



Allocation des ressources aux différents organes le long de gradients de pollution chez les espèces végétales : une réponse allocative optimale ?

Le fonctionnement des communautés végétales est très contrasté entre des milieux productifs et fertiles, et des milieux stressants et peu productifs¹⁻³. Il est attendu que la productivité végétale baisse en cas d'exposition à des polluants pour plusieurs raisons. D'abord, l'exposition des plantes à divers polluants présents dans les sols peut impacter le développement et le fonctionnement du système racinaire⁴. De manière indirecte, la pollution du sol module la composition et le fonctionnement des communautés microbiennes, ce qui pourrait réduire le recyclage des nutriments et la fertilité du milieu⁵. Enfin, des plantes adaptées et moins impactées par l'exposition à un polluant ont des mécanismes physiologiques particuliers (transport, stockage et détoxification des polluants). Cette adaptation a un coût en ressources et énergie, coût qui pourrait impliquer une diminution de la croissance⁶. Les similitudes possibles entre les réponses attendues en cas de baisse de la productivité, et en cas d'exposition à des polluants, offrent un point de départ intéressant pour placer les systèmes pollués dans un cadre d'écologie plus général.

Le long d'un gradient de productivité, au niveau intra-spécifique, l'*Optimal Partitioning Theory* (OPT)^{7,8} indique que les ressources disponibles sont allouées en priorité aux organes responsables de l'acquisition des ressources les plus limitantes. Un mécanisme bien connu est par exemple la plasticité du *root : shoot ratio* (rapport entre la biomasse racinaire et biomasse aérienne) qui augmente lorsque les ressources du sol (eau ou nutriments) sont les plus limitantes. L'observation d'une possible augmentation de l'allocation des ressources au système racinaire, en lien avec la réduction de l'accès aux ressources du sol, et sur un certains nombres d'espèces modèles, offre une approche expérimentale simple pour identifier des similarités de réponses entre les gradients de pollution et les gradients de productivité classiquement étudiés en écologie.

Des études préliminaires au sein de l'EA 4592 G&E sur une variété sensible d'une dicotylédone (*Phaseolus vulgaris*) confirment une augmentation de l'allocation aux racines sur sol pollués (au cuivre et HAPs) en réponse à une perturbation de l'accès à l'eau et à l'azote. Cette thèse s'inscrit dans la poursuite de ces travaux. L'objectif est de tester pour plusieurs espèces modèles (graminées, dicotylédones, espèces ligneuses), si les réponses allocatives le long de gradients de pollution sont cohérent avec l'OPT et la diminution de l'accès à certaines ressources. Ce cadre conceptuel sera testé en comparant pour chaque espèce les réponses de populations sensibles et de populations tolérantes déjà identifiées. L'hypothèse proposée est double :

- Pour les populations sensibles, il existerait une réponse allocative en faveur du système racinaire, en lien avec la diminution de l'accès aux ressources du sol.
- Pour les populations adaptées, la réponse allocative serait moins nécessaire, car les organes de capture des ressources resteraient fonctionnels. Sur sol non pollué, ces populations adaptées auraient une croissance réduite par rapport aux populations n'ayant pas de mécanismes adaptatifs particuliers.

Le système d'étude proposé est basé essentiellement sur un site contaminé où la pollution au cuivre et aux HAPs a déjà été étudiée^{9,10}. Les espèces végétales cibles comprennent en priorité plusieurs populations d'*Agrostis capillaris* (graminée) et de *Populus nigra* (espèce ligneuse) dont des populations, adaptées ou non aux polluants précités, ont été identifiées. La possibilité d'élargir le système d'étude à des populations métallophytes se développant sur sol calaminaire, et non métallophytes, de *Noccaea caerulescens* et *Silene vulgaris* subsp. *humilis* sera abordée. L'OPT sera testée au regard des hypothèses décrites ci-dessus par :

- La constitution de gradients de pollution par *fading* (mélange en différentes proportions de sols pollués et de sols non pollués prélevés à proximité).
- La culture des populations des différentes espèces en milieu contrôlé sur les sols issus du *fading*.
- La mesure de l'acquisition des ressources par les plantes (eau transpirée, teneurs en nutriments dans les tissus, teneurs en chlorophylle et activité photosynthétique)



- Des mesures complémentaires liées à l'impact des contaminants (ionomes et marqueurs biochimiques)
- L'observation de l'allocation (en biomasse) aux différents organes et des surfaces d'acquisition des ressources correspondantes.

Impacts et retombées sociétales : En Europe, des activités polluantes ont été exercées sur près de 3 millions de sites dont 250 000 nécessiteraient des actions de réhabilitation urgentes ¹¹. L'étude de l'effet de ces polluants sur différentes espèces végétales modèles permet de mieux caractériser leurs impacts sur les plantes exposées, pour identifier et expliciter les stratégies d'adaptation. Celles-ci sont utiles pour mener des projets de réhabilitation utilisant la végétation et microorganismes associés pour diminuer les liens de pollution sur sites aux sols contaminés et rétablir leur fonctionnalité écologique. Cependant, l'effet des contaminants sur les espèces végétales est complexe et peut varier d'un site pollué à l'autre ¹². Cela complique la mise en place des méthodes de réhabilitation, et l'efficacité de certaines phyto-technologies est parfois limitée¹³.

Malgré la complexité de l'effet des polluants, cette thèse contribue à identifier des règles générales applicables à de nombreux systèmes pollués. Si l'adaptation à l'exposition à divers contaminants présente des similarités avec les réponses le long des gradients de productivité, les applications pour la gestion des sites pollués pourraient être nombreuses. En particulier, l'utilisation d'espèces ou d'association d'espèces adaptées aux milieux les moins productifs pourraient être testée sur des sites où la pollution a des impacts importants et où d'autres méthodes de réhabilitation ont échoué.

Encadrement : Cette thèse sera encadrée au sein de l'EA 4592 par Oliver Atteia (Directeur de thèse) et Florian Delerue (Co-directeur de thèse). Une collaboration forte est attendue avec Michel Mench de l'UMR BioGeCo.
Contact : Florian DELERUE ; fdelerue@ensegid.fr; +33 (5) 56 84 69 18

Références :

1. Díaz, S. *et al.* The global spectrum of plant form and function. *Nature* **529**, 167–171 (2016).
2. Brooker, R. W. *et al.* Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *J. Ecol.* **96**, 18–34 (2008).
3. Delerue, F., Gonzalez, M., Achat, D. L., Puzos, L. & Augusto, L. Competition along productivity gradients: news from heathlands. *Oecologia* **187**, 219–231 (2018).
4. Potters, G., Pasternak, T. P., Guisez, Y., Palme, K. J. & Jansen, M. A. K. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* **12**, 98–105 (2007).
5. Kandeler, F., Kampichler, C. & Horak, O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. *Biol. Fertil. Soils* **23**, 299–306 (1996).
6. Maestri, E., Marmiroli, M., Visioli, G. & Marmiroli, N. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environ. Exp. Bot.* **68**, 1–13 (2010).
7. Gedroc, J. J., McConnaughay, K. D. M. & Coleman, J. S. Plasticity in Root/Shoot Partitioning: Optimal, Ontogenetic, or Both? *Funct. Ecol.* **10**, 44–50 (1996).
8. Poorter, H. *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytol.* **193**, 30–50 (2012).
9. Bes, C. M., Mench, M., Aulen, M., Gaste, H. & Taberly, J. Spatial variation of plant communities and shoot Cu concentrations of plant species at a timber treatment site. *Plant Soil* **330**, 267–280 (2010).
10. Jones, S. *et al.* Biochar and compost amendments enhance copper immobilisation and support plant growth in contaminated soils. *J. Environ. Manage.* **171**, 101–112 (2016).
11. Antoni, V. Basol: un panorama des sites et sols pollués, ou potentiellement pollués, nécessitant une action des pouvoirs publics. (2013).
12. Delerue, F., Masfarau, J.-F., Lascourrèges, J.-F. & Atteia, O. A multi-site approach to investigate the role of toxicity and confounding factors on plant bioassay results. *Chemosphere* **219**, 482–492 (2019).
13. Mench, M. *et al.* Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *J. Soils Sediments* **10**, 1039–1070 (2010).



Resource allocation to plant organs along pollution gradients: an optimal allocative response?

Plant community functioning is strongly different between highly fertile and productive environments and highly stressed and low productive environments¹⁻³. Plant productivity is expected to decrease with exposure to pollutants for several reasons. First, plant exposure to soil pollutants can impact the development and functioning of roots⁴. Soil pollution also control the composition and functioning of microbial communities, which could reduce nutrient recycling and thus soil fertility⁵. Finally, adapted plants, less impacted by exposure to pollutants, have particular physiological mechanisms (transport, storage and detoxification of pollutants). These adaptations have a cost in terms of resources and energy, which could imply a decrease of plant growth⁶. The possible similarities between plant response in case of productivity decrease, and in case of exposure to pollutants offer an interesting starting point to place polluted systems in a more general ecological framework.

Along productivity gradients, at the intraspecific level, the *Optimal Partitioning Theory* (OPT)^{7,8} states that available resources are allocated in priority to organs in charge of acquisition of the most limiting resources. For instance, plasticity of the root to shoot ratio between belowground and aboveground biomass has been largely described. It increases when soil resources (water or nutrient) are the most limiting ones. The observation of a possible increase of resource allocation to roots in relation with the decrease of soil resource availability, and on a diversity of model species, offers a simple experimental approach to test similarities of response between pollution gradients and productivity gradients more often studied in ecology.

Preliminary studies in the EA 4592 G&E lab on a sensitive variety of the dicotyledonous *Phaseolus vulagris* confirm an increase of allocation to roots on a copper and PAH polluted soil in relation with a lower access to water and nitrogen. This thesis aims to develop this work further. The objective is to test for several model species (grasses, forbs, woody species), if the allocative responses along pollution gradients are consistent with the OPT and the reduction of resource availability. This conceptual framework will be tested by comparing for each species the responses of already identified sensitive and tolerant populations. Consistently with the OPT, the main thesis hypotheses are as follow:

- For sensitive populations, an allocative response in favor of roots should be detected, in relation with the reduction of access to soil resources.
- For tolerant populations, allocative response should not be necessary because organs implied in resource acquisition should remain functional. In more favorable contexts in unpolluted soils, tolerant populations should have lower growth rate compared to sensitive populations without specific adaptive mechanisms.

The system proposed for this study is based on a contaminated site where copper and PAH pollution is well characterised^{9,10}. The model species include *Agrostis capillaris* (grass) and *Populus nigra* (woody species) from which tolerant and sensitive populations to the above-mentioned pollutants have been identified. The possibility to enlarge the studied system to non-metallophyte populations and metallophyte populations of *Noccaea caerulescens* and *Silene vulgaris subsp. humilis* developing on calaminous soil will be evaluated. The OPT will be tested in regards of the hypotheses described above by:

- The constitution of pollution gradients by fading (mixture in different proportions of polluted soils and unpolluted soils collected nearby).
- The cultivation of individuals from the different species populations in a controlled environment on the soils made by fading.
- Measurement of proxy of resource acquisition by plants (transpired water, nutrient content, chlorophyll content and photosynthetic activity)



- Complementary measures related to the impact of contaminants (ionomes and biochemical markers)
- The observation of the allocation (in biomass) to the different organs and of the corresponding areas for resource acquisition.

Societal impacts: In Europe, polluting activities have been carried out on nearly 3 million sites, 250 000 of them requiring urgent remediation programs¹¹. The study of these pollutants effects on different model plant species makes it possible to better characterize their impacts on exposed plants and to identify and explain strategies of adaptation. These strategies are useful for undertaking rehabilitation programs using corresponding vegetation and microorganisms to reduce on-site pollution and restore their ecological functionality. However, the effect of contaminants on plant species is complex and may vary from one polluted site to another¹². This makes the implementation of rehabilitation methods intricate, and some phytotechnologies efficiency is sometimes limited¹³.

Despite the complexity of the effect of pollutants, this thesis aims to identify general rules applicable to many polluted systems. If adaptation to contaminants exposure has similarities with responses observed along productivity gradients, implications for polluted sites management would be important. In particular, the use of species or species associations adapted to low productive environments could be tested in sites where pollution has significant impacts and other rehabilitation methods failed.

Supervision: This thesis is under the supervision of Oliver Atteia (director) and Florian Delerue (Co-director) in the EA 4592 G&E lab. A strong collaboration is expected with Michel Mench of the UMR BioGeCo lab.

Contact: Florian DELERUE; fdelerue@ensegid.fr; 05 56 84 69 18

References :

1. Díaz, S. *et al.* The global spectrum of plant form and function. *Nature* **529**, 167–171 (2016).
2. Brooker, R. W. *et al.* Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. *J. Ecol.* **96**, 18–34 (2008).
3. Delerue, F., Gonzalez, M., Achat, D. L., Puzos, L. & Augusto, L. Competition along productivity gradients: news from heathlands. *Oecologia* **187**, 219–231 (2018).
4. Potters, G., Pasternak, T. P., Guisez, Y., Palme, K. J. & Jansen, M. A. K. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* **12**, 98–105 (2007).
5. Kandeler, F., Kampichler, C. & Horak, O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. *Biol. Fertil. Soils* **23**, 299–306 (1996).
6. Maestri, E., Marmiroli, M., Visioli, G. & Marmiroli, N. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environ. Exp. Bot.* **68**, 1–13 (2010).
7. Gedroc, J. J., McConnaughay, K. D. M. & Coleman, J. S. Plasticity in Root/Shoot Partitioning: Optimal, Ontogenetic, or Both? *Funct. Ecol.* **10**, 44–50 (1996).
8. Poorter, H. *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytol.* **193**, 30–50 (2012).
9. Bes, C. M., Mench, M., Aulen, M., Gaste, H. & Taberly, J. Spatial variation of plant communities and shoot Cu concentrations of plant species at a timber treatment site. *Plant Soil* **330**, 267–280 (2010).
10. Jones, S. *et al.* Biochar and compost amendments enhance copper immobilisation and support plant growth in contaminated soils. *J. Environ. Manage.* **171**, 101–112 (2016).
11. Antoni, V. Basol: un panorama des sites et sols pollués, ou potentiellement pollués, nécessitant une action des pouvoirs publics. (2013).
12. Delerue, F., Masfarau, J.-F., Lascourrèges, J.-F. & Atteia, O. A multi-site approach to investigate the role of toxicity and confounding factors on plant bioassay results. *Chemosphere* **219**, 482–492 (2019).
13. Mench, M. *et al.* Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *J. Soils Sediments* **10**, 1039–1070 (2010).