Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 94 (2014-2015)
Heft: 1

Artikel: Typologie des sols sur gypse et végétation associée en Suisse
Autor: Biedermann, Yann / Gobat, Jean-Michel / Vittoz, Pascal
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-513642

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 94.1: 107-129. ISSN 0037-9603

Typologie des sols sur gypse et végétation associée en Suisse

par

Yann BIEDERMANN [1,2], *Jean-Michel GOBAT* [2] & *Pascal VITTOZ* [3]

Résumé.–BIEDERMANN Y., GOBAT J.-M. & VITTOZ P., 2014. Typologie des sols sur gypse et végétation associée en Suisse. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 94.1: 107-129.
Bien décrits en climat aride, les sols sur gypse sont encore mal connus en climat tempéré, et pour ainsi dire inconnus en Suisse. Cette étude a donc pour but de décrire les sols influencés par le gypse et de comprendre leur pédogenèse, à l'aide d'analyses standards de laboratoire effectuées sur dix sols suisses situés sur des affleurements de gypse. En parallèle, des relevés phytosociologiques ont permis de dresser un portrait de la végétation rencontrée en terrain gypseux. Un processus de gypsification (enrichissement en gypse secondaire par reprécipitation) a été observé dans tous les sols. Il est particulièrement important dans les régions où l'évapotranspiration potentielle excède nettement les précipitations en été (Valais central, Chablais sous l'influence du foehn). Les teneurs en gypse mesurées dépassent régulièrement 20% dans les horizons profonds et atteignent localement plus de 70%, formant alors un horizon blanc, induré. Cependant, l'absence d'un tel horizon gypsique en surface interdit le rattachement de ces sols aux gypsosols (selon le *Référentiel pédologique*, BAIZE & GIRARD 2009), référence typique des sols sur gypse, mais limitée aux régions arides. Tous les sols possédant une haute teneur en carbonates de magnésium, ils ont ainsi été rattachés aux DOLOMITOSOLS. Toutefois, selon la *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS 2014), cinq des sols étudiés peuvent être qualifiés de *Gypsisols*, les critères étant ici moins contraignants. Ces sols sont caractérisés par une texture grossière et une structure particulaire et friable qui en font un substrat filtrant. L'eau s'écoule ainsi facilement, emportant les éléments nutritifs non retenus par les argiles, qui ne dépassent généralement pas 1% de la matière fine, et la saturation du calcium bloque la dégradation de la matière organique. De plus, ces sols sont souvent rajeunis par l'érosion induite par le relief accidenté lié au gypse (éboulis, dolines, falaises et pentes). Ainsi, la végétation est principalement caractérisée par des espèces calcicoles et xérophiles, avec essentiellement des hêtraies xérothermophiles (*Cephalanthero-Fagenion*) et des pinèdes basophiles (*Erico-Pinion sylvestris*) à basse altitude, ou des landes subalpines calcicoles (*Ericion*) et des pelouses calcaires sèches (*Caricion firmae*) en altitude.

Mots clés: sols gypseux, gypse, pédogenèse, évaporites, climat tempéré, Trias, thermogravimétrie, Suisse.

Abstract.–BIEDERMANN Y., GOBAT J.-M. & VITTOZ P., 2014. Typology of soils on gypsum and associated vegetation in Switzerland. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 94.1: 107-129.
Soils on gypsum are well known in dry climates, but were very little described in temperate climate, and never in Switzerland. This study aims to describe soils affected by gypsum in temperate climate

[1] Rue de Vigner 10, CH-2072 Saint-Blaise, Suisse. E-mail: yann.biedermann@rpn.ch
[2] Laboratoire Sol et Végétation, Université de Neuchâtel, R. Emile-Argand 11, CH-2000 Neuchâtel, Suisse.
[3] Département d'écologie et d'évolution, Université de Lausanne, Bâtiment Biophore, CH-1015 Lausanne, Suisse. E-mail: pascal.vittoz@unil.ch

