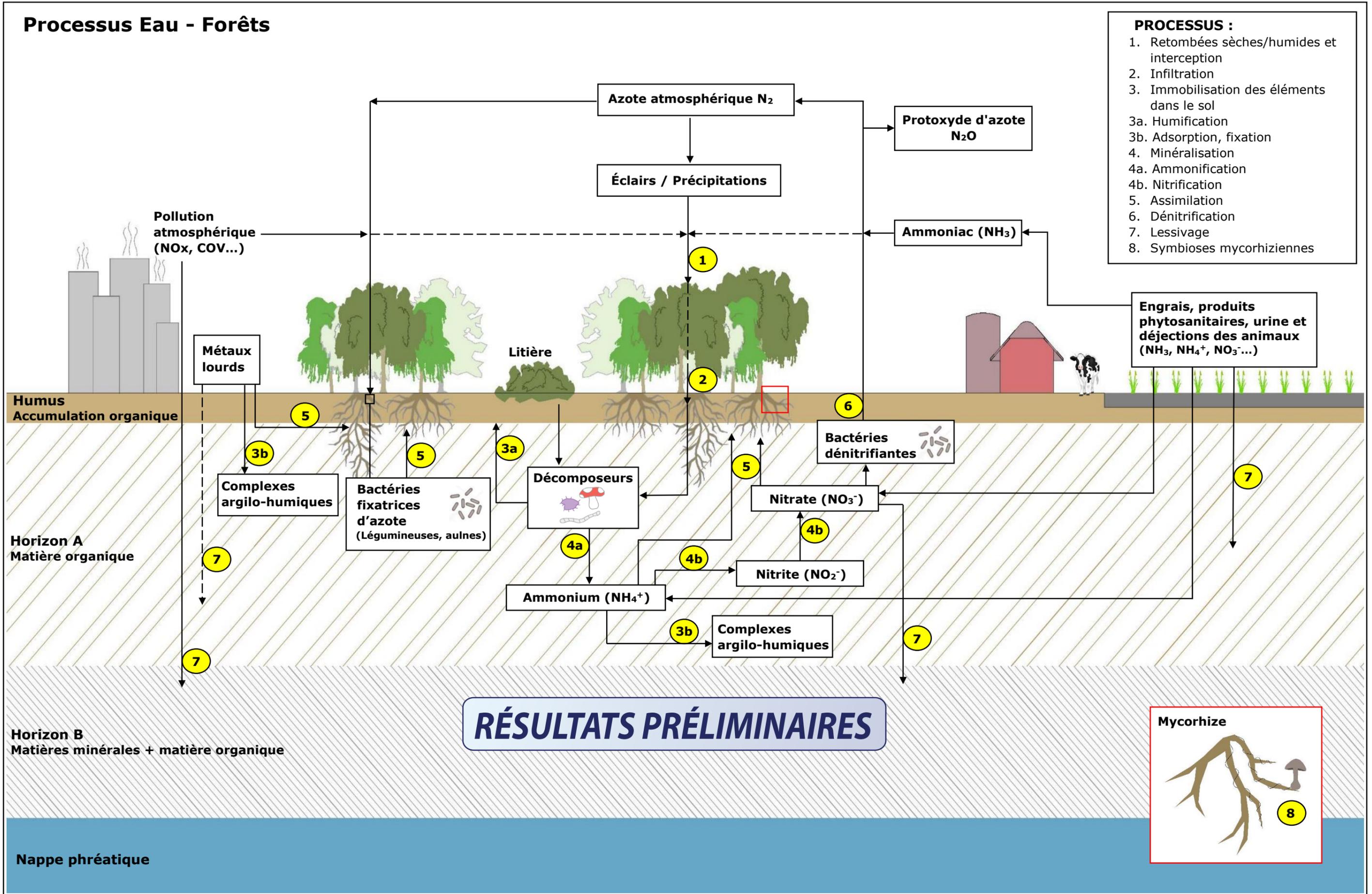
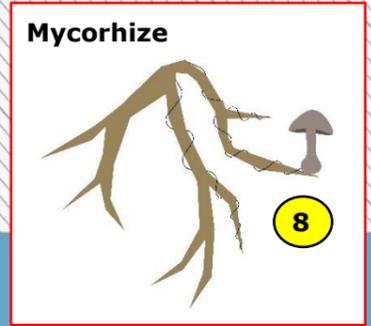


Processus Eau - Forêts



RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES



Les processus écologiques de la relation Eau-Forêts qui influencent la filtration réalisée par des écosystèmes forestiers (protection active de l'eau souterraine)

