

Techniques de mesure des flux en solutions dans les écosystèmes forestiers

Dominique Gelhaye¹

Résumé : Les solutions du sol sont utilisées comme indicateur du fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers, tant pour leur composition chimique que pour les flux d'éléments transférés d'un compartiment vers un autre. Les paramètres affectant la chimie des solutions de la pluie à la base du sol sont nombreux et varient au cours du temps, avec le climat et avec les rythmes biologiques. Le suivi des solutés nécessite de prendre au mieux en compte tous ces facteurs, en fonction des objectifs spécifiques aux projets.

Mots clefs : Flux- solutions- écosystème forestier

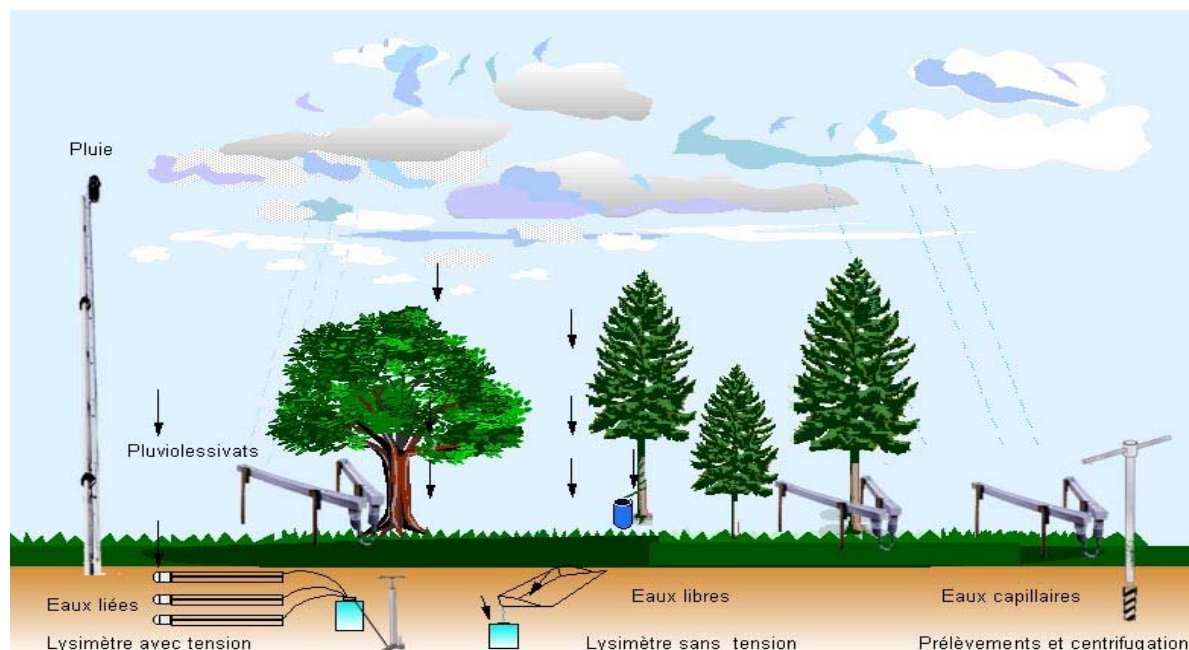


Schéma 1 : *variabilité spatiale des solutés*

Introduction

Les solutés sont des indicateurs du fonctionnement des écosystèmes, ils réagissent en temps réel aux modifications du milieu. Leur valeur indicatrice porte à la fois sur la concentration et sur les flux d'éléments transférés. Les solutés sont relativement instables quant à la nature des espèces chimiques qu'ils contiennent et, les variations spatiales et temporelles sont

¹ INRA - Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux ☎ 03 83 39 41 09
dgelhaye@nancy.inra.fr

importantes. De ce fait ces solutions restent des outils de recherche peu utilisés dans les diagnostics courants du fonctionnement des écosystèmes.