CODEN: BSVAA6

2014 © Société vaudoise des Sciences naturelles
Droits de reproduction réservés

and to understand their pedogenesis using standard laboratory analyzes performed on ten Swiss soils located on gypsum outcrops. In parallel, phytosociological relevés described the vegetation encountered in gypsiferous grounds. Gypsification process (secondary gypsum enrichment by precipitation) was observed in all soils. It was particularly important in regions where potential evapotranspiration exceed strongly precipitations in summer (central Valais, Chablais under influence of warm wind). Gypsum contents were regularly measured above 20% in deep horizons, and exceeded locally 70%, building a white, indurate horizon. However, the absence of such a gypsic horizon in the top soil hindered the use of gypsosol (according to the *Référentiel pédologique*, Baize & Girard 2009), the typical name of soils affected by gypsum, but restricted to dry regions. As all soils had a high content of magnesium carbonates, they were logically classified in the group of dolomitosols. However, according to the World Reference Base for Soil Resources (IUSS 2014), five soils can be classified among the *Gypsisols*, criteria being here less restricting. These soils are characterized by a coarse texture and a particulate brittle structure making a filtering substrate. They allow water to flow easily taking nutrients. They are not retained by clay, which does generally not exceed 1% of the fine material. The saturation of calcium blocks the breakdown of organic matter. Moreover, these soils are often rejuvenated by erosion caused by the rough relief due to gypsum (landslides, sinkholes, cliffs and slopes). Hence, the vegetation is mainly characterized by calcareous and drought tolerant species, with mostly xerothermophilic beech (*Cephalanthero-Fagenion*) and pine forests (*Erico-Pinion sylvestris*) in lowlands, or subalpine heathlands (*Ericion*) and dry calcareous grasslands (*Caricion firmae*) in higher elevations.

Keywords: gypsiferous soils, gypsum, pedogenesis, evaporites, temperate climate, Trias, thermogravimetry, Switzerland.

Introduction

Les gypsosols, au sens de Baize & Girard 2009, sont caractérisés par une accumulation secondaire de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) dans leurs horizons de surface. Ils couvrent plus de 100 millions d'hectares dans le monde (FAO 1990), presque exclusivement dans les milieux arides et semi-arides (Afrique, Asie, Proche-Orient, Amérique, Espagne) où les précipitations n'excèdent pas 300 à 400 mm par année (Baize & Girard 2009). Ces sols se développent toujours à partir de roches évaporitiques contenant du gypse ou de l'anhydrite et se forment par dissolution et redistribution de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ dans le paysage (Baize & Girard 2009). En climat aride, le gypse peut se retrouver en fortes proportions, jusqu'à 80% du solum, et apparaît sous des formes très variées allant de fins cristaux à des encroûtements ou croûtes massives (sols qualifiés alors de pétrogypsiques). Le gypse induit certaines caractéristiques: une texture sableuse et une structure particulaire, un pH élevé, une faible teneur en matière organique (< 1%), une solution du sol saturée par rapport à la calcite et un manque d'eau excessif pour les plantes, qui est l'une des principales restrictions à la croissance des végétaux (Roulet 2011, Herrero & Boixadera 2002).

Ces sols ont été relativement peu étudiés par les pédologues ou les agronomes, car ce sont des sols impropres à l'agriculture. En effet, le gypse est un sel induisant bon nombre d'obstacles physiques et chimiques à la croissance des plantes. Cependant, avec l'accroissement constant de la population mondiale, il est nécessaire de trouver de nouvelles zones cultivables; c'est la raison pour laquelle, depuis la fin du 20ème siècle, les chercheurs se penchent de plus en plus sur ces sols particuliers.

Si les sols gypseux commencent à susciter l'attention des pédologues en climat aride, ils sont cependant mal connus dans les zones où le climat est plus humide et tempéré,

comme en Suisse. Quelques descriptions succinctes de Rendzines gypsifères et de Sols humiques gypseux existent dans les Alpes françaises sur roches du Trias (Bartoli 1966; Gensac 1969), alors que des Chernozems hapliques et des Podzoluvisols eutriques gypseux provenant principalement des pluies acides chargées en sulfates ont été décrits en Allemagne, dans les Herzgebirge (Dultz & Kühn 2005; Heinze & Fielder 1984). Mais aucune étude pédologique approfondie n'a été menée jusqu'ici en climat tempéré et aucune référence n'existe sur le territoire helvétique.

Bien que peu courant en Suisse, le gypse affleure localement et donne alors naissance à des sols ayant le sulfate de calcium comme matériel parental. Ces dépôts ont été datés de l'Ère Secondaire, plus précisément du Trias moyen à supérieur (240-220 millions d'années), quand la Suisse se trouvait plus près de l'équateur et subissait des températures élevées, avec une évaporation importante. Cette situation a permis la précipitation de grandes quantités de gypse dans les marais salants, lagunes ou sebkhas laissés par les mers téthysienne, au sud, et germanique, au nord (Mandia 1991, Trümpy 1980). Lors de l'orogenèse alpine, la couche gypseuse a subi une diagenèse transformant le gypse en anhydrite ($CaSO_4$) par déshydratation (Dronkert 1987). Cette couche d'évaporites est bien connue des géologues pour sa grande plasticité, qui parlent même de «couche savon». Ainsi, dans les Alpes, les évaporites constituent souvent la semelle des nappes (Nicod 1976) ou des horizons de décollement, comme dans le Jura (Trümpy 1980, Sommaruga 1997).