1. Retombées sèches/humides et interception

- Interception de l'humidité et de polluants atmosphériques → résineux > feuillus¹
- En Suisse, environ deux tiers des dépôts azotés qui parviennent dans les écosystèmes sensibles sont dues aux émissions d'ammoniac de l'agriculture et un tiers des oxydes d'azote dus aux processus de combustion. En forêt, ces dépôts provoquent une acidification du sol et influencent négativement le cycle naturel de l'azote (lessivage de nitrates)²
- Les arbres peuvent assimiler des polluants par les stomates (<1% d'amélioration de la qualité de l'air en ville³)
- Interception des précipitations → diminution de la quantité d'eau qui arrive au sol⁴
- Couvert végétal fermé → évite des concentrations élevées de nitrate dans la nappe phréatique⁵
→ limite l'érosion et donc la turbidité de l'eau⁶

2. Infiltration

- La forêt et ses sols favorisent l'infiltration de l'eau, comparée aux autres couvertures végétales⁷
- L'infiltration sous feuillus est plus importante que sous résineux⁷
- L'infiltration dans les jeunes peuplements est plus importante que dans une futaie mature⁷

3. Immobilisation des éléments dans le sol

3a. Humification

- Certains composés contaminants sont intégrés et stabilisés dans l'humus (et les xénobiotiques peuvent être ensuite minéralisés)⁸
- N dans l'humus : le sol minéral peut emmagasiner plus d'azote sous forme stable par rapport à la quantité d'humus → feuillus > résineux¹

3b. Adsorption, fixation

- Les complexes argilo-humiques peuvent adsorber des molécules organiques contaminantes et des métaux lourds dans les sols, ce qui réduit la toxicité pour les plantes et les transferts vers la nappe phréatique⁹. Ces immobilisations sont potentiellement réversibles en fonction de l'évolution du système.

4. Décomposition/minéralisation de matière organique

- L'activité biologique est intense dans les litières forestières des peuplements de feuillus sur sols pas trop acides et plus faible dans les peuplements de résineux¹⁰
- Forêts proches de l'état naturel et sans trop de dépôts azotés → Sol biologiquement très actif¹¹
- Forêts résineuses et/ou rendues acides par des dépôts azotés → Sol plus acide et biologiquement moins actif

4a. Ammonification

- L'ammonification est le processus dominant, voir exclusif dans les cas les plus défavorables, c'est-à-dire les milieux acides et mal aérés → résineux > feuillus¹²

4b. Nitrification

- La nitrification est plus lente à un pH plus bas → feuillus > résineux¹³

5. Assimilation

- Un système racinaire plus profond permet une meilleure utilisation des nitrates contenus dans les eaux de percolation avant qu'elles ne rechargent les eaux souterraines → feuillus > résineux¹⁴
- Les arbres assimilent des nutriments et des métaux lourds (pour les métaux lourds, en fonction des métaux et des essences)¹⁵

6. Dénitrification

- La dénitrification dépend de l'humidité du sol → plus forte quand le sol est gorgé d'eau¹⁶
- Les taux de dénitrification sont plus faibles dans les sols acides¹⁷

7. Lessivage

- Lessivage de nitrate réduite par l'écosystème forestier : corrélation entre l'intensité d'exploitation forestière (coupes rases p.ex.) et la concentration de nitrate dans l'eau d'infiltration → La migration augmente après l'exploitation¹⁸ pour diminuer à nouveau avec le retour de la végétation¹⁹. La décomposition des tas de bois et des résidus végétaux (rapport C/N élevé) contribue en outre à immobiliser de l'azote minéral, et ainsi à limiter les lessivages de nitrate.
- Le sol acide relâche plus de nitrates dans la nappe phréatique → résineux > feuillus¹⁹
- Issus de source naturelle ou anthropogène, les oligo-éléments, dont les métaux lourds, réagissent de manière très diverse. Ils n'apparaissent qu'en petite quantité, non problématique, dans les nappes phréatiques suisses²⁰

8. Symbioses mycorhiziennes

- Les champignons reçoivent des composés carbonés de la plante hôte²¹
- La plante bénéficie de l'association par une absorption accrue de nutriments (principalement du phosphore et de l'azote), une meilleure tolérance au stress abiotique et une résistance aux parasites²¹
- Les mycorhizes accumulent des éléments et protègent la plante contre les pathogènes ainsi que le sol contre les éléments toxiques et les métaux lourds²²