Les équipements que nous présentons sont utilisés dans les études d'écosystèmes forestiers de l'Observatoire de Recherche sur l'Environnement, F-ORE-T, dans les sites de Breuil dans le Morvan, Fougères en Bretagne, Hesse en Lorraine et du réseau Renécofor². Cette technologie a été également transférée vers l'ORE Prairies. Elle a aussi été employée en milieu tropical, en collaboration avec le Cirad, dans les sites à Eucalyptus de Pointe-Noire au Congo et d'Itatinga au Brésil et de Libo à Sumatra sur palmier à huile.

1. Structuration de la variabilité déterminant la nature, le positionnement et le nombre des capteurs

1.1 La variabilité spatiale des solutés (schéma 1)

1.1.a La structuration verticale de l'écosystème liée à la végétation et au sol. La végétation induit une forte structuration de la pluie et des solutés transférés vers le sol et modifie la composition de la pluie incidente. En effet le couvert végétal absorbe des éléments, en particulier l'azote, via un processus appelé récrétion qui correspond à un échange d'ions entre la pluie et le végétal. Il joue le rôle de capteur inerte pour des dépôts secs qui seront lessivés lors des événements pluvieux.

Le sol est également fortement structuré verticalement en horizons, totalement organiques en surface, puis avec des gradients d'éléments, de minéraux argileux ou d'oxy-hydroxydes très variables selon les types de sol. La solution du sol est composée de phases qui se distinguent par l'intensité de leur interaction avec la phase solide. On différencie :

- les solutions gravitaires « indépendantes » de la phase solide, dont le temps de résidence est faible (quelques jours après une pluie, mais dépendant de la nature du sol) ;
- les solutions liées absorbables par la plante, avec un gradient depuis les très faiblement liées, facilement absorbables aux solutions fortement fixées absorbables jusqu'à un point singulier, le point de flétrissement permanent qui correspond à une intensité de liaison équivalente à 16 fois la pression atmosphérique ;
- les solutions très fortement fixées, non absorbables par la plante, siège des interactions géochimiques avec la phase solide.

Ces différentes phases sont connectées par des mécanismes de convection aux faibles liaisons puis de diffusion.

1.1.b La structuration latérale de l'écosystème dépend également de la végétation et du sol.

La végétation structure les retombées atmosphériques au sol par l'architecture du peuplement densité et répartition spatiale des classes de dimension. Le port fastigié de l'arbre induit une structuration à son échelle en augmentant la part ruissellement de troncs. A l'inverse, le port pleureur tend à concentrer les pluviollessivats vers l'extérieur du houppier.

Le sol forestier présente toujours une forte variabilité spatiale, avec ou sans structuration géographique, induisant ou non des gradients et des pas de répétition de mailles élémentaires.

² 17 sites équipés sur 107

1.2 La variabilité temporelle à trois composantes majeures :

- la variabilité saisonnière liée à tous les paramètres pour des raisons physiques (climat) et/ou biologiques,
- la variabilité climatique interannuelle aléatoire ou à tendance (changements climatiques),
- la variabilité liée au stade de développement des peuplements qui prélèvent et restituent les éléments au sol en fonction de leur vitesse de développement et de leur production, affectée d'un indice d'efficacité propre aux essences.

Il faut ajouter les différentes autres contraintes inhérentes aux investigations sur les solutés :

1.2.a Leur relative instabilité chimique

Les solutés contiennent des composés chimiques labiles, sujets à une instabilité physique (photo- ou thermo- dégradation, changement des équilibres liés aux pressions partielles de gaz) ou biologique (biodégradation). De plus, les associations chimiques prévalant dans le compartiment étudié peuvent évoluer dans les containers de récolte en relation avec la quantité de soluté, la durée et les conditions de stockage.

