UNIL | Université de Lausanne

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Maîtrise universitaire ès Sciences en biogéosciences
Master of Science in Biogeosciences

Écologie, évolution et devenir des pinèdes de la Rive sud du lac de Neuchâtel

Sarah Beuvier

Sous la direction des Dr Pascal Vittoz et Prof. Éric Verrecchia
Institut des dynamiques de la surface terrestre
Faculté des géosciences et de l'environnement, Université de Lausanne

Sauf indications, toutes les photographies et illustrations sont de l’autrice.

Résumé

Suite à d'importants aménagements hydrauliques réalisés à la fin du 19ème siècle, environ 2 000 ha de terres ont été exondés au pied des falaises molassiques de la Rive sud du lac de Neuchâtel (RSLN). Ces terres ont rapidement été colonisées par une végétation herbacée puis ligneuse. Ainsi, elles représentent un terrain propice à l'étude de la succession primaire de la végétation à partir d'un sol nu et d'un repère temporel connu. N'ayant subi que peu d'interventions, les différents milieux forestiers présents sur la RSLN peuvent être considérés comme naturels.

En tant qu'essence pionnière tolérante quant à la qualité des sols, le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) a colonisé les zones légèrement surélevées de la rive, formant ainsi plus d'une cinquantaine d'hectares de pinèdes. Ces pinèdes, rattachées au *Molinio-Pinetum* dans les années 1980, étaient considérées comme originales et comme étant une phase transitoire dans un modèle de succession sol nu – climax forestier. Ainsi, les pinèdes étaient vouées à disparaître et à être remplacées progressivement et à moyen terme par une forêt de feuillus. Mais qu'en est-il plus de trente ans plus tard ?

Dans le cadre de cette étude, axée sur la phytosociologie, la dendrochronologie et la pédologie, vingt pinèdes de la RSLN ont été revisitées en 2018. Les données de végétation ont été comparées à celles obtenues dans les années 1980 afin de préciser les changements écologiques amorcés par les pinèdes. Les données dendrochronologiques ont permis de retracer la colonisation, d'une part par le pin, et d'autre part par ses concurrents, des zones à pinèdes. Enfin, les données pédologiques ont permis d'identifier les facteurs édaphiques responsables de l'évolution des pinèdes.

Au cours des trente dernières années, la richesse spécifique, ainsi que la diversité de Simpson au sein des pinèdes, ont significativement augmenté, entraînant une nette évolution des pinèdes. La colonisation des pinèdes par les essences concurrentielles du pin se poursuit exponentiellement tandis que le pin ne se régénère plus depuis une cinquantaine d'années. Les sols, sur lesquels se sont installées les pinèdes, appartiennent aujourd'hui aux RENDOSOLS. La pédogenèse est essentiellement régie par l'intégration de la matière organique.

Avec une diversité en hausse, les pinèdes de la RSLN s'éloignent du *Molinio-Pinion* auquel elles sont encore rattachées. En effet, avec la disparition et l'arrivée de certaines espèces, les formations buissonnantes, forêts inondables, hêtraies et autres forêts de feuillus comptent plus d'espèces fréquentes de ces milieux que les pinèdes thermophiles. Bien que les propriétés physico-chimiques des sols restent favorables au pin, leur enrichissement en humus favorise les essences concurrentielles de ce dernier. Le pin sylvestre va donc naturellement disparaître, à moins que des mesures de conservation favorisant le *Molinio-Pinion* ne soient prises. À terme, les pinèdes de la RSLN, après un stade de succession de formations buissonnantes, seront remplacées par des forêts caducifoliées, et probablement par des chênaies à charme (*Carpinion*).

Zusammenfassung

Nach umfangreichen Entwässerungsarbeiten Ende des 19. Jahrhunderts wurden am Fusse der Molassefelsen am Südufer des Neuenburgersees rund 2'000 Hektar Land trockengelegt. Diese Ländereien wurden schnell von krautiger und dann waldiger Vegetation kolonisiert. Damit stellen sie ein geeignetes Gebiet für die Untersuchung der Vegetationsabfolge beginnend mit einem offenen Boden und einem bekannten zeitlichen Bezugspunkt dar. Da diese nur geringen Eingriffen ausgesetzt waren, können die verschiedenen Waldumgebiete am Südufer des Neuenburgersees als naturbelassen angesehen werden.

Als Pionierbaumart, welche tolerant gegenüber der Bodenqualität ist, hat die Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) die leicht erhöhten Uferbereiche kolonisiert und mehr als 50 Hektar Kiefernwald gebildet. Diese Kiefernwälder, die in den 1980er Jahren dem *Molinio-Pinetum* zugeordnet wurden, galten als speziell und befanden sich in einer Übergangsphase gemäss eines Abfolgemodells vom offenen Boden zum Waldklimax. Demzufolge sollten die Kiefernwälder verschwinden und allmählich und mittelfristig durch einen Laubwald ersetzt werden. Aber was ist der tatsächliche Zustand dreissig Jahre später?

Im Rahmen dieser Studie, die sich auf Phytosoziologie, Dendrochronologie und Pedologie konzentriert, wurden 2018 zwanzig Kiefernwälder am Südufer des Neuenburgersees untersucht. Die Vegetationsdaten wurden mit Daten, die in den 1980er Jahren erhoben wurden, verglichen, um die ökologischen Veränderungen durch die Kiefernwälder zu evaluieren. Dendrochronologische Daten haben es ermöglicht, die Besiedlung von Kiefernwaldgebieten einerseits durch Kiefern und andererseits durch ihre Konkurrenten zu verfolgen. Schliesslich ermöglichten die Bodendaten es, die Bodenfaktoren zu identifizieren, die an der Entwicklung der Kiefernwälder beteiligt waren.

Im Lauf der letzten dreissig Jahre hat der Artenreichtum und die Vielfalt der Kiefernwälder deutlich zugenommen, was zu einer deutlichen Entwicklung der Kiefernwälder geführt hat. Die Besiedlung der Kiefernwälder mit konkurrierenden Baumarten der Kiefer setzt sichexponentiell fort, während sich die Kiefer seit etwa 50 Jahren nicht mehr regeneriert hat. Die Böden, auf denen die Kiefernwälder gewachsen sind, gehören heute zu den Rendzina-Böden. Die Pedogenese wird im Wesentlichen von der Integration der organischen Materie dominiert.

Mit zunehmender Vielfalt entfernen sich die Kiefernwälder am Südufer des Neuenburgersees vom *Molinio-Pinion*, dem sie noch zugeordnet sind. Mit dem Verschwinden und Erscheinen bestimmter Arten weisen in der Tat Gebüsche, Bruch- und Auenwälder, Buchenwälder und andere Laubwälder mehr Arten dieser Lebensräumeauf als die Wärmeliebende Föhrenwälder. Obwohl die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Böden für die Kiefer nach wie vor günstig sind, begünstigt deren Anreicherung mit Humuserde die konkurrierenden Arten der Kiefer. Die Waldkiefer wird daher von Natur aus verschwinden, wenn keine Schutzmassnahmen ergriffen werden. Langfristig werden die Kiefernwälder am Südufer des Neuenburgersees nach einem Stadium der Nachfolge von Gebüschen durch Laubwälder und höchstwahrscheinlich durch Eichen- Hainbuchenwald (*Carpinion*) ersetzt.

Abstract

Following major hydraulic developments at the end of the 19th century, some 2,000 ha of land was exposed at the foot of the molassic cliffs of the South Shore of Lake Neuchâtel (SSLN). This land was quickly colonised by herbaceous and then woody vegetation. Thus, it is a suitable terrain for studying vegetation succession from bare ground and a known temporal reference point. Having undergone only a few interventions, the various forest habitats present on the SSLN can be considered natural.

As a pioneering species, tolerant regarding to soil quality, Scots pine (*Pinus sylvestris*) has colonized the slightly elevated areas of the shore, forming more than 50 hectares of pine forests. These pine forests, belonging to the *Molinio-Pinetum* in the 1980s, were considered original and in a transitional phase in a bare ground - forest climax successional model. Thus, the pine forests were predicted to disappear and be replaced gradually and in the medium term by a deciduous forest. What is the situation more than 30 years later?

As part of this study, which focused on phytosociology, dendrochronology and pedology, twenty pine forests in the SSLN were reviewed in 2018. Vegetation data were compared with those obtained in the 1980s to determine the ecological changes initiated by the pine forests. Dendrochronological data have allowed pine forest colonisation by pine trees and their competitors to be studied. Finally, the soil data allowed soil factors involved in the forest evolution to be identified.

Over the past 30 years, species richness and Simpson diversity within pine forests have increased significantly, leading to a clear evolution of the pine forests. The colonisation of pine forests by competitive species continues exponentially, while the Scots pine has not regenerated for about 50 years. The soils, on which the pine forests were built, belong now to Fluvisols. Pedogenesis essentially concerns the integration of organic matter.

With increasing diversity, the pine forests of the SSLN are moving away from the *Molinio-Pinion* to which they still belong. Indeed, with the disappearance and arrival of certain species, bushy formations, floodplains, beech and other deciduous forests have more species considered frequent of these environments than thermophilic pine forests. Although the physico-chemical properties of soils remain favourable to pine, their enrichment in humus favours the competitive species of the latter. The Scots pine will therefore naturally disappear, unless conservation measures are taken. In the long term, the pine forests of the SSLN, after a succession of bushy formations, will be replaced by deciduous forests, and most probably by oak forests with common hornbeam (*Carpinion*).

Table des matières

Résumé 1
Zusammenfassung 3
Abstract 5
Table des matières 7
I. Introduction 11
Un contexte historique favorable à l'évolution naturelle des sols et des forêts 11
Une première étude des pinèdes de la RSLN datant de 1984 12
Une deuxième étude comparative à la première effectuée en 2018 15
II. Matériel et méthodes 17
1. Site d'étude 17
Généralités 17
Géologie 17
Climat 17
Végétation 17
Sols 18
2. Terrain 19
Stations étudiées 19
Étude phytosociologique 19
Étude dendrochronologique 21
Étude pédologique 22
3. Laboratoire 23
Analyse des carottes 23
Analyses des échantillons de sols 23
4. Analyses des données 24
Données phytosociologiques 24
Données dendrochronologiques 26
Données pédologiques 26
III. Résultats 29
1. Milieu actuel et diversités du milieu 29
Milieu actuel 29
Richesse spécifique et diversité selon Simpson 29
Dissimilarité selon Bray-Curtis 31

2. Evolution de la végétation 31
Evolution de la composition floristique des communautés 31
Groupement des communautés et espèces différentielles 31
Valeurs écologiques selon Landolt 31
Autres facteurs écologiques 35
Evolution des espèces arborescentes 37
3. Sols et formes d'humus 41
Descriptions et résultats des analyses 41
Répartition des horizons en fonction des variables environnementales 47
IV. Discussion 49
1. Composition floristique et milieu 49
Un Molinio-Pinion controversé 49
Une évolution marquée et unidirectionnelle 50
Un pin sylvestre en recul face à un cortège d'essences autres 51
Des valeurs écologiques indicatrices de changements climatiques et édaphiques 53
2. Sols 55
Des propriétés physico-chimiques inchangées 55
Un enrichissement en humus 57
Des RENDOSOLS aux CALCOSOLS 57
3. Devenir et gestion des pinèdes de la RSLN 58
Des pinèdes aux chênaies à charme 58
Une aide à la gestion des pinèdes 59
4. Fiabilité de l'étude de la végétation 61
V. Conclusion 63
Bibliographie 67
Sitographie 71
Remerciements 73
Annexes 75

I. Introduction

Un contexte historique favorable à l'évolution naturelle des sols et des forêts

Afin d'enrayer les inondations fréquentes et dévastatrices de la région des Trois Lacs (Lacs de Neuchâtel, de Morat et de Bienne) située au nord-ouest de la Suisse (fig. 1), d'importants aménagements hydrauliques ont été réalisés fin 19ème (1868-1891) et courant 20ème siècle (1962-1972 ; www.grande-caricaie.ch). Ces aménagements, communément appelés « Corrections des eaux du Jura », ont abouti à la disparition de 40 000 ha de marais (fig. 1 : marais en 1850). Le niveau des trois lacs a été abaissé d'environ 3 m (fig. 2 : 1ère Correction), exondant, notamment, 2 000 ha de grèves (sables et limons) au pied des falaises molassiques de la Rive sud du lac de Neuchâtel (RSLN ; fig. 1 : marais en 1900). De plus, les fluctuations du niveau des lacs ont été réduites, limitant l'écart annuel moyen à 0,85 m (fig. 2 : 2ème Correction).

Sur les terres exondées, une végétation pionnière herbacée des milieux humides s'est rapidement installée. Plus tardivement, les ligneux ont eux aussi colonisé le rivage pour former des forêts alluviales sous influence plus ou moins marquée de la nappe du lac et des ruissellements depuis les falaises lacustres. Ainsi, aulnaies, saulaies, frênaies, pinèdes et chênaies présentent une diversité de composition et de structure. Dans la première moitié du 20ème siècle, des plantations, notamment de pins et de peupliers, ont renforcé la mise en place de ces forêts (www.grande-caricaie.ch). Aujourd'hui, d'une superficie de 710 ha, les forêts font parties d'un ensemble de huit réserves naturelles, se déployant d'Yverdon-les-Bains (fig. 5 ; pointe sud-ouest de lac) à La Tène (pointe nord-est du lac) et regroupées sous le nom de La Grande Cariçaie. Ces réserves ont pour but de protéger la valeur naturelle des surfaces marécageuses et boisées de la RSLN, qui abritent aujourd'hui un quart de la flore et de la faune suisse (www.grande-caricaie.ch). Elles permettent aussi l'étude de la succession naturelle de la végétation à partir d'un sol nu. En effet, hormis dans les zones plantées, il y a eu peu d'interventions humaines dans les milieux boisés. Ainsi, sols et forêts y ont évolué naturellement depuis presque 150 ans, ce qui est rarement le cas en Suisse du fait d'une exploitation importante des forêts par l'homme depuis des siècles. De plus, de manière générale, la foresterie et la biologie de la conservation orientent de plus en plus leurs objectifs et stratégies vers la structure et la dynamique des forêts naturelles (Heiri et al., 2009). En effet, les forestiers doivent concilier l'objectif traditionnel de la production de bois avec les demandes de la société pour des fonctions récréatives, écologiques et de protection des écosystèmes forestiers tandis que les biologistes de la

conservation se concentrent principalement sur la promotion de la biodiversité (Heiri et al., 2009). Ainsi, les forêts de la RSLN offrent un terrain propice à la conciliation de tous ces objectifs.

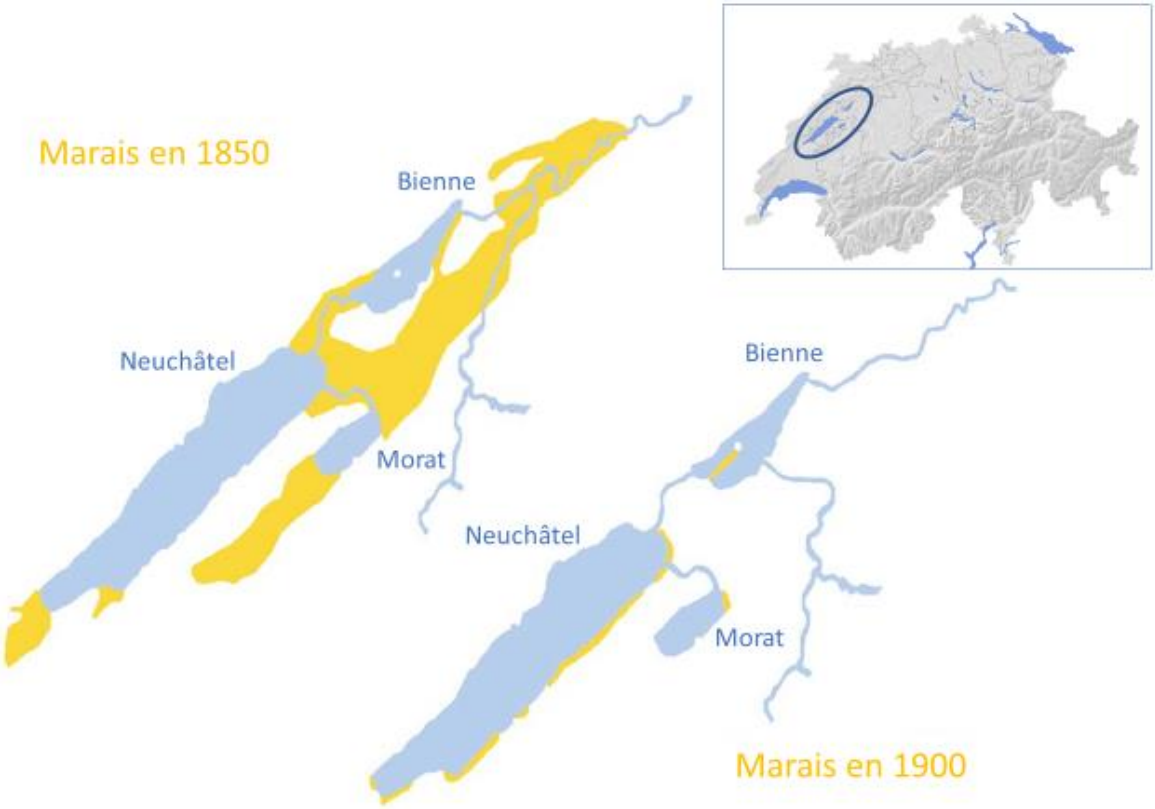


Fig. 1 : distribution des marais, représentée en jaune, avant et après la 1ère correction des eaux du Jura (1968-1891) dans la région des Trois Lacs (Lacs de Neuchâtel, de Morat et de Bienne). Dessin tiré et modifié de www.grande-caricaie.ch. En médaillon, localisation de la région des Trois Lacs en Suisse (ovale bleu). Carte tirée de www.maps-of-europe.net.

Une première étude des pinèdes de la RSLN datant de 1984

Parmi les forêts alluviales, se trouvent des pinèdes thermophiles. En effet, cinquante ans après l'exondation consécutive à la première correction des eaux du Jura, le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) s'est installé en essence pionnière sur les zones légèrement surélevées (placages morainiques) du substrat molassique (Cornali, 1998), indépendante de la nappe lacustre (Cornali, 1992). Dans les années 1980, les pinèdes, considérées à priori comme naturelles, ont fait l'objet d'une vaste étude menée par P. Cornali, alors doctorant au Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie de l'Université de Neuchâtel (Ecologie des pinèdes de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) ; Cornali, 1992). A l'époque, ces pinèdes, rattachées au *Molinio-Pinetum*, étaient considérées comme originales et différentes des autres pinèdes de Suisse, du fait d'une influence plus marquée des groupements de feuillus limitrophes (Cornali, 1997). De plus, contrairement au vrai *Molinio-Pinetum* qui colonise des pentes raides et marneuses soumises à des glissements et à des phénomènes d'érosion (Clot, 2013), les pinèdes de la RSLN ont colonisé des surfaces planes. Le *Molinio-Pinetum* est un groupement rare dont les stations sont dispersées (Clot, 2013). Il fait parti de l'alliance du *Molinio-Pinion,* au tempérament pionnier, que l'on rencontre principalement sur quelques escarpements molassiques du Plateau suisse, ainsi que dans le Jura sur des pentes marneuses

(Delarze et al., 2015). Le caractère atypique des pinèdes de la RSLN traduisait déjà une phase transitoire dans un modèle de succession sol nu – climax forestier (fig. 3 ; Cornali, 1997). De plus, elles présentaient une décomposition élevée de la matière organique pour ce type de milieu, modifiant les conditions pédologiques de telle manière à favoriser les essences compétitives du pin (Cornali, 1992). Enfin, la productivité des pinèdes se stabilisait et la régénération du pin sylvestre était quasi inexistante (Cornali, 1992). De ses observations et analyses, l'auteur de l'étude émettait l'hypothèse d'un remplacement progressif et à moyen terme de la pinède par la forêt feuillue (climax « fonctionnel ») en raison non seulement des difficultés de régénération évoquées, mais aussi grâce aux modifications des conditions pédologiques permettant de plus en plus aux concurrents de cette essence d'être compétitifs, ce qui n'était pas le cas à l'origine du peuplement (Cornali, 1998).

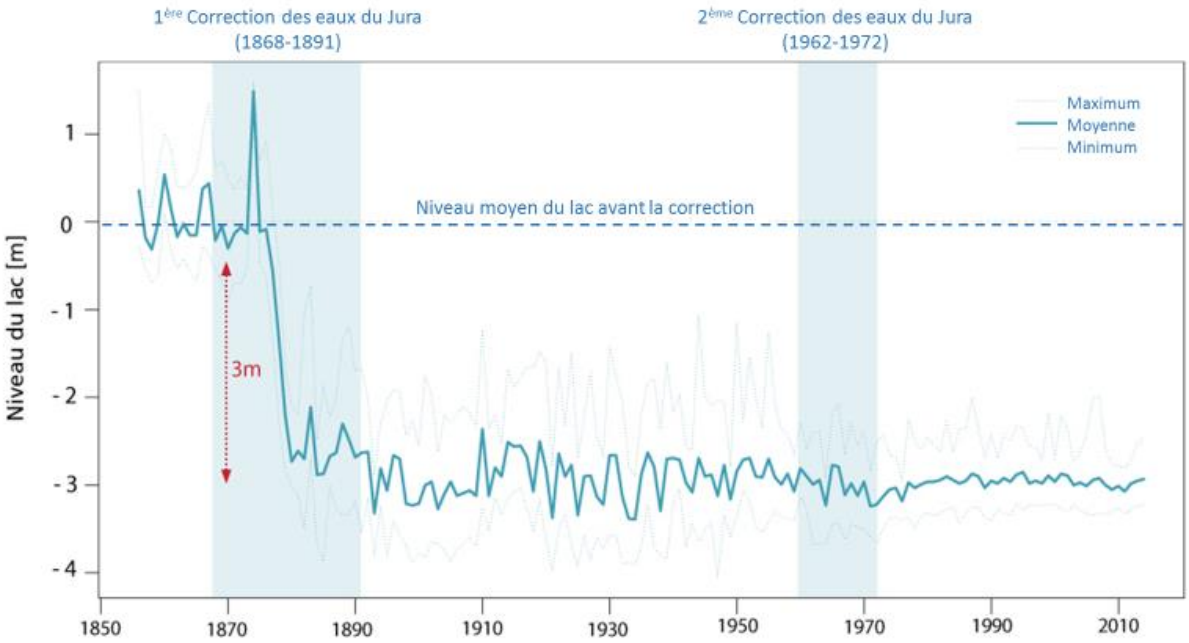


Fig. 2 : fluctuations du niveau lac de Neuchâtel entre 1860 et 2010. Le niveau du lac a baissé de 3 m suite à la 1ère Correction des eaux du Jura. Ses fluctuations ont été limitées à 0,85 m en moyenne annuelle suite à la 2ème Correction des eaux du Jura. Graphique tiré de www.grande-caricaie.ch.

Aujourd'hui, plus de trente ans plus tard, le pin sylvestre est toujours répandu sur le rivage (fig. 5), les pinèdes occupant une superficie de 50 ha, soit environ 7 % de la superficie des forêts alluviales de la RSLN. Étant donné que les changements écologiques se réalisent sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs décennies (Heiri et al., 2009), diverses questions se posent concernant l'écologie et la dynamique des pinèdes actuelles :

1. Quelle diversité floristique abritent-elles ?
2. Comment ont-elles évolué durant les dernières décennies ?
3. Quelle place occupe encore le pin face aux autres essences ?
4. Quels facteurs climatiques ou édaphiques expliquent l'évolution de ces pinèdes ?

5. Le sol est-il devenu plus favorable aux essences concurrentielles du pin ?
6. Vers quel climax forestier se dirigent ces pinèdes ?

De ces questions, découlent les hypothèses suivantes :

1. La diversité floristique est supérieure à celle observée en 1984 si les pinèdes sont dans une phase transitoire plus avancée que celle décrite par P. Cornali.
2. Le pin ne se régénérant pas, l'évolution des pinèdes est nette.
3. Les essences autres progressent tandis que le pin stagne ou régresse.
4. L'élévation des températures due aux changements climatiques et l'enrichissement du sol en matière organique par la chute de litière entraînent une composition floristique différente et donc une évolution des pinèdes.
5. Le sol, en s'enrichissant en matière organique, devient plus favorable aux essences concurrentielles du pin.
6. Les pinèdes de la RSLN seront à terme remplacées par des forêts caducifoliées.

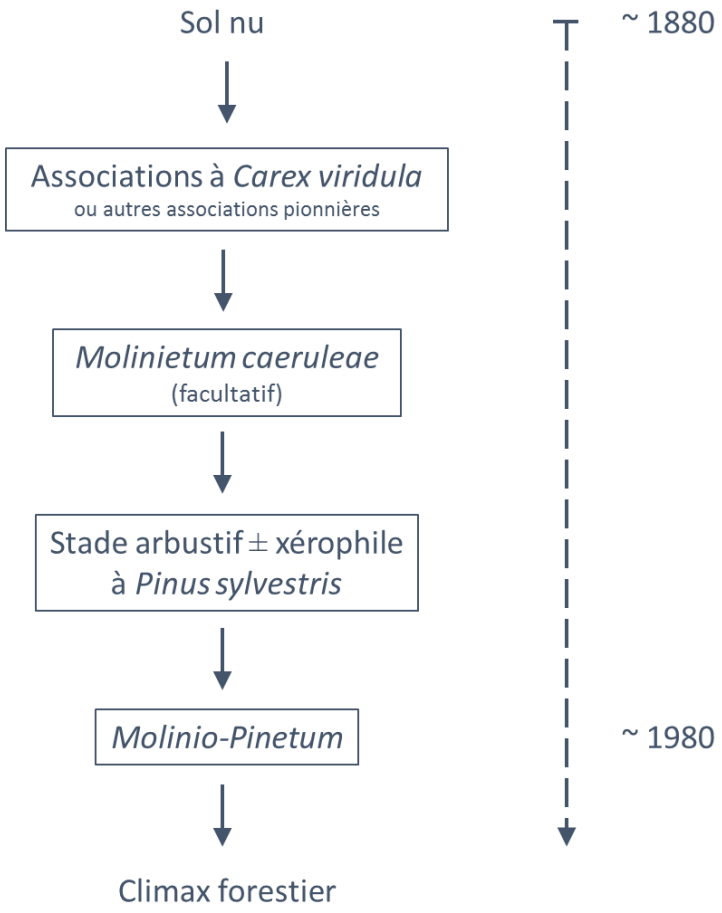


Fig. 3 : modèle de succession préférentiel pour les pinèdes de la RSLN. Le stade Molinio-Pinetum *est un stade transitoire dans le modèle de succession sol nu – climax forestier. Modèle tiré et modifié de la figure 1 de Cornali, 1997.*

Une deuxième étude comparative à la première effectuée en 2018

Afin de répondre à ces questions et d'apporter une aide à la gestion de ces pinèdes, une deuxième étude a été menée en 2018. Cette étude suit trois axes principaux qui sont la phytosociologie, la dendrochronologie et enfin la pédologie. La phytosociologie permet d'obtenir une représentation de la structure actuelle des pinèdes. Par comparaison de leur composition floristique ancienne avec leur composition floristique actuelle, et en tenant compte de l'abondance des espèces, elle permet aussi d'établir leur évolution sur les 34 années qui séparent les deux études. En parallèle, l'utilisation des valeurs de Landolt (Landolt et al., 2010) donne une vue d'ensemble des changements écologiques amorcés par les pinèdes. La dendrochronologie permet de retracer la colonisation des zones à pinèdes, d'une part par le pin sylvestre et d'autre part par les essences concurrentielles à celui-ci. Enfin, la pédologie permet d'évaluer les conditions édaphiques actuelles et de les mettre en lien avec les trajectoires prises par les pinèdes.

Fig. 4 : prairies et pinèdes forment une mosaïque dans la réserve naturelle des Grève de la Motte.

II. Matériel et méthodes

1. Site d'étude

Généralités

Parmi les huit réserves naturelles de la Grande Cariçaie, deux ont fait l'objet de cette étude (fig. 5). La réserve naturelle des Grèves de la Corbière et de Chevroux est principalement située sur territoire fribourgeois, entre les communes d'Estavayer-le-Lac et de Chevroux. C'est une réserve surtout forestière, avec de vastes étendues de pinèdes (www.grande-caricaie.ch). La réserve naturelle des Grèves de la Motte est principalement située sur territoire vaudois, au pied d'une falaise lacustre, entre les communes de Delley-Portalban et de Cudrefin. C'est une réserve composée de prairies séchardes et de pinèdes (www.grande-caricaie.ch ; fig. 4).

Géologie

La RSLN est établie sur un plateau de Molasse d'eau douce inférieure (Aquitanien), constitué de grès et marnes bigarrées (www.geo.admin.ch). Sur ce plateau, repose une faible couverture de dépôts lacustres de sables, limons et argiles à Unios et de dépôts morainiques würmiens (présence de galets alpins). Ces dépôts ont été remaniés par l'action érosive du battement des eaux du lac, notamment au pied de la falaise lacustre (Buttler, 1987 ; Cornali, 1992).

Climat

Le climat régional du Plateau occidental est fortement influencé par les courants d'ouest provenant de l'Atlantique, apportant un air frais en été et humide et doux en hiver. La chaîne du Jura vient toutefois nuancer cette influence, en formant une barrière aux précipitations. En saison froide, du brouillard se forme sur le Plateau et notamment le long des lacs car l'air y est très humide (www.meteosuisse.admin.ch). Localement, les précipitations annuelles sont de 855 mm et la température moyenne annuelle est de 9,8 °C (données de la station météorologique la plus proche, se situant à Payerne, sur la période 1998-2017, www.meteosuisse.admin.ch).

Végétation

Parmi les nombreuses associations végétales, les pinèdes thermophiles font partie des 710 ha de forêts riveraines et de pente que compte la Grande Cariçaie. Leur superficie avoisine les 50 ha. La

végétation est rattachée à la pinède à molinie liée au climat subatlantique (*Molinio-Pinion* Ellenberg et Klötzi 72). Les arbres, essentiellement *Pinus sylvestris*, sont clairsemés et le sous-bois, hébergeant de nombreuses espèces d'arbustes tel *Juniperus communis* s.str., est dense (Delarze et al., 2015 ; fig. 6). La surface du sol est, quant à elle, majoritairement recouverte de poacées, tels *Molinia arundinacea* et *Brachypodium sylvaticum*, et de cypéracées tel *Carex flacca*. Toutefois, de nombreuses autres espèces herbacées y trouvent sporadiquement leur place.

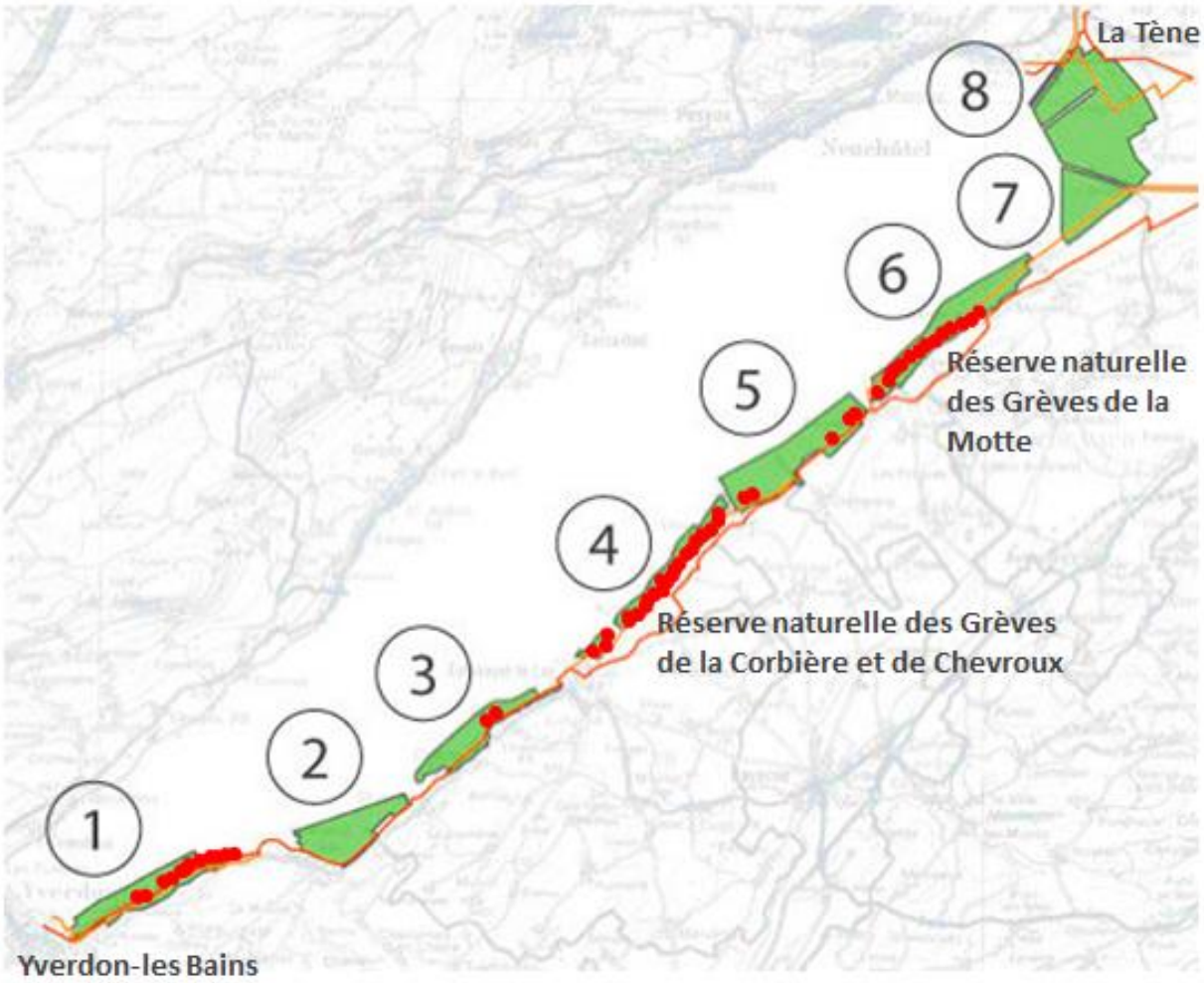


Fig. 5 : localisation des huit réserves naturelles de la Grande-Cariçaie situées sur la RSLN, entre Yverdon-les Bains et La Tène. La réserve n°4 est la réserve naturelle des Grèves de la Corbière et de Chevroux. La réserve n°6 est la réserve naturelle des Grèves de la Motte. Les points rouges illustrent la répartition des pinèdes sur la RSLN. Carte tirée et modifiée de www.grande-caricaie.ch.

Sols

Etant donné la récente exondation des terres qui constituent l'actuelle RSLN (environ 150 ans), les processus pédogénétiques à l'œuvre sont donc, eux aussi, très récents (Cornali, 1992), et ce malgré d'importantes variations du niveau du lac durant les quelques siècles précédant la 1ère correction des eaux du Jura (Magny, 2004). Les sols, sur lesquels se sont implantées les pinèdes, sont peu profonds. La molasse

affleure. Ils sont pauvres en nutriments, calcaires, inondés en hiver et secs en été (www.grande-caricaie.ch). Ce sont ces caractéristiques qui ont permis au pin sylvestre, plante pionnière capable de supporter des milieux pauvres et des sols très secs comme très humides (Ellenberg, 1986), de s'y installer et ainsi, d'échapper à la concurrence des feuillus (Delarze et al., 2015).

2. Terrain

Stations étudiées

Les vingt stations, ayant fait l'objet de l'étude phytosociologique, correspondent aux pinèdes visitées par P. Cornali en 1984 dans le cadre de sa thèse sur l'écologie des pinèdes de la RSLN (Cornali, 1992). Parmi ces vingt stations, sept appartiennent à la réserve naturelle des Grèves de la Corbière et de Chevroux et treize autres appartiennent à la réserve naturelle des Grèves de la Motte (fig. 5). Afin de distinguer les relevés récents des relevés anciens réalisés par P. Cornali, le nombre 100 a été ajouté à chaque numéro de relevé. Ainsi au relevé 1 datant de 1984 correspond le relevé 101 effectué en 2018 et ainsi de suite. La superficie des stations varie entre 60 et 400 m^2, les relevés récents reprenant les superficies indiquées pour les relevés historiques (annexe A).

Pour des raisons de temps et de coûts, seules cinq stations ont fait l'objet des études dendrochronologique et pédologique. Parmi ces cinq stations, une appartient à la réserve naturelle des Grèves de la Corbière et de Chevroux et les quatre autres appartiennent à la réserve naturelle des Grèves de la Motte. La présence d'essences arborescentes autres que le pin sylvestre et le nombre d'individus carottables, c'est-à-dire les individus ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DBH, à 1,3 m du sol), supérieur à 7 cm, ont été les deux critères déterminant pour le choix de ces cinq stations.