CONCLUSION

Les bassins versants couverts de forêts ont une influence directe et reconnue sur la qualité de l'eau des nappes phréatiques puis de l'eau potable qui en est tirée. Comme celle de certains autres milieux naturels ou exploités de manière extensive (prairies extensives, pâturages d'estivage), l'eau souterraine issue des milieux forestiers présente des concentrations en contaminants systématiquement plus basses que celle provenant des autres utilisations des sols. Ces propriétés protectrices sont très clairement mises en évidence par l'étude de l'OFEV 2019 présentant les résultats d'analyses des eaux souterraines du réseau NAQUA²³. De nombreuses villes, en Suisse et à travers le monde (Evian, New York), ont d'ailleurs, souvent depuis longtemps, décidé de protéger le couvert forestier des bassins versants d'où ils tirent leur eau potable. La gestion des forêts est en effet réalisée sans apport d'intrants ni, quasiment, d'utilisation de produits chimiques. L'effet de l'absence de polluants est déterminant, il est parfois appelé l'effet de protection *passive* de la forêt.

Il existe en outre un effet de protection active, largement reconnu sur le plan international, qui est beaucoup plus complexe à généraliser du point de vue scientifique. Les peuplements et sols forestiers sont très diversifiés en Suisse. Tous deux sont avant tout dépendants des conditions de stations (de l'écologie des sites). En outre, les peuplements sont influencés par leur gestion passée (structure, composition), par les sols et par ce qu'ils reçoivent de ces mêmes peuplements (matière en décomposition) et, de manière ponctuelle, par des influences anthropiques (compaction notamment).

Il est donc très difficile de s'aventurer à donner des généralités. On peut cependant tirer du schéma et des explications qui précèdent que, par comparaison avec d'autres usages des sols, les peuplements et sols forestiers ont une **capacité élevée à retenir et parfois éliminer des substances nocives issues de la pollution atmosphérique ou d'autres apports de produits chimiques**. Ce rôle est important en vue du captage d'eau potable dans les nappes phréatiques situées dans leur bassin versant. Dangereuse pour les cours d'eau et utilisée sous conditions pour protéger des bois frais, la cyperméthrine a fait l'objet d'études particulières. Des expériences réalisées dans un contexte karstique extrêmement vulnérable en Suisse ont par exemple mis en évidence l'effet filtrant de sols forestiers sur ce pesticide : seuls env. 3.3% des produits atteignent le sol avant qu'env. 0.05% ne parvienne à la nappe phréatique (soit 1.5% de ce qui a touché le sol)²⁴.

On sait toutefois aussi que, par leurs canopées, les forêts retiennent des substances nocives de l'atmosphère même sans précipitations. La FAO met notamment en garde contre cet effet pour les forêts qui se trouvent dans les zones de nuages ou brouillards persistants. Les arbres peuvent également absorber les substances toxiques par les stomates (effet mesuré dans des villes polluées p.ex.) mais, même s'il est positif pour l'atmosphère, cet effet se limite à quelques pourcents selon les polluants. La foresterie proche de la nature vise des peuplements adaptés à leurs stations. Les essences résineuses occupent naturellement certaines stations, notamment en altitude. Sur d'autres stations cependant, il est connu que leur litière est moins bénéfique pour le développement du sol (acidification, réduction de l'activité biologique) que celle des feuillus.

Par rapport à leurs effets sur la filtration de l'eau, les atouts de l'écosystème forestier sont en particulier liés à la bonne structure, l'activité biologique et la quantité de matière organique des sols ainsi qu'à un effet de rétention ou d'assimilation, dans un volume racinaire important, de certaines substances par les racines des arbres. Sur le plan des nappes phréatiques, l'impact qualitatif majeur est lié aux nitrates. De nombreuses études ont été menées sur la bonne capacité de rétention des nitrates par les écosystèmes forestiers, ainsi que par la réversibilité qui peut être provoquée par des coupes rases (libération de nitrates). Un couvert du sol et donc une assimilation aussi constante que possible sont cruciaux pour garantir une rétention optimale.

Par ses caractéristiques de gestion et ses propriétés de filtration et de purification, la forêt peut fournir une aide incontestable pour une distribution d'eau de haute qualité à la population suisse. En pratiquant une gestion précautionneuse pour les sols et une sylviculture adaptée à cet objectif, il est possible de renforcer cette vocation de protection afin de préserver à moindre coût la ressource en eau potable sur le long terme. La gestion sylvicole visera un couvert continu dans l'espace et dans le temps, une structure hétérogène mesurée et un mélange adapté à la station et aux changements climatiques pour assurer cette prestation de manière régulière et durable. Un faible taux de résineux et une sylviculture fine aboutiront à une meilleure filtration et purification de l'eau que dans un peuplement de résineux purs comportant de grandes trouées. Il s'agit néanmoins d'une généralité qui ne peut s'appliquer à tous les peuplements sans distinction. Une forêt d'altitude est naturellement plus riche en résineux qu'une forêt de plaine, de même qu'une forêt sur sol très sec est plus ouverte qu'une forêt sur sol humide. Par conséquent, il est essentiel de connaître pour chaque type de milieu forestier le taux de mélange et le degré de fermeture naturels.