Il est théoriquement possible d'éliminer toutes ces sources d'erreurs avec des systèmes complexes, lourds à gérer et coûteux. La meilleure garantie est la récolte et l'analyse instantanée des solutés. Tant qu'il n'y aura pas de système de mesure automatique et continu *in situ*, il faudra composer avec ces contraintes pour satisfaire au mieux les objectifs. Il est possible de réduire l'effet des facteurs physiques en isolant les containers de récolte qui peuvent être placés dans des « caves » closes. L'utilisation d'enceintes réfrigérées dépend des moyens financiers. Par ailleurs, il est possible d'ajouter des inhibiteurs chimiques mais ils peuvent perturber les résultats d'analyses.

1.2.b Le problème de la neutralité chimique des matériaux utilisés pour les capteurs

Il n'existe pas de matériau inerte en absolu. Il convient d'adapter les matériaux aux objectifs. Les interactions sont d'ordre chimique (dissolution) ou physique (adsorption-désorption). Par exemple, le polyéthylène est inerte vis-à-vis des éléments majeurs, Carbone y compris, mais pas vis-à-vis de certaines molécules organiques (xénobiotiques) qu'il adsorbe efficacement. On utilisera alors les capteurs en acier inoxydable. Les travaux sur les éléments en traces sont les plus contraignants car il faut étudier le comportement des matériaux vis-à-vis de chaque élément.

Remarque : dans un système de récolte, il est nécessaire de prendre en compte tous les composants de la chaîne ainsi que les pollutions éventuelles au cours du processus (soin des manipulateurs, entretien du matériel). Le stockage avant l'analyse doit être tout aussi soigné : il est inutile de prendre des précautions drastiques pour la collecte si les échantillons sont stockés dans des conditions inadéquates en attendant leur traitement !

Les conséquences de ces contraintes se répercutent directement sur la stratégie et les méthodes d'échantillonnage qui doivent prendre en compte :

- la structuration verticale de l'écosystème liée à la végétation et au sol, entre les limites de l'écosystème déterminées par l'atmosphère et la limite de l'enracinement,
- la variabilité spatiale induite par la végétation, le relief et le type de sol, (**schéma 2**)
- la variabilité temporelle liée aux cycles saisonniers, à la variabilité climatique interannuelle, et la variabilité liée au stade de développement des peuplements,
- l'intensité des flux (dilution lors de flux intenses ou concentration en flux faibles).

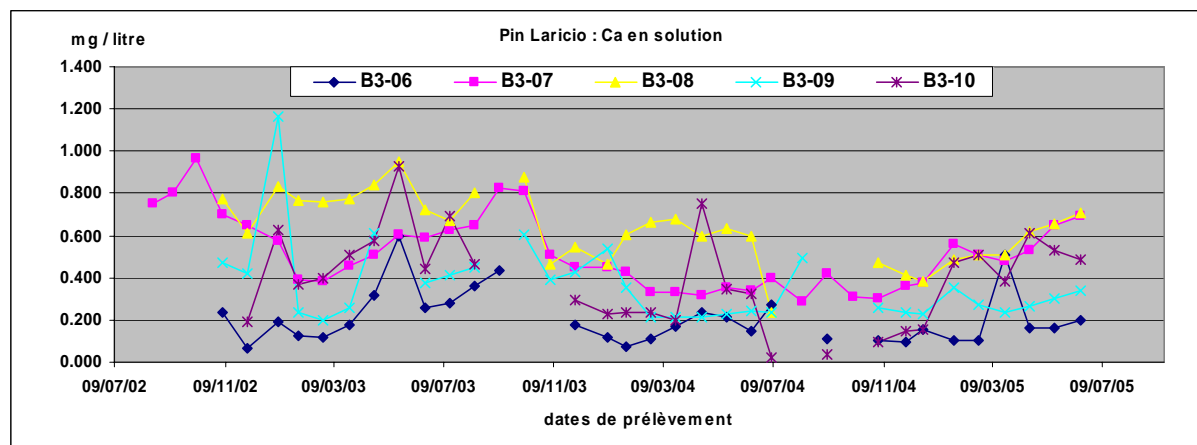


Schéma 2 : Variabilité spatiale et temporelle de 5 solutions à 30 cm extraites par des bougies poreuses

Ces contraintes peuvent être intégrées de différentes manières, en fonction des objectifs. Par exemple, il peut être utile de caractériser finement la structure spatiale des apports d'éléments au sol, ou bien, il est uniquement nécessaire d'avoir une quantification précise du flux sous couvert. Le premier cas conduit à mettre en place un réseau de capteurs dense et organisé en fonction de la structure du peuplement. Dans le second cas, des capteurs intégrant les différents types d'espaces entre arbres suffisent. Autre exemple, au niveau du sol il peut être suffisant de quantifier les transferts hors de la zone racinaire : les capteurs seront alors installés à la base du profil racinaire et la structuration par horizon pédologique, déterminant puissant de la chimie des solutions, ne sera pas explorée.

La durée d'observation est un critère difficile à définir. Le court terme doit au minimum prendre en compte la variabilité climatique interannuelle. Les observations de longue durée montrent que 5 années représentent un minimum à cet égard. Si une tendance existe, sous le gradient de changements climatiques, la durée d'observation nécessaire pour distinguer l'effet propre au développement du peuplement (en plantation) de ce gradient doit être nettement plus longue et au moins supérieure à 15 ans.

2. Paramètres techniques des capteurs utilisés dans les sites ateliers

2.1 L'eau de pluie est collectée hors peuplement par au moins un pluviomètre en polyéthylène dont toutes les parties en contact avec le liquide doivent être usinées dans des matériaux chimiquement inertes. Celui-ci doit recueillir les précipitations y compris neigeuses (maintien hors-gel par des gaines chauffantes), enregistrer journalièrement les débits (auge à bascule et enregistreur), prélever et conserver un échantillon journalier (partiteur).

2.2 Les pluviollessivats peuvent être recueillis par des pluviomètres de type météorologie nationale. Ces matériels sont mal adaptés à cause de leur faible surface (400 cm²) de collecte ne permettant pas d'intégrer l'hétérogénéité des retombées dues à la discontinuité de la canopée ; de plus, étant en PVC, leur neutralité chimique n'est pas garantie. On préférera des pluviomètres en polyéthylène, de 2m de long et de 0,20m de large, qui intègrent les variations quantitatives et qualitatives des pluviollessivats. Pour obtenir une quantification précise des pluviollessivats à l'échelle de la parcelle forestière, nous utilisons de 4 à 6 capteurs de ce type.

2.3 L'écoulement de tronc est mesuré par des capteurs en polyéthylène ou en silicone, installés en spirale à la base des troncs et reliés à des récipients. Un système mécanique à auget à bascule associé à un enregistreur de volume mesure le flux.

2.4 Les solutions du sol sont récoltées par des capteurs adaptés à la phase étudiée (cf. ci-dessus).

2.4.a Solutions gravitaires : les eaux libres sont récoltées à l'aide de plaques lysimétriques sans tension. Ces plaques en polyéthylène haute densité de 40 x 30 cm, sont enfoncées dans le profil de sol à l'aide de 2 vérins hydrauliques de 1,5 t de poussée ; un châssis métallique donne l'inclinaison à la plaque qui est reliée à un bidon de récolte en polyéthylène situé en amont dans une « cave ». Pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol, on prévoit au minimum 5 plaques par horizon étudié. Afin d'éliminer l'effet des perturbations initiales, on programme un délai de 6 mois environ avant les premiers prélèvements

2.4.b Solutions liées : Une dépression est effectuée à l'intérieur d'une céramique microporeuse (bougie poreuse) fixée à l'extrémité d'une canne pour aspirer les solutions du sol. Cette canne est alors introduite dans l'horizon de sol et la solution est transférée vers des containers situés à l'abri de la lumière et des fortes variations de température. Quatre paramètres influencent la quantité et la qualité des solutions récoltées :

- le matériau utilisé pour fabriquer la bougie (céramique, inox, Téflon® polymère)
- la taille des pores (1 à 3µm) et surtout leur diamètre maximum qui détermine le point d'entrée d'air,
- la taille des bougies (le diamètre de la zone poreuse varie de 5 à 63 mm et sa longueur de 3 à 15 cm) dont dépend le volume de sol exploré
- la dépression effectuée par une pompe à vide manuelle ou automatique de 0 à -1000 mbar (en prenant en compte le dénivelé entre le capteur et le container de récolte)

Les eaux capillaires fortement fixées peuvent être récoltées ponctuellement par centrifugation à partir d'un échantillon de sol en état d'humidité naturelle. Cette méthode présente un inconvénient : le prélèvement est destructif et ne permet pas un suivi en continu des solutions du sol.

3. Passage au flux

3.1 Pluie et pluviolessivats : le flux est directement mesuré par les capteurs

3.2 Solutions du sol : le flux des solutions gravitaires (seules drainées) doit être quantifié à partir d'un modèle hydrique car les capteurs, ne biaisant pas la qualité de solutions, ne prélèvent qu'une partie représentative des eaux drainées. Ce modèle est basé sur la mesure de la pluie, de l'interception, de la transpiration et de l'évaporation au sol. Connaissant par ailleurs la dimension du réservoir que constitue le sol par les relations entre humidité du sol et rétention en eau (le domaine utile à la plante est constitué par la masse d'eau comprise entre l'eau libre pF 2,5 à 3 et la limite physique moyenne de l'absorption à pF 4,2), on calcule pas à pas un bilan entrées-sorties. La mesure en continu de l'humidité du sol permet de valider les

résultats du modèle hydrique (les systèmes TDR³ avec station de multiplexage mesurent sur un pas de temps de quelques heures l'humidité du sol aux différents niveaux de mesure de flux). Le drainage de solutés associe au même pas de temps le drainage d'eau et la concentration des solutions gravitaires.

Conclusion

Les perspectives dans le domaine du monitoring des solutions du sol concernent la meilleure individualisation des phases les constituant. Elles visent en particulier à mieux identifier la solution du sol prélevée par les végétaux. Celle-ci varie avec l'humidité du sol et concerne de l'eau de plus en plus liée quand le sol se dessèche. Il faudrait coupler les capteurs de solutions aux sondes à humidité. Cette étape techniquement abordable ne résoudrait qu'une partie du problème car les capteurs à tension ne peuvent prélever que la frange peu fixée de l'eau liée, la plante ayant un pouvoir d'extraction supérieur en cas de dessèchement important du sol.

Bibliographie

- Gelhaye D, Hurpeau A, Perrin JR (1987) Construction d'un pluviomètre original pour la collecte des pluviolessivats. *Ann. Sci. for.*, 44, 3 : 365-370.
- Ranger J, Discours D, Mohamed Ahamed D, Moares C, Dambrine E, Merlet D, Rouiller J (1993) Comparaison des eaux liées et des eaux libres des sols de trois peuplements d'épicéa (*Picea Abies* Karst) des Vosges. Application à l'étude du fonctionnement actuel des sols et conséquences pour l'état sanitaire des peuplements. *Ann. Sci. for.*, 50, 5 : 425-444.
- Ranger J, Allie S, Gelhaye D, Pollier B, Turpault MP, Granier A (2002) Nutrient budgets for a rotation of a Douglas-fir plantation in the Beaujolais (France) based on a chronosequence study. *For. Ecol. Manage.*, 171, 1-2 : 3-16.
- Villette S (1994) Etablissement du bilan hydrique sur une chronoséquence de peuplements de Douglas (*Pseudotsga menziesii* (Mirb.) Franco) du Beaujolais. Essai de modélisation. Stage 3e année E.N.E.S.A. Dijon. Champenoux : Institut de la Recherche Agronomique de Nancy : 50 p. et annexes.

³ Times Domain Reflectometry