L'emplacement des stations a été retrouvé à l'aide des coordonnées géographiques calculées par P. Cornali d'après les points qu'il avait placé sur des cartes au 1 : 5 000 lors de ses visites en 1984, soit une coordonnée centrale par station (annexe A et B). Sur place, la comparaison de la végétation appartenant à la strate arborescente avec celle observée par P. Cornali en 1984 a permis d'affiner la relocalisation des stations. Toutefois, il n'était pas possible de confirmer les emplacements des stations au mètre près.

Étude phytosociologique

Une fois l'emplacement et la superficie d'une station définis, un relevé de végétation a été effectué selon les méthodes appliquées par P. Cornali en 1984 (exemplaire type de fiche de relevé en annexe C). La végétation a été répartie en trois strates : la strate arborescente composée des ligneux d'une hauteur supérieure à 6 m ; la strate arbustive composée des ligneux ayant une hauteur comprise entre 0,5 et 6 m ; la strate herbacée composée des herbacées et des ligneux d'une hauteur inférieure à 0,5 m. Pour les trois strates, le recouvrement, par la végétation ligneuse ou herbacée, a été estimé visuellement en pourcents. Pour chaque strate, toutes les espèces présentes ont été identifiées (Aeschimann et Burdet, 2005 ; Eggenberg et al., 2018 ; Eggenberg et Möhl, 2013) et leur abondance évaluée selon l'échelle de Braun-Blanquet (tab. 1, Braun-Blanquet, 1964). Enfin, les caractéristiques stationnelles, telles l'altitude et les coordonnées aux quatre angles, avec une précision indiquée de ± 3 m, ont été obtenues à l'aide d'un GPS Garmin etrex 10. L'altitude a été réévaluée ultérieurement, avec d'avantage de précision, grâce au visualiseur de cartes du Géoportail fédéral suisse (www.geo.admin.ch). Les relevés de végétation ont été effectués entre le 14 juin et le 6 août 2018.

Fig. 6 : pinède à molinie de la station 114. Pinus sylvestris *domine au-dessus d'un sous-bois riche en espèces arbustives, tel* Juniperus communis s.str*, et dont la surface au sol est recouverte de poacées, telle* Molinia arundinacea*, et de cypéracées, tel* Carex flacca*.*

Tab. 1 : codes des échelles d'abondance-dominance de Braun-Blanquet (1964) utilisés sur le terrain pour effectuer les relevés de végétation et codes correspondants aux recouvrements moyens et à la dominance numérique utilisés pour les analyses statistiques.

Recouvrement [%]	Code des relevés		Code des analyses	
	1984	2018	Dom. num.	Rec. moyen [%]
1 - 2 individus	r	r	0,1	0,05
< 1	+	+	0,5	0,5
1 - 5	1	1	1	3
5 - 15	2	2a	2	15
15 - 25		2b		
25 - 50	3	3	3	37,5
50 - 75	4	4	4	62,5
> 75	5	5	5	87,5

Étude dendrochronologique

Sur les cinq stations mentionnées précédemment, des carottes ont été prélevées sur des individus ayant un DBH supérieur à 7 cm. Après mesure de la circonférence de l'arbre, à une hauteur de 1,3 m par rapport à la surface du sol et à l'aide d'un mètre ruban de couturière, une carotte a été prélevée, à cette même hauteur (hauteur standard pour le prélèvement de carottes, Schweingruber, 1988), suivant l'orientation sud-nord et à l'aide d'une tarière de Pressler (fig. 7). La carotte a ensuite été directement collée, à l'aide d'une colle à bois, dans une glissière sur laquelle était inscrit le numéro de la carotte et le nom de l'espèce (fig. 8).

Par station, un carottage de dix pins et de 15 individus d'essences autres que le pin (feuillus et épicéa) a été réalisé. Si une station comptait moins de dix pins ou moins de 15 individus d'essences autres à l'intérieur de ses limites, les arbres les plus proches de la station ont été carottés. De plus, si une station comptait plus de dix pins, les arbres à carotter étaient choisis en fonction de leur représentativité, basée sur le DBH, au niveau de la population de pins. Ainsi, 44 pins et 27 individus autres que le pin ont été carottés dans les limites des stations et six pins et 52 individus autres que le pin ont été carottés aux abords des stations. Les coordonnées géographiques de chaque individu carotté ont été obtenues à l'aide d'un GPS Garmin etrex 10. Le carottage a été réalisé entre le 18 et le 27 septembre 2018, une fois la saison de croissance des arbres quasiment achevée.

Aussi, une quantification des jeunes arbres non carottables, c'est-à-dire des arbres ayant un DBH inférieur à 7 cm, a été effectuée. Tous les individus appartenant à la catégorie des arbres (en termes de potentiel de l'espèce et non en termes de taille) ont été identifiés (Eggenberg et al., 2018). Leur circonférence, à la base du tronc, a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban de couturière afin d'en déduire le diamètre. Au total, 76 jeunes arbres ont été recensés. La quantification a été réalisée entre le 18 et le 27 septembre 2018.

Fig. 7 : tarière de Pressler vissée dans un pin sylvestre à hauteur de 1,3 m du sol pour le prélèvement d'une carotte.

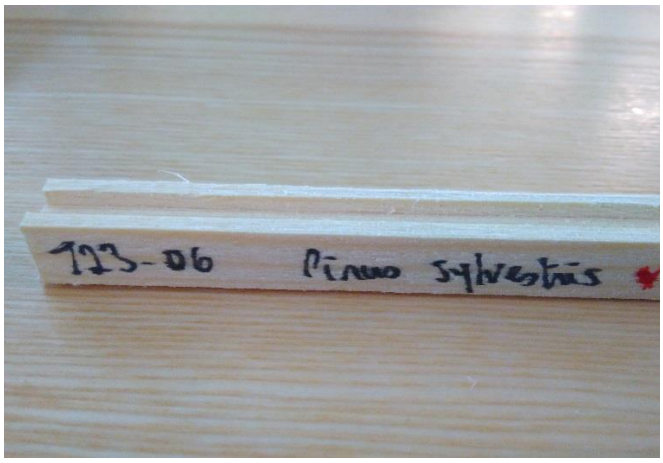


Fig. 8 : glissière sur laquelle est collée une carotte prélevée sur un pin sylvestre.

Étude pédologique

Toujours sur les cinq mêmes stations, des profils de sol ont été décrits et des échantillons de sol ont été prélevés. Une fosse pédologique a été creusée au centre de la station mais toujours dans un espace suffisamment dégagé pour faciliter le travail et à distance des grands arbres afin que des racines trop volumineuses n'entravent pas le creusage. Les coordonnées géographiques de la fosse ont été obtenues à l'aide d'un GPS Garmin etrex 10. Le travail a été effectué à l'aide d'une pelle et d'une pelle américaine jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de creuser davantage (sols peu profonds, soit une quarantaine de centimètres). Les différents horizons du profil ont été délimités selon des critères visuels tels un changement de couleur ou de structure et selon des critères tactiles tel un changement de texture. La description complète a été réalisée selon le protocole de description des sols (Gobat, 2013). Ainsi, les descripteurs suivants ont été évalués : couleur, squelette, structure, texture, porosité, propriétés mécaniques, taches d'hydromorphie, matière organique, racines et organismes vivants (exemplaire type de fiche de description en annexe D). Le pH a été mesuré selon la méthode Hellige et la teneur en carbonate estimée selon le test d'effervescence à l'acide chlorhydrique (HCl 6 M). Les informations récoltées, ainsi que la clé de détermination des sols (Gobat et Le Bayon, 2014), fondée sur le *Référentiel pédologique 2008* (Baize et Girard, 2009), ont permis une première détermination, sur le terrain, du nom des horizons et du sol. En parallèle, les formes d'humus ont été déterminées selon Zanella et al. (2018) (Le Bayon, 2018). Après obtention des résultats d'analyse des sols au laboratoire, la dénomination des horizons et du sol a été précisée et le sol a été nommé, en complément, selon la WRB (*World reference base for soil resources 2014*, IUSS Working Group WRB, 2015).

Pour chaque horizon décrit, un échantillon de sol a été prélevé. Ce prélèvement a été effectué en commençant par l'horizon le plus en profondeur, puis en remontant le profil afin d'éviter toute contamination par de la terre provenant de l'horizon supérieur. Au total, vingt échantillons ont été récoltés puis stockés à température constante (environ 18 °C) avant d'être transportés au laboratoire de pédologie de l'Université de Lausanne. La description des profils de sol et le prélèvement des échantillons ont été réalisés entre le 31 juillet et le 7 août 2018.

Fig. 9 : atelier de ponçage des carottes. Les carottes ont été poncées à l'aide d'une ponceuse à bande et de papier abrasif à grain très fin.

Fig. 10 : détail des cernes. Les fibres du bois initial sont larges et de couleur claire tandis que les fibres du bois final sont étroites et de de couleur foncée.

3. Laboratoire

Analyse des carottes

Afin de pouvoir visualiser correctement les cernes sous la loupe binoculaire, les carottes ont été poncées, une première fois, à l'aide d'une ponceuse à bande PBS 75 A et d'une bande de papier abrasif à grain très fin P240 (fig. 9). Une finition manuelle à l'aide de papier abrasif à grain encore plus fin K150 a permis de lisser et d'homogénéiser la surface à observer. De plus, lorsque la limite entre les cernes était particulièrement difficile à observer, comme c'est le cas pour certains feuillus (surtout frêne et merisier), la carotte a été huilée afin de créer un contraste entre les fibres étroites du bois final et les fibres plus larges du bois initial du cerne suivant (fig. 10).

Les carottes ont été mesurées à l'aide d'une station de mesure des cernes LINTAB™ (plateau mobile permettant de déplacer précisément la carotte), équipée d'une loupe binoculaire Leica S8 APO reliée à un ordinateur. Le logiciel TSAP-Win (Rinntech®) a permis d'enregistrer et d'exporter les données relatives au nombre et à la largeur des cernes de chaque carotte.

Analyses des échantillons de sols

Afin de pouvoir procéder aux analyses de laboratoire, les vingt échantillons ont été séchés à l'étuve à 45 °C, durant une semaine. Ils ont ensuite été tamisés à 2 mm afin de ne conserver que la fraction fine du squelette. Les mesures du pH, de la granulométrie, de l'humidité résiduelle et de la perte au feu ont été réalisées sur cette fraction. Environ 20 g de la fraction fine ont été finement broyés à l'agate. Le dosage des carbonates a été réalisé sur cette fraction broyée. Les protocoles détaillés suivis pour ces mesures sont consultables en annexe E.

pH H_2O et pH KCl

À partir d'un échantillon de sol, deux types de pH peuvent être mesurés : le pH H_2O qui rend compte de l'acidité active du sol et le pH KCl qui rend compte de l'acidité d'échange du sol. Les mesures ont été effectuées à partir d'un mélange pondéral de sol/eau désionisée ou solution KCl 1M dans la proportion 1/2,5. Après agitation pendant une heure et décantation pendant 30 minutes, les pH ont été mesurés à l'aide d'un pH-mètre Thermo Scientific Orion Star A111.

Granulométrie

La granulométrie laser permet de connaître la répartition de la taille des particules de moins de 2 mm d'un échantillon et donc la texture du sol. Les échantillons ayant été considérés comme limoneux-argileux, la quantité de terre fine nécessaire a été estimée à 0,8 g environ. Les carbonates étant présents abondamment dans les sols échantillonnés, les échantillons n'ont pas été préalablement décarbonatés afin que les résultats soient le reflet de la véritable texture du sol. La destruction de la matière organique (MO) a nécessité l'ajout quotidien d'eau oxygénée (solution de peroxyde d'hydrogène 10 et 35 %) durant deux semaines avant de procéder à la dispersion des particules minérales par ajout de Calgon (solution d'hexamétaphosphate de sodium 40 g/L). La mesure de la taille des particules a été obtenue à l'aide de l'appareil Beckman Coulter LS 13 320 Laser Diffraction Particule Size Analyser.

Humidité résiduelle

L'humidité résiduelle correspond à la perte de masse des échantillons, préalablement séchés à 45 °C, après séchage à 105 °C, durant 24 h. Elle a été mesurée afin d'exprimer le taux de MO et le taux de carbonate en fonction de la masse sèche des échantillons. Les mesures de l'humidité résiduelle ont été couplées à celles de la perte au feu et, de ce fait, ont été effectuées sur environ 10 g de sol.

Perte au feu

La perte au feu correspond à la perte de masse des échantillons après calcination à 450 °C, durant 4 h. Seule la fraction minérale n'est pas détruite bien que certaines fractions hydratées et mal cristallisées puissent être affectées. Ce qui est brûlé correspond donc pour l'essentiel à la fraction organique de l'échantillon. Ainsi, il est possible de déterminer le taux de MO.

Dosage des carbonates

Le dosage des carbonates est effectué par perte de masse lorsque des taux élevés en carbonate sont attendus. La destruction des carbonates a été réalisée par ajout d'acide (solution d'acide chlorhydrique 10 %). Les taux de carbonate ont été calculés après correction des résultats selon l'humidité résiduelle.

4. Analyses des données

L'ensemble des analyses statistiques a été effectué à l'aide du logiciel R version 3.4.3 (R Core Team 2017) et à l'aide des packages *labdsv* et *vegan*. Les analyses des données dendrochronologiques ont, quant à elles, été effectuées à l'aide du logiciel Microsoft Excel 2016.

Données phytosociologiques

Actualisation et transformation des données

Afin de pouvoir comparer les relevés de végétation datant de 1984 avec ceux datant de 2018, certaines données ont été modifiées. Les noms d'espèces anciennement utilisés ont été actualisés. Concernant l'abondance des espèces, les codes 2a (de 5 à 15 %) et 2b (de 15 à 25 %) de l'échelle de Braun-Blanquet ont été utilisés en 2018 alors que seul le code 2 (de 5 à 25 %) a été utilisé en 1984. De ce fait, 2a et 2b ont été regroupés sous le code 2 (tab. 1). Enfin, les codes ont été transformés pour les analyses statistiques. Afin de ne pas donner trop d'importance aux espèces ayant un recouvrement élevé, la dominance numérique a été choisie pour le calcul des indices de Simpson et de Bray-Curtis (Wildi, 2013). Elle a également été choisie pour effectuer le groupement. En revanche, le recouvrement moyen (tab. 1) a été utilisé pour l'analyse en composantes principales (ACP) dont les données ont ensuite subi une transformation de Hellinger, réduisant ainsi l'importance des espèces très abondantes (Borcard et al., 2011). Il a également été choisi pour l'analyse des valeurs écologiques (Landolt et al., 2010).

Indices de diversité

La richesse spécifique, sans redondance des espèces présentes dans plusieurs strates, a permis d'avoir une première estimation de l'évolution du nombre d'espèces entre 1984 et 2018. L'indice de diversité de Simpson, qui tient compte du recouvrement respectif des espèces, a permis d'affiner cette évolution en donnant moins de poids aux espèces à faible recouvrement, permettant de réduire l'influence

d'efforts d'inventaires potentiellement différents et de donner une valeur plus proche d'une diversité fonctionnelle (Vittoz et Matteodo, 2017). L'indice de Bray-Curtis, qui tient aussi compte du recouvrement respectif des espèces, a permis de quantifier le *turn over* ou remplacement des espèces au sein de chaque station entre 1984 et 2018. En comparant les communautés de 1984 entre elles et les communautés de 2018 entre elles, ce même indice a aussi permis d'évaluer si les communautés actuelles tendent vers un même climax. Enfin, afin de connaître la significativité des différences observées entre 1984 et 2018, des tests non paramétriques de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été effectués.

Analyses en composantes principales (ACP)

L'ACP a permis de visualiser, grâce à une projection sur deux axes expliquant le maximum de variance dans les données, la position des relevés les uns par rapport aux autres et ainsi d'observer d'éventuels déplacements dans la composition floristique des communautés entre 1984 et 2018. La significativité des déplacements a été testée à l'aide d'une analyse de variance multivariée (MANOVA).

Groupement

Le groupement a permis de rechercher les similitudes ou les discontinuités entre relevés et ainsi de former des groupes de relevés semblables. La distance entre relevés a été calculée à l'aide de l'indice de Bray-Curtis et le groupement a été réalisé selon la méthode de Ward. Bien que la combinaison entre méthode de Ward et indice de Bray-Curtis n'est pas optimale, étant donné que ce dernier n'est pas une distance euclidienne, cette combinaison donne de bons résultats (Vittoz et Matteodo, 2017) et ce, notamment dans la présente étude. Le choix du nombre optimal de groupes a été basé sur la corrélation de la matrice de distance avec des matrices binaires produites en coupant le dendrogramme à différents niveaux (Borcard et al., 2011). Le calcul de la valeur indicatrice de chaque espèce pour chaque groupe et le calcul de la significativité de celle-ci ont permis de définir quelles sont les espèces différentielles de chaque groupe (Dufrêne & Legendre, 1997 ; Borcard et al., 2011) et ainsi, d'établir un tableau de végétation trié basé sur le groupement et mettant en évidence les espèces différentielles des groupes.

Facteurs écologiques

Les valeurs de Landolt (Landolt et al., 2010) ont permis de déterminer les changements écologiques amorcés par les pinèdes. Par station, la moyenne, pondérée par le recouvrement des espèces, a été calculée pour la température, la continentalité, la lumière, les substances nutritives, l'humus, la dispersité, l'humidité, l'humidité changeante et la réaction. La significativité des différences observées entre les valeurs obtenues pour 1984 et celles obtenues pour 2018 a été établie à l'aide de tests non paramétriques de Wilcoxon-Mann-Whitney.

Afin d'avoir des données cohérentes et statistiquement utilisables, certains ajustements ont été préalablement effectués. Les espèces, présentes dans plusieurs strates de végétation n'ont été retenues qu'une seule fois selon la strate pour laquelle le recouvrement était le plus important. Trois espèces ont été supprimées (*Rosa* sp., *Epipactis* sp. et *Platanthera* sp.) du fait de l'impossibilité de déterminer les individus jusqu'au niveau de l'espèce. *Pinus sylvestris* et *Betula pendula* ont, eux aussi, été supprimés. Ces deux espèces, manifestant un comportement indifférent quant à certains facteurs écologiques (Lauber et al., 2012), possèdent quatre valeurs de Landolt indéterminées (notées x). Enfin, pour les espèces possédant seulement une à deux valeurs indéterminées (*Deschampsia cespitosa*, *Picea abies*, *Ranunculus auricomus* et *Rubus fruticosus* aggr.), la valeur médiane 3 a été attribuée.

De plus, les valeurs écologiques selon Landolt et al. (2010), les stratégies CSR selon Grime (1974) et les milieux de prédilection selon Delarze et al. (2015) ont été extraits pour les espèces non retrouvées en 2018 et les nouvelles espèces observées en 2018, afin d'affiner la trajectoire écologique prise par les pinèdes (annexe F). Pour chaque valeur écologique, la moyenne pondérée, par l'occurrence des espèces, a été calculée, aussi bien pour les espèces qui ont disparu, que pour les nouvelles espèces.

Données dendrochronologiques

Les données de quantification des jeunes arbres et de carottage ont été traitées ensemble afin d'établir une continuité dans l'étude de l'évolution des espèces arborescentes, qu'elles soient représentées par des individus jeunes ou des individus adultes. Les graphiques obtenus concernent la colonisation des stations par le pin sylvestre et les autres essences sur la période 1928 - 2003, la colonisation des stations par les jeunes individus sur la base de leur diamètre à la base du tronc (considéré comme proportionnel à l'âge) et la distribution des individus en fonction de l'espèce.

Données pédologiques

Ajustement et transformation des données

Des deux pH mesurés au laboratoire, seul le pH KCl a été utilisé dans l'analyse. Les valeurs négatives du taux de MO des horizons 110.5 et 116.5, obtenues après calcul suite à la mesure de la perte au feu au laboratoire (MO = PAF % - ((2.04*T) / 100), Howard, 1965), ont été remplacées par 0. Enfin, les valeurs nulles des taux de sables fins et grossiers, des horizons 123.2 et 123.3, obtenues par la granulométrie laser, ont été remplacées par une valeur positive infime afin de pouvoir appliquer la transformation *centered log ratio*. Cette transformation convertit des données *closes* (dont la somme est toujours égale à 100 %) en données indépendantes, tout en conservant les distances entre les données. L'utilisation de ces données transformées est alors possible pour effectuer des analyses multivariées (Verrecchia, in prep.). Les autres données, ont, quant à elles, été centrées et réduites afin de pouvoir s'affranchir des diverses unités.

Analyse en composantes principales

Le pH, les taux de carbonate et de MO, ainsi que les taux de sables, limons et argiles, répartis selon cinq classes granulométriques, ont été utilisés comme variables environnementales pour comparer quantitativement les horizons des cinq sols étudiés. Le nombre d'échantillons étant peu élevé (20 au total), l'ACP a pour but essentiel de permettre une meilleure visualisation des résultats.

Fig. 11 : pinède à molinie de la station 112. La strate arborescente est dominée par le pin sylvestre La strate arbustive est dense et riche en espèces. La strate herbacée est majoritairement recouverte de poacées et cypéracées.

III. Résultats

1. Milieu actuel et diversités du milieu

Milieu actuel

A partir des espèces observées en 2018 dans les 20 stations (annexe G) et selon la classification TypoCH, basée sur le Guide des milieux naturels de Suisse (Delarze et al., 2015), le milieu forestier étudié (fig. 11) a été rattaché à l'alliance du *Molinio-Pinion* Ellenberg et Klötzli 72, soit à la pinède subatlantique des pentes marneuses, du fait de la forte dominance de *Pinus sylvestris* dans la strate arborescente, des abondances élevées de *Ligustrum vulgare* et de *Viburnum lantana* dans la strate arbustive et de *Carex flacca* et *Molinia arundinacea* dans la strate herbacée. Sur les 79 espèces recensées, quinze espèces sont représentatives des pinèdes thermophiles mais seulement neuf espèces du *Molinio-Pinion* (tab. 2). 22 espèces sont fréquentes des forêts inondables, soit de l'*Alnion incanae* Pawlowski 28, soit du *Fraxinion excelsioris* Moor 76, soit de ces deux alliances. Dix-sept espèces sont fréquentes des hêtraies, soit du *Cephalanthero-Fagenion* Tüxen 58, soit du *Galio odorati-Fagenion* T. Müller 66, soit de ces deux alliances. De plus, 25 espèces sont fréquentes des forêts de feuillus autres que les hêtraies, avec notamment dix espèces du *Carpinion*. Enfin, douze espèces d'arbustes sont fréquentes des formations buissonnantes, soit du *Berberidion vulgaris* Br.-Bl. 50, soit du *Pruno-Rubion fruticosi* Tüxen 52, soit de ces deux alliances. Ces dernières sont aussi naturellement présentes dans les différents milieux forestiers.

Selon la Liste des milieux prioritaires, la priorité au niveau national du *Molinio-Pinion* est élevée et il est absolument nécessaire de prendre des mesures pour sa conservation. Au niveau international, la responsabilité de la Suisse est moyenne (www.infoflora.ch). Selon la Liste rouge des milieux, ce milieu est considéré comme vulnérable en Suisse (Delarze et al., 2015).

Richesse spécifique et diversité selon Simpson

Sur l'ensemble des stations visitées en 2018, 79 espèces de plantes vasculaires ont été identifiées, contre 71 en 1984, correspondant à une augmentation de 11 % de la richesse spécifique globale, sans redondance des espèces présentes dans plusieurs strates de végétation (tab. 3). Par station, cette augmentation est de 20 % avec, en moyenne, 28 espèces identifiées en 2018 contre 23 en 1984. 52 espèces sont à la fois présentes en 1984 et en 2018. En 2018, 27 nouvelles espèces ont été observées alors que 19 espèces n'ont pas été retrouvées (annexe F). Enfin, sur les vingt stations visitées, trois stations ont

vu leur richesse spécifique diminuer aux cours des 34 années qui ont séparé les deux visites (paires de relevés 2/102, 19/119 et 23/123, annexe A). Pour deux stations, la richesse spécifique est restée inchangée (paires de relevés 10/110 et 22/122).

En tenant compte du recouvrement respectif des espèces, l'indice de diversité de Simpson permet de relativiser la richesse spécifique en donnant moins de poids aux espèces à faible recouvrement. En moyenne, celui-ci est de 16,7 en 1984 et de 24,8 en 2018. Ainsi, l'augmentation de la diversité au sein des stations est confirmée (fig. 12, test pairé de Wilcoxon-Mann-Whitney, *p-value* < 0.01), d'autant que toutes les stations ont vu leur diversité de Simpson augmenter au cours des 34 années qui séparent les deux visites.

Tab. 2 : nombres d'espèces fréquentes des milieux les plus représentés au sein des pinèdes de la RSLN. Ces nombres d'espèces sont détaillés en nombres total, d'arbres, d'arbustes et d'herbacées. À noter qu'une espèce peut-être fréquente de plusieurs milieux.

Milieu	Nombre d'espèces			
	Total	Arbres	Arbustes	Herbacées
Pinèdes thermophiles	15			
Molinio-Pinion	9	2	3	4
Forêts inondables	22			
Alnion incanae	13	7	-	6
Fraxinion	13	7	-	6
Hêtraies	17			
Cephalanthero-Fagenion	8	5	-	3
Galio-Fagenion	10	3	-	7
Autres forêts de feuillus	25	11	9	5
Carpinion	10	6	1	3
Formations buissonnantes	12			
Berberidion	5	-	5	-
Pruno-Rubion	8	-	8	-

Tab. 3 : à gauche, richesses spécifiques totale et moyenne par station, sans redondance des espèces présentes dans plusieurs strates de végétation, observées en 1984 et en 2018 et augmentation de la richesse spécifique en % entre 1984 et 2018. À droite, répartition des espèces en espèces communes aux années 1984 et 2018, espèces non retrouvées en 2018 et espèces nouvelles pour 2018.

	Richesse spécifique			
	Total	Moyenne		Nombre d'espèces
1984	71	23	Communes	52
2018	79	28	Non retrouvées	19
Augmentation [%]	11	20	Nouvelles	27

Dissimilarité selon Bray-Curtis

D'une part, lorsque l'indice de diversité de Bray-Curtis est calculé pour chaque paire de relevés, celui-ci permet de quantifier le *turn over* des espèces, entre 1984 et 2018, au sein de chaque station. Plus cet indice est proche de 1, plus le *turn over* est important. Il est compris entre 0,38 et 0,57 (fig. 13) et s'élève à 0,48 en moyenne. De plus, il n'est pas corrélé à la superficie des stations (R^2 = 0.0075).

D'autre part, en quantifiant la dissimilarité des stations de 1984 entre elles et la dissimilarité des stations de 2018 entre elles et en comparant ces dissimilarités, ce même indice permet aussi d'évaluer si les communautés actuelles tendent vers un même climax. La dissimilarité moyenne des stations est de 0,46 en 1984 et de 0.44 en 2018. La diminution observée est très significative (fig. 13, test de Wilcoxon-Mann-Whitney, *p-values* < 0.01). Les communautés de 2018 sont donc plus semblables entre elles que ne l'étaient les communautés de 1984, indiquant une direction vers un même climax.

2. Evolution de la végétation

Evolution de la composition floristique des communautés

L'ACP montre des déplacements importants des communautés de 1984, aboutissant aux communautés observées en 2018 (fig. 14), exception faite d'une seule paire de communautés (paire de relevé 24/124, flèche noire). Ces déplacements sont très significatifs (*p-value* < 0.01). Ils s'expliquent par des changements floristiques conséquents et relativement semblables entre les stations. Les axes 1 et 2 expliquent, à eux seuls, 32 % de la variance totale (PC1 : 22 % et PC2 : 10,3 %).

Groupement des communautés et espèces différentielles

Le groupement sépare de manière nette les communautés de 2018 de celles de 1984, à l'exception des communautés 6 et 24 qui, bien qu'observées en 1984, sont groupées avec les communautés de 2018 (fig. 15).

Les communautés de 1984 (annexe H, groupe 1) sont essentiellement caractérisées par les recouvrements de *Pinus sylvestris* au niveau de la strate arborescente*, Viburnum lantana* et *Quercus robur* au niveau de la strate arbustive et *Calamagrostis varia* au niveau de la strate herbacée. Les communautés de 2018, ainsi que les communautés 6 et 24 (annexe H, groupe 2), sont essentiellement caractérisées par les recouvrements de *Crataegus monogyna* et *Fraxinus excelsior* au niveau de la strate arborescente, *Crataegus monogyna*, *Fagus sylvatica*, *Lonicera xylosteum* et *Rubus fruticosus* au niveau de la strate arbustive et *Carex flacca* au niveau de la strate herbacée. Davantage d'espèces différentielles caractérisent le groupe 2 (vingt espèces pour le groupe 2 contre six pour le groupe 1).

Valeurs écologiques selon Landolt

Facteurs du climat

Par station, la valeur de température (T) augmente de manière significative entre 1984 et 2018 (*p-value* = 0,035, fig. 16). En moyenne, elle passe de 3,44 à 3,49. Tout logiquement, la valeur de continentalité (K) diminue (non significatif, non illustré). La valeur de lumière (L) diminue mais cette diminution est non significative (fig. 16).

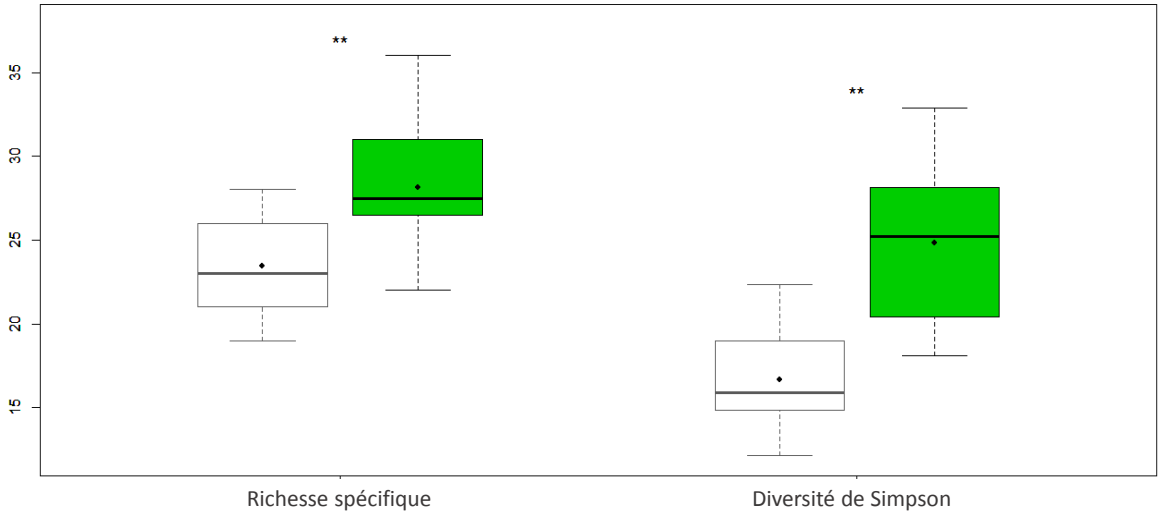


*Fig. 12 : distributions de la richesse spécifique et de la diversité de Simpson en 1984 (boîtes vides aux bordures grises) et en 2018 (boîtes vertes). Les points représentent les moyennes. La différence entre la richesse spécifique de 1984 et celle de 2018 est très significative. La différence entre la diversité de Simpson de 1984 et celle de 2018 est aussi très significative (Tests pairés de Wilcoxon-Mann-Whitney : p-values < 0.01, **).*

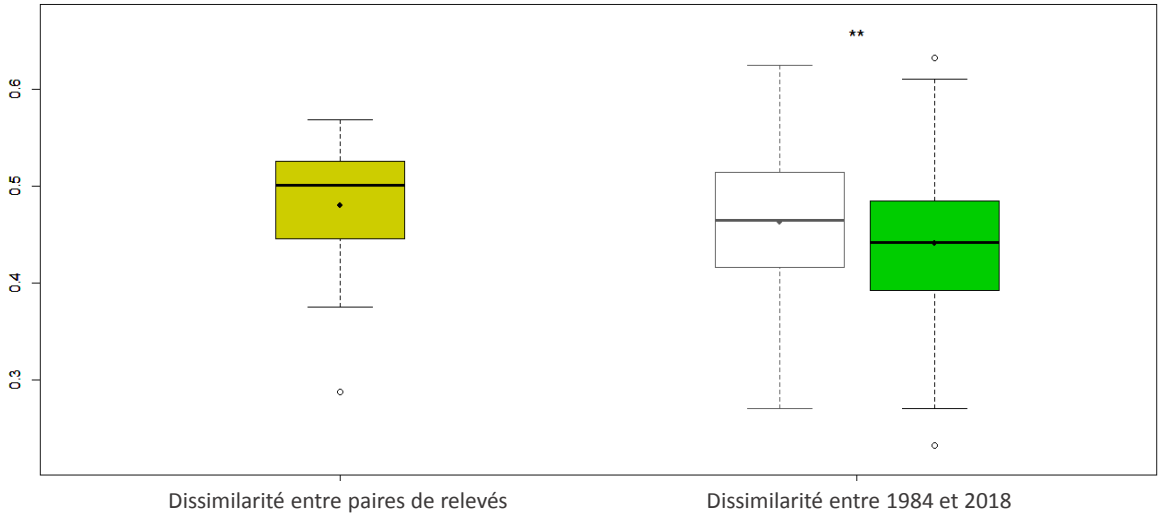


*Fig. 13 : distribution de la dissimilarité entre les paires de relevés, représentant le turn over des espèces entre 1984 et 2018, et de la dissimilarité des communautés de 2018 par rapport à celle des communautés de 1984. Les points représentent les moyennes de la dissimilarité de Bray-Curtis. La différence entre la dissimilarité des communautés de 1984 et celle des communautés de 2018 est très significative (Test non pairé de Wilcoxon-Mann-Whitney : p-values < 0.01, **).*

La comparaison de ces mêmes valeurs écologiques calculées uniquement pour les espèces non retrouvées en 2018 et nouvelles pour 2018 (annexe F) permet de confirmer ces observations. En effet, les nouvelles espèces, telles *Juglans regia* et *Rubus laciniatus* qui, de plus, sont des espèces subspontanées ou encore *Lonicera periclymenum*, affectionnent un climat plus chaud et plus doux (*p-value* pour T = 0,007 et *p-value* pour K = 0,001) et un couvert plus sombre (non significatif) que les espèces non retrouvées.

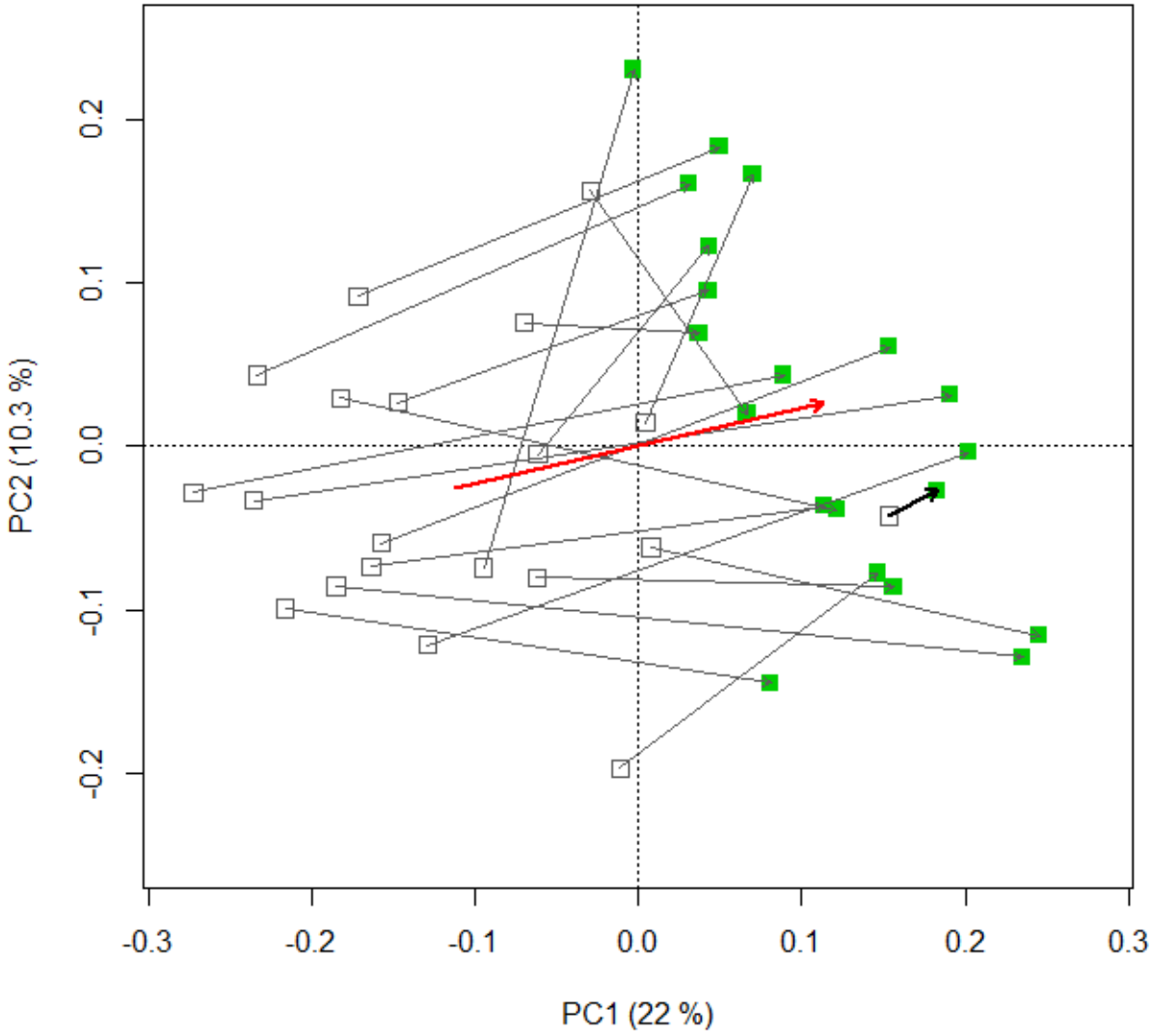


Fig. 14 : positionnement des communautés de 1984, représentées par un carré vide gris, et des communautés de 2018, représentées par un carré plein vert, sur la base de leur composition floristique. Chaque paire de communautés est reliée par une flèche grise qui illustre son déplacement, correspondant à un changement important de la composition. Les déplacements observés sont très significatifs (Manova : p-value < 0.01). Le déplacement moyen est illustré par une flèche rouge. Le déplacement de la paire 24/124, caractérisée par une composition très similaire, est illustré par une flèche noire. Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 22 et 10,3 % de la variance totale de l'analyse en composantes principales.

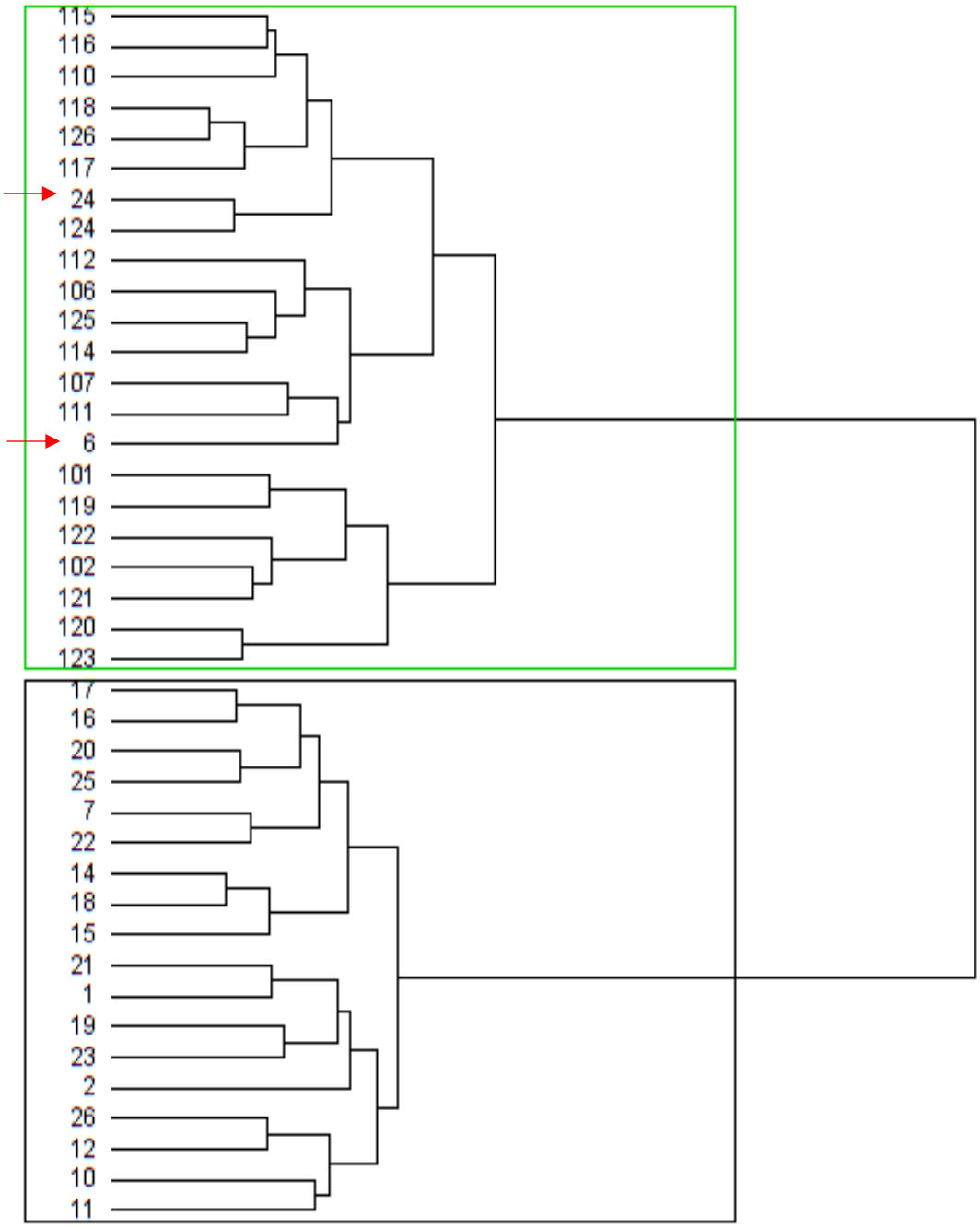


Fig. 15 : formation de deux groupes sur la base des distances calculées entre communautés. Le groupe, encadré en vert, contient l'ensemble des communautés observées en 2018, plus deux communautés observées en 1984, correspondant aux numéros 6 et 24 (flèches rouges). Le groupe, encadré en gris, contient exclusivement des communautés observées en 1984.

Facteurs du sol

Par station, la valeur de substances nutritives (N) augmente très significativement entre 1984 et 2018 (*p-value* = 0,001, fig. 16). En moyenne, elle passe de 2,58 à 2,80. En revanche, la valeur en humus ne varie que très peu (non significatif, non illustré). La valeur de dispersité (aération du sol, D) augmente significativement (*p-value* = 0,049, fig. 16). En moyenne, elle passe de 1,84 à 2,04 et s'approche ainsi de la valeur 3, représentative des sols perméables et bien aérés. La valeur d'humidité changeante (capacité de la plante à tolérer des changements d'humidité importants, W) diminue (non significatif, fig. 16) alors que la valeur d'humidité ne varie que très peu (non significatif, non illustré). Enfin, la valeur de réaction (pH, R) diminue mais non significativement (fig. 16).

La comparaison de ces mêmes valeurs écologiques calculées uniquement pour les espèces non retrouvées en 2018 et nouvelles pour 2018 (annexe F) permet, en partie, de confirmer ces observations. En effet, les nouvelles espèces, telle *Juglans regia*, se montrent plus exigeantes quant aux substances nutritives et à la dispersité du sol (*p-value* pour N = 0,001, non significatif pour D) que les espèces non retrouvées. De plus, elles se montrent moins tolérantes aux changements d'humidité (*p-value* pour W = 0,013). Bien que la valeur de réaction par station diminue entre 1984 et 2018, les nouvelles espèces semblent affectionner un pH du sol plus élevé (non significatif).

Autres facteurs écologiques

Stratégies CSR selon Grime

La principale stratégie sélectionnée, en réponse à différents facteurs environnementaux (Grime, 1974), par les espèces non retrouvées ou les nouvelles espèces pour 2018, est la compétition (C), suivi de la tolérance au stress (S, annexe F). Entre 1984 et 2018, deux espèces ligneuses, à la stratégie uniquement compétitive (CCC, *Salix alba* et *Rhamnus cathartica*), n'ont pas été retrouvées alors que cinq nouvelles espèces, aussi ligneuses et à la stratégie uniquement compétitive, ont fait leur apparition (*Acer campestre*, *Acer opalus*, *Clematis vitalba*, *Juglans regia* et *Salix viminalis*). De plus, parmi les six nouvelles espèces à la stratégie CCS, deux sont ligneuses (*Sorbus aria* et *Ulmus glabra*).

Milieux selon Delarze

Les espèces non retrouvées et les nouvelles espèces pour 2018 sont représentatives de divers milieux selon Delarze et al., 2015 (bas-marais, prairies humides, formations buissonnantes…), mais ces milieux sont essentiellement forestiers (pinèdes thermophiles, hêtraies…). En effet, l'occurrence, en terme du nombre d'espèces représentatives d'un milieu, des prairies humides est passée de 5 à 3 entre 1984 et 2018 (tab. 4 et annexe F). Il en va de même pour les formations buissonnantes (4 occurrences en 1984 contre 2 en 2018). En revanche, pour les divers milieux forestiers, leurs occurrences ont davantage varié. 5 espèces des forêts inondables, essentiellement aulnaie alluviale et frênaie humide, n'ont pas été retrouvées mais 9 nouvelles espèces, représentatives de ce milieu, ont été observées en 2018, notamment 6 espèces pour la frênaie humide. Il en va de même pour les autres forêts de feuillus. 3 espèces n'ont pas été retrouvées mais 7 nouvelles espèces ont été observées, notamment des espèces représentatives de la chênaie à charme et de la tillaie thermophile sur éboulis ou lapiez. Pour les hêtraies ainsi que pour les pinèdes thermophiles, le nombre d'espèces représentatives de ces milieux et non retrouvées est compensé par le nombre de nouvelles espèces (respectivement 4 et 5 et 2 et 2). Enfin, les forêts de conifères d'altitude ont perdu 3 représentantes sans compensation.

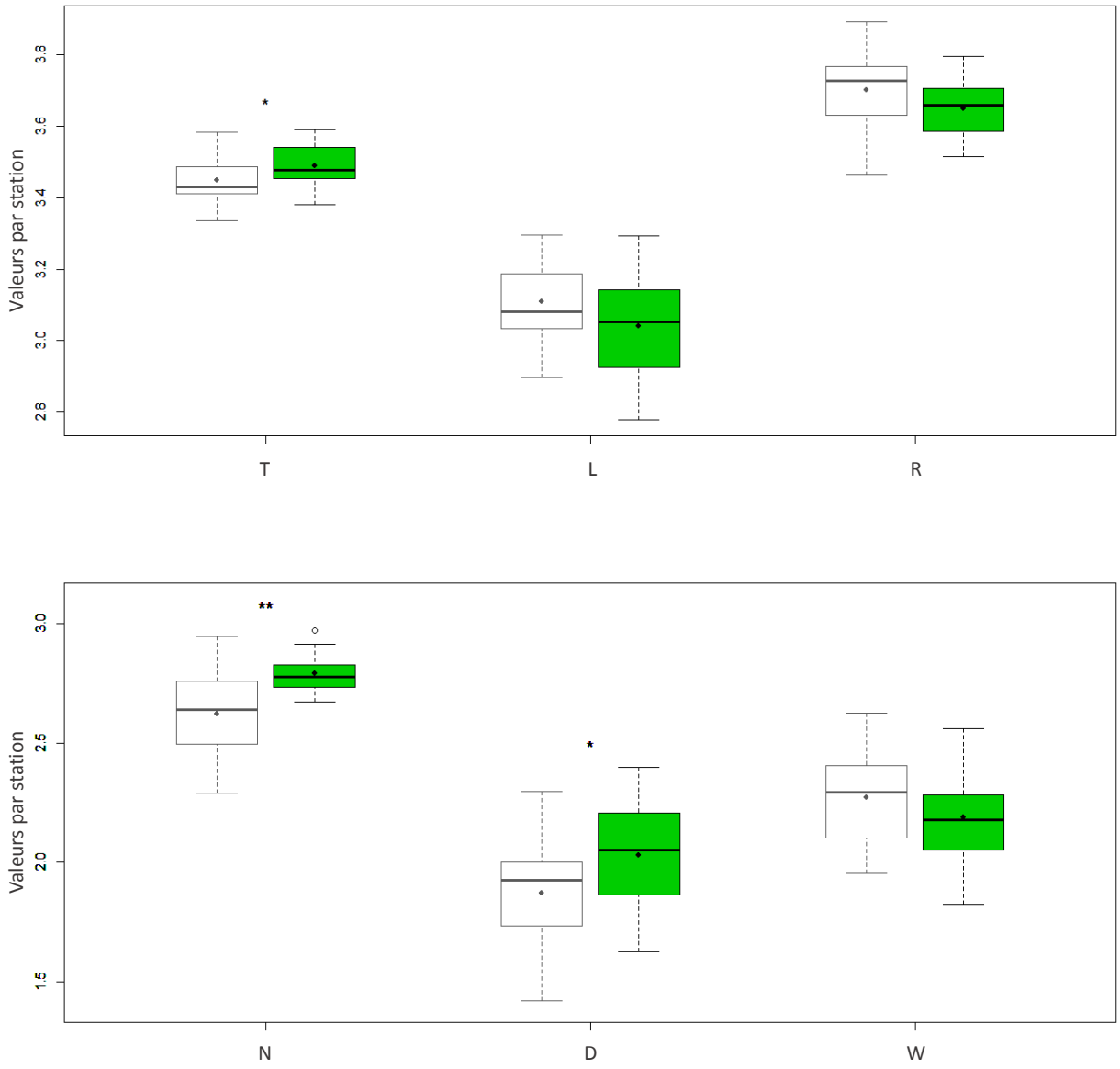


*Fig. 16 : distributions des moyennes, pondérées par le recouvrement des espèces, des valeurs écologiques de Landolt et al. (2010) calculées pour 1984 (boîtes vides aux bordures grises) et pour 2018 (boîtes vertes). Les valeurs illustrées sont la température (T), la lumière (L), les substances nutritives (N), la dispersité (D), l'humidité changeante (W) et la réaction (R). Les différences des valeurs de température et de dispersité entre 1984 et 2018 sont significatives (tests de Wilcoxon-Mann-Whitney : p-values < 0.05, *). La différence des valeurs de substances nutritives entre 1984 et 2018 est très significative (test de Wilcoxon-Mann-Whitney : p-values < 0.01, **).*

Tab. 4 : occurrence des milieux au sein des pinèdes. L'occurrence d'un milieu correspond au nombre d'espèces observées dans les pinèdes et considérées comme fréquentes de ce milieu.

Milieu	Occurrence	
	1984	2018
Bas-marais	0	2
Prairies humides	5	3
Prairies grasses	1	1
Friches à graminées	1	0
Lisières herbacées	1	1
Mégaphorbiaies, coupes forestières	1	1
Formations buissonnantes	4	2
Landes	1	0
Forêts inondables	5	9
Hêtraies	4	5
Autres forêts de feuillus	3	7
Pinèdes thermophiles	2	2
Forêts de conifères d'altitude	3	0
Terrains piétinés et rudéraux	0	1

Evolution des espèces arborescentes

Colonisation des stations

La colonisation des stations par des espèces arborescentes a débuté un peu avant les années 1930 (fig. 17). Le premier pin s'est installé en 1931. La colonisation par le pin a été forte et s'est poursuivie jusqu'à la fin des années 1950. Le dernier pin s'est installé en 1964. Le premier feuillu (*Fraxinus excelsior*) s'est installé en 1928. La colonisation des stations par les essences autres que le pin (feuillus et épicéas) s'est faite de manière progressive. Le plus jeune individu carotté est un *Picea abies* qui s'est installé en 2003. Cette colonisation se poursuit de manière exponentielle. En effet, les jeunes individus, c'est-à-dire ayant un DBH inférieur à 7 cm, sont d'autant plus nombreux que leur diamètre à la base est petit (fig. 18). 49,3 % des jeunes individus ont un diamètre à la base inférieur à 3 cm. En revanche, aucun jeune pin n'a été recensé.

Recouvrement par le pin sylvestre

Globalement, au niveau de la strate arborescente, le recouvrement par le pin sylvestre a diminué (fig. 19). En 1984, dix-sept des vingt stations avaient un recouvrement par le pin sylvestre compris entre 50 et 75 % contre seulement trois stations en 2018. En 2018, la majorité des stations (14) avait un recouvrement compris entre 25 et 50 %. Cette diminution est confirmée par la présence, sur le terrain, de pins couchés, certainement déracinés lors de tempêtes (fig. 20).

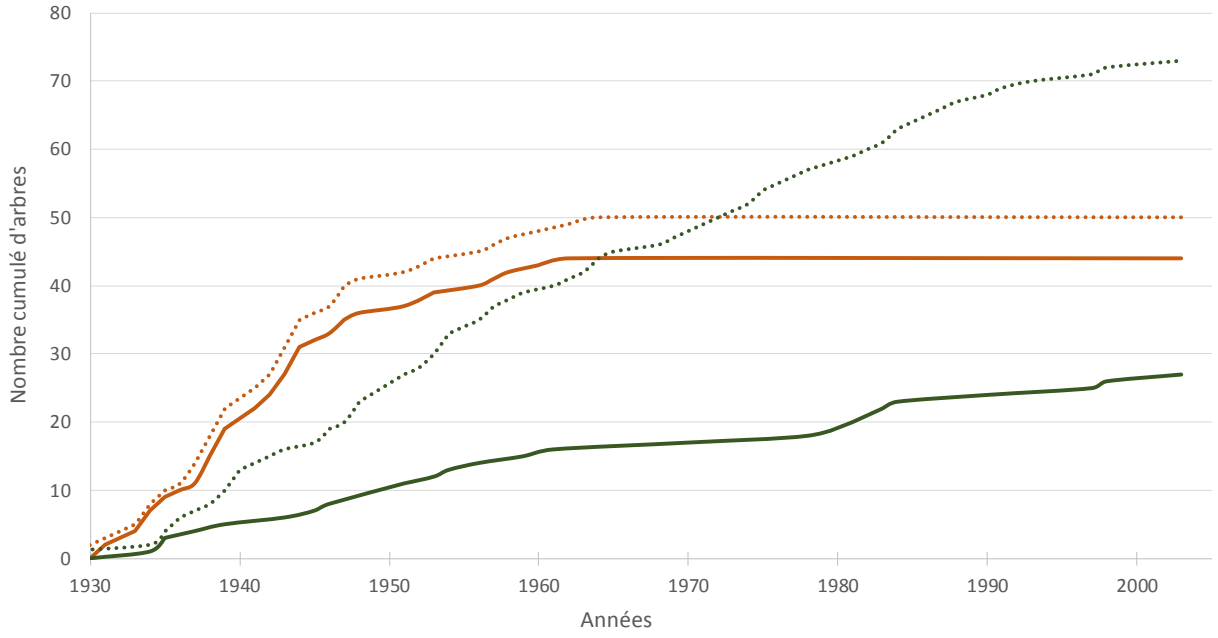


Fig. 17 : colonisation des stations par les individus ayant un DBH supérieur à 7 cm sur la période 1928 – 2003 et sur la base du décompte des cernes de 50 pins et 79 individus d'essences autres que le pin (feuillus et épicéa). La colonisation par le pin est illustrée en orange et celle des essences autres en vert. Les lignes pleines ont été tracées à partir des carottes prélevées dans les limites des stations. Les lignes pointillées ont été tracées à partir de l'ensemble des carottes prélevées.

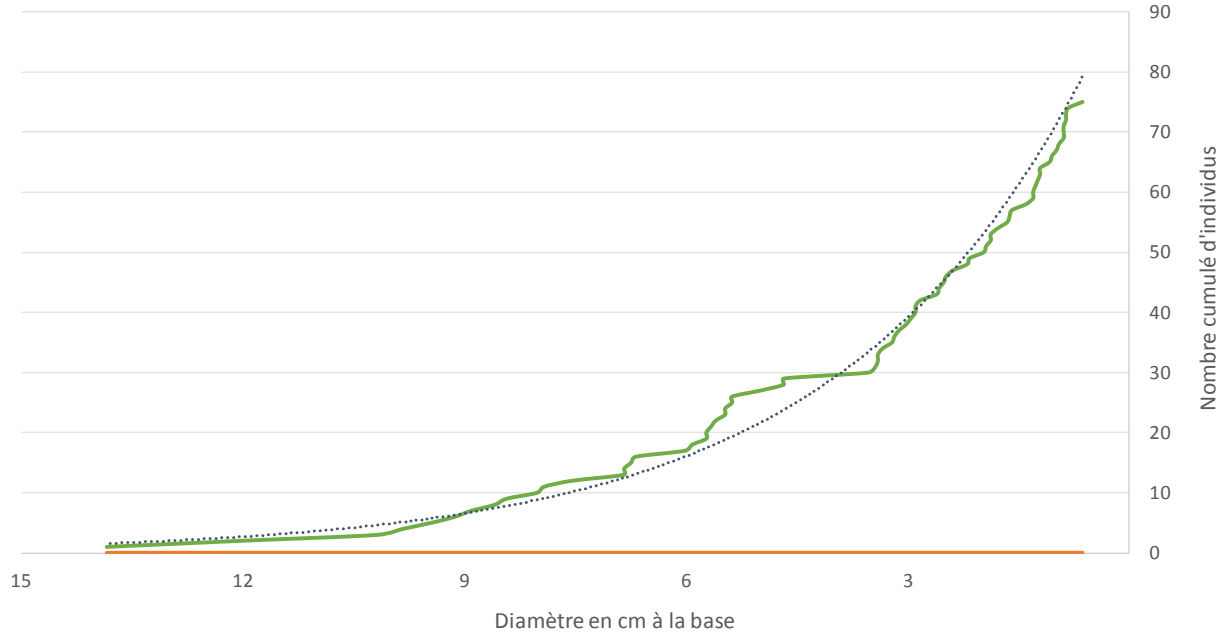


Fig. 18 : colonisation des stations par les individus ayant un DBH inférieur à 7 cm sur la base du diamètre à la base du tronc. Le diamètre a la base du tronc est considéré comme proportionnel à l'âge de l'individu. Plus le diamètre est important, plus l'individu est âgé. Le pin sylvestre est illustré en orange et les autres essences en vert. La ligne pointillée correspond à la ligne de tendance que suit la courbe, ici exponentielle.

Fig. 19 : strate arborescente de la station 120. Le recouvrement par le pin sylvestre a nettement diminué entre 1984 et 2018.

Fig. 20 : pin sylvestre de la station 123 couché lors d'une tempête.

Essences arborescentes

Outre *Pinus sylvestris*, *Picea abies* est la seule espèce de conifère présente (fig. 21). C'est aussi l'espèce qui compte le plus grand nombre d'individus adultes dans les limites et aux abords des stations (respectivement 7 et 9 individus). Treize espèces de feuillus sont présentes dans les limites des stations, auxquelles s'ajoutent six autres espèces présentes aux abords. Les individus adultes appartenant aux feuillus sont au nombre de 63, répartis en 20 individus dans les limites des stations, et 43 individus aux abords. Les jeunes individus sont au nombre de 76 et ont tous été recensés dans les limites des stations (soit environ 0.06 individus/m^2). Parmi les feuillus adultes (DBH > 7 cm), *Prunus avium*, *Quercus robur* et *Fraxinus excelsior* sont les espèces les plus recensées (11 individus au total pour chacune des espèces). Parmi les jeunes feuillus (DBH < 7 cm), *Fraxinus excelsior* est l'espèce la plus représentée avec plus de 25 % des effectifs (21 individus sur 76). Viennent ensuite *Alnus incana* et *Fagus sylvatica* avec chacune 12 individus. Neuf espèces de feuillus, telles *Alnus glutinosa* et *Populus nigra*, présentent quelques individus adultes mais aucun jeune individu. A l'opposé, trois espèces (*Juglans regia*, *Salix cinerea* et *Ulmus glabra*) présentent des jeunes individus alors qu'elles n'ont aucun représentant adulte dans les limites ou aux abords des stations.

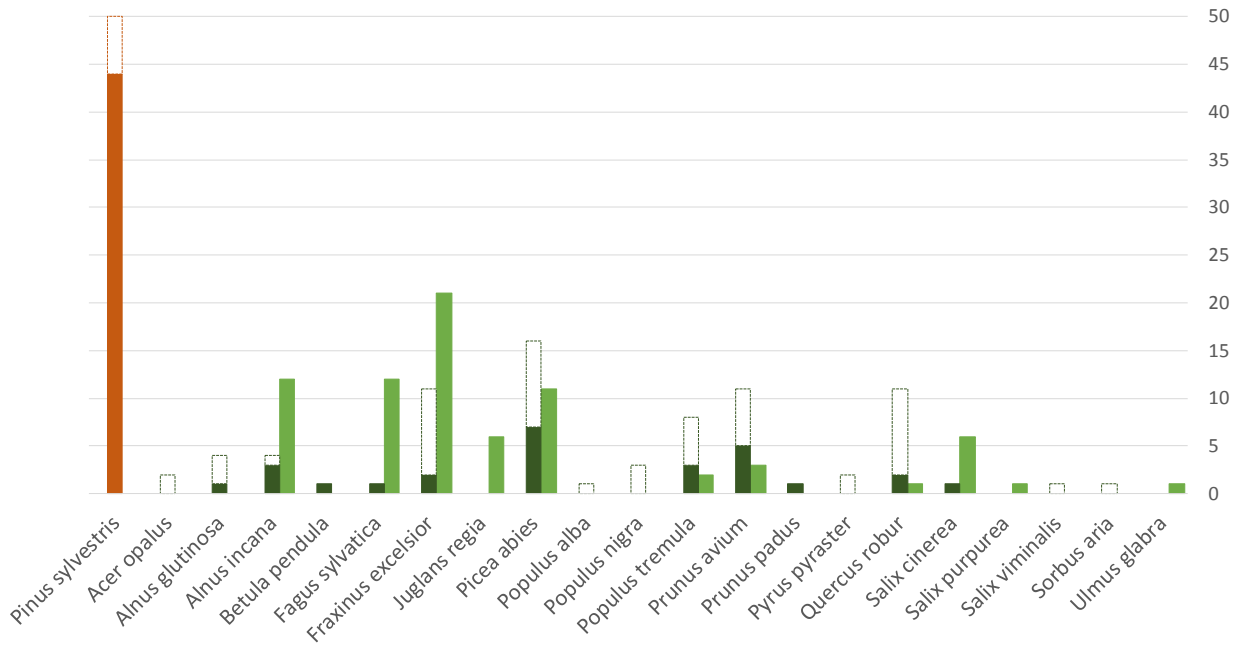


Fig. 21 : nombre d'individus par espèces arborescentes. Le pin sylvestre est illustré en orange. Les autres essences sont illustrées en vert foncé pour les individus ayant un DBH supérieur à 7 cm et en vert clair pour les individus ayant un DBH inférieur à 7 cm. Les barres pleines correspondent aux individus recensés dans les limites des stations et les barres blanches avec bordure pointillée correspondent aux individus recensés aux abords des stations.

3. Sols et formes d'humus

Descriptions et résultats des analyses

Parmi les cinq sols étudiés, quatre sont des RENDOSOLS et un est un RÉDOXISOL, selon le *Référentiel pédologique 2008* (Baize et Girard, 2009, tab. 5, fig. 22). Ils se situent tous à une altitude comprise entre 431,2 et 431,8 m. Ils ont été formés à partir de dépôts lacustres et morainiques remaniés par l'action érosive du battement des eaux du lac. La topographie des terrains est relativement plate. Chaque sol est décrit en détail dans une fiche pédologique présentée en annexe I, incluant aussi les données stationnelles, une photo et un schéma des profils. Les formes d'humus ont été déterminées selon Zanella et al. (2018). Un double rattachement d'une forme d'humus s'explique par le fait que le sol présente un épisolum particulier (*Paraformes* : *Bryoformes* ou *Lignoformes*) en plus d'un épisolum humifère typique (*Terroformes* : *Mull* ou *Mor*). Un triple rattachement s'explique par le fait que le sol présente, en plus d'un épisolum particulier et d'un épisolum humifère typique, une forme d'humus de transition (*Intergrades* : *Hydroformes*) en lien avec la présence d'eau.

Tab. 5 : rattachement des profils de sols selon le Référentiel pédologiques 2008 *(RP 2008, Baize et Girard, 2009) et la WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) et des formes d'humus (Zanella et al., 2018) des cinq sols étudiés.*

Station	Sol		Formes d'humus
	RP 2008	WRB	Zanella et al. (2018)
107	RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre	Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol	DYSMULL
110	RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre	Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol	DYSMULL
112	RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre	Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol	BRYO-DYSMULL
116	RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre	Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol	DYSMULL
123	RÉDOXISOL fluvique, surrédoxique, partiellement décarbonaté en surface, issu de matériel meuble lacustre et morainique	Orthofluvic Epigleyic Stagnosol (Capillaric)	LIGNO-HYDRO-EUMOR

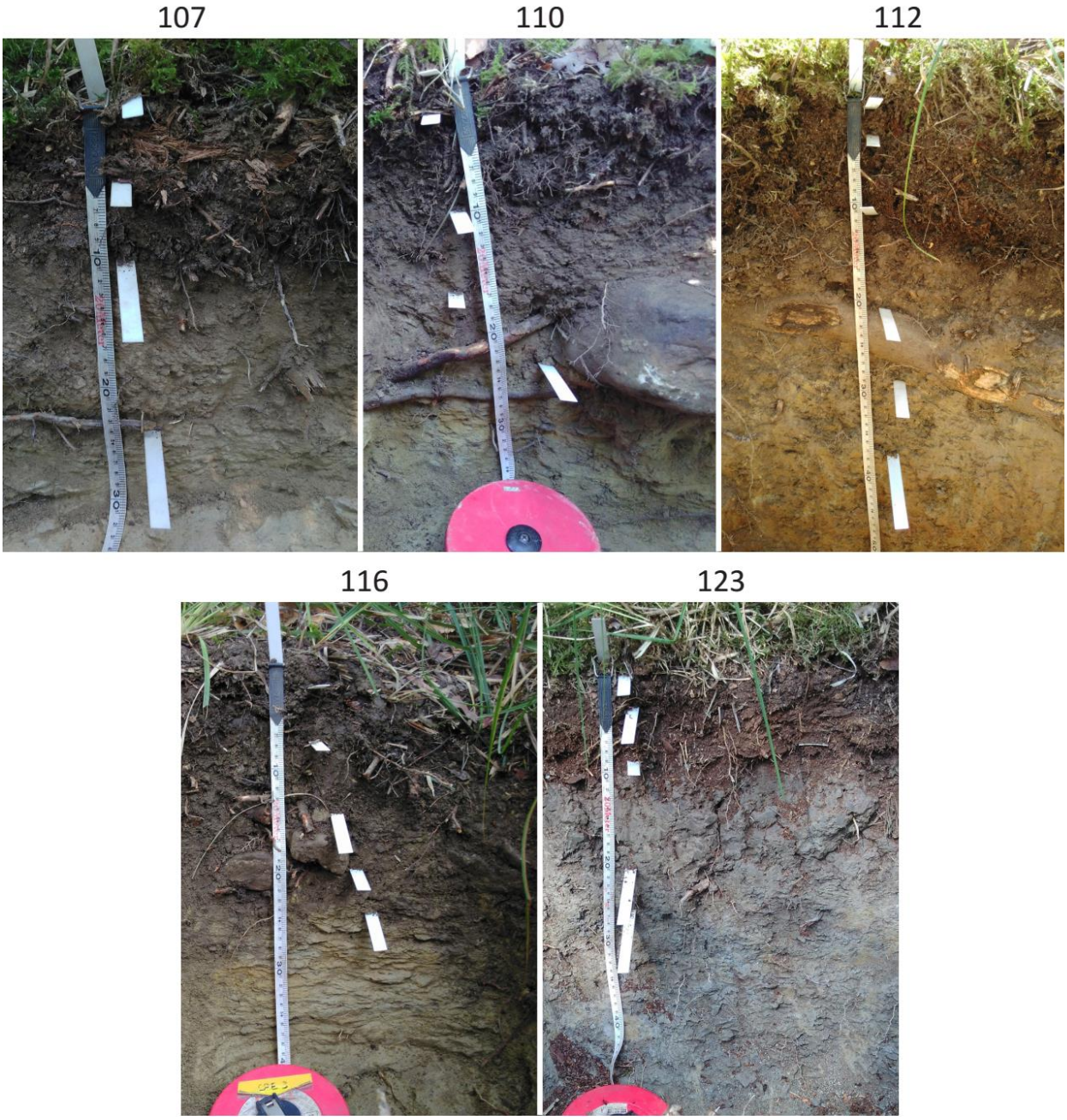


Fig. 22 : profils des sols étudiés. Les sols des stations 107, 110, 116 et 112 sont des RENDOSOLS. Le sol de la station 123 est un RÉDOXISOL.

Les résultats des analyses de sol concernent les pH H_2O et KCl, le taux de carbonate, le taux de matière organique (MO, tab. 6) et la répartition de la taille des particules de moins de 2 mm (fig. 23) de chaque horizon échantillonné. Les taux de MO ont été calculés à partir des résultats de la perte au feu. Ils sont probablement légèrement surestimés du fait d'un éventuel fractionnement des carbonates lors de la perte au feu (température > 350 °C). Les pourcentages d'argiles, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers ont été calculés à partir des résultats de la granulométrie laser (tab. 6).

Station 107

La séquence d'horizons [OLv]&S* / OF / Aca / Aca-Cca / Cca / Mma permet de définir le sol de la station 107 comme étant un RENDOSOL. La séquence de l'épisolum humifère [vOL] / zoOF / meA permet de définir la forme d'humus comme étant un DYSMULL. Le sol repose sur une roche argileuse carbonatée située à une profondeur de 30 cm et présentant de nombreuses taches d'oxydo-réduction. Le sol est ainsi bathyhydromorphe.

Les pH H_2O et KCl passent respectivement de 7,9 et 7,3 en surface à 8,7 et 7,8 en profondeur. Le taux de carbonate avoisine les 24 %, quel que soit l'horizon. Le taux de MO s'élève à un peu plus de 10 % dans l'horizon de surface Aca, puis chute à moins de 4 % dans l'horizon de transition Aca-Cca. Parmi les particules de moins de 2 mm, les limons fins dominent avec environ 40 % des particules. Les limons grossiers et sables fins viennent ensuite (entre 20 et 36 % suivant les horizons). Le taux d'argile varie entre 6,5 et 10 % et le taux de sables grossiers est relativement faible. Le sol est ainsi limoneux fin et carbonaté sur toute son épaisseur.

Station 110

La séquence d'horizons [OLv]&S* / OF / Aca1 / Aca2 / Aca-C / C / Mmag permet de définir le sol de la station 110 comme étant un RENDOSOL. La séquence de l'épisolum humifère [vOL] / zoOF / maA permet de définir la forme d'humus comme étant un DYSMULL. Le sol repose sur une roche argileuse carbonatée située à une profondeur de 37 cm et présentant de nombreuses taches de réduction. Le sol est ainsi bathyhydromorphe.

Les pH H_2O et KCl passent respectivement de 7,8 et 7,2 en surface à 9,1 et 8,2 en profondeur. Le taux de carbonate diminue légèrement puis augmente fortement avec la profondeur. Ainsi, il passe approximativement de 9 % dans les horizons organo-minéraux, à 6 % dans l'horizon minéral C, puis remonte à 16 % au niveau du substrat géologique Mma. Le taux de MO s'élève à 16 % dans l'horizon Aca le plus en surface, puis diminue à 10 % dans le second horizon Aca, pour atteindre un peu moins de 4 % dans l'horizon de transition Aca-Cca. Parmi les particules de moins de 2 mm, les limons fins dominent dans les horizons organo-minéraux, avec environ 38 % des particules, suivis des sables fins. Dans les horizons minéraux, ce sont les sables fins qui dominent, avec des taux allant de 36 à 55 % avec la profondeur. Le taux de limons grossiers est stable quel que soit la profondeur (≈ 19 %). Le taux d'argiles varie entre 9 et 4 % et celui des sables grossiers est inférieur à 3 %. Le sol est ainsi limoneux fin dans ses horizons organo-minéraux et limono-sableux dans ses horizons minéraux.

Station 112

La séquence d'horizons [OLv]&S* / OF1 / OF2 / Aca / Aca-Cca / Cca / Ccag permet de définir le sol de la station 112 comme étant un RENDOSOL. La séquence de l'épisolum humifère bryoOL / bryoOF / bryoOF-[ligOF] / maA permet de définir la forme d'humus comme étant un BRYO-DYSMULL (double rattachement). Le substrat géologique n'a pas été atteint et se situe à une profondeur supérieure à 50 cm.

Tab. 6 : résultats des analyses de sols concernant les pH H_2O et KCl, le taux de carbonate, le taux de matière organique et la granulométrie des différents horizons des cinq profils de sol étudiés.

	Echantillon	Horizon	Profondeur [cm]	pH H2O	pH KCl	Carbonates [wt %]	PAF [%]	MO [%]	Argiles	L. fins	L. grossiers	S. fins	S. grossiers	Classe texturale
									[%]					
1	107.1	Aca	2/4-9/11	7,92	7,31	23,23	12,06	10,27	9,89	42,88	20,05	24,86	2,33	Limoneux fin
0	107.2	Aca-Cca	9/11-22/24	8,28	7,54	25,58	5,66	3,74	8,49	39,28	19,91	26,97	5,35	Limoneux fin
7	107.3	Cca	22/24-30	8,71	7,84	23,72	2,41	0,42	6,66	34,58	19,28	36,54	2,94	Limoneux fin
	110.1	Aca1	2-10	7,78	7,17	9,14	17,78	16,10	8,68	37,99	18,04	32,35	2,94	Limoneux fin
1	110.2	Aca2	10-17	8,03	7,39	9,12	11,51	9,71	8,19	38,06	19,19	33,13	1,44	Limoneux fin
1	110.3	Aca-C	17-25	8,26	7,57	8,23	5,65	3,72	7,20	33,82	20,13	36,68	2,18	Limoneux fin
0	110.4	C	25-37	8,65	7,8	6,03	2,17	0,17	5,24	27,51	19,57	46,94	0,73	Limono-sableux
	110.5	Mma	37 et +	9,09	8,17	16,20	1,36	0,00	4,16	22,02	17,29	55,15	1,39	Limono-sableux
1	112.1	Aca	11/15-21/23	8,04	7,46	19,86	11,65	9,84	16,15	57,35	9,03	9,06	8,41	Limoneux fin
1	112.2	Aca-Cca	21/23-28	8,3	7,51	20,50	5,72	3,80	16,91	58,44	8,36	8,52	7,77	Limoneux fin
2	112.3	Cca	28-37	8,57	7,55	9,06	4,09	2,14	17,67	63,31	9,41	7,17	2,44	Limoneux fin argileux
	112.4	Ccag	37 et +	8,7	7,55	9,45	4,16	2,20	15,26	65,37	9,45	7,61	2,31	Limoneux fin argileux
	116.1	[OF]-Aca	2-7	8,07	7,57	18,74	12,24	10,45	8,42	40,47	30,05	20,83	0,23	Limoneux fin
1	116.2	Aca	7-14/16	8,14	7,6	18,52	9,64	7,80	8,60	41,14	29,59	19,21	1,45	Limoneux fin
1	116.3	Aca-Cca1	14/16-19/22	8,29	7,63	19,24	6,30	4,39	7,66	37,70	29,81	22,62	2,22	Limoneux fin
6	116.4	Aca-Cca2	19/22-25/28	8,46	7,73	19,95	4,37	2,42	7,03	34,66	30,58	27,47	0,26	Limoneux fin
	116.5	Cca	25/28-38	8,92	8,12	21,07	1,45	0,00	5,05	26,09	29,79	38,88	0,19	Limoneux fin
1	123.1	Ag	9-20	6,92	5,63	5,50	9,80	7,96	22,03	71,13	3,97	2,73	0,15	Limoneux fin argileux
2	123.2	Ag-g	20-27	7,54	6,05	5,34	7,84	5,96	20,12	79,12	0,76	0,00	0,00	Limoneux fin argileux
3	123.3	g	27 et +	8,68	7,54	11,99	6,88	4,98	20,67	75,59	3,70	0,04	0,00	Limoneux fin argileux

PAF : perte au feu ; MO : matière organique ; L : limons ; S : sables.

Argiles : < 2 µm ; L. fins : 2 à 20 µm ; L. grossiers : 20 à 50 µm ; S. fins : 50 à 200 µm ; S. grossiers : 200 à 2000 µm.

Classes texturales établies selon le triangle des textures.

L'horizon le plus en profondeur Ccag présente de nombreuses taches de réduction. Le sol est ainsi bathyhydromorphe.

Les pH H_2O et KCl passent respectivement de 8,0 et 7,5 en surface à 8,7 et 7,6 en profondeur. Le taux de carbonate avoisine les 20 % dans les horizons organo-minéraux, puis est divisé par deux dans les horizons minéraux Cca. Le taux de MO avoisine les 10 % dans l'horizon de surface, puis diminue à moins de 4 % dans l'horizon de transition. Parmi les particules de moins de 2 mm, les limons fins dominent largement avec des taux allant de 57 à 65 % pour une profondeur croissante. Les argiles viennent ensuite avec des taux avoisinant les 15 à 17 %. Les limons grossiers et sables fins ont des taux légèrement inférieurs à 10 %. Le sol est ainsi limoneux fin dans ses horizons organo-minéraux et limoneux fin argileux dans ses horizons minéraux.

Station 116

La séquence d'horizons OLv&[S*] / OF / [OF]-Aca / Aca-Cca / Cca / Mma permet de définir le sol de la station 116 comme étant un RENDOSOL. La séquence de l'épisolum humifère vOL / zoOF / maA1 / maA2 permet de définir la forme d'humus comme étant un DYSMULL. Le sol repose sur une roche argileuse carbonatée située à une profondeur de 38 cm et présentant de nombreuses taches d'hydromorphie. Le sol est ainsi bathyhydromorphe.

Les pH H_2O et KCl passent respectivement de 8,1 et 7,6 en surface à 8,9 et 8,1 en profondeur. Le taux de carbonate augmente légèrement avec la profondeur. Il passe de presque 19 % en surface à 21 % en profondeur. Le taux de MO varie entre 10 et 8 % dans les horizons de surface Aca, puis est divisé par deux voire quatre dans les horizons de transition. Parmi les particules de moins de 2 mm, les limons fins dominent avec des taux allant de 35 à 41 %, sauf au niveau de l'horizon minéral Cca, pour lequel ce sont les sables fins qui sont les plus présents avec près de 39 %. Le taux de limons grossiers est stable quel que soit la profondeur (≈ 30 %). Le taux de sables fins (hors horizon Cca) varie de 19 à 27 %, celui d'argiles varie de 8,6 à 5 et celui de sables grossiers est très faible (< 2.3 %). Le sol est ainsi limoneux fin sur toute son épaisseur.

Station 123

La séquence d'horizons OLv&S* / OF1 / OF2 / Ag / Ag-g / g permet de définir le sol de la station 123 comme étant un RÉDOXISOL. La séquence de l'épisolum humifère vOL / ligOF1 / ligOF2 / gmsA permet de définir la forme d'humus comme étant un LIGNO-HYDRO-EUMOR (triple rattachement). Le substrat géologique n'a pas été atteint et se situe à une profondeur supérieure à 45 cm. L'horizon de transition Ag-g et l'horizon minéral g présentent de nombreuses traces d'hydromorphie. Les caractères rédoxiques apparaissant à moins de 20 cm de profondeur, le sol est surrédoxique.

Les pH H_2O et KCl passent respectivement de 6,9 et 5,6 en surface à 8,7 et 7,5 en profondeur. Le taux de carbonate avoisine les 5 % dans les horizons organo-minéraux, puis est multiplié par deux dans l'horizon minéral g. Le taux de MO atteint presque 8 % en surface et varie peu avec la profondeur. Il avoisine les 5 % dans l'horizon minéral g. Parmi les particules de moins de 2 mm, les limons fins dominent largement avec des taux allant de 71 à 79 %. Les argiles viennent ensuite avec des taux avoisinant les 21 %. Les trois autres classes granulométriques sont sous représentées (< 4 %). Le sol est ainsi limoneux fin argileux sur toute son épaisseur.

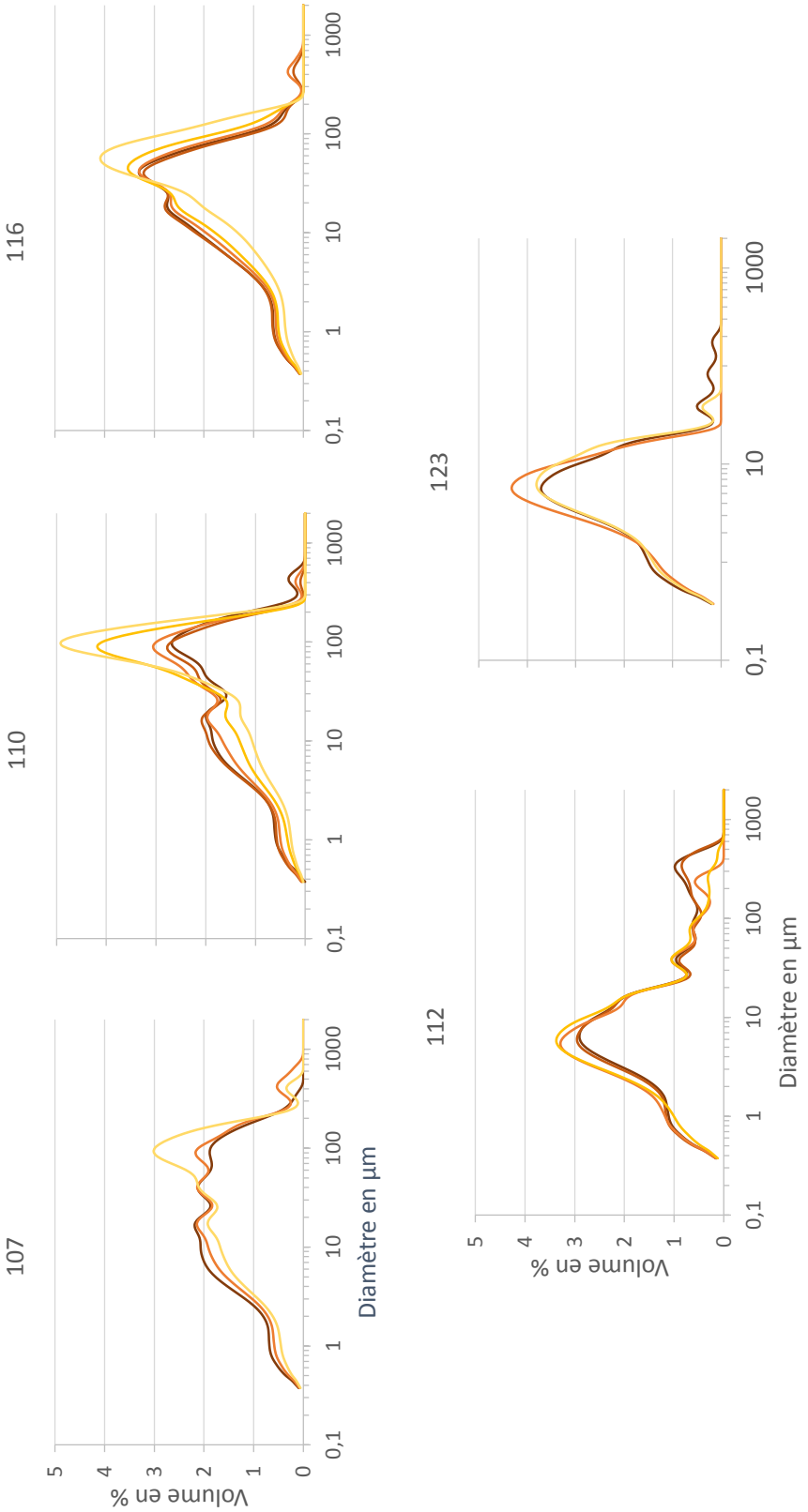


Fig. 23 : courbes granulométriques des cinq profils de sol. Chaque courbe correspond à un horizon. Plus la couleur de la courbe est foncée, plus l' horizon est en surface.

Répartition des horizons en fonction des variables environnementales

L'ACP (fig. 24) met en évidence la répartition des cinq sols étudiés et de leurs horizons. Le sol de la station 123 (échantillons 123.1, 123.2 et 123.3) se distingue clairement des autres sols, principalement par ses taux de limons fins (LF) et d'argiles (A), ainsi que par le pH KCl de l'horizon 123.1 qui s'avère être le plus bas (5,6) de tous les pH mesurés. Des taux de MO plus élevés caractérisent les horizons de surface quel que soit le sol étudié, tandis que des pH et des taux de carbonate plus élevés caractérisent les horizons de profondeur (à l'exception du sol de la station 112 en ce qui concerne les taux de carbonate).

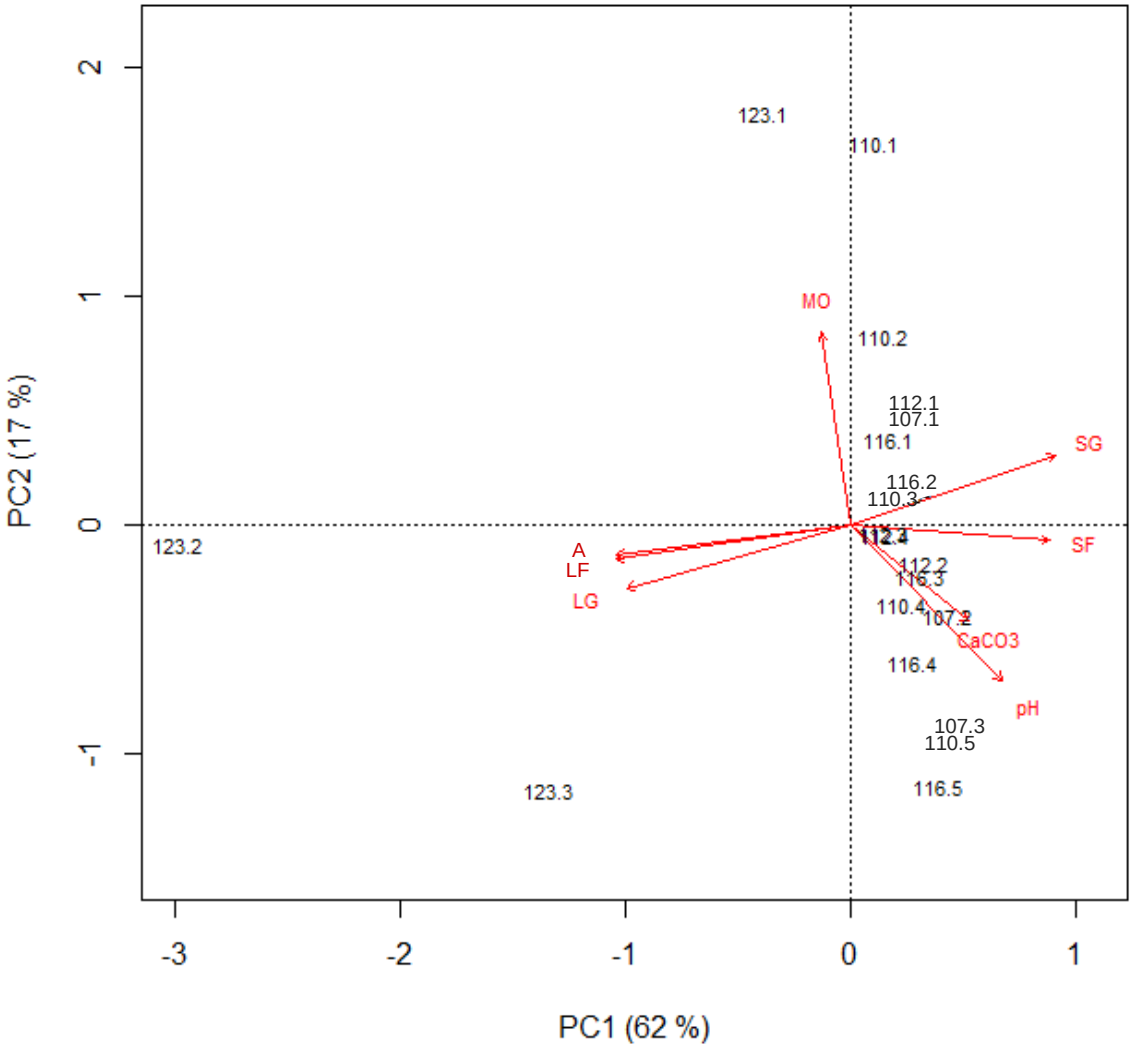


Fig. 24 : analyse en composantes principales des horizons des cinq sols étudiés en fonction des variables environnementales. Ces variables sont le pH KCl (pH), le taux de carbonate ($CaCO_3$), le taux de MO (MO), ainsi que les taux d'argiles (A), de limons fins (LF) et grossiers (LG), et de sables fins (SF) et grossiers (SG).

IV. Discussion

1. Composition floristique et milieu

Un Molinio-Pinion controversé

Les pinèdes de la RSLN sont rattachées à l'alliance du *Molinio-Pinion* et plus précisément à l'association du *Molinio-Pinetum sylvestris* (*Molinio-Pinetum*, Clot et Delarze, 2009). Cependant, elles présentent une strate arborescente, si celle-ci était dépourvue de pins sylvestres, et une strate herbacée de forêts inondables (*Alnion incanae* et *Fraxinion*) et de forêts de feuillus (*Cephalanthero-Fagenion*, *Galio-Fagenion* et *Carpinion*). Bien qu'étant la strate la plus visible et représentative du climax en milieu forestier, la strate arborescente n'est pas forcément le reflet du type de milieu réellement présent. L'*Alnion incanae* et le *Fraxinion* sont marqués par la dominance des essences hygrophiles tandis que le *Cephalanthero-Fagenion* et le *Galio-Fagenion* sont des hêtraies, respectivement, xérothermophile et mésophile, et que le *Carpinion* abrite une grande variété d'essences feuillus thermophiles. Les différentes alliances, aux affinités écologiques divergentes, rencontrées au sein du même milieu, démontrent la particularité de ces pinèdes et leur phase transitoire. Ainsi, malgré une physionomie ressemblante à celle du *Molinio-Pinion* (dominance du pin sylvestre, nombreux buissons et présence de *Molinia* et de *Carex flacca*), ces pinèdes ne correspondent pas tout à fait au véritable *Molinio-Pinion*, qui occupe des pentes marneuses instables et ensoleillées (Delarze et al., 2015). Déjà en 1997, P. Cornali, qui considérait que le milieu appartenait à l'association du *Molinio-Pinetum* E. Schmid 1936 em, confirmait, suite à une confrontation avec diverses données représentatives au niveau national, une position syntaxonomique des pinèdes de la RSLN difficile à déterminer. Selon lui, la difficulté de détermination était accentuée par la modeste superficie et le découpage des pinèdes, entraînant une large interface avec le reste des unités boisées caducifoliées (Cornali, 1997). Cette large interface a depuis permis à de nouvelles espèces de s'installer au sein des pinèdes, et notamment à cinq espèces de feuillus à la stratégie principalement compétitive (*Acer campestre*, *Acer opalus*, *Juglans regia, Sorbus aria* et *Ulmus glabra*). Aujourd'hui, le pin sylvestre fait face à une quinzaine d'espèces ligneuses compétitrices alors qu'il est jugé comme étant incapable de résister à la concurrence des autres essences forestières lorsque le milieu ne présente plus des conditions extrêmes (sécheresse du climat et médiocre qualité des sols ; Delarze et al., 2015).

Une évolution marquée et unidirectionnelle

L'augmentation très significative de la richesse spécifique, au cours des 34 dernières années, renforce la phase transitoire des pinèdes. En effet, la richesse spécifique est souvent plus importante dans un milieu en transition que dans un milieu pré- ou post- transition, du fait de la persistance temporaire des espèces du milieu originel et de l'arrivée de nouvelles espèces inféodées au milieu à venir (Smith & Smith, 2015). Selon l'indice de Simpson, la diversité des communautés s'est aussi accrue très significativement, marquant ainsi leur évolution. Selon l'indice de Bray-Curtis, calculé pour chaque paire de relevés, le *turn over* des espèces au sein de ces communautés est plus ou moins important. Ainsi, certaines communautés ont plus évolué que d'autres mais toutes semblent tendre vers un même climax, du fait de la diminution de ce même indice, calculé pour les communautés de 1984 et celles de 2018 et du déplacement unidirectionnel mis en évidence par l'ACP. Cette tendance est confirmée par le fait que les communautés de 2018 sont caractérisées par davantage d'espèces différentielles que les communautés de 1984. Seules deux communautés, présentant déjà en 1984 les caractéristiques des communautés de 2018, sont groupées avec les communautés de 2018. Ainsi, leur évolution avait commencé bien avant celle des autres communautés.

Fig. 25 : Strate arborescente de la station 110. Le développement progressif des feuillus entrave la transmission de la lumière jusqu'au sol.

Un pin sylvestre en recul face à un cortège d'essences autres

Le pin sylvestre a commencé à coloniser la RSLN une cinquantaine d'années après l'exondation des terres due à la première correction des eaux du Jura (1878). Il a colonisé avec succès des zones légèrement surélevées (Cornali, 1998) défavorables au développement des sols et à l'installation des formations climaciques (marnes à humidités variables notamment ; Delarze et al., 2015). En tant qu'essence la mieux adaptée aux conditions édaphiques et en l'absence de compétiteurs sérieux, il s'est largement imposé dans ces zones. Le pin sylvestre est une espèce à grande amplitude écologique et climatique qui s'adapte à la plupart des sols et des substrats. Aujourd'hui, il est en recul. En effet, bien que le pin soit toujours l'espèce dominante de la strate arborescente, son recouvrement a diminué depuis les 34 dernières années. Quelques individus déracinés, certainement lors de tempêtes, démontrent un ancrage peu profond du pin, laissant penser qu'à chaque nouvel événement climatique violent, le nombre de pins dressés diminuera. Ces arbres ont, au plus, à peine 100 ans alors qu'en Suisse, certains pins sylvestres avoisinent les 300 ans (Brunner, 2014). De plus, aucun jeune pin ne croît sous le couvert. Le développement progressif du couvert a éliminé les semis du pin, très exigeants en lumière (Cornali, 1998 ; fig. 25). La transmission de la lumière à travers la canopée est le facteur le plus important pour la croissance des semis du pin sylvestre (Kara et Topaçoğlu, 2018). Les conditions initiales favorables au pin se sont donc transformées en l'espace d'une trentaine d'années (1964, date d'installation du plus jeune pin recensé) en conditions défavorables à la régénération de celui-ci. Toutefois de jeunes pins sont présents au niveau des lisières, entre pinèdes et prairies, là où la lumière est abondante (fig. 26). Un ombrage trop important porte donc préjudice au développement initial du pin (Cornali, 1998) mais de nombreuses autres essences semblent s'en accommoder. En effet, une quinzaine d'espèces ligneuses compétitrices (feuillus et épicéa) sont présentes dans les pinèdes de la RSLN. Le nombre d'individus adultes est relativement faible mais le nombre de jeunes individus est plus important (environ 0.06 individu/m^2). Toutefois, la moitié de ces individus a un diamètre à la base inférieur à 3 cm et donc n'est âgé, tout au plus, que de quelques années. De ce fait, ces individus sont encore vulnérables à l'herbivorie, aux blessures accidentelles entraînant le développement de maladies, ou encore à la compétition pour la lumière ou les éléments nutritifs. Ainsi donc, leur survie n'est pas assurée.

Parmi les essences en compétition avec le pin, certaines sont des espèces dominantes et influentes sur la physionomie des milieux (*Alnus incana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies*, *Quercus robur*) et peuvent être à l'origine de la future alliance forestière. D'autres sont des espèces moins strictement inféodées aux milieux (*Juglans regia*, *Ulmus glabra*) ou ont une longévité relativement courte (autour des 100 ans pour *Populus nigra*, *Prunus avium*, *Pyrus pyraster*, Aymonin et al., 1986). Parmi les prétendants à la formation de la future alliance, se trouve le frêne commun qui est l'essence qui se multiplie le plus au sein des pinèdes. Toutefois la majorité de ses représentants sont malades. Tout comme les individus adultes, les jeunes individus sont atteints de la chalarose ou maladie du flétrissement, causée par un champignon et entraînant le flétrissement de la cime des arbres. L'existence du frêne est donc menacée à moins qu'il ne développe une résistance à la maladie (Rigling et al., 2016). Vient ensuite l'aulne blanc mais le milieu actuel n'est pas assez perturbé pour satisfaire celui-ci (absence de crues). À égalité avec l'aulne blanc, est le hêtre. Le hêtre occupe une place prépondérante dans une grande partie de l'ère forestière suisse (Delarze et al., 2015). De plus, c'est une essence sciaphile dont les jeunes individus sont capables d'attendre pendant de nombreuses années avant de profiter d'une ouverture dans la canopée, pour ensuite largement se développer. Toutefois, dans un contexte de changements climatiques et compte tenu d'une faible profondeur des sols, le hêtre risque fort de souffrir des sécheresses à venir.

Fig. 26 : jeune pin sylvestre se développant en lisière de pinède, là où la lumière est abondante.

Ensuite, l'épicéa est aussi un concurrent sérieux au pin. Bien qu'étant davantage une espèce des étages montagnard et subalpin, il s'est fort bien adapté aux conditions du Plateau. Étant donné la taille des individus adultes et la bonne santé de leurs descendants, l'épicéa semble à l'aise au sein des pinèdes. Cependant, tout comme le hêtre, l'épicéa risque fort de souffrir des sécheresses à venir. Enfin, le chêne pédonculé est régulièrement représenté au sein des pinèdes. En revanche, il n'y a que très peu de jeunes individus.

Des valeurs écologiques indicatrices de changements climatiques et édaphiques

Depuis la première correction des eaux du Jura à la fin du 19ème siècle, l'atmosphère au niveau du sol s'est réchauffée de près de 2 °C (valeur moyenne pour l'ensemble du territoire suisse). La plus grande partie de cette augmentation s'est effectuée dans les dernières décennies, soit depuis l'étude des pinèdes effectuées par P. Cornali en 1984, avec une augmentation de plus de 1 °C (www.meteosuisse.admin.ch). D'où une augmentation significative, entre 1984 et 2018, de la valeur de température, attribuée aux pinèdes sur la base de leur composition en espèces. Cette augmentation indique une tendance à l'arrivée d'espèces affectionnant des stations plus chaudes qu'elles ne l'étaient autrefois. Parmi ces espèces se trouvent *Acer campestre*, *Acer opalus*, *Juglans regia* et *Lonicera periclymenum*. Aussi, lors des dernières décennies, le développement des feuillus au sein des pinèdes de la RSLN a entraîné une augmentation de l'ombre, du fait de l'importance de leur surface foliaire en comparaison avec celle du pin sylvestre (fig. 25). Or la compétition pour la lumière est un des processus qui détermine la composition en espèces et le développement de celles-ci en milieu forestier (Heiri et al., 2009). Ainsi, la valeur de lumière a diminué, bien que non significativement, entre 1984 et 2018, indiquant un nombre croissant d'espèces sciaphiles au sein du sous-bois.

Par ailleurs, la valeur en substances nutritives, caractérisant essentiellement la teneur du sol en azote (N ; Lauber et al., 2012), a très significativement augmenté, indiquant l'arrivée ou le développement d'espèces déjà présentes (*Lonicera xylosteum*, *Crataegus monogyna*, *Cornus sanguinea*, fig. 27) préférant des sols contenant davantage d'éléments nutritifs. L'accumulation dans le sol d'éléments nutritifs au cours des dernières décennies peut avoir deux origines. D'une part, la végétation prélève en profondeur certains éléments sous forme ionique et les restitue en surface lors de la chute des débris végétaux qui constitueront la MO. D'autre part, les dépôts azotés dus à la pollution atmosphérique sont de l'ordre de 10 et 20 kg d'N/ha/an au niveau de la RSLN (chiffres de 2010 ; www.bafu.admin.ch). En 1990, ils atteignaient jusqu'à 30 kg d'N/ha/an (www.bafu.admin.ch). Ces dépôts azotés favorisent des espèces nitrophiles tel *Rubus fruticosus* (fig. 27) dont le recouvrement est positivement corrélé avec des dépôts azotés modélisés (CFHA, 2005). De plus, la valeur de dispersité a significativement augmenté, impliquant une meilleure aération des sols qu'autrefois. Lors de l'exondation des terres de la RSLN, la porosité des sols était uniquement due à la présence de sables, l'absence d'activité biologique empêchant toute connectivité entre les pores. Le développement des racines et de la faune du sol a progressivement permis de décompacter et d'aérer les horizons de surface (Le Bayon, com. pers., 2019). Ce processus s'est poursuivi lors de ces trois dernières décennies, permettant à des espèces végétales des sols perméables et bien aérés de s'y installer.

Enfin, aucun changement significatif n'a été observé concernant l'humidité du sol ou la capacité des plantes à tolérer des changements d'humidité. Sur le Plateau, les précipitations hivernales moyennes des 150 dernières années ont augmenté alors qu'aucun changement n'a été détecté dans les précipitations estivales moyennes. Toutefois, le régime des précipitations a évolué. L'intensité et la fréquence des fortes précipitations ont augmenté depuis 1901 (www.meteosuisse.ch). En hiver, la

végétation, étant au ralenti, et les sols gorgés d'eau du fait qu'ils sont peu profonds, qu'ils reposent sur une roche imperméable et qu'ils reçoivent l'eau des ruissellements depuis la falaise lacustre, n'est pas affectée par l'augmentation des précipitations hivernales. Ainsi, les conditions d'humidité des pinèdes de la RSLN n'ont pas évolué depuis 1984.

Fig. 27 : de nombreuses espèces d'arbustes produisant des baies sont présentes au sein des pinèdes. Ces espèces, telles Lonicera xylosteum *(en haut à gauche),* Crataegus monogyna *(en haut à droite),* Cornus sanguinea *(en bas à gauche) et* Rubus fruticosus *(en bas à droite) affectionnent des sols moyennement nutritifs à riches en substances nutritives.*

2. Sols

Des propriétés physico-chimiques inchangées

De manière générale, les sols de pinèdes de la RSLN évoluent dans une ambiance physico-chimique dominée par les ions Ca^{2+}. Globalement, ces sols sont riches en carbonate (jusqu'à 25 % de la masse de matière sèche) mais ils sont parfois partiellement décarbonatés suivant les horizons. Une décarbonation partielle des horizons de surface peut potentiellement être due à une hétérogénéité initiale du substrat géologique, tandis qu'une recarbonatation peut potentiellement être due à des apports d'origine latérale (falaise lacustre riche en calcaire) ou à une remise en surface des ions Ca^{2+} par la végétation. Malgré une litière acidifiante (aiguilles et écorce de pin essentiellement, fig. 28), les horizons organo-minéraux ne sont que très légèrement plus acides que les horizons minéraux ; les carbonates, chimiquement actifs, jouent un rôle tampon et maintiennent le pH basique. Ainsi, les sols de pinèdes de la RSLN sont rattachés aux RENDOSOLS. Déjà en 1992, P. Cornali avait estimé que ces sols appartenaient aux Pararendzines (Cornali, 1992), l'équivalent des RENDOSOLS décrits dans le *Référentiel pédologique 2008* (Baize et Girard, 2009).

Bien qu'étant en dehors de toute influence de la nappe du lac, ces RENDOSOLS sont gorgés d'eau en hiver (eaux de pluie et de ruissellement depuis la falaise lacustre) et secs en été. Cet engorgement temporaire hivernal est à l'origine de processus d'oxydo-réduction, matérialisés en profondeur par des taches d'hydromorphie. Outre la présence d'un plancher imperméable qui favorise indéniablement cet engorgement, la dynamique de l'eau dans les sols est fortement influencée par la texture. Quelles que soient les pinèdes, la fraction des limons varie peu. En revanche, les fractions des argiles et des sables varient davantage. Les RENDOSOLS (hormis le profil 112) présentent une distribution unimodale de sables fins dans les couches profondes et des pics de limons plus en surface. Cette distribution hétérogène a potentiellement quatre origines : dépôts de particules de tailles différentes au cours de la sédimentation lacustre ou apports de limons fins soit éoliens (lœss), soit lors de crues, soit depuis la falaise lacustre. La présence de sables en profondeur, favorisant la porosité, permet une moindre rétention de l'eau dans le sol à la fin de l'hiver contrairement à la présence d'argile qui, par sa capacité de rétention de l'eau, favorise un engorgement du sol sur une période plus longue. Ce phénomène est observé dans le seul RÉDOXISOL étudié qui présente une distribution homogène de limons fins et d'argiles tout le long du profil et peu de sables. Enfin, la présence d'une épaisse litière acidifiante, composée essentiellement d'écorce de pins (fig. 28), favorise une légère acidité de l'horizon organo-minéral, peu tamponnée par un taux moindre de carbonate. Curieusement, P. Cornali avait décrit, à quelques dizaines de mètres du RÉDOXISOL, un sol brun totalement décarbonaté et à pH acide (Cornali, 1992). Selon lui, les conditions pédogénétiques susceptibles d'engendrer un profil entièrement décarbonaté en un laps de temps aussi court (100 ans) peuvent avoir été déterminées soit par un apport naturel ou anthropique de matériel déjà évolué, soit par la présence d'une moraine acide ou tout au moins faiblement pourvue en carbonate dès le départ, déposée sur une molasse pouvant être elle-même déjà fortement décarbonatée.

Ainsi, les propriétés physico-chimiques, qui ont peu varié durant les 100 dernières années, et la dynamique de l'eau qui en découle sont à l'origine des conditions édaphiques extrêmes que le pin sylvestre est la seule essence capable de supporter (Clot, 2013). Tant que ces conditions perdurent, le *Molinio-Pinetum* se maintient, mais si le sol s'enrichit en humus, le pin fait progressivement place aux essences plus exigeantes et plus concurrentielles des hêtraies (Clot, 2013).

Fig. 28 : par la chute de ses aiguilles et de son écorce, le pin sylvestre produit une litière dite acidifiante (en haut, station 123) tandis que les feuillus et les herbacées produisent une litière dite améliorante (en bas, station 107).

Un enrichissement en humus

Globalement, les RENDOSOLS de la RSLN présentent des taux de MO compris entre 7,8 et 16,1 % dans leurs horizons organo-minéraux. En comparaison, les Pararendzines étudiés par P. Cornali présentaient des taux de MO compris entre 8,3 et 10,6 %. Bien que les sols étudiés en 1983 et en 2018 ne concernent pas les mêmes pinèdes, mais que les taux de MO ont été obtenues de manière identique (perte au feu à 450 °C et calcul selon la formule MO = PAF % - ((2.04*T) / 100)), il est raisonnable de considérer que le taux de MO des RENDOSOLS a augmenté depuis 1983. En effet, contrairement à l'installation rapide du pin sylvestre, produisant une litière acidifiante (pauvre en azote mais riche en lignine, Gobat et al., 2010), l'installation progressive des feuillus, en produisant une litière améliorante (riche en azote et en cellulose, Gobat et al., 2010), facilement biodégradable (Zanella et al., 2018 ; fig. 28), a permis la formation d'un humus de type mull (Duchaufour, 1997), biologiquement actif. En 1998, Cornali estimait que cette litière, bien que composée à 70 % de débris issus du pin (aiguilles, cônes, écorces), ne s'accumulait pas autant dans les horizons organiques des pinèdes de la RSLN que dans des pinèdes sans feuillus. Malgré une production de litière plus faible que celle des pins, les feuillus suffisent à modifier profondément la dynamique de décomposition du mélange de litière (Cornali, 1999), à l'origine de la forme actuelle d'humus de type Dysmull. De plus, en milieu calcaire, les ions Ca^{2+} participent à la formation d'un complexe argilo-humique très stable, empêchant une minéralisation trop rapide de la MO humifiée (Rowley et al., 2018). Ainsi, l'incorporation accélérée de la MO et le ralentissement de la minéralisation de l'humus favorisent un enrichissement en humus des RENDOSOLS de la RSLN. Cet enrichissement est propice aux essences plus exigeantes et concurrentielles du pin sylvestre.

Il en est autrement du RÉDOXISOL étudié. En effet, ce dernier possède un épais horizon de fragmentation (5 cm, fig. 28), constitué essentiellement d'écorces de pin, inhibant alors l'activité bactérienne du sol (Gobat et al., 2010). De plus, la faible porosité (texture limoneux fin-argileux) et l'engorgement prolongé créent des conditions anaérobies, défavorables à la faune du sol. Dans des milieux à forte acidité et faible activité biologique, la MO incomplètement décomposée s'accumule à la surface du sol, se superposant au sol minéral (Duchaufour, 1997), à l'origine de la forme actuelle d'humus de type Ligno-Hydro-Eumor.