Tenant compte des diverses caractéristiques des milieux écologiques suisses, un guide est en cours de réalisation en vue de soutenir le partenariat entre le gestionnaire forestier et le producteur d'eau.



Fontaine en forêt (@CFPF)

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

BIBLIOGRAPHIE

1. Hegg, C., Jeisy, M., Waldner, P., Hartmann, D., & Dousse, M. (2006). La forêt et l'eau potable : Une étude bibliographique. Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage, WSL.
2. Les polluants atmosphériques azotés portent atteinte à la biodiversité (admin.ch)
3. Nowak et al (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4, 115-123.
4. Navar (2020). Modeling rainfall interception loss components of forests. *Journal of Hydrology* 548.
5. Bartsch, N. (2000). Element release in beech (*Fagus sylvatica* L.) forest gaps. *Water, Air and Soil Pollution*, 122(1-2), 3-16.
6. Guide Alpeau dans l'arc alpin et jurassien (2012). Protection des eaux souterraines en forêt.
7. Maître, V., & Jenni, R. (2007). Etude bibliographique sur la relation forêt-eau souterraine. Fribourg : Bureau Nouvelle Forêt sàrl.
8. Weber (2020). Humic Substances and their Role in the Environment. *EC Agriculture* (2020): 03-08.
9. Fageria (2012). Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43:16.
10. Duchaufour, P. (1997). Abrégé de pédologie, sol, végétation, environnement. 5ème édition. Ed. Masson
11. Benecke, P. (1993). Zur Aufforstung von Wassereinzugsgebieten, Wald in Wasserschutzgebieten. Ergebnisse aus einem Fachgespräch am 04.Juni 1992. Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, pp.48-58
Einsele, G., Köhler, W., Plum, H., Schraft, A., Seiler, K., & Udluft, P. (1990). Stoffeintrag und Stoffaustrag in bewaldeten Einzugsgebieten. DVWK Schriften. Hamburg und Berlin, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau eV (DVWK).
12. Deletraz, G. (2002). Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Bariatou (Pyrénées) (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).
13. Ste-Marie, C., & Paré, D. (1999). Soil, pH and N availability effects on net nitrification in the forest floors of a range of boreal forest stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1579-1589.
14. Rothe, A., Kölling, C., & Moritz, K. (1998). Waldbewirtschaftung und Grundwasserschutz. *AFZ/Der Wald*, 6, 291-295.
15. Godt, Jochen (1986): Untersuchung von Prozessen im Kronenraum von Waldökosystemen und deren Berücksichtigung bei der Erfassung von Schadstoffeinträgen - unter besonderer Beachtung von Schwermetallen -. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe A, Bd.
16. Hénault, C. (1993). *Quantification de la dénitrification dans les sols à l'échelle de la parcelle cultivée, à l'aide d'un modèle prévisionnel* (Doctoral dissertation, École nationale supérieure agronomique (Montpellier)).
17. Eaton, L. J. & Patriquin, D. G. (1989). Denitrification in lowbush blueberry soils. *Canadian journal of soil science*, 69(2), 303-312C'
18. Schleppi et al. 2017 Nitrate leaching from a sub-alpine coniferous forest subjected to experimentally increased N deposition for 20 years, and effects of tree girdling and felling. *Biogeochemistry* 134:319-335.
19. Rothe, A., & Mellert, K. H. (2004). Effects of forest management on nitrate concentrations in seepage water of forests in southern Bavaria, Germany. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156(1), 337-355.
20. BAFU 2019. Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1901, 138 S.
21. García-Garrido, J. M., & Ocampo, J. A. (2002). Regulation of the plant defense response in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of experimental Botany*, 53(373), 1377-1386.
22. Miransari, M. (2010). Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress. *Plant Biology*, 12(4), 563-569.
23. OFEV (2019). Etat et évolution des eaux souterraines en Suisse. Résultats de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA, état 2016. Office fédérale de l'environnement, Berne. Etat de l'environnement no 1901 : 144 p.
24. Zwahlen (2012). Présentation au Colloque final du projet Interreg Alpeau. http://www.alpeau.org/images/pdf/120329_seminaire_final/3_IAO_EVIAN_ZWAHLEN.pdf

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES