresse, inondation, alternance) sur les paramètres agronomiques chez la plante, l'accumulation de Pb, Zn, Cd, et Cu dans les feuilles et les racines, ainsi que sur les biomarqueurs de stress oxydatif (Teneur en Malondialdéhyde (MDA), activités enzymatiques de la Catalase (CAT) et du Glutathion-S-transférase (GST)). Le second volet évalue les modifications induites par ces stress sur les propriétés physico chimiques, la spéciation des éléments traces métalliques (Pb, Zn, Cd, Cu) et le fonctionnement biologique du sol, à travers l'analyse des activités enzymatiques et de la diversité microbienne. Les résultats montrent que le stress hydrique et la contamination affectent la croissance chez la luzerne. Dans les sols moyennement contaminés, la hauteur de la partie aérienne atteint 29,52 cm sous alternance sécheresse-inondation. Dans les sols faiblement contaminés, le stress oxydatif s'accroît, avec une activité GST de 0,22 $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ après 6 jours de sécheresse et une hausse du MDA dans les racines sous inondation. Les stress hydriques ont profondément modifié l'activité biologique du sol, en réduisant la biomasse microbienne sous alternance sécheresse-inondation (de 8,1 à 6,28 $\mu\text{g C/g}$ en sols moyennement contaminés). De manière générale, les stress hydriques modifient profondément la répartition des ETMs dans le sol. Ainsi, la sécheresse augmente significativement le Pb sous forme résiduelle, passant de 21,7% à 72% dans les sols faiblement contaminés. Cependant, l'inondation favorise l'augmentation des fractions plus mobiles du Zn et du Cd dans les sols moyennement contaminés.

Le troisième volet s'intéresse aux effets du stress thermique, en particulier des températures de 27°C et 29°C, correspondant respectivement à une augmentation modérée (+2°C) et forte (+4°C) par rapport au témoin (25°C) sur les paramètres agronomiques, physiologiques, et biochimique, ainsi que sur l'accumulation de Pb, Zn, Cd, et Cu dans les feuilles et les racines. Le quatrième volet étudie les effets de ces stress thermiques sur la modification des propriétés physico chimiques, la spéciation des éléments traces métalliques, et les activités biologiques des sols agricoles contaminés. L'augmentation de la température accroît la mobilité des ETMs dans le sol, accroît leur accumulation dans les plantes et intensifie le stress physiologique, tout en réduisant l'activité microbienne. Dans les sols moyennement contaminés, le plomb dans les racines passe de 259 ppm à 1055 ppm à 29°C, et le zinc atteint 132 ppm. La croissance diminue et le stress oxydatif augmente, avec un MDA de 74,6 nmol/g MF dans les feuilles à 29°C dans les sols moyennement contaminés. Dans les sols moyennement contaminés, le pH diminue jusqu'à 7,87, augmentant la fraction résiduelle du plomb. Parallèlement, la biomasse microbienne baisse de 17,6 à 5,2 mg C/g dans les sols faiblement contaminés.

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le fonctionnement du système sol-plante dans un contexte de changement climatique et montrent l'importance d'une approche intégrée pour évaluer la résilience des sols contaminés et l'adaptation des plantes.

Mots clés : Stress hydrique, stress thermique, *Medicago sativa*, spéciation des ETMs, stress oxydatif, activités enzymatiques du sol, biomasse microbienne

Abstract

This thesis studied the synergistic effects of water stress (drought, flooding, and drought-flood cycles), heat stress, and metal stress on the functioning of the soil-plant system using alfalfa (*Medicago sativa* L.) as a bioindicator.

The experimental work is structured around four main components. The first analyzes the effects of different water stress scenarios (drought, flooding, and drought-flood cycles) on agronomic parameters in the plant, the accumulation of Pb, Zn, Cd, and Cu in the shoots and roots, as well as on biomarkers of oxidative stress (malondialdehyde (MDA) content, and the enzymatic activities of catalase (CAT) and glutathione-S-transferase (GST)). The second part of the study assesses the changes induced by these stresses on the physicochemical properties, speciation of trace metals (Pb, Zn, Cd, Cu), and biological functioning of the soil, through the analysis of enzymatic activities and microbial diversity. The results show that water stress and contamination affect alfalfa growth. In moderately contaminated soil, the aboveground height reaches 29.52 cm under alternating drought and flooding conditions. In low contaminated soil, oxidative stress is more pronounced, with a GST activity of 0.22 $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ after 6 days of drought and an increase in MDA in the roots under flooding. Water stresses significantly altered soil biological activity, reducing microbial biomass under alternating drought and flooding conditions (from 8.1 to 6.28 $\mu\text{g C}/\text{g}$ in moderately contaminated soil). Our findings highlighted that water stress significantly influences the distribution of trace metals in the soil. For example, drought significantly increases residual lead (Pb), from 21.7% to 72% in low contaminated soil. However, flooding promotes an increase in the more mobile fractions of zinc (Zn) and cadmium (Cd) in moderately contaminated soil.

The third section focuses on the effects of heat stress, particularly temperatures of 27°C and 29°C, corresponding to a moderate (+2°C) and strong (+4°C) increase, respectively, compared to the control (25°C), on agronomic, physiological, and biochemical parameters, as well as on the accumulation of lead, zinc, cadmium, and copper in shoots and roots. The fourth section investigates the effects of high temperatures on the modification of physicochemical properties, the speciation of trace metals, and the biological activities of contaminated agricultural soils. Rising temperatures increase the mobility of trace metals in the soil, enhance their accumulation in plants, and intensify physiological stress, while simultaneously reducing microbial activity. In moderately contaminated soil, lead levels in roots rise from 259 ppm to 1055 ppm at 29°C, and zinc levels reach 132 ppm. Growth decreases and oxidative stress increases, with a lead-to-discharge ratio (MDA) of 74.6 nmol/g MF in leaves at 29°C in moderately contaminated soil. In this soil, pH decreases to 7.87, increasing the residual fraction of lead. In low contaminated soil, our data showed that microbial biomass drops from 17.6 to 5.2 mg C/g.

These results provide a better understanding of soil-plant systems functioning in the context of climate change and highlight the importance of an integrated approach to assessing the resilience of contaminated soils and plant adaptation.

Keywords: Water stress, heat stress, heavy metal speciation, *Medicago sativa*, oxidative stress, soil enzymatic activities, microbial biomass