Des RENDOSOLS aux CALCOSOLS

Dans un RENDOSOL, si le matériel parental carbonaté est riche en fer et en argile, la brunification s'installe, permettant la formation d'un horizon de structuration Sca à la base de l'horizon Aca et donc une évolution vers un CALCOSOL (Gobat et Guenat, 2019). Dans le contexte des RENDOSOLS de la RSLN, les taux de fer sont compris entre 0,8 et 1,2 % (Cornali, 1992, méthode de Mehra et Jackson) et les taux d'argiles varient entre 5 et 17 % dans l'horizon C. De plus, la roche est facilement altérable (molasse) et l'activité biologique existante. L'ensemble de ces conditions peuvent potentiellement être à l'origine d'un processus de brunification mais l'engorgement des sols pendant la période hivernale peut limiter ce processus. Aucune analyse, effectuée dans le cadre de l'étude, ne permet de confirmer qu'un tel processus soit déjà en cours (étude à l'aide de lames minces nécessaire). Selon Girard et al. (2011), un CALCOSOL se développe en 500 à 1 000 ans. L'évolution des RENDOSOLS de la RSLN vers des CALCOSOLS, davantage favorables aux espèces plus exigeantes que le pin sylvestre, du fait de leur épaisseur plus importante, de leur structure plus stable, de leur meilleure rétention en eau et de leur fertilité plus importante (Gobat et Guenat, 2019), est la voie d'évolution la plus plausible sur une échelle de temps de plusieurs siècles.

Quant au RÉDOXISOL, si la durée annuelle de l'engorgement venait à diminuer, il pourrait évoluer vers un RENDOSOL voire un CALCOSOL, ce qui est peu probable à l'heure actuelle du fait de l'engorgement prolongé.

3. Devenir et gestion des pinèdes de la RSLN

Des pinèdes aux chênaies à charme

Étant donné l'évolution de la composition en espèces, le recul du pin et son absence de régénération au sein des pinèdes, le développement des feuillus et l'enrichissement des sols en humus, l'avenir du pin sylvestre, et donc des pinèdes de la RSLN, est compromis. Une gestion forestière de ces pinèdes est indispensable pour leur conservation. Mais est-ce bien utile dans le contexte actuel de réchauffement climatique ? D'une part, de nombreux auteurs estiment que si le changement climatique est associé à des sécheresses plus intenses, alors le dépérissement des forêts dû à la sécheresse augmentera (Buras et al., 2018). Dans le centre sud de l'Allemagne, à l'étage collinéen, Buras et al. (2018) ont observé un dépérissement important dans des peuplements de pin sylvestre suite à la sécheresse de 2015. De plus, ils affirment que les pins en lisière sont davantage affectés par le manque de vitalité et le dépérissement suite à une sécheresse que les pins au cœur des pinèdes. Ce phénomène est dû à une évapotranspiration accrue en lisière (Buras et al., 2018). Or, sur la RSLN, la lisière est la seule zone dans laquelle le pin se régénère, la luminosité, plus importante en lisière, permettant au semis de se développer (fig. 26). Ainsi, même les jeunes pins en lisière n'ont que peu de chance de survie. D'autre part, les risques de sensibilité à la sécheresse et de déracinement par le vent augmentent lorsqu'un déséquilibre entre masse des parties aériennes et celle des racines s'accroît chez les arbres (Matzner & Murach, 1995). Or, ceci est le cas lors de dépôts azotés qui favorisent la croissance des parties aériennes, au détriment de celle des racines, aussi longtemps que d'autres nutriments ne constituent pas un facteur limitant (CFHA, 2015). Mais en l'absence de mesures de conservation, que deviendraient alors les pinèdes de la RSLN ?

À plus ou moins court terme (< 100 ans), les pins vont dépérir naturellement ou être déracinés lors de violentes tempêtes du fait de leur faible enracinement (fig. 20). Ainsi, la strate arborescente ne sera composée que de quelques individus adultes de feuillus et d'épicéa déjà présents dans les pinèdes. D'ici à ce qu'une forêt de feuillus se mette en place, il est fort probable que le milieu soit essentiellement composé d'espèces appartenant au *Berberidion* et au *Pruno-Rubion* (*Crataegus monogyna*, *Ligustrum vulgare*, *Prunus spinosa* et *Viburnum lantana* notamment), soit aux deux formations buissonnantes déjà présentes dans la strate arbustive des pinèdes. N'étant plus en compétition avec les arbres de la strate arborescente, les arbustes de ces formations se développeront vigoureusement jusqu'à constituer un milieu dense quasi impénétrable comme c'est déjà le cas dans des zones déboisées en bordure de pinèdes (manteau). Ces formations sont d'une importance vitale pour de nombreux vertébrés, notamment pour divers oiseaux qui y nichent ou s'y alimentent (nombreux arbustes produisant des baies ou des fruits charnus, Delarze et al., 2015). Ainsi, la faune liée aux formations buissonnantes sera favorisée jusqu'au retour de la forêt. Mais quel milieu forestier se mettra en place ?

À long terme, les quantités de précipitations moyennes diminueront et l'évaporation augmentera pendant les mois d'été (www.meteosuisse.admin.ch), mettant à mal les essences hygrophiles des forêts inondables. Ainsi, les espèces appartenant à l'*Alnion incanae* et au *Fraxinion* (*Alnus incana*, *Calamagrostis epigejos*, *Circaea lutetiana* et *Fraxinus excelsior* notamment), actuellement présentes dans les strates arborescente et herbacée, ne le seront plus dans l'avenir. Malgré sa place prépondérante dans une grande

partie de l'aire forestière suisse (Delarze et al., 2015), le hêtre sera lui aussi mis à mal par les changements climatiques (augmentation des températures et du nombre d'évènements climatiques extrêmes et diminution des précipitations). Bien que se développant dans des conditions climatiques et édaphiques larges, le hêtre est sensible aux sécheresses estivales (Peterken, 1996). Selon Bugmann et al. (2014), la biomasse du hêtre sur le Plateau va diminuer de moitié d'ici à 2300. Or, la RSLN est située dans le domaine de la hêtraie de basse altitude, notamment dans le *Galio-Fagenion* (Delarze et al., 2015). Bien que l'écologie de cette sous-alliance s'apparente à celle des pinèdes actuelles de la RSLN, le hêtre aura toutes les difficultés à dominer. Ainsi, les pinèdes de la RSLN seront remplacées par des forêts caducifoliées autres que les forêts inondables et les hêtraies.

En comparaison avec la vallée du Rhône, il n'est pas exclu que les pinèdes soient progressivement remplacées par des chênaies, du fait d'un affaiblissement du pin et d'un accroissement de la capacité concurrentielle du chêne suite au réchauffement climatique (Bonfils et al., 2005). Sur la RSLN, il est envisageable que les pinèdes soient à terme remplacées par des chênaies à charme (*Carpinion*). La possibilité d'évolution vers le *Querco-Carpinetum* est déjà suggérée par Berset en 1949, ainsi que par Sommerhalder en 1992, de manière plus ou moins rapide selon les conditions édaphiques (mise en place des CALCOSOLS). Sur sol superficiel et sèchard, le *Carpinion* prendrait alors une physionomie de formation basse (Delarze et al., 2015).

Une aide à la gestion des pinèdes

Selon la Liste des milieux prioritaires, la priorité au niveau national du *Molinio-Pinion* est élevée et il est absolument nécessaire de prendre des mesures pour sa conservation (www.infoflora.ch). Selon Delarze et al. (2015), la pinède à molinie est riche en espèces héliophiles rares et protégées, notamment en orchidées, d'où une nécessité de la conserver. Les pinèdes de la RSLN étant actuellement en phase transitoire, il serait judicieux de procéder à un entretien ciblé afin qu'elles prennent la trajectoire d'un véritable *Molinio-Pinion* (pinède d'arbres bas et clairsemés avec un tapis dense en sous-bois, Delarze et al., 2015).

Les premières mesures de gestion concerneraient le recouvrement des strates arborescentes et arbustives. En effet, dans le *Molinio-Pinion*, le recouvrement de la strate arborescente ne doit pas dépasser les 40 % et celui de la strate arbustive les 20 % (ECOTEC, 2012 concernant les pinèdes à molinie du canton de Genève). Les recouvrements moyens de ces deux strates sont aujourd'hui de 55 et 62 % dans les pinèdes de la RSLN. Ainsi, la suppression de certains pins est nécessaire. L'objectif final est de 30 pins adultes/ha (ECOTEC, 2012). Or, il y a en moyenne 630 pins adultes/ha dans les pinèdes de la RSLN. Ces pins mesurent entre 20 et 25 m et n'ont pas de ramifications dans les deux tiers inférieurs du tronc. Ils n'ont donc pas la morphologie caractéristique des pins affiliés au *Molinio-Pinion* (arbres branchus n'excédant pas 12 m, fig. 29). Ainsi, il ne serait pas raisonnable d'essayer d'atteindre cet objectif au risque de voir les pins conservés se déraciner lors d'une tempête du fait d'une absence de protection par des pins voisins. Concernant la strate arbustive, une réduction de plus de 50 % est nécessaire, l'objectif final étant le développement d'une strate arbustive composée à 50 % de jeunes pins et à 50 % d'essences arbustives (ECOTEC, 2012). Il est primordial de commencer par supprimer les essences arborescentes caducifoliés et les épicéas de cette strate. Ces mesures ont pour objectif d'augmenter la transmission de la lumière jusqu'au sol, favorisant ainsi les espèces héliophiles caractéristiques du *Molinio-Pinion* et la régénération naturelle du pin sylvestre. Une luminosité de plus de 50 % est recommandée pour obtenir une germination du pin suffisante à sa régénération (Kara & Topaçoğlu 2018). De plus, une luminosité inférieure à 60 % peut nuire à la croissance des plantules après germination (Kara & Topaçoğlu 2018).

Fig. 29 : pin sylvestre de la RSLN possédant des branches basses du fait de son isolement. Cet arbre présente la morphologie des pins affiliés au Molinio-Pinion.

En parallèle, une autre mesure pourrait être appliquée pour créer des nouvelles zones à *Molinio-Pinion*. En effet, les prairies régulièrement fauchées à proximité des pinèdes pourraient être plantées de manière clairsemée de jeunes pins, issus de graines prélevées dans les pinèdes de la RSLN (objectif final : maintien de 30 pins adultes/ha, ECOTEC, 2012). Un entretien régulier, limitant l'embuissonnement, serait nécessaire.

4. Fiabilité de l'étude de la végétation

Pour que des changements dans la végétation puissent être détectés avec justesse, les relevés effectués sur le terrain doivent être exacts (Vittoz et Guisan, 2007). Ainsi, aucune espèce ne doit être omise et le recouvrement doit être correctement estimé. Cependant, malgré l'application de la même méthode par deux observateurs, les résultats obtenus ne sont pas exactement identiques. Ainsi, Gray et Azuma (2005) ont montré, qu'en milieu forestier, les relevés de deux botanistes n'étaient similaires qu'à 70 %. Aussi, bien que les données concernent des zones montagneuses, Vittoz et al. (2010) ont estimé, pour des superficies supérieures à 100 m^2, un taux différentiel de 20 % entre relevés de végétation effectués par des observateurs différents à une même période. Dans leur synthèse sur les différences observées, ils invoquent une confusion entre espèces proches, une mauvaise identification des semis et jeunes plantes et une omission d'espèces. Selon Morrison (2016), les erreurs peuvent être imputées aux caractéristiques de la végétation (feuilles étroites, rareté…), aux conditions environnementales (météorologie, topographie…) et aux capacités des observateurs (concentration, temps de recherche…).

Étant donné la présence, dans le tableau de végétation de 1984, d'espèces observées qu'une seule fois par P. Cornali sur l'ensemble des stations et le but de son projet, il est vraisemblable que ce dernier ait cherché à effectuer des relevés exhaustifs. En revanche, il n'y a aucune indication quant au temps passé sur le terrain à observer les espèces. En 2018, une demi-journée a été consacrée par station pour sa délimitation et pour la réalisation du relevé de végétation. Ce temps était largement suffisant pour parcourir entièrement la station, quelle que soit sa superficie.

De plus, l'estimation visuelle du recouvrement par deux observateurs, même lors d'une estimation par classe, comme avec l'échelle semi-quantitative de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1964), qui autorise une précision moindre et qui permet uniquement de révéler les changements du recouvrement de la végétation les plus importants (Vittoz et Guisan, 2007) montre, pour de grandes superficies, une large variation (Vittoz et al., 2010). Selon Vittoz et Guisan (2007), un observateur qui répète l'étude sur le terrain est plus fiable qu'une succession des différents observateurs. Or, étant donné les 34 années qui séparent l'étude effectuée en 2018 de celle effectuée en 1984, la répétition de l'étude par le même observateur n'était guère possible, et donc des écarts par rapport à la réalité sont inévitables dans les deux études.

Enfin, il est fort probable que l'emplacement exact des stations n'ait pas été retrouvé en 2018. En effet, les coordonnées géographiques du centre des stations ont été obtenues par calcul d'après des points placés sur des cartes au 1 : 5 000 lors de l'étude en 1984. Davantage de précision aurait été souhaitable, bien que la liste d'espèces présentes dans la strate arborescente en 1984 ait contribué à retrouver l'emplacement des stations, mais impossible compte tenu de l'absence de GPS en 1984 et du manque de points de repères sur ces terrains plats. Ainsi, une répétition plus fidèle de la méthode par un unique observateur et des stations permanentes auraient permis d'augmenter la fiabilité des résultats.

Malgré les faiblesses de la méthode employée, les résultats sont tout de même crédibles. En effet, l'analyse en composantes principales (fig. 14) montrent un réel déplacement des communautés. Ce déplacement serait impossible si les différences entre relevés anciens et récents n'étaient qu'aléatoires. Ainsi, les changements sont clairement plus grands que les erreurs de mesure.

V. Conclusion

Malgré les quelques faiblesses des méthodes employées, l'étude effectuée en 2018 a permis de confirmer la particularité, la phase transitoire, la disparition à moyen terme et le remplacement à long terme, par une forêt caducifoliée, des pinèdes de la RSLN.

Au cours des trois dernières décennies, la disparition de certaines espèces, l'arrivée de nouvelles espèces et le développement d'espèces anciennement déjà présentes ont accru la diversité au sein des pinèdes et entraîné une évolution marquée de celles-ci. Aujourd'hui, les diverses alliances des formations buissonnantes, forêts inondables, hêtraies ou autres forêts de feuillus sont davantage représentées, au sein même des pinèdes, que le *Molinio-Pinion* ; les pinèdes s'éloignant encore davantage de cette alliance.

Bien que les propriétés physico-chimiques des sols, rattachés aux RENDOSOLS, et donc la dynamique de l'eau qui en découle (sol gorgé d'eau en hiver et sec en été), restent favorables au pin sylvestre, ce dernier ne se régénère plus depuis une cinquantaine d'années déjà. Cette absence de régénération est due à un couvert arborescent trop dense, limitant la transmission de la lumière et portant ainsi préjudice aux semis du pin. En parallèle, l'incorporation accélérée, par la présence d'une litière améliorante, de la MO et le ralentissement de la minéralisation de l'humus favorisent un enrichissement des sols. Cet enrichissement en MO et en substances nutritives, ainsi que l'augmentation de la dispersité des sols, profitent aux essences concurrentielles du pin, plus exigeantes quant aux conditions édaphiques.

Ainsi, le pin sylvestre va naturellement disparaître de la RSLN et les pinèdes seront remplacées, après développement temporaire des formations buissonnantes, par une forêt de feuillus, probablement, appartenant au *Carpinion*, soit à la chênaie à charme.

La réalisation d'études complémentaires à celle-ci préciserait le modèle de succession de végétation et l'évolution des sols. Une première étude, basée sur la dynamique de l'eau, permettrait de définir le régime hydrique actuelle des sols et de projeter ce régime dans l'avenir par modélisation selon le scénario de changement climatique le plus probable. Ainsi, il serait possible d'extrapoler quelles espèces pourraient potentiellement s'installer, s'étendre ou disparaître. Une deuxième étude, cette fois-ci basée sur le fer et la dynamique de la MO, permettrait de quantifier les processus pédogénétiques en cours et de confirmer ou non la transition des RENDOSOLS vers des CALCOSOLS, davantage favorables aux concurrents du pin.

Seule une gestion forestière favorisant les semis du pin (réduction des couverts arborescent et arbustif) peut permettre la survie de ces pinèdes. Malgré des mesures de conservation réalisables, mais

certainement très coûteuses, il semble peu raisonnable de vouloir conserver les pinèdes de la RSLN. En effet, le réchauffement des températures, déjà observé au sein des pinèdes, et l'augmentation prédite de l'intensité des sécheresses à venir contre-indique la conservation du pin sylvestre. De telles conditions affaiblissent celui-ci. En revanche, ces mêmes conditions sont favorables au chêne, du fait d'un accroissement de sa capacité concurrentielle.

Étant donné que l'exploitation des forêts en Suisse n'est plus guère rentable, et malgré le fait que les pinèdes soient condamnées à plus ou moins court terme, la commercialisation des pins, ayant encore une valeur marchande, ne serait que peu lucratif. De plus, les demandes de la société pour des fonctions récréatives, écologiques et de protection des écosystèmes forestiers se sont multipliées. Enfin, d'un point de vue scientifique, laisser ces pinèdes poursuivre leur évolution naturellement permettrait de documenter les prochaines étapes du modèle de succession sol nu-climax forestier, établi par P. Cornali dans les années 1990. En effet, les pinèdes ont succédé à une végétation tout d'abord herbacée (Associations à *Carex viridula*, *Molinietum caeruleae*) puis arbustive qui a colonisé les terres de la RSLN suite à leur exondation. Ainsi, le maintien d'une forêt naturelle reste la solution la plus profitable à tous.

En termes de milieux forestiers, la RSLN offre une diversité écologique importante due à une large amplitude des régimes hydriques (de très humides à humidité variable). Ainsi, des études similaires mais centrées sur des milieux telles les aulnaies, saulaies, frênaies et chênaies pourraient être réalisées. Ces forêts sont encore jeunes mais peuvent être considérées comme étant des forêts primaires, car l'homme y est peu intervenu. En parallèle aux pinèdes, les aulnaies noires, frênaies et autres forêts de feuillus ont fait l'objet d'études dans les années 1980 (Roulier, 1980 ; Bueche, non publié). Ainsi, ces études peuvent elles aussi servir de base à l'élaboration de divers modèles de succession de végétation, à partir d'un sol nu et d'un repère temporel identique (1ère correction des eaux du Jura) mais sous des régimes hydriques différents.

Bibliographie

Aeschimann D. & Burdet H.M. 2005. Flore de la Suisse et des territoires limitrophes : le nouveau Binz. 4ème éd., Haupt, Berne. 603 p.

Aymonin G.G., Timbal J., Belot A., Brosse J., Dominik M., Lamontagne M. & Picard J.-F. 1986. Guide des arbres et arbustes. Sélection du Reader's Digest, Paris. 351 p.

Baize D. & Girard M.-C. 2009. Référentiel pédologique 2008. Quae, Versailles. 480 p.

Berset J. 1949. La végétation de la réserve de Cheyres et des rives avoisinantes du lac de Neuchâtel. Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles. 40 : 65-94.

Bonfils P., Horisberger D. & Ulber M. 2005. Promotion du chêne. Stratégie de conservation d'un patrimoine naturel et culturel en Suisse. 102 p.

Borcard D., Gillet F. & Legendre P. 2011. Numerical ecology with R. Springer, New York. 306 p.

Braun-Blanquet J. 1964. Pflanzensoziologie : Grundzüge der Vegetationskunde. Springer, Vienne. 865 p.

Brunner M. 2014. Arbres géants de Suisse. Werd, Thun. 239 p.

Bugmann H., Brang P., Elkin C., Henne P., Jakoby O., Lévesque M., Lischke H., Psomas A., Rigling A., Wermelinger B. & Zimmermann N. 2014. Climate change impacts on tree species, forest properties, and ecosystem services. p. 79–90. CH2014-Impacts. Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, et ProClim, Berne.

Buras A., Schunk C., Zeiträg C., Herrmann C., Kaiser L., Lemme H., Straub C., Taeger S., Swein S.G., Klemmt H.-J. & Menzel A. 2018. Are Scots pine forest edges particularly prone to drought-induced mortality? Environmental Research Letters. 13 : 025001.

Buttler A. 1987. Etude écosystémique des marais non boisés de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse) : phytosociologie, pédologie, hydrodynamique et hydrochimie, production végétale, cycles biogéochimiques et influence du fauchage sur la végétation. Université de Neuchâtel, Neuchâtel. 284 p.

CFHA. 2005. Les polluants atmosphériques azotés en Suisse. Cahier de l'environnement 384. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, OFEFP, Berne. 174 p.

Clot F. 2013. Pineraie à molinie. Service des forêts, de la faune et de la nature du canton de Vaud. 2 p.

Clot F. & Delarze R. 2009. Catalogue des unités de végétation forestière répertoriées dans la base de données du canton de Vaud. Typologie des groupements végétaux forestiers du canton de Vaud : rupture nécessaire d'une tradition. Journal forestier suisse. 5 p.

Cornali P. 1992. Écologie des pinèdes (*Pinus silvestris*) de la rive sud du Lac de Neuchâtel (Suisse). Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie. Université de Neuchâtel, Neuchâtel. 239 p.

Cornali P. 1997. Ecologie des pinèdes (*Pinus sylvestris*) de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). I, Phytosociologie, pédologie, hydrodynamique. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles. 120 : 55–72.

Cornali P. 1998. Ecologie des pinèdes (*Pinus sylvestris*) de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). II, Phytomasse et productivité aériennes, dynamique du groupement. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles. 121 : 93–110.

Cornali P. 1999. Ecologie des pinèdes (*Pinus sylvestris*) de la rive sud du lac de Neuchâtel (Suisse). III, Minéralomasse et cycles biogéochimiques des éléments majeurs du groupement. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles. 122 : 85–97.

Delarze R., Gonseth Y., Eggenberg S. & Vust M. 2015. Guide des milieux naturels de Suisse : écologie, menaces, espèces caractéristiques. 3ème éd., Rossolis, Bussigny. 440 p.

Duchaufour P. 1997. Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement. 5ème éd., Masson, Paris. 291 p.

Dufrêne M. & Legendre P. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. Ecological Monographs. 67 : 345–366.

ECOTEC. 2012. Milieu naturel. Pinède à molinie. Direction générale de la nature et du paysage, ECOTEC Environnement S.A, Genève. 9 p.

Eggenberg S., Bornand C., Juillerat P., Jutzi M., Möhl A., Nyffeler R. & Santiago H. 2018. Flora Helvetica : guide d'excursions. Haupt, Bern. 813 p.

Eggenberg S. & Möhl A. 2013. Flora Vegetativa : un guide pour déterminer les plantes de Suisse à l'état végétatif. 2ème éd., Rossolis, Bussigny. 726 p.

Ellenberg H. 1986. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. 4ème éd., Ulmer, Stuttgart. 989 p.

Girard M.-C., Jabiol B. & Schvartz C. 2011. Etude des sols. Description, cartographie, utilisation. Dunod, Paris. 404 p.

Gobat J.-M., Aragno M. & Matthey W. 2010. Le sol vivant. Bases de pédologie - Biologie des sols. 3ème éd., Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. 817 p.

Gobat J.-M. & Guenat C. 2019. Sols et paysages : types de sols, fonctions et usages en Europe moyenne. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. 576 p.

Gobat J.-M. & Le Bayon C. 2014. Clé de Sol. Principaux sols de Suisse. Laboratoire Sol et Végétation, Université de Neuchâtel. 73 p.

Gobat J.-M., Valdi G., Bullinger-Weber G. & Amstutz R. 2013. Protocole de description des sols. Laboratoire Sol et Végétation, Université de Neuchâtel. 46 p.

Gray A.N. & Azuma D.L. 2005. Repeatability and implementation of a forest vegetation indicator. Ecological Indicators. 5 : 57–71.

Grime J.P. 1974. Vegetation classification by reference to strategies. Nature. 250 : 26–31.

Heiri C., Wolf A., Rohrer L. & Bugmann H. 2009. Forty years of natural dynamics in Swiss beech forests: structure, composition, and the influence of former management. Ecological Applications. 19 : 1920–1934.

Howard P.J.A. 1965. The carbon-organic matter factor in various soil types. Oikos. 15 : 229–236.

IUSS Working Group. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014: international soil classification system for naming and creating legends for soil maps. FAO, Rome. 203 p.

Kara F. & Topaçoğlu O. 2018. Influence of stand density and canopy structure on the germination and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings. Environmental Monitoring and Assessment. 190 : 1–10.

Landolt E., Bäumler B., Erhardt A., Hegg O., Klötzli F., Lämmler W., Nobis M., Rudmann-Maurer K., Schweingruber F.H., Theurillat J.-P., Urmi E., Vust M. & Wohlgemuth T. 2010. Flora indicativa. Ecological indicator values and biological attributes of the Flora of Switzerland and the Alps. Haupt, Berne. 384 p.

Lauber K., Wagner G. & Gygax A. 2012. Flora Helvetica : flore illustrée de Suisse. 4ème éd., Haupt, Berne. 1656 p.

Le Bayon C. 2018. Clé de détermination des formes d'humus. D'après Zanella et al. (2018). Version test. Laboratoire d'écologie fonctionnelle, Université de Neuchâtel. 28 p.

Magny M. 2004. Fluctuations du niveau des lacs dans le Jura, les Préalpes françaises du Nord et le Plateau suisse, et variabilité du climat pendant l'Holocène. Méditerranée. 102 : 61–70.

Matzner E. & Murach D. 1995. Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in central Europe. Water, Air, and Soil Pollution. 85 : 63–76.

Morrison L.W. 2016. Observer error in vegetation surveys: a review. Journal of Plant Ecology. 9 : 367–379.

Peterken G.F. 1996. Natural woodland: ecology and conservation in northern temperate regions. Cambridge University Press, New York. 522 p.

Rigling D., Hilfiker S., Schöbel C., Meier F., Engesser R., Scheidegger C., Stofer S., Senn-Irlet B. & Queloz V. 2016. Le dépérissement des pousses du frêne. Biologie, symptômes et recommandations pour la gestion. Institut fédéral de recherches WSL Birmensdorf. 8 p.

Roulier C. 1980. Dynamique des aulnaies noires de la rive sud du lac de Neuchâtel. Colloques phytosociologiques IX, 371–391.

Rowley M., Grand S. & Verrecchia E. 2018. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. Biogeochemistry. 137 : 27-49.

Schweingruber F.H. 1988. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. D. Reidel, Dordrecht. 276 p.

Smith T.M. & Smith R.L. 2015. Elements of ecology. 9ème éd., Pearson Education, Boston. 705 p.

Sommerhalder R. 1992. Natürliche Wälder der Waldföhre (*Pinus silvestris*) in der Schweiz - eine pflanzensoziologische Analyse mit Hilfe eines vegetationskundlichen Informationssystems. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. 172 p.

Verrecchia E. En préparation. Approche exploratoire des données en biogéosciences. Sur des thèmes traités avec l'aide de Matlab. Université de Lausanne.

Vittoz P., Bayfield N., Brooker R., Elston D.A., Duff E.I., Theurillat J. & Guisan A. 2010. Reproducibility of species lists, visual cover estimates and frequency methods for recording high-mountain vegetation. Journal of Vegetation Science. 21 : 1035–1047.

Vittoz P. & Guisan A. 2007. How reliable is the monitoring of permanent vegetation plots? A test with multiple observers. Journal of Vegetation Science. 18 : 413–422.

Vittoz P. & Matteodo M. 2017. Analyses de tableaux de végétation. Utilisation de R. Institut des dynamiques de la surface terrestre, Université de Lausanne. 43 p.

Wildi O. 2013. Data Analysis in Vegetation Ecology. 2ème éd., Wiley, Hoboken. 301 p.

Zanella A., Ponge J.-F., Jabiol B., Sartori G., Kolb E., Le Bayon R.-C., Gobat J.-M., Aubert M., De Waal R., Van Delft B., Vacca A., Serra G., Chersich S., Andreetta A., Kõlli R., Brun J.J., Cools N., Englisch M., Hager H., Katzensteiner K., Brêthes A., De Nicola C., Testi A., Bernier N., Graefe U., Wolf U., Juilleret J., Garlato A., Obber S., Galvan P., Zampedri R., Frizzera L., Tomasi M., Banas D., Bureau F., Tatti D., Salmon S., Menardi R., Fontanella F., Carraro V., Pizzeghello D., Concheri G., Squartini A., Cattaneo D., Scattolin L., Nardi S., Nicolini G. & Viola F. 2018. Humusica 1, article 5: Terrestrial humus systems and forms — Keys of classification of humus systems and forms. Applied Soil Ecology. 122 : 75–86.

Sitographie

Association de la Grande Cariçaie. Histoire. Naissance de la Grande Cariçaie. Page consultée le 2 juin 2019. https://grande-caricaie.ch/fr/histoire/naissance-de-la-grande-caricaie/. Nature. Milieux naturels. Page consultée le 2 juin 2019. https://grande-caricaie.ch/fr/nature/milieux-naturels/. Nature. Page consultée le 2 juin 2019. https://grande-caricaie.ch/fr/nature/. Fiche info | 4. Grèves de la Corbière et de Chevroux consultée le 5 avril 2019. https://grande-caricaie.ch/fr/fiche/4-greves-de-la-corbiere-et-de-chevroux/. Fiche info | 6. Grève de la Motte consultée le 5 avril 2019. https://grande-caricaie.ch/fr/fiche/6-greve-de-motte/. Une mosaïque de milieux influencés par l'eau. Page consultée le 5 avril 2019. https://grande-caricaie.ch/fr/nature/milieux-naturels/.

Info flora. Milieux. Classification TypoCH. 6.4.1. Pinède subatlantique des pentes marneuses *Molinio-Pinion*. Fiche consultée le 9 avril 2019. https://www.infoflora.ch/fr/milieux/typoch/6.4.1-pinde-subatlantique-des-pentes-marneuses.html.

Office fédéral de l'environnement OFEV. Carte des dépôts d'azote. Page consultée le 6 juin 2019. https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/etat/donnees/donnees-historiques/cartes-des-valeurs-annuelles/carte-des-depots-dazote.html.

Office fédéral de la météorologie et de la climatologie Météosuisse. Climat de la Suisse. Page consultée le 5 avril 2019. https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/climat-de-la-suisse.html. Données mensuelles homogénéisées de précipitations et de température de la station météorologique de Payerne. Page consultée le 5 avril 2019. https://www.meteosuisse.admin.ch/product/output/climate-data/homogenous-monthly-data-processing/data/homog_mo_PAY.txt. Changement climatique suisse. Page consultée le 3 mai 2019. https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse.html. Scénarios climatiques. Page consultée le 6 mai 2019. https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse/scenarios-climatiques.html.

Office fédéral de la topographie Swisstopo. Atlas géologique de la Suisse au 1 : 25 000. Page consultée le 5 avril 2019. https://map.geo.admin.ch/?topic=geol&zoom=8&lang=fr&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&E=2564738.46&N=1198667.24&layers=ch.swisstopo.geologie-geocover,ch.swisstopo.geologie-geologischer_atlas&layers_opacity=0.75,0.75&catalogNodes=1786,1787&layers_visibility=false,true.

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier le Dr Pascal Vittoz, mon directeur de mémoire, pour m'avoir confié le sujet de mémoire sur les pinèdes de la Rive sud du lac de Neuchâtel, pour son accompagnement sur le terrain, pour son partage de connaissances botaniques et pour sa disponibilité.

Ensuite, j'aimerais remercier mes divers professeurs pour avoir cordialement répondu à mes questions. En particulier, merci au Prof. Éric Verrecchia, mon second directeur de mémoire, pour ses éclairements sur la fraction minérale du sol et au Dr Claire Le Bayon, pour ses éclairements sur la fraction organique du sol. Aussi merci au Dr Stéphanie Grand pour avoir retrouvé la référence manquante.

Merci aussi à Micaela Faria, Laetitia Monbaron et Olivier Reubi pour leurs conseils lors de la réalisation des analyses au laboratoire.

Un grand merci aux sympathiques étudiants du master BGS pour le changement d'idées en prenant un café à la cafétéria du Géopolis ! Entre autres, merci à Valentine, Anaïs et Gaëtan !

Un grand merci également à mes amies Nicola et Silvia pour avoir corriger respectivement l'abstract et la Zusammenfassung ! Ainsi qu'à Rahel pour ses conseils concernant l'emploi des termes spécifiques en allemand.

Merci à Aline pour ses conseils concernant les figures et à Cylia pour son aide lors de la mise en page.

Un immense merci à Julien et papa pour avoir relu en entier ce mémoire.

Enfin, j'aimerais remercier mes parents, mes sœurs et tous mes amis pour leur soutien et encouragements !

Annexes

A : tableau des données stationnelles, de la richesse spécifique et du recouvrement par strate des vingt stations étudiées

B : cartes historiques de la localisation des stations

C : exemplaire type de fiche de relevé de végétation

D : exemplaire type de fiche de description de profil de sol

E : protocoles détaillés des analyses de sol effectuées au laboratoire

F : tableau du nombre d'occurrence des valeurs écologiques selon Landolt et al. (2010), des stratégies CSR selon Grime (1974) et des milieux de prédilection selon Delarze et al. (2015) des espèces non retrouvées et nouvelles pour 2018

G : tableau des relevés phytosociologiques effectués en 2018

H : tableau de végétation issu du groupement

I : fiches pédologiques

Annexe A

Tableau des données stationnelles, de la richesse spécifique et du recouvrement par strate des vingt stations étudiées

Les relevés 1 à 26 ont été effectués en 1984 et les relevés 101 à 126 en 2018. Au relevé historique 1 correspond le relevé récent 101 et ainsi de suite.

Réserve	N° relevé	Coordonnées		Superficie	Richesse	Recouvrement [%]		
		X	Y	[m2]	spécifique	Arbres	Arbustes	Herbacées
Grèves de la Corbière et de Chevroux	**1**	556'818	191'039	400	22	70	70	40
	101	556'807	191'055		31	65	65	30
	19	556'823	191'069	200	28	90	80	50
	119	556'823	191'069		27	70	40	30
	20	556'837	191'084	250	25	60	50	95
	120	556'836	191'090		28	40	40	55
	23	556'860	191'106	150	27	60	50	50
	123	556'852	191'113		24	30	60	70
	24	556'675	190'744	200	19	80	70	60
	124	556'671	190'748		23	70	60	70
	25	556'911	191'020	100	21	60	50	80
	125	556'906	191'034		29	60	80	50
	26	556'909	191'057	100	21	80	80	25
	126	556'911	191'059		22	50	50	50
Grèves de la Motte	**2**	563'975	197'341	60	24	80	70	60
	102	563'963	197'336		23	60	60	85
	6	564'281	197'653	250	27	60	80	40
	106	564'296	197'656		33	55	80	30
	7	564'394	197'857	150	20	90	60	80
	107	564'402	197'871		28	60	65	25
	10	564'771	198'222	200	26	80	70	40
	110	564'776	198'217		26	40	80	30
	11	564'835	198'291	150	26	60	60	60
	111	564'835	198'285		27	60	60	30
	12	565'177	198'522	400	19	70	50	100
	112	565'183	198'516		36	50	60	90
	14	565'532	198'721	200	23	60	50	100
	114	565'524	198'720		27	50	80	80
	15	565'568	198'743	400	23	80	40	80
	115	565'280	198'743		27	60	70	70
	16	565'670	198'816	400	25	80	70	60
	116	565'662	198'807		34	70	60	75
	17	565'717	198'865	400	22	60	40	80
	117	565'711	198'866		32	60	60	65
	18	566'165	199'206	400	21	60	60	80
	118	566'173	199'220		27	40	70	70
	21	565'864	198'930	100	22	60	70	70
	121	565'868	198'926		31	55	70	60
	22	566'320	199'340	150	28	70	60	80
	122	566'303	199'327		28	60	40	60

Coordonnées de 1984 révisées par P. Cornali le 7 décembre 2017.

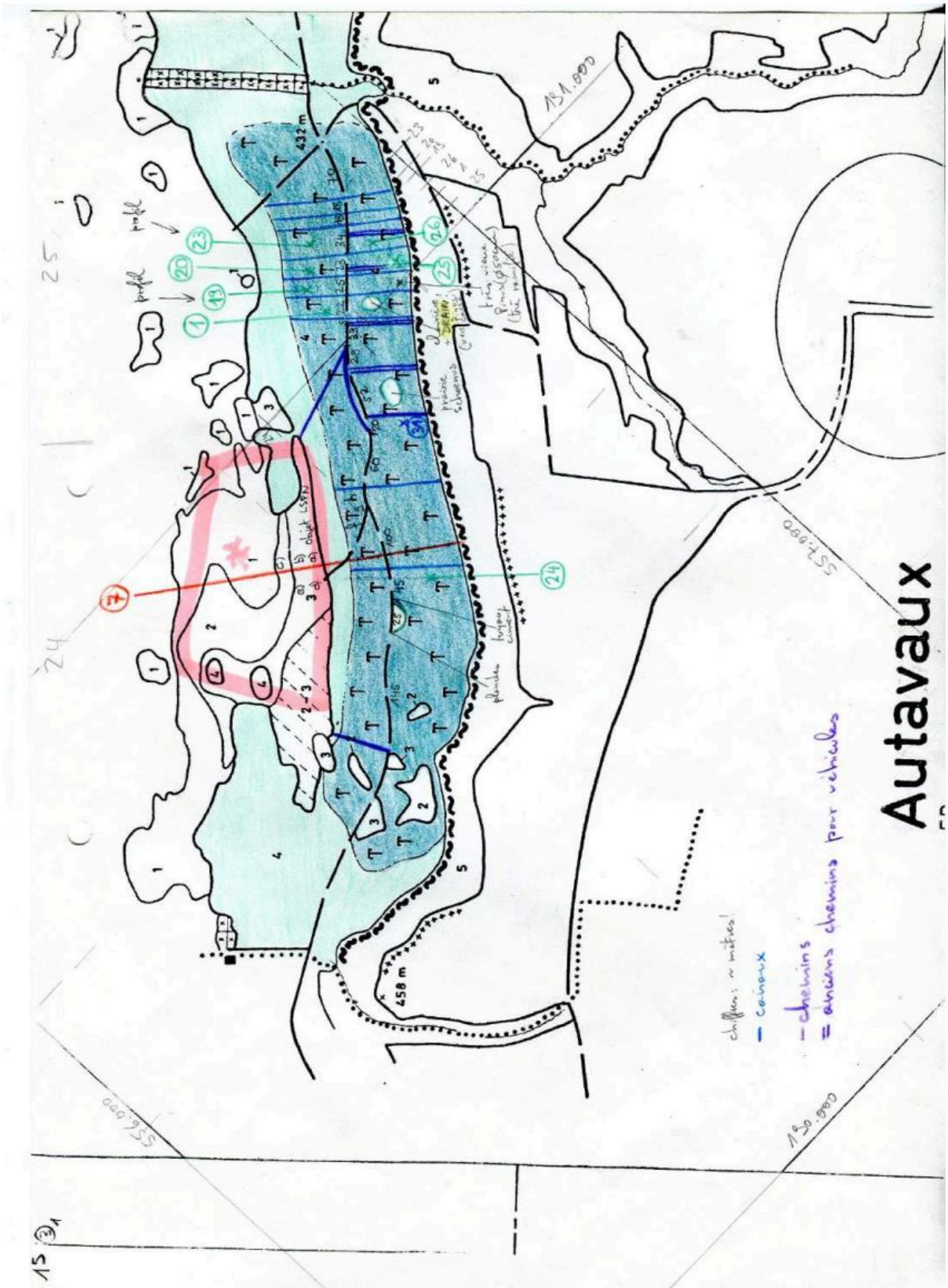
Source : jeu de photocopies de cartes à l'échelle 1 : 5000.

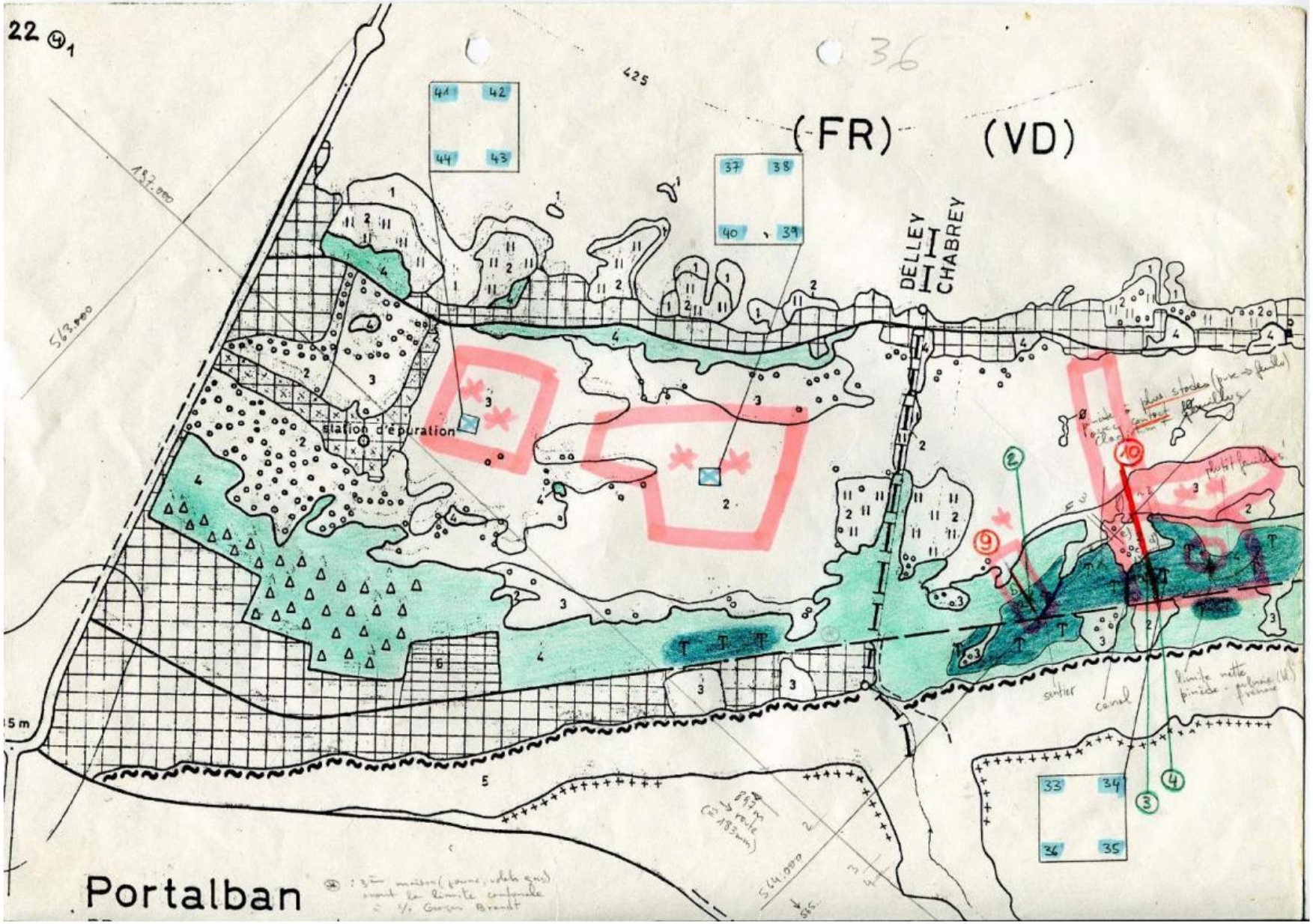
Complément pour calcul et contrôle : www.map.geo.admin.ch.

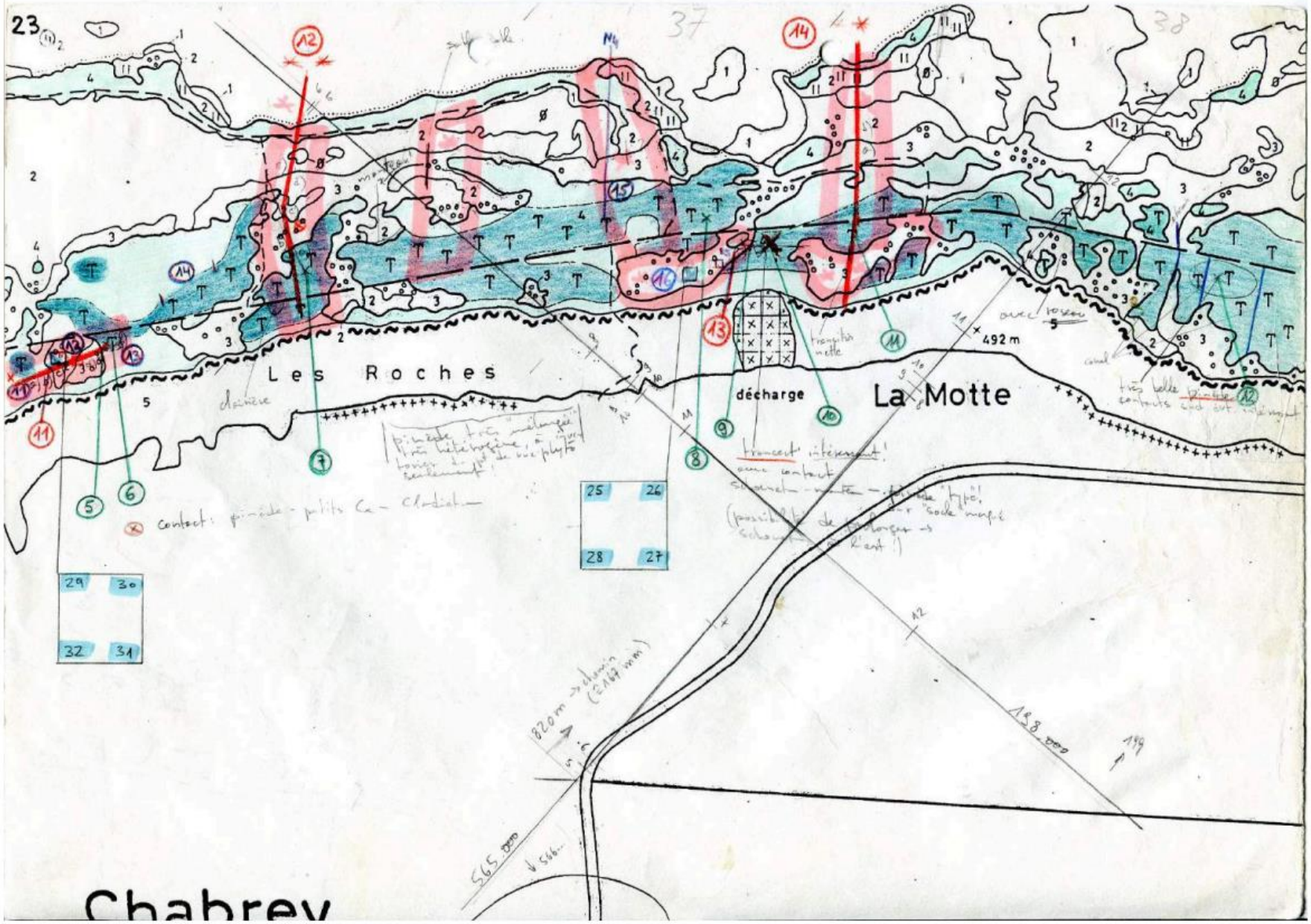
Annexe B

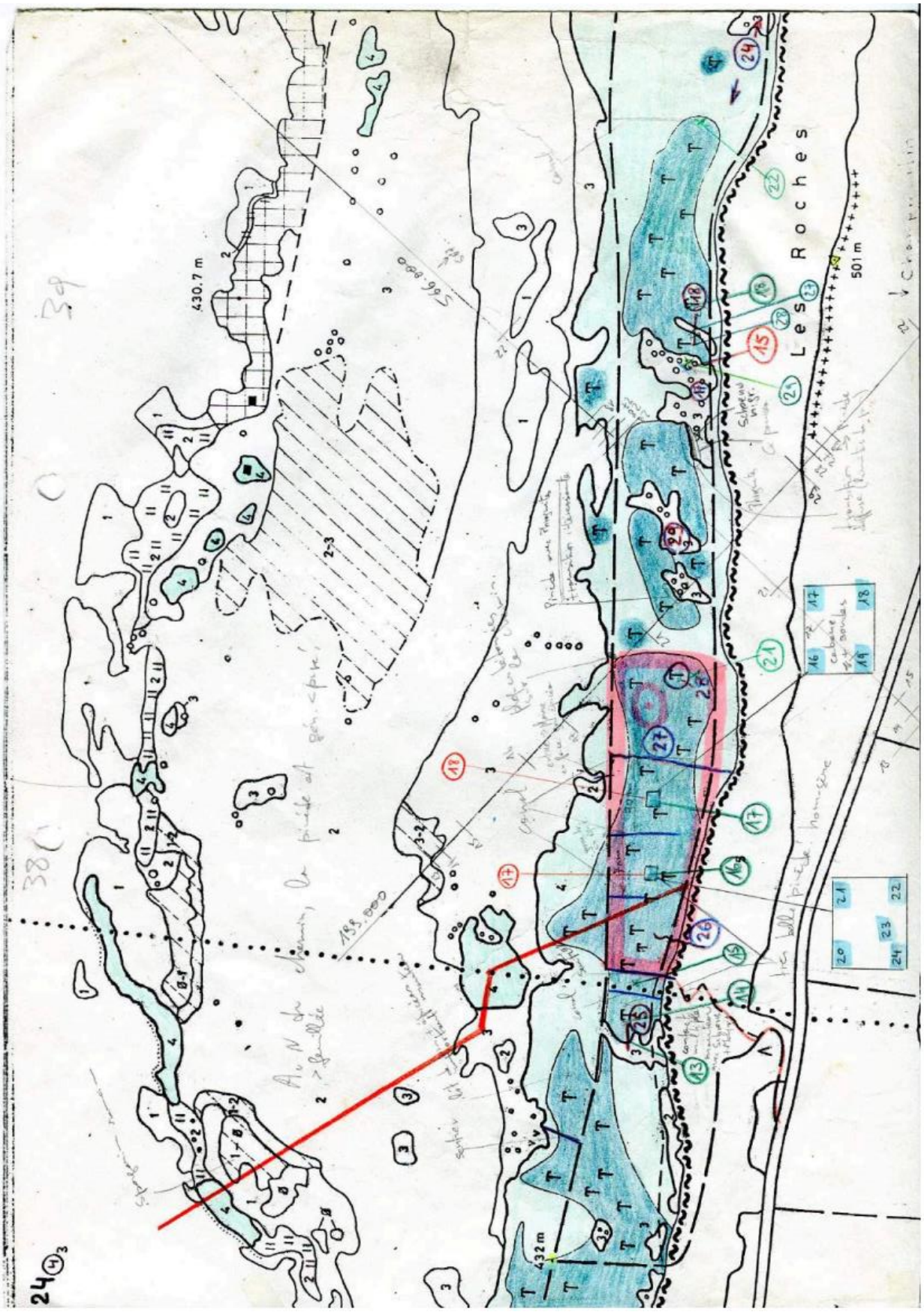
Cartes historiques de la localisation des stations

Les cartes ont été fournies par P. Cornali. Les numéros des stations sont inscrits et entourés en vert.


Autavaux
chiffres : ~ mètres!
— canaux
— chemins
= anciens chemins pour véhicules
432 m
458 m
131.000
130.000
557.000
556.000


22 ④1
(FR)
(VD)
DELLEY
CHABREY
station d'épuration
Portalban
sentier
canal
41
42
44
43
37
38
40
39
33
34
36
35


23
Les Roches
décharge
La Motte
492 m
Chabrey
25
26
28
27
29
30
32
31


Les Roches
430.7 m
501 m
432 m
24

Annexe C

Exemplaire type de fiche de relevé de végétation

Altitude en m	N° station
Superficie en m2	Date
Exposition en °	Lieu
Pente en °	Coord.
Microreliefs	

Strate arboresente > 6 m	Haut. max. en m	Recouv.

Strate arbustive	Haut. max. en m	Recouv.

Strate herbacée < 0.5 m

Recouvrement en %
Litière
Mousse
Herbacées
Roche
Sol nu

Braun-Blanquet	
r	1 à 2 ind.
+	< 1 %
1	1 à 5
2a	5 à 15
2b	15 à 25
3	25 à 50
4	50 à 75
5	> 75

Classification
- Formation
- Classe
- Alliance
- Sous-alliance

Annexe D

Exemplaire type de fiche de description de profil de sol

Station: Date: Lieu: Auteur:	Coordonnées X: Coordonnées Y: Altitude:
Antécédents climatiques: Temps du jour: Type de roche mère: Microreliefs: Type de végétation:	
Autres remarques:	
Croquis:	

Horizon	Profondeur	Description
		Couleur: pH: HCl: Structure: Texture: Vide, porosité: Racines: MO: Orga. vivants: Prop. mécaniques: Remarques:
		Couleur: pH: HCl: Structure: Texture: Vide, porosité: Racines: MO: Orga. vivants: Prop. mécaniques: Remarques:
		Couleur: pH: HCl: Structure: Texture: Vide, porosité: Racines: MO: Orga. vivants: Prop. mécaniques: Remarques:
		Couleur: pH: HCl: Structure: Texture: Vide, porosité: Racines: MO: Orga. vivants: Prop. mécaniques: Remarques:
		Couleur: pH: HCl: Structure: Texture: Vide, porosité: Racines: MO: Orga. vivants: Prop. mécaniques: Remarques:

Annexe E

Protocoles détaillés des analyses de sol effectuées au laboratoire

Le pH

Introduction

1. **Principes**

De manière générale, le pH représente la concentration de ions H^+ libres dans une solution. Il s'exprime selon une échelle de 0 à 14. Les valeurs faibles indiquent l'acidité (vinaigre, jus de citron), les valeurs hautes la basicité (savon) tandis que la neutralité se situe aux environs de 7. Dans le sol, deux types de pH peuvent être mesurés (pH_{H2O}) et (pH_{KCl}).

2. **Le pH H_2O**

Il rend compte de l'acidité libre ou acidité active, c'est-à-dire de l'activité des ions H_3O^+ (protons) présents à l'état dissocié dans la phase aqueuse du sol. On obtient donc la mesure du pH de l'eau du sol et des éléments qui y sont dissout.

Ces ions en solution sont en équilibre dynamique avec les protons fixés sur le complexe organo-minéral (appelé aussi complexe adsorbant ou complexe d'échange) du sol qui agit comme un acide faible :

$$HA\ (sol)\ +\ H_2O\ \leftrightarrow\ A\text{-}\ (sol)\ +\ H_3O^+$$

3. **Le pH KCl**

Il rend compte de l'acidité d'échange. En effet, le chlorure de potassium en solution (KCl, électrolyte ou sel neutre) déplace l'équilibre vers la droite par échange des ions K^+ avec les protons fixés sur le complexe. A la différence du pH H_2O, le pH KCl mesure donc à la fois l'activité des ions H_3O^+ déjà dissociés et des ions H_3O^+ fournis par le complexe :

$$HA\ (sol) + K^+ + H_2O \leftrightarrow KA\ (sol) + H_3O^+$$

Sa valeur est en général plus faible que celle du pH H_2O puisque les ions K^+ ont évacué les ions H^+ fixés sur le complexe. C'est un paramètre également plus stable dans le temps que le précédent. Le pH KCl permet la mesure du pH "du sol", soit celle des particules solides et de la solution de sol.

Méthode

1. **Matériel**

- Flacons plastique 100mL (voir photo ci-dessous)
- Baguette de verre.
- pH-mètre avec électrode pH.

Flacon de 100 ml pour les mesures de pH

2. **Réactifs**

- Eau désionisée
- Solutions tampon pH = 4.00, pH = 7.00 et pH = 10.
- KCl 1 M : dissoudre **37.28 g de KCl** en poudre dans 500mL d'eau désionisée, utiliser un ballon jaugé. La masse molaire du KCl est de 74.56 g/mol.

3. **Mode opératoire**

a. ***Echantillon de départ :***

10g de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm (= terre fine).

b. ***Blancs***

Il n'est pas nécessaire de faire de blancs, mais il faut bien calibrer le pH-mètre.

c. ***Procédure***

- **Placer** de la prise d'échantillon dans un flacon plastique.
- **Ajouter** de l'**eau désionisée/KCl 1M**. L'important est ici de travailler avec un mélange sol/liquide dans la **proportion 1 : 2.5**. Par exemple, si vous travaillez avec 10 g de sol séché à l'air, il vous faudra ajouter 25 ml d'eau désionisée.
- Bien **homogénéiser** le mélange sol-eau ou tourbe-eau en brassant énergiquement avec une baguette de verre. Veiller à rincer la baguette de verre avec de l'eau désionisée entre les échantillons afin d'éviter de polluer ceux-ci !
- **Mettre à agiter** 1h à 120tr/min
- **Etalonner** le pH-mètre avec les solutions tampons pH 10, pH 7 et pH 4.
- Après **décantation** rapide des échantillons, **mesurer le pH** en plaçant l'électrode dans la suspension de sol. **Noter** la valeur du pH après stabilisation.
- Après chaque mesure, rincer l'électrode à l'eau désionisée.
- Verser délicatement un maximum de solution (eau ou KCl) à l'évier sous flux d'eau important puis jeter le restant de sol dans un bécher. Une fois toutes les analyses effectuées, faire sécher le sol puis le mettre dans le bac au couvercle bleu à droite de l'évier.

Contacts

Personne en charge des laboratoires de biogéosciences - à définir

Références

Pansu, M. et Gautheyrou. J. (2003). *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minéral*. Springler-Verlag France, p.9

Préparation pour la granulométrie laser

Introduction

1. **Principe de la Granulométrie Laser**

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la répartition de la taille des particules minérales dans un échantillon. Pour la granulométrie par diffraction, l'échantillon, en suspension dans une solution, passe au travers d'un rayon laser. Le rayon est diffracté en fonction du nombre et de la taille des particules qui le traversent. Après le passage à travers l'échantillon, l'angle et l'intensité de la diffraction du laser sont mesurés par une série de détecteurs. A partir de ces données, le programme calcule la taille des particules et exprime le pourcentage volumique relatif pour chaque classe granulométrique définie (Pansu et Gautheyrou, 2003).

2. **Comparaison des méthodes**

La comparaison des résultats provenant des diverses méthodes est en général assez surprenante et il arrive que ces résultats diffèrent complètement. Premièrement, dans la méthode par tamisage / pipetage, les résultats sont calculés d'après le poids respectifs des fractions, alors que dans la méthode par diffraction laser, le calcul est réalisé d'après le volume des particules analysées. Deuxièmement, la forme des grains joue un rôle. On imagine facilement qu'une particule allongée puisse passer à travers les mailles d'un tamis correspondant à son plus petit diamètre. Dans ce cas, elle sera considérée comme « plus petite » qu'elle ne l'est. Inversement, le programme du granulomètre laser calcule la taille des particules en admettant qu'elles sont toutes sphériques et il extrapole le volume de ces sphères d'après les plus grands diamètres mesurés. Cette fois, une même particule allongée apparaîtra comme « plus grande » que ce qu'elle est. Mais au final, qu'est-ce que la taille d'une particule ? Quelle dimension prendre en compte et comment la mesurer ?

3. **Intérêt de la granulométrie minérale**

La distribution granulométrique est une des caractéristiques de la fraction minérale des sols ou des sédiments. L'étude des différentes courbes obtenues peut se révéler un précieux indice pour comprendre la répartition des formations superficielles dans le paysage. En domaine carbonaté par exemple, le résidu d'altération des roches et marnes (après décarbonatation) peut servir de « signature » du matériel géologique en place. En comparant ce signal à celui des sols sus-jacents, il est possible de déterminer s'il y a eu d'autres dépôts par-dessus la roche (on parle alors de discontinuité lithologique et la roche est le matériel substrat), ou si le sol s'est développé à partir de l'altération du matériel géologique sous-jacent (qui est, dans ce cas, le matériel parental).
N.B. Nous vous encourageons à lire la référence suivante : Gee, G. W. & Bauder J. W. (1986) Particle-size analysis. In Klute, A. (Ed.) Methods of Soils Analysis, Part. 1. Soil Science Society of Amercia Book Series 5, Madison, Wisconsin, USA. *PDF disponible sur demande !*

Méthode

Afin de procéder aux analyses minéralogiques par diffraction laser, les échantillons doivent suivre trois traitements successifs dans le but de libérer et dissocier les particules minérales :

1. Décarbonatation
2. Destruction de la matière organique
3. Dispersion

1. Décarbonatation

La décarbonatation **n'est en général pas nécessaire.** Si toutefois elle s'avère vraiment nécessaire pour l'étude, elle doit être réalisée avant la destruction de la matière organique.

!! La décarbonatation se fait sous la chapelle droite du labo 1440 !!

a) Matériel

- Tubes à centrifuger 50 ml bouchons bleu (dans caisse grise sous bain-marie labo 1440)
- Bain à ultrasons (rempli d'eau déminéralisée)
- Centrifugeuse
- Pipette jetable de 10 ml
- Pipette 10 ml et embouts de pipettes de 10 ml

b) Réactifs

- HCl technique 10%
- Eau déminéralisée

c) Elimination des carbonates :

- En fonction de la teneur approximative en carbonate des échantillons, calculer la quantité de terre fine nécessaire pour obtenir après décarbonatation les poids suivants :
  - 0.5 g de sédiment pour des échantillons très argileux (0.2 g si analyses manuelles)
  - 1 g de sédiment pour des échantillons très limoneux (0.4 g si analyses manuelles)
  - 1.5–2 g de sédiment pour des échantillons très sableux (0.7g si analyses manuelles)
- Mettre la quantité de terre fine tamisée à 2mm désirée pour chaque échantillon dans un tube à centrifuger de 50ml (tubes avec bouchons bleu dans la boites grise dans labo 1440)
- Mouiller les échantillons avec 2 ml d'eau déminéralisée.
- Pour l'étape suivante de la procédure, travailler avec des séries de 8 échantillons afin de pouvoir centrifuger et neutraliser les échantillons selon le bon 'timing'.
- Pour la première série de 8 échantillons, ajouter 10ml de HCl 10%, attention réaction forte si l'échantillon est très carbonaté.

- Fermer les flacons le temps de les secouer énergétiquement puis les rouvrir. (le CO_2 produit par la dissolution de $CaCO_3$ risque de faire sauter le bouchon si celui-ci reste fermé trop longtemps !)
- Placer les 8 échantillons dans le bain à ultrasons sans couvercle, préalablement chauffé à 70°C, enclencher la minuterie pour 10 minutes d'ultrason (vérifier que les flacons soient bien dans l'eau).
- Une fois les 10 minutes écoulées, sortir de suite les 8 échantillons du bain à ultrasons et vérifier l'état de la réaction.

  – Si la réaction est encore vive, prolonger l'attaque 5 minutes de plus et revérifier
  – Si la réaction est stoppée (ce qui est généralement le cas), fermer les bouchons et les centrifuger de suite pendant 6 minutes à 4'000 RPM (Pour les échantillons qui ne sédimentent pas bien, augmenter le temps de centrifugation jusquAttention à bien équilibrer les flacons en les complétant par exemple à l'eau déminéralisée jusqu'à la marque des 50 ml.
- Ouvrir prudemment les couvercles et jeter dans un grand bécher en plastique le surnageant. 2 possibilités pour faire cela :

  A. Déverser prudemment le surnageant en faisant attention de ne pas perdre même la plus infime des fractions de l'échantillon.

  B. A l'aide d'une pipette jetable de 10 ml, pomper le surnageant prudemment en évitant de récupérer même la plus infime des fractions de l'échantillon

  N.B. Il se peut que des petites particules flottent dans le surnageant. Il s'agit en général de matière organique (racines, feuilles, bois, etc.). C'est une bonne chose si ces particules sont jetées en même temps que le surnageant.

  Attention : Les résidus d'acides récoltés doivent être neutralisés avant d'être jeté à l'évier !

- 2ème attaque **si nécessaire** : recommencer les phases décrites ci-dessus. Pour tester s'il y a encore des carbonates, on peut mettre quelques gouttes d'HCl 10% sur le culot de sédiment. Si une réaction a lieu, alors une deuxième attaque doit être effectuée.
- Tout de suite après avoir déversé le surnageant, remplir le tube à centrifugé avec de l'eau déminéralisée jusqu'à la marque des 50 ml, fermer le tube et disperser le sédiment en agitant énergétiquement ou en utilisant le 'Vortex'.
- Répéter l'opération de rinçage décrite ci-dessous deux à trois fois :

  i) Vérifier que chacun des 8 tubes est rempli à la même hauteur.
  ii) Centrifuger les 8 échantillons 6 minutes à 4'000 RPM (voir 10 à 15 minutes pour avoirs un culot qui tienne mieux)
  iii) Déverser le surnageant à l'évier soit en déversant celui-ci directement ou en le pipetant à l'aide d'une pipette jetable de 10 ml.
  iv) Remplir le tube avec l'eau déminéralisée jusqu'à la marque des 50 ml. Ne pas effectuer cette étape lors du dernier rinçage !

  En général, 3 rinçages suffisent à laver le HCl et neutraliser l'échantillon. On peut vérifier le pH de la solution à l'aide d'un papier pH 1-10 pour vérifier que le pH soit >6.
- Une fois la première série de 8 échantillons neutralisée, on peut passer aux 8 échantillons suivants. L'important est de limiter le plus possible le temps de réaction des échantillons avec HCl 10 % à 10 minutes pour éviter la transformation des argiles aux pH bas.

2. Destruction de la matière organique

!! La destruction de la MO se fait sous la chapelle gauche du labo 1440 !!

a) Matériel

- Tubes à centrifuger 50 ml bouchons bleu (dans caisse grise sous bain-marie labo 1440)
- Bain-marie ou étuve réglée à 45 °C
- Papier pH
- Pipette jetable de 1 ml et de 10 ml
- Pipette de 10 ml et embouts de pipettes de 10 ml

b) Réactifs

- H_2O_2 technique 35%
- H_2O_2 technique 10%
- Eau déminéralisée
- NaOH 0.1N ou NaOH 0.5N
- Ethanol

Elimination de la matière organique :

- En fonction de la taille approximative des grains des échantillons, estimer la quantité de terre fine tamisée à 2 mm nécessaire selon les indications suivantes :
  - 0.5 g de sédiment pour des échantillons très argileux (0.2 g si analyses manuelles)
  - 1 g de sédiment pour des échantillons très limoneux (0.4 g si analyses manuelles)
  - 1.5–2 g de sédiment pour des échantillons très sableux (0.7 g si analyses manuelles)

  Mettre la quantité de terre fine tamisée à 2mm désirée pour chaque échantillon dans un tube à centrifugé de 50ml (tubes avec bouchons bleu dans la boites grise dans labo 1440)
- Humidifier les échantillons avec 2 ml d'eau déminéralisée.
- Sous la hotte, ajouter 2ml d'eau oxygénée 10% et mélanger en remuant gentiment les tubes sans les fermer.
- L'humidification et la destruction de la matière organique par H_2O_2 libèrent une quantité parfois importante d'acidité. Si l'on veut préserver les minéraux solubles à pH acides ($CaCO_3$) et éviter la dégradation des argiles, il faut tamponner la solution à des pH neutre (entre 6.5 et 7.5). Pour ce faire :

  i) Utiliser les papiers pH 1-10 et pH 1-6 pour vérifier le pH plus précisément.

  ii) Ajouter à l'aide d'une pipette jetable du NaOH 0.1 M (ou NaOH 0.5 M si nécessaire) goutte à goutte et vérifier à l'aide d'un petit bout de papier pH tenu à l'aide d'une pincette en plastique le pH ajouter du NaOH jusqu'à ce que le pH arrive aux alentours de pH 6.5 à 7.5. Jeter les morceaux de papier pH dans la 'poubelle de hotte' prévue à cet effet.

  iii) Durant les premiers jours de l'attaque, vérifier que le pH soit toujours neutre à l'aide de papier pH. Il arrive que passablement d'acidité soit libérée durant les premiers jours ; après le pH reste généralement plus stable.

!! Attention à la formation de mousse (réaction de la matière organique) !! Au besoin, ajouter un jet d'éthanol. (Si l'éthanol coule le long des flacons, vérifier la notation du nom des échantillons)

- Couvrir les flacons avec leur bouchon mais ne pas fermer celui-ci hermétiquement.
- Les laisser 12h (une nuit) sous la hotte.
- Le lendemain, mettre les flacons à l'étuve réglée à 45°C (utiliser pour ce faire l'étuve jaune à gauche des hottes dans le labo 1440. NE PAS MODIFIER LE REGLAGE DE LA TEMPERATURE !)
- Deux heures après, vérifier l'état de vos échantillons et ajouter 1 ml de H_2O_2 35% (avec une pipette jetable de 1 ml) si la mousse ne dépasse pas la marque des 30-40 ml. Sinon attendre un peu plus longtemps pour que la réaction diminue et la mousse de même. Après l'adjonction de H_2O_2, secouer, vérifier le pH et remettre les échantillons au chaud.
- Quelques heures après, vérifier l'état de vos échantillons et ajouter environ 2-3 ml de H_2O_2 35% (avec une pipette jetable de 10 ml) si la mousse ne dépasse pas la marque des 30-40 ml. Si vos échantillons moussent fort, attendre un peu plus. Après l'adjonction de H_2O_2, secouer, vérifier le pH et remettre les échantillons au chaud.

!! Tant qu'il y a formation de mousse il y a destruction de matière organique. Tout est donc OK. S'il n'y a plus de mousse, cela veut dire qu'il n'y a plus assez de H_2O_2, il faut donc en rajouter.

- En général, à l'aide d'une pipette jetable de 10 ml, ajouter 2-4 ml de H_2O_2 35% le matin et 2-4 ml de H_2O_2 35% le soir durant une bonne semaine voir deux. Penser à vérifier le pH. Remuer les échantillons à chaque ajout d'eau oxygénée.

!! A force de rajouter du H_2O_2 et de NaOH, le niveau d'eau monte dans le tube, ce qui dilue à chaque fois plus le H_2O_2 rajouté. Si le niveau atteint 30-40 ml, il est préférable de centrifuger les tubes et jeter le surnageant pour ramener le niveau du surnageant à des quantités raisonnables.

- Au bout d'une semaine voir deux au maximum, la réaction est stoppée. Il n'y a plus formation de mousse mais seulement de bulles qui proviennent du dégazage de H_2O_2.
- Il faut maintenant ramener le niveau d'eau dans les tubes à <10 ml. Pour ce faire, on peut laisser évaporer nos échantillons à l'étuve ou les centrifuger et jeter le surnagent.

3. Dispersion

a. ***Matériel***

- Plateau agitateur

b. ***Réactifs***

- Hexamétaphosphate de sodium à 40g/l

c. ***Marche à suivre***

- Ajouter 1 ml d'une solution d'hexamétaphosphate de Na à 40 g/l (Calgon) à chaque échantillon.

- Fermer les flacons et les mettre sur le plateau agitateur (vitesse env.100/min) pendant une nuit.
- Les échantillons sont prêts à être passés au granulomètre laser.

Contacts

Personne en charge des laboratoires de biogéosciences - à définir

Références

Pansu, M. et Gautheyrou. J. (2003). *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minéral*. Springler-Verlag France, p.993.

Gee, G. W. & Bauder J. W. (1986) Particle-size analysis. In Klute, A. (Ed.) Methods of Soils Analysis, Part. 1. Soil Science Society of Amercia Book Series 5, Madison, Wisconsin, USA. *PDF disponible sur demande!*

Humidité résiduelle

Introduction

1. Principe

Le sol, même apparemment sec, continue à capter l'humidité ambiante. Cette faculté dépend évidemment de la teneur en eau de l'air mais également du taux de matières hygrophiles de l'échantillon (argiles et matière organique), quoique la détermination du taux d'humidité ne permettre pas de les quantifier avec précision. On observe cependant des valeurs entre 4 et 8 % pour des textures argileuses (des valeurs supérieures à 8% indiquant un séchage imparfait de l'échantillon !), alors qu'un horizon sableux peu humifère aura un % HR inférieur à 1.

La valeur de l'humidité résiduelle est également très importante pour la suite des analyses. En effet, on exprime classiquement les résultats en fonction de la masse sèche (à 105 °C) de l'échantillon. Si l'on ne veut pas passer chaque prise d'essai à l'étuve à 105 °C pendant une nuit avant de l'analyser, il suffira de corriger les masses de terre séchées à l'air par le degré d'humidité résiduelle (ou son corollaire, le taux de matière sèche).

La teneur en eau du sol est un des paramètres importants à déterminer sur tourbe fraîche. Il permettra notamment de rapporter les taux de fibres à la masse sèche de départ.

2. Que mesure-t-on ?

L'humidité résiduelle (HR) correspond à la perte de masse observée après passage à 105°C d'une prise d'essai de l'échantillon de sol préparé pour analyse, c'est-à-dire séché à l'air (ou à l'étuve à 45°C).

Méthode

1. Matériel

- Cristallisoir Pyrex ou creuset en porcelaine (si suivi de perte au feu voir chapitre Perte au feu).
- Balance analytique (0.0001 g)
- Etuve à 105 °C
- Dessiccateur

Par gain de temps, il est préférable de coupler d'emblée l'analyse de l'humidité résiduelle et celle de la perte au feu en pesant les échantillons de sol frais directement dans les creusets en porcelaine.

2. Mode opératoire

- Prendre et **peser** un creuset en porcelaine
- Noter sa masse **« B »**, **en g**.
- **Peser** avec précision un échantillon de **sol séché** de **10 à 20 g** dans le creuset. Les récipients en verre ne captant pas l'humidité, il n'est pas nécessaire de précéder la pesée par un séchage en étuve. Cependant, la phase de séchage est indispensable lorsque les récipients contiennent des matériaux hygrophiles (comme la porcelaine).
- Noter la masse **« A »** exacte de l'échantillon **en g**.
- **Placer** l'échantillon 24 heures minimum **à l'étuve à 105°C**.
- **Sortir** l'échantillon, le **refroidir** au dessiccateur, **peser** à nouveau le creuset. Noter sa masse **« C », en g**.
- Si besoin, conserver cet échantillon étuvé dans le dessiccateur pour effectuer la mesure de la perte au feu.

NB : Il faut toujours corriger les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur sol frais ou séché à l'air par la teneur en matière sèche.

3. Calculs

Prise d'essai (m) corrigée par l'humidité résiduelle (HR) :

$$\mathbf{m_{105} = m - (m * HR)}$$

Le calcul permettant d'obtenir l'humidité résiduelle en % est le suivant :

$$\mathbf{HR\ \% = (A - C) / (A - B) *100}$$

Contacts

Personne en charge des laboratoires de biogéosciences - à définir

Références

Pansu, M. et Gautheyrou. J. (2003). *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minéral*. Springler-Verlag France, p.993.

Perte au feu

Pour cette manipulation, veuillez contacter :

Jean-Claude Lavanchy (Bureau 3221, Jean-Claude.Lavanchy@unil.ch,
Tel 021 692 43 22)

Introduction

1. Principe

L'échantillon de sol est brûlé à haute température (450°C): le matériel organique est oxydé et transformé sous forme de gaz carbonique (CO_2) et de vapeur d'eau. Après combustion, il ne reste que la fraction minérale du sol dans le récipient.

En ce qui concerne les tourbes, la mesure de la perte au feu permet une bonne estimation des teneurs réelles en matières organiques de la tourbe. L'échantillon de tourbe est cette fois brûlé à 600°C.

2. Que mesure-t-on ?

La mesure de la perte au feu (PAF) donne une indication sur le taux de matière organique et la teneur en carbone organique (Corg) du sol.

Cette analyse se fait au laboratoire 1871.

Méthode

1. Matériel

- Creusets en porcelaine
- Balance analytique, précision 0.0001 g.
- Dessiccateur
- Etuve à 105 °C
- Four à moufles pouvant atteindre une température adéquate

2. Mode opératoire

Pour un gain de temps il est préférable de couplé d'emblée l'analyse de la perte au feu avec celle de l'humidité résiduelle.

- Reprenez la masse **« C »** en g pesée ci-dessus, cette masse correspond à l'échantillon séché à 105°C avec le creuset
- Faites chauffer le four à 450°C
- Mettre les échantillons à 450°C pendant 2 heures.
- Pour des échantillons très organiques et peu argileux, on peut porter le temps de calcination à 4 heures. De même, si le départ de l'expérience se fait à four froid, on comptera 4 heures plutôt que 2 afin de garantir la calcination de toutes les matières organiques contenues dans l'échantillon.
- Après la calcination, placer les échantillons dans le dessiccateur
- Après refroidissement en dessiccateur, peser à nouveau le creuset et les cendres. Noter sa masse **« D »**.

3. Calculs

Les calculs permettant d'obtenir les valeurs de la perte au feu en % des échantillons sont les suivants :

- PAF % = ((A – B) – (D – B) * 100) / A – B
- PAF = 100 – Teneur en cendres (T)
- MO = PAF – ((2.04 * T) / 100)

Contacts

Jean-Claude Lavanchy, Bureau 3221, Jean-Claude.Lavanchy@unil.ch, Tel 021 692 43 22
Personne en charge des laboratoires de biogéosciences - à définir

Références

Pansu, M. et Gautheyrou. J. (2003). *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minéral*. Springler-Verlag France, p.993.

Protocole dosage des carbonates par pertes de masse

Introduction

1. Théorie

Les carbonates constituent un groupe abondant de la biosphère. Une fraction des minéraux carbonatés domine cependant : les formes liées au calcium $CaCO_3$, au magnésium $MgCaCO_3$, au sodium Na_2CO_3 et au fer $FeCO_3$. Il existe cependant de nombreuses espèces intermédiaires. Ces derniers sont issus d'une grande quantité de processus pédogéniques et biogéochimiques et peuvent apporter de précieuses informations selon les observations souhaitées. Pour plus d'information sur les méthodes de dosage des carbonates, se référer à Pansu et Gautheyrou (2003).

2. Principe

Dans le cas présent, le dosage des carbonates s'effectue par une mesure de perte de poids sur un échantillon de terre préalablement tamisé à 2 mm et broyée. L'ajout de HCl lance le processus de décarbonatation selon une réaction du type :

$$CaCO_3 + 2\ HCl \rightarrow Ca^{2+} + 2\ Cl^- + H_2O + CO_2$$

Suite à la décarbonatation de l'échantillon, il est alors possible de mesurer la différence de masse entre l'échantillon initiale et l'échantillon final et de déduire la teneur en carbonate.

Méthode

1. Matériel

- Tube pour la centrifugeuse (50mL)
- Bac à ultrasons
- Centrifugeuse
- Balance
- Etuve à 105°C

2. Réactifs

- HCl 10%
- Eau distillée

3. Démarche

1. Tarer le tube à centrifuger 50mL avec son bouchon, noter la masse exacte.
2. Peser 4 g de l'échantillon dans le tube, noter la masse exacte.
3. Mouiller l'échantillon avec un peu d'eau distillée.
4. Ajouter 10mL d'HCl 10%.
5. Une fois que la réaction est terminée (plus de formation de mousse), mettre les échantillons à l'ultrason 2 minutes.
6. Agiter à l'horizontale pendant 15 minutes à 120 t/min sur la table à agiter. Attention à ne pas faire cela qu'une fois que quasi tous les carbonates sont éliminés. Avec des échantillons très carbonatés, le bouchon peut fuir ou le tube exploser (!) S'il reste des carbonates et que le bouchon est fermé.
7. Centrifuger pendant 10 min à 4'000 t/min. Jeter le surnageant en faisant bien attention de ne pas perdre de matériel. Attention à bien équilibrer les flacons !
8. Vérifier que tous les carbonates sont bien détruits en ajoutant quelques gouttes de HCl 10%. Si ce n'est pas le cas, recommencer au point 4, autrement continuer.
9. Compléter le tube à centrifuger jusqu'à 40mL avec de l'eau distillée.
10. Agiter à l'horizontale pendant 10 min à 120 t/min.
11. Centrifuger pendant 20min à 4'000 t/min. Jeter le surnageant en faisant bien attention de ne pas perdre de matériel.
12. Recommencer au point 9.
13. Une fois le surnageant jeté, mettre les échantillons à l'étuve à 105°C pour une nuit.
14. Sortir les échantillons de l'étuve, mettre le bouchon et les laisser refroidir.
15. Peser les échantillons.

La teneur en carbonate en pourcent poids (wt %) est alors la différence de poids entre l'échantillon original et l'échantillon après acidification divisée par le poids de l'échantillon original, le tout fois 100.

Contacts

Personne en charge des laboratoires de biogéosciences - à définir

Références

Pansu, M. et Gautheyrou. J. (2003). *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minéral*. Springler-Verlag France, p.993.

Annexe F

Tableau du nombre d'occurrence, des valeurs écologiques selon Landolt et al. (2010), des stratégies CSR selon Grime (1974) et des milieux de prédilection selon Delarze et al. (2015) des espèces non retrouvées et nouvelles pour 2018

		Occ.	Valeurs écologiques									Strat.	Milieux de prédilection
			T	K	L	F	W	R	N	H	D	CSR	
Espèces non retrouvées en 2018	*Angelica sylvestris*	1	3	3	3	4	3	3	3	3	1	ccs	Prairies humides, forêts inondables
	Asparagus officinalis	1	4,5	4	4	2	1	4	3	3	5	css	Friches à graminées
	Carex digitata	1	3	3	2	2,5	1	3	2	3	3	crs	Hêtraies
	Convalaria majalis	1	3,5	3	3	2,5	2	3	2	3	1	ccs	Hêtraies, pinèdes thermophiles
	Convolvulus sepium	1	3,5	2	3	3,5	2	4	4	3	1	ccr	Lisières herbacées
	Crataegus laevigata B	1	3,5	2	3	3,5	2	3	3	3	1	ccs	Formations buissonantes
	Dactylorhiza sambucina	1	3	4	4	2,5	3	2	3	3	1	crs	Landes
	Hippocrepis emerus B	2	4	4	3	2	2	4	2	1	3	ccs	Formations buissonantes, hêtraies, autres forêts de feuillus
	Hippophae rhamnoides B	1	3,5	4	4	2,5	3	4	2	1	3	ccs	Formations buissonantes
	Lamium galeobdolon	1	3,5	4	1	3	1	4	3	3	3	crs	Forêts inondables, hêtraies, autres forêts de feuillus, forêts de conifères d'altitude
	Listera ovata	1	3	3	3	3,5	3	3	3	3	1	crs	Forêts inondables
	Melampyrum sylvaticum	1	2,5	3	2	3,5	2	1	2	5	1	rrs	Pinèdes thermophiles, forêts de conifères d'altitude
	Orchis maculata	4	3	2	4	4	3	1	2	5	1	crs	Prairies humides
	Salix alba A	1	4	3	3	4,5	3	4	4	1	1	ccc	Forêts inondables
	Sanguisorba officinalis	1	3,5	3	4	3,5	3	3	4	5	1	ccs	Prairies humides
	Solanum dulcamara B	1	3,5	3	3	3,5	3	3	4	3	1	crs	Forêts inondables
	Solidago virgaurea	1	3,5	3	2	2,5	1	3	3	5	3	crs	Mégaphorbiaies, coupes forestières, Forêts de conifères d'altitude
	Viccia cracca	1	3,5	3	3	3	3	3	3	3	1	crs	Prairies humides, prairies grasses
Moyenne pondérée par l'occurrence			3,39	3,04	3,13	3,15	2,39	2,87	2,70	3,26	1,70		
Nouvelles espèces pour 2018	*Acer campestre* H	1	4	3	3	2,5	1	3	3	3	3	ccc	Hêtraies, autres forêts de feuillus
	Acer opalus A	1	4,5	3	3	2	1	4	3	3	3	ccc	Forêts de feuillus, pinèdes thermophiles
	Arum maculatum	1	4	2	2	3	2	3	3	3	3	crs	Autres forêts de feuillus
	Carex pendula	1	3,5	2	2	4	3	3	4	3	1	css	Forêts inondables
	Carex remota	1	3,5	2	2	4	3	3	3	3	1	css	Forêts inondables
	Carex riparia	1	4	3	4	5	3	4	4	5	1	css	Bas-marais, forêts inondables
	Carex sylvatica	1	3,5	3	2	3,5	2	3	3	3	3	crs	Hêtraies
	Carex tomentosa	1	3,5	4	4	3,5	3	4	2	3	3	crs	Prairies humides
	Circaea lutetiana	3	3,5	2	2	3,5	2	4	4	3	1	ccr	Forêts inondables, hêtraies
	Clematis vitalba	1	3,5	3	3	3	1	4	3	3	3	ccc	Forêts inondables, autres forêts de feuillus
	Epilobium tetragonum	1	3,5	2	3	3,5	2	3	4	5	1	ccr	Lisières herbacées
	Equisetum arvense	1	3,5	3	3	3,5	3	4	3	3	1	ccr	Formations buissonantes, terrains piétinés et rudéraux
	Equisetum telmateia	1	3,5	2	3	4,5	3	4	3	3	1	crs	Forêts inondables
	Fragaria vesca	1	3	3	3	3	1	3	3	3	3	crs	Mégaphorbiaies, coupes forestières
	Galium album	2	3,5	3	3	3	2	3	4	3	1	crs	Prairies grasses
	Juglans regia B et H	7	4	2	3	2,5	1	4	4	3	3	ccc	Forêts inondables
	Lonicera periclymenum B et H	4	4	2	3	3	1	2	3	3	3	ccs	Formations buissonantes, autres forêts de feuillus
	Lythrum salicaria	1	4	3	3	4	3	3	3	3	1	ccs	Prairies humides
	Ranunculus auricomus	1	3	4	3	3,5	3	3	3	3	1	crs	Autres forêts de feuillus
	Rubus laciniatus	1	4	2	4	2,5	1	3	3	3	3	ccs	
	Salix viminalis A	1	3,5	2	4	4	3	4	3	1	1	ccc	Forêts inondables
	Schoenus nigricans	1	3,5	2	4	4,5	3	5	2	5	1	css	Bas-marais
	Sorbus aria A, B et H	1	3,5	3	3	2	2	3	2	3	3	ccs	Hêtraies, autres forêts de feuillus
	Ulmus glabra A	1	3,5	2	2	3,5	3	3	4	3	1	ccs	Forêts inondables, autres forêts de feuillus
	Viola reichenbachiana	2	3	2	2	3	1	3	3	3	3	ccs	Hêtraies
	Epipactis sp.	1	Non pris en compte dans les calculs										Pinèdes thermophiles
	Platanthera sp.	3	Non pris en compte dans les calculs										Prairies humides
Moyenne pondérée par l'occurrence			3,68	2,39	2,87	3,18	1,82	3,39	3,34	3,11	2,16		
Test de Wilcoxon-Mann-Whitney entre les moyennes obtenues pour 1984 et 2018													
	p-value		0,007	0,001	0,105	0,982	0,013	0,114	0,001	0,477	0,064		

Annexe G

Tableau des relevés phytosociologiques effectués en 2018

Les espèces ont été attribuées aux divers milieux selon Delarze et al., 2015.

Relevés			**101**	**102**	**106**	**107**	**110**	**111**	**112**	**114**	**115**	**116**	**117**	**118**	**119**	**120**	**121**	**122**	**123**	**124**	**125**	**126**
	Superficie [m2]		400	60	250	150	200	150	400	200	400	400	400	400	200	250	100	150	150	200	100	100
	Richesse spécifique		31	23	33	28	26	27	36	27	27	34	32	27	27	28	31	28	24	23	29	22
	Recouvrement [%]																					
	Arbres		65	60	55	60	40	60	50	50	60	70	60	40	70	40	55	60	30	70	60	50
	Arbustes		65	60	80	65	80	60	60	80	70	60	60	70	40	40	70	40	60	60	80	50
	Herbacées		30	85	30	25	30	30	90	80	70	75	65	70	30	55	60	60	70	70	50	50
Arbres																						
Pinèdes thermophiles : *Molinio-Pinion MP*																						
MP, CF	*Pinus sylvestris*	A	4	3	3	3	2a	3	3	3	3	3	3	2b	4	3	3	3	3	4	3	2b
		B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
MP, CF, C	*Acer opalus*	A	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Forêts de feuillus : *Cephalanthero-Fagenion CF* , *Galio-Fagenion GF* , *Carpinion betuli Cb*																						
GF, F, C	*Quercus robur*	A	+	.	.	2a	1	2b	1	.	2a	.	+	1	+	1	.	+	.	1	.	2a
		B	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	+	.	.	.	.	.	.
		H	r	.	.	.	+	+	+	r	.	+	r	r	+	+	.	r	+	r	+	r
C	*Prunus avium*	A	1	.	.	.	2a	.	1	.	1	2a	.	.	.	.	.	.	.	2a	.	.
		B	.	.	.	.	2a	.	.	.	2a	.	1	.	.	+	.	.	.	1	.	.
		H	.	r	.	.	+	.	r	.	.	.	.	r	+	.	r	r	.	.	.	.
CF, GF	*Fagus sylvatica*	A	.	.	.	.	.	.	1	.	2a	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	.	.	.	r	1	+	1	.	1	1	1	+	+	+	+	1	.	.	.	.
		H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	r	.	.	.	r	.	.	.	.
C	*Pyrus pyraster*	A	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CF	*Sorbus aria*	A	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		H	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CF, C	*Acer campestre*	H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.

Relevés			101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Arbres (suite)																						
Forêts inondables : *Alnion incanae Ai* , *Fraxinion F*																						
Ai, F, GF, C	*Fraxinus excelsior*	A	+	2a	2a	.	.	.	2b	2a	1	+	2a	2b	.	.	2a	1	.	1	2a	2a
		B	+	1	+	+	.	+	+	+	1	1	1	+	+	.	1	1	1	.	+	+
		H	+	+	+	+	+	+	+	.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ai, F	*Alnus incana*	A	.	2b	.	1	.	.	1	2a	.	+	.	+	.	.	.	1	.	.	1	.
		B	+	.	+	+	+	.	1	2a	.	1	1	1	+	1	1	2a	+	.	1	+
		H	r	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.
F	*Juglans regia*	B	.	.	.	2a	r	.	.	.	+	+	r	r	.	.	.	.	r	.	.	.
		H	.	.	.	+	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F	*Alnus glutinosa*	A	.	.	1	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.
Ai	*Populus nigra*	A	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ai	*Salix purpurea*	B	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.
Ai, F	*Prunus padus*	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ai	*Ulmus glabra*	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ai	*Salix m. subsp myrsinifolia*	B	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F	*Clematis vitalba*	A	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Autres milieux																						
	Picea abies	A	.	.	.	2a	1	+	.	1	.	2b	1	.	1	.	1	2a	.	2a	.	.
		B	.	.	.	.	+	.	1	.	.	1	1	.	+	1	.	.	2b	.	+	2a
		H	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Salix cinerea	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.
		B	.	1	.	.	.	.	2a	2a	.	.	+	+	.	+	2b	1	+	.	.	.

Relevés			101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Arbres (suite)																						
Autres milieux (suite)																						
	Populus tremula	A	r	.	.	2a	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.
		H	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Acer pseudoplatanus	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	+	.	.	.	.
		B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
		H	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	r	.	.
	Betula pendula	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
	Salix viminalis	A	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Populus alba	B	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Arbustes																						
Formations buissonnantes : *Berberidion B, Pruno-Rubion PR*																						
B	*Crataegus monogyna*	A	.	.	1	.	1	2a	.	2a	2a	1	1	1	2	.	.	1	.	2a	2a	2a
		B	2	2b	2a	1	2a	2b	1	2a	2a	2a	1	2b	1	2a	2a	1	2a	3	1	2a
		H	+	+	+	.	+	+	r	.	+	+	+	+	+	r	.	+	+	.	+	+
B, MP	*Ligustrum vulgare*	B	2	2a	2a	2a	1	1	2a	2a	1	2a	2a	2b	2	1	3	1	1	2a	1	2a
		H	1	+	+	1	+	.	+	+	+	+	+	+	1	+	+	+	+	1	1	+
B, MP	*Viburnum lantana*	B	1	2a	+	1	.	1	2a	2a	1	2a	2a	1	1	1	1	1	2a	2a	2a	2b
		H	+	+	+	.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	1	1	.	+
PR	*Cornus sanguinea*	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	+	.	2b	2a	2a	2a	.	2b	2a	1	+	1	r	1	+	+	r	1	2a	1
		H	.	r	1	.	+	+	+	+	+	+	r	+	r	+	+	+	r	.	+	r
PR	*Corylus avellana*	A	.	.	.	.	.	.	.	.	2a	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		B	.	.	+	.	1	.	.	.	2b	2a	2a	2a	r	1	.	+	2a	1	.	1
		H	.	.	+	+	+	r	.	.	.	.	+	+	+	+	.	+	+	r	.	.

Relevés			101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Arbustes (suite)																						
Formations buissonnantes (suite) : *Berberidion B, Pruno-Rubion PR*																						
PR	*Frangula alnus*	A	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
		B	2	2a	1	+	+	+	1	2a	.	1	.	+	1	1	2a	2a	.	+	1	+
		H	+	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
PR	*Viburnum opulus*	B	.	+	1	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	r	r	r	.	.	1	.
		H	r	+	+	+	+	+	+	1	1	+	+	+	+	+	+	+	.	+	+	+
PR	*Euonymus europaeus*	B	.	+	.	.	.	.	.	+	+	.	r	+	.	.	r	+	.	.	.	.
		H	+	+	r	.	.	r	+	+	.	+	+	+	+	+	.	+	r	r	.	.
B, PR	*Prunus spinosa*	B	3	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	+	.	.	1	.	2a	.
		H	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	r	.
B, MP	*Berberis vulgaris*	B	.	.	1	.	.	.	.	2a	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
PR	*Rubus caesius*	B	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.
		H	+	.	+	.	.	.	.	+	1	.	+	.	.	.	+	.	+	.	+	r
PR car., C	*Lonicera periclymenum*	B	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
		H	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
Autres milieux																						
	Lonicera xylosteum	B	1	+	2a	2a	2b	1	1	2a	3	2a	2a	2a	1	2a	1	1	1	2a	2a	2a
		H	.	+	+	.	+	.	+	.	+	+	.	+	+	+	.	+	+	+	.	+
	Juniperus communis	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	2a	.	.	.	.
		B	+	.	+	2a	.	2a	2a	2a	1	r	1	1	+	+	1	r	+	.	2a	.
		H	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Daphne mezereum	B	r	r	+	+	r	.	+	+	+	+	+	+	r	.	r	.	.	+	1	.
		H	r	r	r	+	r	+	+	+	+	r	+	+	r	+	.	.	r	.	.	r
	Rubus fruticosus	B	r	+	1	.	.	1	1	1	+	+	+	+	.	.	.	.	.	.	1	1
		H	+	+	.	.	+	+	+	+	.	+	+	.	.	.	.	+	.	.	+	.
	Rosa sp.	A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
		B	r	.	+	.	.	+	1	.	+	+	r	+	+	1	+	.	+	+	1	.
		H	r	.	+	r	.	+	+	.	1	+	r	r	.	+	r	r	+	+	+	r

Relevés			101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Herbacées																						
Pinèdes thermophiles : *Molinio-Pinion MP*																						
MP, CF	*Carex flacca*		2	3	2b	2b	3	3	3	3	4	3	4	3	2	2a	2b	2b	1	4	3	3
MP, Ai, CF	*Calamagrostis varia*		.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	+	+	+	.	.	.
MP	*Molinia arundinacea*		1	3	+	+	.	1	3	2a	+	3	1	2b	1	3	2a	3	3	1	1	1
MP, CF	*Brachypodium pinnatum*		+	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	+	2a	.	.	2a	+	.	.
			.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Forêts de feuillus : *Galio-Fagenion GF* , *Carpinion*			.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
			.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
GF, C	*Hedera helix*	A	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		H	.	.	+	+	2a	r	+	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
GF	*Paris quadrifolia*		.	.	+	.	+	.	+	+	+	+	+	+	.	.	+	.	.	.	.	+
GF	*Viola reichenbachiana*		.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
GF	*Carex sylvatica*		.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
C	*Ranunculus auricomus*		.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
GF	*Polygonatum multiflorum*		.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Forêts inondables : *Alnion incanae Ai* , *Fraxinion F*																						
Ai, C	*Brachypodium sylvaticum*		+	2b	1	2a	+	+	1	1	2a	3	2a	2a	+	.	2a	2b	.	2a	1	2a
Ai	*Calamagrostis epigeios*		+	+	.	.	.	.	+	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ai, F	*Carex acutiformis*		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	+	.
F	*Equisetum telmateia*		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
F, GF	*Circaea lutetiana*		.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ai	*Deschampsia cespitosa*		.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F	*Carex pendula*		.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
F	*Carex remota*		.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ai	*Lysimachia vulgaris*		r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.
F, GF	*Arum maculatum*		.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Relevés		101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Herbacées																					
Autres milieux																					
Tamus communis	B	.	r	+	.	+	.	.	+	+	+	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.
	H	+	r	+	.	+	.	.	r	+	.	.	.	r	+	r	.	.	.	r	r
Phragmites australis		.	.	.	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+	.
Galium mollugo		.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Melica nutans		+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Platanthera sp		.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.
Galium album		.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Agrostis stolonifera		.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Equisetum arvense		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Fragaria vesca		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Molinia caerulea		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Carex tomentosa		+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Schoenus nigricans		.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Carex riparia		.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Epilobium tetragonum		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.
Epipactis sp.		.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rubus laciniatus	H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.
Lythrum salicaria		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.

Annexe H

Tableau de végétation issu du groupement

Les relevés 1 à 26 ont été effectués en 1984 et les relevés 101 à 126 en 2018. Au relevé historique 1 correspond le relevé récent 101 et ainsi de suite.

Pour effectuer le groupement, les codes de l'échelle de Braun-Blanquet ont été remplacés par les codes de la dominance numérique. La distance entre relevés a été calculée à l'aide de l'indice de Bray-Curtis et le groupement a été réalisé selon la méthode de Ward. Le choix du nombre optimal de groupes a été basé sur la corrélation de la matrice de distance avec des matrices binaires produites en coupant le dendrogramme à différents niveaux. Le calcul de la valeur indicatrice de chaque espèce pour chaque groupe (ind.gr) et le calcul de la significativité de celle-ci (pval) ont permis de définir quelles sont les espèces différentielles de chaque groupe.

Groupe	1																	
N° relevé	1	2	7	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26
Richesse spécifique	22	24	20	26	26	19	23	23	25	22	21	28	25	22	28	27	21	21
Calamagrostis varia	1	.	3	.	2	3	4	3	3	4	4	1	3	2	2	2	3	2
Pinus sylvestris A	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	5	4	3	4	4	4	4
Salix purpurea B	.	.	+	.	+	.	1	.	+	.	1	+	+	+	+	.	.	.
Viburnum lantana B	3	3	2	2	2	2	1	1	2	2	2	3	2	3	2	1	2	2
Quercus robur B	+	.	+	+	.	+	.	1	1	+	+	1	.	.	+	2	.	.
Dactylorhiza maculata	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	r	.	.	.	+	.	.	.
Carex flacca	1	3	+	2	2	2	+	1	1	2	1	1	+	2	2	1	2	2
Crataegus monogyna A	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Crataegus monogyna B	1	1	.	1	2	.	+	+	1	1	2	3	1	r	+	2	+	+
Crataegus monogyna H	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.
Daphne mezereum H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Euonymus europaeus H	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Fagus sylvatica B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rosa sp H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Viburnum opulus H	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	+
Ligustrum vulgare H	+	.	.	+	+	1	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.	.	.
Rubus fruticosus H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Lonicera xylosteum B	1	2	+	1	+	1	1	1	2	1	1	1	+	1	2	1	+	+
Paris quadrifolia	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.
Cornus sanguinea H	.	.	.	.	+	+	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+
Hedera helix H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Fraxinus excelsior H	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	+	.	.	+	+	+	+	+
Rubus fruticosus B	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+	.	.	.
Corylus avellana H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+
Juglans regia B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Fraxinus excelsior A	.	.	.	.	.	1	2	2	.	1	+	.	.	.	1	.	.	1
Ligustrum vulgare B	2	+	1	+	2	1	1	1	2	2	1	3	1	2	2	1	1	1
Molinia arundinacea	1	1	1	+	+	3	1	+	1	+	1	3	2	1	2	1	2	+
Cornus sanguinea B	3	+	.	1	1	1	.	+	+	.	+	1	+	.	+	1	1	1
Juniperus communis B	+	+	1	1	2	2	1	1	+	+	2	.	+	1	1	2	+	4
Brachypodium sylvaticum	.	+	3	1	.	.	.	1	1	1	.	1	1	1	3	2	+	+
Alnus incana B	1	1	1	2	.	2	1	1	1	+	2	.	1	2	1	.	1	1
Frangula alnus B	2	+	+	.	+	+	2	2	1	.	2	1	+	2	1	+	2	.
Fraxinus excelsior B	+	+	.	.	.	.	+	.	+	1	+	+	+	+	.	+	1	.
Viburnum lantana H	+	.	.	+	+	1	.	+	+	+	+	.	+	.	.	.	+	+
Daphne mezereum B	.	+	.	.	.	+	+	+	+	+	.	+	+	+	.	.	.	r
Rosa sp B	+	.	.	+	1	.	+	.	.	.	+	+	.	+	+	+	+	.
Quercus robur A	.	.	1	+	2	.	+	1	.	.	+	1	.	.	+	1	.	.
Corylus avellana B	.	.	.	.	.	.	.	1	1	1	+	+	.	.	+	+	+	.
Quercus robur H	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	+	.	.	.	+	+
Lonicera xylosteum H	+	.	.	+	.	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
Picea abies A	.	.	1	1	.	.	.	.	1	.	.	.	+	.	1	.	+	.
Viburnum opulus B	.	+	.	+	+	+	.	.	r	+	.	.	.	.	.	+	.	.
Picea abies B	+	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	1	+	.	.
Salix cinerea B	.	.	.	.	+	2	1	.	+	.	+	.	.	.	+	.	.	.
Tamus communis B	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	+	+	.
Euonymus europaeus B	.	.	.	+	.	.	.	+	+	+	.	+	+	.	.	.	.	.
Tamus communis H	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Calamagrostis epigeios	.	3	.	1	1	.	1	+	.	.	1	.	2	+	.	.	.	.

Groupe	2																					
N° relevé	6	24	101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Richesse spécifique	27	19	31	23	33	28	26	27	36	27	27	34	32	27	27	28	31	28	24	23	29	22
Calamagrostis varia	1	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	+	+	+	.	.	.
Pinus sylvestris A	4	4	4	3	3	3	2a	3	3	3	3	3	3	2b	4	3	3	3	3	4	3	2b
Salix purpurea B	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.
Viburnum lantana B	.	1	1	2a	+	1	.	1	2a	2a	1	2a	2a	1	1	1	1	1	2a	2a	2a	2b
Quercus robur B	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Dactylorhiza maculata	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Carex flacca	1	3	2	3	2b	2b	3	3	3	3	4	3	4	3	2	2a	2b	2b	1	4	3	3
Crataegus monogyna A	.	1	.	.	1	.	1	2a	.	2a	2a	1	1	1	2	.	.	1	.	2a	2a	2a
Crataegus monogyna B	+	3	2	2b	2a	1	2a	2b	1	2a	2a	2a	1	2b	1	2a	2a	1	2a	3	1	2a
Crataegus monogyna H	+	.	+	+	+	.	+	+	r	.	+	+	+	+	+	r	.	+	+	.	+	+
Daphne mezereum H	.	.	r	r	r	+	r	+	+	+	+	r	+	+	r	+	.	.	r	.	.	r
Euonymus europaeus H	.	.	+	+	r	.	.	r	+	+	.	+	+	+	+	+	.	+	r	r	.	.
Fagus sylvatica B	.	.	.	.	.	r	1	+	1	.	1	1	1	+	+	+	+	1	.	.	.	.
Rosa sp H	.	.	r	.	+	r	.	+	+	.	1	+	r	r	.	+	r	r	+	+	+	r
Viburnum opulus H	+	+	r	+	+	+	+	+	+	1	1	+	+	+	+	+	+	+	.	+	+	+
Ligustrum vulgare H	+	.	1	+	+	1	+	.	+	+	+	+	+	+	1	+	+	+	+	1	1	+
Rubus fruticosus H	+	.	+	+	.	.	+	+	+	+	.	+	+	.	.	.	.	+	.	.	+	.
Lonicera xylosteum B	2	2	1	+	2a	2a	2b	1	1	2a	3	2a	2a	2a	1	2a	1	1	1	2a	2a	2a
Paris quadrifolia	.	.	.	.	+	.	+	.	+	+	+	+	+	+	.	.	+	.	.	.	.	+
Cornus sanguinea H	.	.	.	r	1	.	+	+	+	+	+	+	r	+	r	+	+	+	r	.	+	r
Hedera helix H	+	.	.	.	+	+	2a	r	+	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Fraxinus excelsior H	.	.	+	+	+	+	+	+	+	.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rubus fruticosus B	1	.	r	+	1	.	.	1	1	1	+	+	+	+	.	.	.	.	.	.	1	1
Corylus avellana H	.	.	.	.	+	+	+	r	.	.	.	.	+	+	+	+	.	+	+	r	.	.
Juglans regia B	.	.	.	.	.	2a	r	.	.	.	+	+	r	r	.	.	.	.	r	.	.	.
Fraxinus excelsior A	.	1	+	2a	2a	.	.	.	2b	2a	1	+	2a	2b	.	.	2a	1	.	1	2a	2a
Ligustrum vulgare B	1	1	2	2a	2a	2a	1	1	2a	2a	1	2a	2a	2b	2	1	3	1	1	2a	1	2a
Molinia arundinacea	+	1	1	3	+	+	.	1	3	2a	+	3	1	2b	1	3	2a	3	3	1	1	1
Cornus sanguinea B	2	2	+	.	2b	2a	2a	2a	.	2b	2a	1	+	1	r	1	+	+	r	1	2a	1
Juniperus communis B	2	.	+	.	+	2a	.	2a	2a	2a	1	r	1	1	+	+	1	r	+	.	2a	.
Brachypodium sylvaticum	3	1	+	2b	1	2a	+	+	1	1	2a	3	2a	2a	+	.	2a	2b	.	2a	1	2a
Alnus incana B	+	1	+	.	+	+	+	.	1	2a	.	1	1	1	+	1	1	2a	+	.	1	+
Frangula alnus B	+	.	2	2a	1	+	+	+	1	2a	.	1	.	+	1	1	2a	2a	.	+	1	+
Fraxinus excelsior B	.	1	+	1	+	+	.	+	+	+	1	1	1	+	+	.	1	1	1	.	+	+
Viburnum lantana H	.	.	+	+	+	.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	1	1	.	+
Daphne mezereum B	+	+	r	r	+	+	r	.	+	+	+	+	+	+	r	.	r	.	.	+	1	.
Rosa sp B	.	+	r	.	+	.	.	+	1	.	+	+	r	+	+	1	+	.	+	+	1	.
Quercus robur A	.	.	+	.	.	2a	1	2b	1	.	2a	.	+	1	+	1	.	+	.	1	.	2a
Corylus avellana B	.	1	.	.	+	.	1	.	.	.	2b	2a	2a	2a	r	1	.	+	2a	1	.	1
Quercus robur H	.	.	r	.	.	.	+	+	+	r	.	+	r	r	+	+	.	r	+	r	+	r
Lonicera xylosteum H	.	.	.	+	+	.	+	.	+	.	+	+	.	+	+	+	.	+	+	+	.	+
Picea abies A	.	2	.	.	.	2a	1	+	.	1	.	2b	1	.	1	.	1	2a	.	2a	.	.
Viburnum opulus B	+	.	.	+	1	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	r	r	r	.	.	1	.
Picea abies B	.	.	.	.	.	.	+	.	1	.	.	1	1	.	+	1	.	.	2b	.	+	2a
Salix cinerea B	.	.	.	1	.	.	.	.	2a	2a	.	.	+	+	.	+	2b	1	+	.	.	.
Tamus communis B	+	.	.	r	+	.	+	.	.	+	+	+	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Euonymus europaeus B	+	.	.	+	.	.	.	.	.	+	+	.	r	+	.	.	r	+	.	.	.	.
Tamus communis H	.	.	+	r	+	.	+	.	.	r	+	.	.	.	r	+	r	.	.	.	r	r
Calamagrostis epigeios	.	.	+	+	.	.	.	.	+	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Groupe	1																		2																					
N° relevé	1	2	7	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	6	24	101	102	106	107	110	111	112	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
Rubus caesius H	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	+	1	.	+	.	.	.	+	.	+	.	+	r
Alnus incana A	.	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2b	.	1	.	.	1	2a	.	+	.	+	.	.	.	1	.	.	1	.
Brachypodium pinnatum	3	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	2	1	.	.	1	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	+	2a	.	.	2a	+	.	.
Rubus caesius B	.	+	.	1	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	1	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.
Prunus avium A	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	2a	.	1	.	1	2a	.	.	.	.	.	.	.	2a	.	.
Prunus spinosa B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	1	1	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	+	.	.	1	.	2a	.
Prunus avium H	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	+	.	r	.	.	.	.	r	+	.	r	r	.	.	.	.
Prunus avium B	1	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2a	.	.	.	2a	.	1	.	.	+	.	.	.	1	.	.
Phragmites australis	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+	.
Populus nigra A	.	.	.	+	.	.	1	.	2	1	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Alnus incana H	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.
Berberis vulgaris B	.	1	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	1	.	.	.	.	2a	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Galium mollugo	.	.	.	r	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Alnus glutinosa B	.	.	.	.	1	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.
Alnus glutinosa A	.	.	.	.	.	.	.	1	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Populus tremula B	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.
Populus tremula A	.	.	1	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	2a	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Carex acutiformis	.	.	.	+	1	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	+	.
Juniperus communis H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Prunus spinosa H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	r	.
Fagus sylvatica A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	2a	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
Melica nutans	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Betula pendula A	.	1	.	.	.	.	1	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
Salix m. ssp myrsinifolia B	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Molinia caerulea	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Lysimachia vulgaris	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.
Frangula alnus A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
Frangula alnus H	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Acer pseudoplatanus B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
Fagus sylvatica H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	r	.	.	.	r	.	.	.	.
Salix cinerea A	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.
Acer pseudoplatanus H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	r	.	.
Circaea lutetiana	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Lonicera periclymenum H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
Lonicera periclymenum B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
Platanthera sp	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.
Pinus sylvestris B	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Cornus sanguinea A	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Juniperus communis A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	2a	.	.	.	.
Prunus padus A	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Betula pendula B	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Hippocrepis emerus B	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Viola reichenbachiana	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Corylus avellana A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2a	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Hedera helix A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Galium album	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Acer pseudoplatanus A	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	+	.	.	.	.
Juglans regia H	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

N° relevé	Espèces accidentelles
1	*Populus alba* B (+)
2	*Rhamnus cathartica* B (1), *Angelica sylvestris* (+)
7	*Crataegus laevigata* B (+), *Carex digitata* (+)
10	*Dactylorhiza sambucina* (r), *Sanguisorba officinalis* (+)
11	*Rosa* sp A (+), *Asparagus officinalis* (+), *Salix alba A* (1)
18	*Agrostis stolonifera* (+)
19	*Deschampsia cespitosa* (+)
20	*Picea abies* H (+), *Pyrus pyraster* H (+), *Hippophae rhamnoides* B (2)
21	*Salix m. ssp myrsinifolia* A (1)
23	*Prunus padus* B (+), *Prunus padus* H (+), *Pyrus pyraster* B (+), *Solidago virgaurea* (+), *Listera ovata* (r), *Betula pendula* H (+)
25	*Convallaria majalis* (+)
6	*Lamium galeobdolon* (r), *Melampyrum sylvaticum* (+), *Solanum dulcamara* B (+), *Vicia cracca* (+)
24	*Convolvulus sepium* H (+)
101	*Picea abies* H (r), *Carex tomentosa* (+)
102	*Agrostis stolonifera* (+)
106	*Arum maculatum* (r), *Carex remota* (+), *Carex riparia* (+), *Carex sylvatica* (+), *Ranunculus auricomus* (+)
107	*Populus alba* B (r), *Sorbus aria* A (+), *Sorbus aria* B (r), *Sorbus aria* H (r)
110	*Clematis vitalba* A (+)
111	*Deschampsia cespitosa* (+)
112	*Acer opalus* A (1), *Epipactis* sp. (r), *Populus tremula* H (+), *Pyrus pyraster* A (+), *Salix viminalis* A (1), *Schoenus nigricans* (+)
115	*Polygonatum multiflorum* (r)
116	*Prunus padus* B (r), Prunus padus H (+), *Carex pendula* (+), *Ulmus glabra* A (1)
118	*Fragaria vesca* (+)
121	*Epilobium tetragonum* (r), *Equisetum arvense* (+), *Equisetum telmateia* (1), *Rubus laciniatus* H (r)
122	*Rosa* sp A (1)
125	*Acer campestre H* (r), *Lythrum salicaria* (r)

	Espèces	freq	max.gr	ind.gr	pval
Différentielles du groupe 1	*Calamagrostis varia*	23	1	0,81	0,001
	Pinus sylvestris A	40	1	0,56	0,001
	Salix purpurea B	11	1	0,44	0,004
	Viburnum lantana B	38	1	0,61	0,004
	Quercus robur B	14	1	0,49	0,005
	Dactylorhiza maculata	4	1	0,22	0,034
Différentielles du groupe 2	*Carex flacca*	40	2	0,64	0,001
	Crataegus monogyna A	15	2	0,6	0,001
	Crataegus monogyna B	38	2	0,64	0,001
	Crataegus monogyna H	20	2	0,62	0,001
	Daphne mezereum H	16	2	0,73	0,001
	Euonymus europaeus H	15	2	0,62	0,001
	Fagus sylvatica B	12	2	0,55	0,001
	Rosa sp H	17	2	0,66	0,001
	Viburnum opulus H	24	2	0,85	0,001
	Ligustrum vulgare H	28	2	0,63	0,002
	Rubus fruticosus H	11	2	0,5	0,002
	Lonicera xylosteum B	40	2	0,62	0,003
	Paris quadrifolia	11	2	0,44	0,004
	Cornus sanguinea H	22	2	0,54	0,005
	Hedera helix H	8	2	0,36	0,008
	Fraxinus excelsior H	27	2	0,57	0,01
	Rubus fruticosus B	17	2	0,47	0,013
	Corylus avellana H	13	2	0,4	0,025
	Juglans regia B	7	2	0,32	0,031
	Fraxinus excelsior A	22	2	0,47	0,049
	Ligustrum vulgare B	40	2	0,54	0,259
	Molinia arundinacea	39	2	0,53	0,497
	Cornus sanguinea B	34	2	0,56	0,082
	Juniperus communis B	34	1	0,55	0,137
	Brachypodium sylvaticum	33	2	0,55	0,081
	Alnus incana B	33	1	0,49	0,288
	Frangula alnus B	33	1	0,44	0,692
	Fraxinus excelsior B	29	2	0,51	0,101
	Viburnum lantana H	29	2	0,48	0,139
	Daphne mezereum B	27	2	0,43	0,282
	Rosa sp B	25	2	0,37	0,463
	Quercus robur A	22	2	0,36	0,371
	Corylus avellana B	21	2	0,42	0,111
	Quercus robur H	21	2	0,38	0,193
	Lonicera xylosteum H	18	2	0,4	0,122
	Picea abies A	17	2	0,36	0,133
	Viburnum opulus B	17	2	0,25	0,615
	Picea abies B	15	2	0,28	0,298
	Salix cinerea B	15	2	0,25	0,462
	Tamus communis B	15	2	0,22	0,775
	Euonymus europaeus B	14	1	0,18	1
	Tamus communis H	13	2	0,36	0,061
	Calamagrostis epigeios	12	1	0,32	0,095
	Rubus caesius H	11	2	0,29	0,096
	Alnus incana A	11	2	0,26	0,232
	Brachypodium pinnatum	11	1	0,16	0,804
	Rubus caesius B	10	2	0,15	0,897

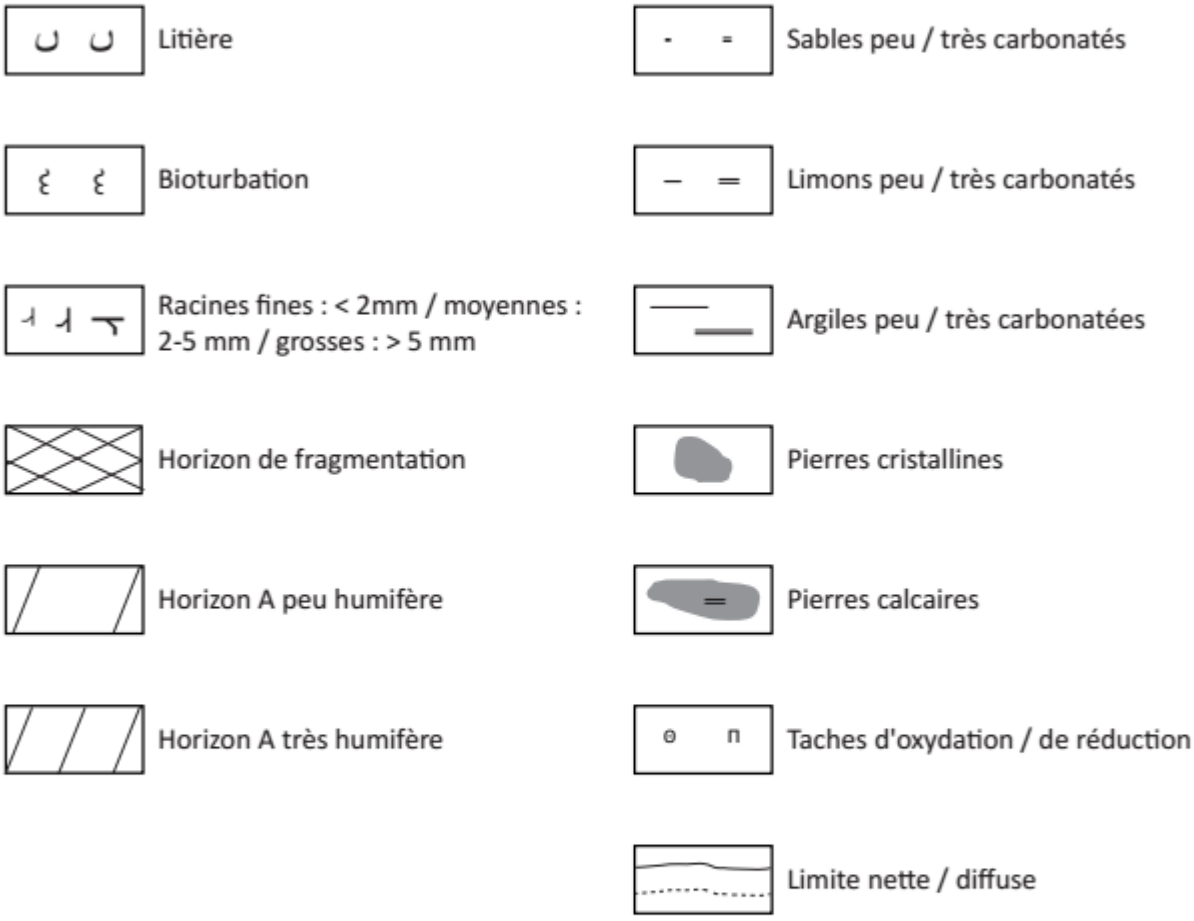
Espèces	freq	max.gr	ind.gr	pval
Prunus avium A	9	2	0,19	0,355
Prunus spinosa B	9	2	0,17	0,501
Prunus avium H	8	2	0,23	0,189
Prunus avium B	8	2	0,17	0,424
Phragmites australis	7	2	0,16	0,371
Populus nigra A	7	1	0,14	0,51
Alnus incana H	7	2	0,14	0,528
Berberis vulgaris B	7	1	0,1	0,884
Galium mollugo	6	2	0,13	0,454
Alnus glutinosa B	6	2	0,12	0,461
Alnus glutinosa A	6	2	0,09	0,838
Populus tremula B	6	2	0,08	0,867
Populus tremula A	6	2	0,08	0,955
Carex acutiformis	5	1	0,1	0,6
Juniperus communis H	5	2	0,08	1
Prunus spinosa H	4	2	0,18	0,119
Fagus sylvatica A	4	2	0,18	0,13
Melica nutans	4	2	0,13	0,228
Betula pendula A	4	1	0,14	0,245
Salix m. ssp myrsinifolia B	4	1	0,14	0,252
Molinia caerulea	4	1	0,14	0,285
Lysimachia vulgaris	4	1	0,1	0,53
Frangula alnus A	4	2	0,08	0,619
Frangula alnus H	4	2	0,09	0,636
Acer pseudoplatanus B	4	1	0,06	1
Fagus sylvatica H	4	2	0,04	1
Salix cinerea A	4	1	0,05	1
Acer pseudoplatanus H	3	2	0,14	0,224
Circaea lutetiana	3	2	0,14	0,238
Lonicera periclymenum H	3	2	0,14	0,239
Lonicera periclymenum B	3	2	0,14	0,247
Platanthera sp	3	2	0,14	0,259
Pinus sylvestris B	3	1	0,08	0,585
Cornus sanguinea A	3	2	0,07	0,736
Juniperus communis A	3	2	0,06	0,74
Prunus padus A	3	2	0,06	1
Betula pendula B	2	1	0,11	0,189
Hippocrepis emerus B	2	1	0,11	0,205
Viola reichenbachiana	2	2	0,09	0,473
Corylus avellana A	2	2	0,09	0,483
Hedera helix A	2	2	0,09	0,485
Galium album	2	2	0,09	0,5
Acer pseudoplatanus A	2	2	0,09	0,501
Juglans regia H	2	2	0,09	0,514
Picea abies H	2	1	0,05	0,731
Populus alba B	2	1	0,05	0,738
Prunus padus B	2	1	0,05	0,752
Agrostis stolonifera	2	1	0,03	1
Deschampsia cespitosa	2	1	0,03	1
Prunus padus H	2	1	0,03	1
Rosa sp A	2	2	0,03	1
Asparagus officinalis	1	1	0,06	0,434
Pyrus pyraster B	1	1	0,06	0,439

Espèces	freq	max.gr	ind.gr	pval
Salix m. ssp myrsinifolia A	1	1	0,06	0,442
Dactylorhiza sambucina	1	1	0,06	0,448
Crataegus laevigata B	1	1	0,06	0,45
Sanguisorba officinalis	1	1	0,06	0,451
Rhamnus cathartica B	1	1	0,06	0,453
Carex digitata	1	1	0,06	0,458
Solidago virgaurea	1	1	0,06	0,458
Pyrus pyraster H	1	1	0,06	0,459
Salix alba A	1	1	0,06	0,46
Listera ovata	1	1	0,06	0,461
Convallaria majalis	1	1	0,06	0,462
Hippophae rhamnoides B	1	1	0,06	0,463
Betula pendula H	1	1	0,06	0,465
Angelica sylvestris	1	1	0,06	0,468
Acer campestre H	1	2	0,05	1
Acer opalus A	1	2	0,05	1
Arum maculatum	1	2	0,05	1
Carex pendula	1	2	0,05	1
Carex remota	1	2	0,05	1
Carex riparia	1	2	0,05	1
Carex sylvatica	1	2	0,05	1
Carex tomentosa	1	2	0,05	1
Clematis vitalba A	1	2	0,05	1
Convolvulus sepium H	1	2	0,05	1
Epilobium tetragonum	1	2	0,05	1
Epipactis sp.	1	2	0,05	1
Equisetum arvense	1	2	0,05	1
Equisetum telmateia	1	2	0,05	1
Fragaria vesca	1	2	0,05	1
Lamium galeobdolon	1	2	0,05	1
Lythrum salicaria	1	2	0,05	1
Melampyrum sylvaticum	1	2	0,05	1
Polygonatum multiflorum	1	2	0,05	1
Populus tremula H	1	2	0,05	1
Pyrus pyraster A	1	2	0,05	1
Ranunculus auricomus	1	2	0,05	1
Rubus laciniatus H	1	2	0,05	1
Salix viminalis A	1	2	0,05	1
Schoenus nigricans	1	2	0,05	1
Solanum dulcamara B	1	2	0,05	1
Sorbus aria A	1	2	0,05	1
Sorbus aria B	1	2	0,05	1
Sorbus aria H	1	2	0,05	1
Ulmus glabra A	1	2	0,05	1
Vicia cracca	1	2	0,05	1

Annexe I

Fiches pédologiques

Légendes des fiches pédologiques

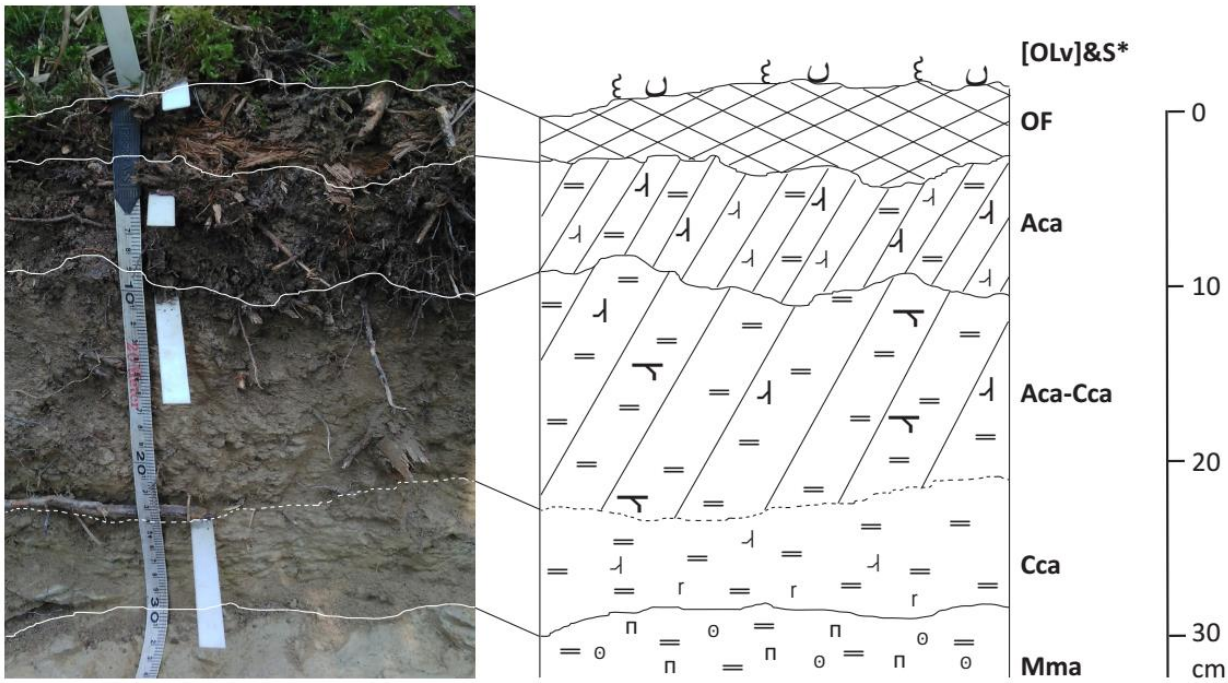


Les horizons et sols sont nommés selon le réferentiel pédologique 2008 (Baize et Girard, 2009).
Le nom du sol selon la WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) est noté en bas de fiche.
Les formes d'humus sont nommées selon Zanella et al. (2018).
Le nom attribué aux horizons humifères pour la détermination des formes d'humus est noté en fin de description de ces horizons.
Les pH indiqués correspondent aux pH H_2O mesurés au laboratoire.
Les horizons 116.3 et 116.4 sont regroupés pour des raisons de clarté et parce qu'ils sont très similaires.

Station 107 — RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre, à DYSMULL

Date : 06.08.2018
Lieu : Grèves de la Motte, Vully-les-Lacs (VD)
Coordonnées : 565’398/197’866 ± 3 m
Altitude : 431,2 m

Topographie : plat
Géologie : dépôts lacustres et morainiques remaniés par l’action érosive du battement des eaux du lac
Végétation : *Molinio-Pinion*



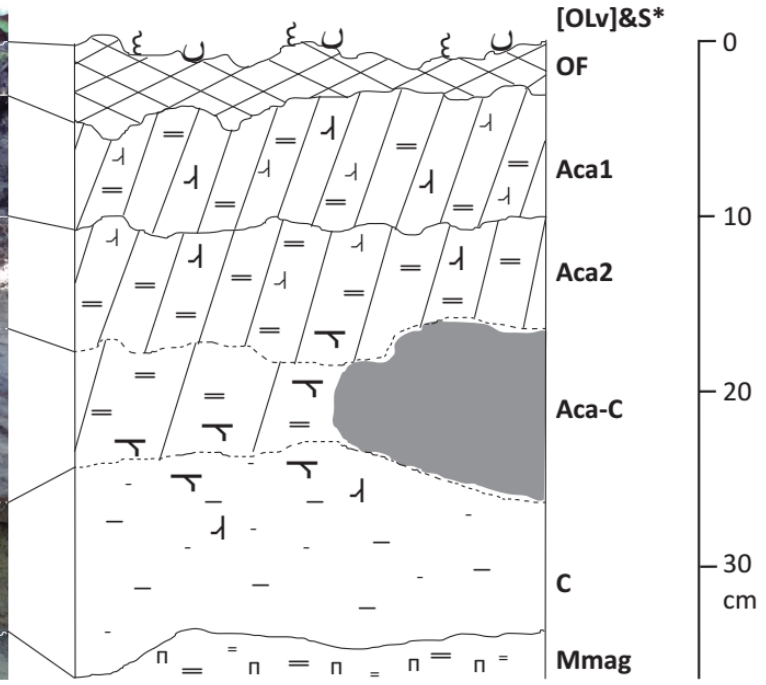
[OLv]&S* +3-0	Mousse couvrante. Feuilles de laiche, peuplier et chêne. Ecorces de pin. Brindilles. Fourmis. Ver de terre. Bioturbation. [vOL].
OF 0-2/4	Reste de mousse. Bois et aiguilles en décomposition. zoOF.
Aca 2/4-9/11	Couleur brune. Structure grumeleuse moyennement stable. Texture limoneux fin. Matériau compact, plastique et collant. Porosité moyenne. Racines fines à moyennes 4/5. pH 7,9. HCl 4/4. meA.
Aca-Cca 9/11-22/24	Couleur brun-jaune. Structure subpolyédrique stable. Texture limoneux fin. Matériau très compact, plastique et peu collant. Porosité faible. Racines moyennes à grosses 2/5. pH 8,3. HCl 4/4.
Cca 22/24-30	Couleur jaune-beige.Structure en plaquettes obliques très stable. Texture limoneux fin. Matériau très compact, plastique, peu collant. Porosité faible. Quelques racines fines. pH 8,7. HCl 4/4. Petites taches bleutées, peu nombreuses.
Mma 30 et +	Couleur beige. Structure massive cimentée. Porosité nulle. Quelques racines fines. HCl 4/4. Nombreuses taches d’hydromorphie.

WRB Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol

Station 110 — RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre, à DYSMULL

Date : 03.08.2018
Lieu : Grèves de la Motte, Vully-les-Lacs (VD)
Coordonnées : 564'772/198'220 ± 3 m
Altitude : 431,6 m

Topographie : plat
Géologie : dépôts lacustres et morainiques remaniés par l'action érosive du battement des eaux du lac
Végétation : *Molinio-Pinion*

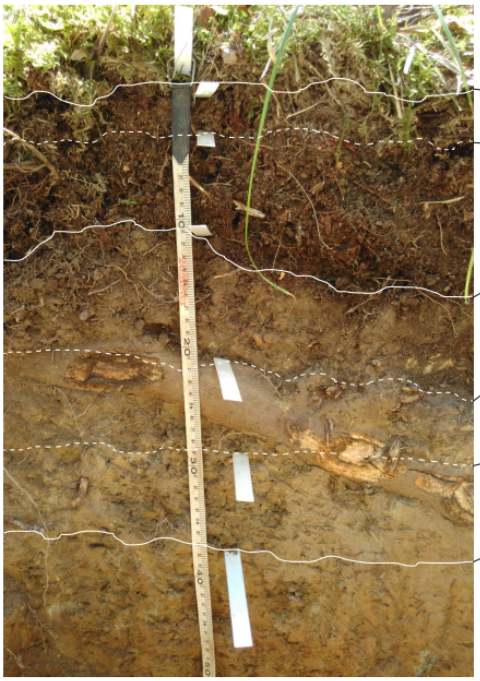


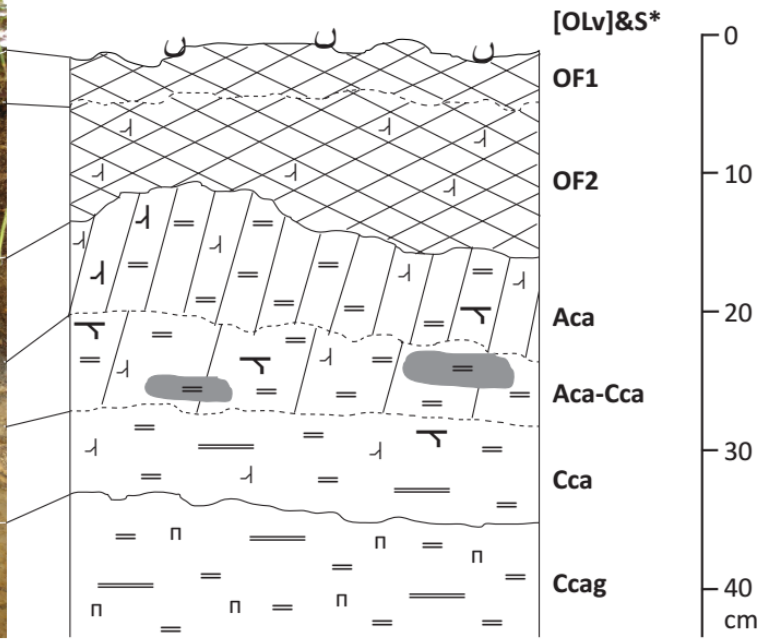
[OLv]&S* +3-0	Mousse couvrante. Feuilles de laiche, hêtre et aubépine. Brindilles et cônes de pin. Morceaux de branches diamètre 2 cm. Bioturbation. [vOL].
OF 0-2	Reste de mousse. Débris de feuilles, brindilles et aiguilles.Mycélium. Millepatte et acarien rouge. zoOF.
Aca1 2-10	Couleur brune. Structure grumeleuse, subpolyédrique et friable. Texture limoneux fin. Matériau meuble, peu plastique et peu collant. Porosité moyenne. Racines fines à moyennes 3/5. pH 7,8. HCl 3/4. maA.
Aca2 10-17	Couleur brun clair. Structure grumeleuse, subpolyédrique et friable. Texture limoneux fin. Matériau compact, peu plastique et peu collant. Porosité moyenne. Racines fines à grosses 2/5. pH 7,8. HCl 3/4.
Aca-C 17-25	Couleur brun-jaune. Structure polyédrique friable. Texture limoneux fin. Matériau compact, plastique et peu collant. Porosité faible. Racines grosses 2/5. pH 8,3. HCl 4/4. Pierres aplaties subanguleuses HCl 2/4 et sphériques polyédriques HCl 0/4.
C 25-37	Couleur jaune-beige. Structure lamellaire friable. Texture limono-sableuse. Matériau compact, platique et collant. Porosité nulle. Racines moyennes 2/5. pH 8,7. HCl 2/4.
Mmag 37 et +	Couleur jaune-gris. Structure massive cimentée. Texture limono-sableuse. Matériau plastique et collant. Porosité nulle. pH 9,1. HCl 4/4. Nombreuses taches de réduction.
WRB	Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol

Station 112 — RENDOSOL, bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre, à BRYO-DYSMULL

Date : 02.08.2018
Lieu : Grèves de la Motte, Vully-les-Lacs (VD)
Coordonnées : 564'772/198'220 ± 3 m
Altitude : 431,6 m

Topographie : plat
Géologie : dépôts lacustres et morainiques remaniés par l'action érosive du battement des eaux du lac
Végétation : *Molinio-Pinion*



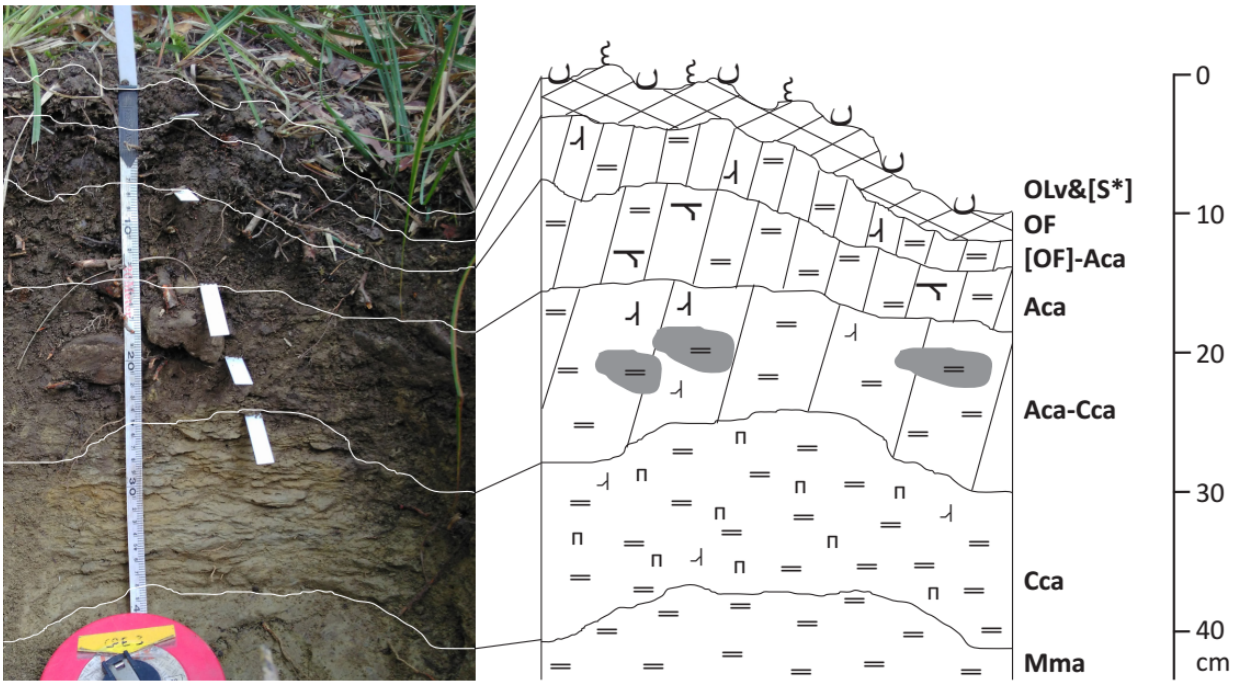


[OLv]&S* +6-0	Mousse couvrante. Feuilles de laiche et érable. Samares de frêne. Jeunes cônes et morceaux d'écorces de pin. Fourmis. bryoOL.
OF1 0-3/5	Reste de mousse. Mycélium. bryoOF.
OF2 3/5-11/15	Souches de laiche et morceaux de bois en décomposition. Mycélium. Racines fines 2/5. bryoOF-[ligOF].
Aca 11/15-21/23	Couleur brun clair. Structure subpolyédrique cohérente. Texture limoneux fin. Matériau compact, plastique et collant. Porosité moyenne. Racines moyennes à grosses 2/5. pH 8,0. HCl 4/4. maA.
Aca-Cca 21/23-28	Couleur brun clair. Structure polyédrique cohérente. Texture limoneux fin. Matériau très compact, plastique et collant. Porosité faible. Racines fines à grosses 1/5. pH 8,3. HCl 4/4. Pierres aplaties subarrondies à subanguleuses HCl 4/4.
Cca 28-37	Couleur brun clair-jaune. Structure polyédrique cohérente. Texture limoneux fin argileux. Matériau très compact, plastique et très collant. Porosité nulle. Racines fines 1/5. pH 8,6. HCl 4/4.
Ccag 37 et +	Couleur rouge ocre-gris bleuté. Structure en plaquettes obliques friable. Texture limoneux fin argileux. Matériau très compact, plastique et très collant. Nombreuses taches de réduction.
WRB	Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol

Station 116 — RENDOSOL bathyhydromorphe, issu de matériel meuble lacustre et morainique, de bas de falaise lacustre, à DYSMULL

Date : 31.07.2018
Lieu : Grèves de la Motte, Vully-les-Lacs (VD)
Coordonnées : 565'668/198'811 ± 3 m
Altitude : 431,8 m

Topographie : plat
Géologie : dépôts lacustres et morainiques remaniés par l'action érosive du battement des eaux du lac
Végétation : *Molinio-Pinion*



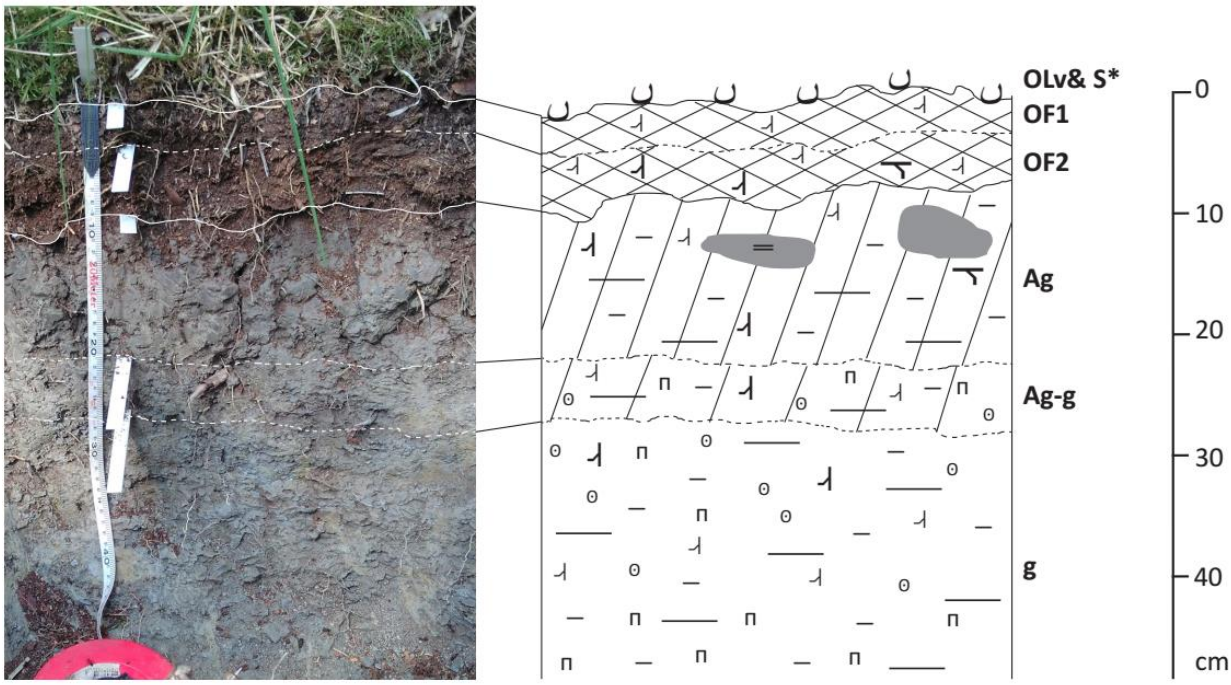
OLv&[S*] +3-0	Mousse. Feuilles de laiche et hêtre. Ecorces et petits cônes de pin. Bioturbation. vOL.
OF 0-2	Mousse blanchie.Ecorces, petits cônes et aiguilles de pin. Brindilles fragmentées. Mycélium. zoOF.
[OF]-Aca 2-7	Couleur brun. Structure grumeleuse cohérente. Texture limoneux fin. Matériau peu compact, platique et peu collant. Porosité moyenne. Racines moyennes 2/5. pH 8,1. HCl 4/4. maA1.
Aca 7-14/16	Couleur brun. Structure grumeleuse friable. Texture limoneux fin. Matériau compact, plastique et peu collant. Porosité moyenne. Racines grosses 2/5. pH 8,1. HCl 4/4. maA2.
Aca-Cca 14/16-25/28	Couleur brun-jaune. Structure subpolyédrique friable. Texture limoneux fin. Matériau compact, plastique et peu collant. Porosité faible. Racines fines à moyennes 1/5. pH 8,4. HCl 4/4. Pierres aplaties subarrondies à subanguleuses HCl 4/4.
Cca 25/28-38	Couleur jaune bleuté. Structure lamellaire cohérente. Texture limoneux fin. Matériau très compact, non plastique et peu collant. Porosité nulle. Quelques racines. pH 8,9. HCl 4/4. Très nombreuses taches de réduction.
Mma 38 et +	Couleur jaune-beige. Structure friable. HCl 4/4.

WRB Calcaric Gleyic Leptic Orthofluvic Fluvisol

Station 123 — REDOXISOL fluvique, surrédoxique, partiellement décarbonaté en surface, issu de matériel meuble lacustre et morainique, à LIGNO-HYDRO-EUMOR

Date : 07.08.2018
Lieu : Grèves de la Corbière, Estavayer (FR)
Coordonnées : 556'851/191'113 ± 3 m
Altitude : 431,3 m

Topographie : plat
Géologie : dépôts lacustres et morainiques remaniés par l'action érosive du battement des eaux du lac
Végétation : *Molinio-Pinion*



OLv&S* +5-0	Mousse couvrante. Feuilles de molinie et de chêne. Branches de diamètre 2 cm. Ecorces de pin. Fourmis. vOL.
OF1 0-3	Couleur rouge-brun foncé. Morceaux de bois en décomposition. Tiges de molinie. Aiguilles de pin. Mycélium. Racines fines. ligOF1.
OF2 3-9	Couleur rouge-brun clair. Morceaux d'écorce. Bois en décomposition. Racines fines à grosses 3/5. ligOF2.
Ag 9-20	Couleur gris foncé. Structure massive fondue. Texture limoneux fin argileux. Matériau très compact, plastique et très collant. Porosité faible. Racines fines à grosses 2/5. pH 6,9. HCl 0/4. Pierres sphériques arrondies HCl 0/4 et aplaties subanguleuses HCl 4/4. Taches. gmsA.
Ag-g 20-27	Couleur gris-jaune. Structure polyédrique. Texture limoneux fin argileux. Matériau très compact, plastique et très collant. Porosité nulle. Racines fines à moyennes 1/5. pH 7,5. HCl 0/4. Taches d'oxydo-réduction.
g 27 et +	Couleur gris-jaune, aspect bariolé. Structure polyédrique. Texture limoneux fin argileux. Matériau très compact, plastique et très collant. Porosité nulle. Racines fines à moyennes 1/5. pH 8,7. HCl 4/4.

WRB Orthofluvic Epigleyic Stagnosol (Capillaric)