D'après Schöneich & Imfeld (1997), le gypse en Suisse est toujours secondaire, issu de l'hydratation de l'anhydrite par les eaux météoriques et de la reprécipitation du gypse des eaux saturées en ions sulfates et calcium. Ces mêmes auteurs soulignent que cette précipitation s'accompagne d'une augmentation du volume de la roche de plus de 60%. Le gypse est également caractérisé par sa haute solubilité (2,6 g/L à 25°C) et par une dissolution rapide dans l'eau, ce qui a pour conséquence son érosion rapide, avec redistribution dans le paysage, et son importante lixiviation des horizons pédologiques par les eaux de percolation (Delarze 1978). Cette particularité influence la topographie des terrains gypseux, souvent très escarpés, avec de fortes pentes et des phénomènes de karstification menant à la formation de profondes dolines et de pyramides, qui font partie des curiosités touristiques rencontrées en milieu alpin.

Face au manque de connaissances, la présente étude a pour but une meilleure documentation des sols sur gypse en climat tempéré. Plus spécifiquement, elle vise (1) à vérifier la présence en climat tempéré de gypsosols semblables à ceux des régions arides ou, dans le cas contraire, à rattacher ces sols à des références autres (selon Baize & Girard 2009), (2) à expliquer l'influence du gypse sur la végétation en lien avec les caractéristiques physico-chimiques de ces sols et (3) à comprendre leur pédogenèse en climat tempéré.

Matériel et Méthodes

Sites d'étude

Les affleurements gypseux en Suisse sont relativement rares et restreints. Néanmoins, compte tenu des connaissances étendues en géologie de la Suisse et de l'intérêt économique représenté par le gypse (matériaux de construction comme le plâtre), on sait où les gypses

triasiques affleurent (SGTK 1997). Les sites d'étude ont ainsi été sélectionnés en fonction de ces affleurements, de manière à couvrir une grande partie du territoire suisse et une large gamme d'altitudes (figure 1). Le tableau 1 récapitule les données relatives au climat de chaque station. Neuf sites ont été retenus:

- Dans les Préalpes vaudoises (Chablais): (Site 1) Bois de la Glaivaz à Ollon, (2) La Combe à Bex (près d'une carrière de gypse) et (3) Col de la Croix dans les pyramides de gypse (deux profils pédologiques étudiés, l'un orienté au sud et l'autre au nord);
- Dans les Alpes: (4) Saint-Léonard (près d'une carrière de gypse, Valais), (5) Krattigen (Berne), (6) Kerns-Melbach (Obwald) et (7) Col du Lukmanier (Tessin);
- Dans le Jura plissé: (8) Zeglingen (près d'une carrière, Bâle-Campagne) et (9) Kienberg (réserve naturelle dans une ancienne carrière, Soleure).

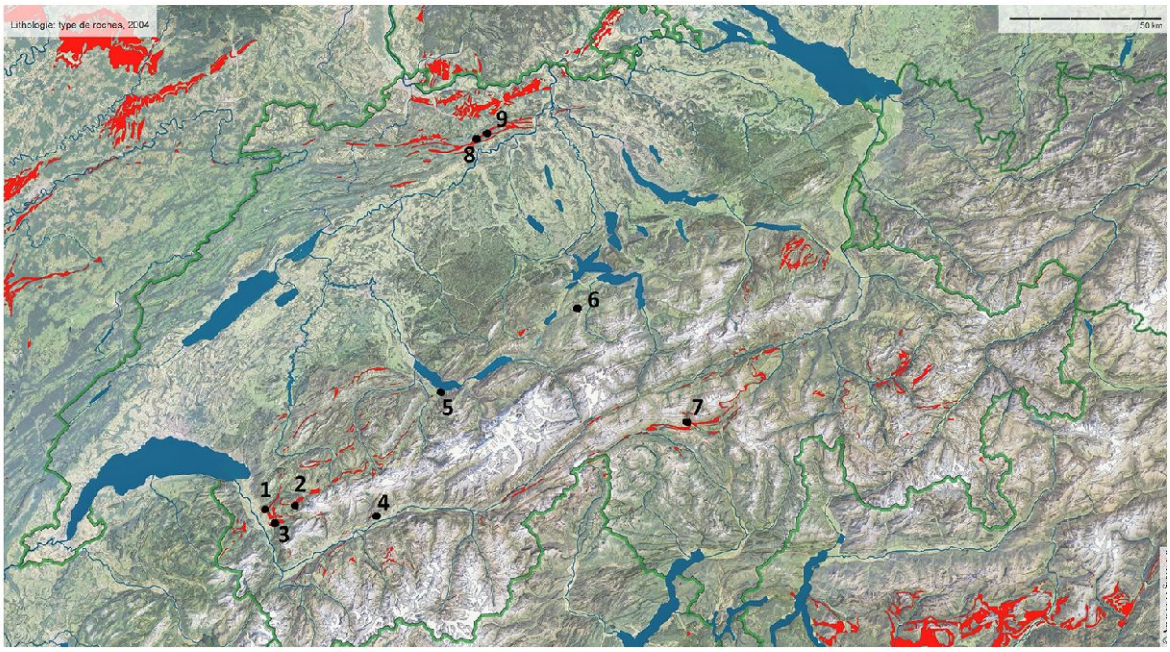

Figure 1.–Affleurements de gypse en Suisse (en rouge; Atlas de la Suisse 2, 2004) et localisation des sites d'étude (points noirs): (1) Ollon, (2) Col de la Croix, (3) Bex, (4) Saint-Léonard, (5) Krattigen, (6) Kerns-Melbach, (7) Col du Lukmanier, (8) Zeglingen, (9) Kienberg. © Atlas de la Suisse 2, 2004.

Descriptions de terrain

Une fosse pédologique a été creusée dans chacun des sites d'étude et le profil a été décrit conformément aux recommandations de Baize & Jabiol (1995). Pour chaque horizon, la texture a été relevée au toucher, alors que la structure, le taux d'éléments grossiers et leurs constituants ont été identifiés visuellement (Gobat *et al.* 2010). L'abondance relative des racines vivantes (échelle de 0 à 5) a été estimée par classes de taille et la couleur des horizons a été appréciée visuellement. Des remarques concernant certains traits particuliers ont parfois été ajoutées, notamment la forme et le type d'accumulation du gypse. L'étude de la forme d'humus, sur la base de Zanella *et al.* (2011), parachève la description du sol. Un échantillon de chaque horizon reconnu a été récolté pour les analyses en laboratoire.

Tableau 1.–Données stationnelles et climatiques des différents sites d'étude. Les données climatiques sont extraites de cartes climatiques (ZIMMERMANN & KIENAST 1999) pour la période d'avril à septembre: somme des précipitations, température moyenne, évapotranspiration potentielle et différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (bilan hydrique entre avril et septembre). Une valeur négative correspond à une évapotranspiration supérieure aux précipitations. La végétation observée est donnée au niveau de l'alliance ou sous-alliance phytosociologique, correspondant à la typologie de DELARZE & GONSETH (2008); l'association et la liste des espèces présentes se trouvent en annexe.

N°	Stations	Altitude (m)	Précipit. avril-sept (mm)	Temp. avril-sept (°C)	Evapotrans. avril-sept (mm)	Différence Précipit.-Evapotransp. (mm)	Pente (%)	Exposition	Végétation observée
1	Ollon	608	690	14.3	785	-95	67	Ouest	*Erico-Pinion sylvestris*
2	Col de la Croix (Sud)	1842	870	7.7	575	295	47	Sud-est	*Ericion*
	Col de la Croix (Nord)	1830					70	Nord-ouest	*Vaccinio-Piceion*
3	Bex	570	654	14.9	743	-89	70	Ouest	*Cephalanthero-Fagenion*
4	Saint-Léonard	580	282	15.0	886	-604	84	Sud	*Stipo-Poion*
5	Krattigen	590	711	13.9	490	221	37	Nord-est	*Lonicero-Fagenion*
6	Kerns-Melbach	962	860	11.7	676	185	75	Nord-ouest	*Cephalanthero-Fagenion*
7	Col du Lukmanier	1915	812	6.4	475	337	53	Sud-ouest	*Caricion firmae*
8	Zeglingen	615	646	13.3	615	31	70	Nord-ouest	*Cephalanthero-Fagenion*
9	Kienberg	685	661	13.1	758	-97	60	Sud-sud-est	*Cephalanthero-Fagenion*

Chaque site a fait l'objet d'un relevé phytosociologique (BRAUN-BLANQUET 1964), rattaché par la suite à une alliance selon DELARZE & GONSETH (2008) et, si possible, à une association sur la base de GALLANDAT *et al.* (2012).

Analyses pédologiques en laboratoire

Lors des analyses en laboratoire, des précautions ont été prises en raison des artefacts que le gypse peut produire (VIEILLEFON 1979, PORTA 1998, LOEPPERT & SUAREZ 1996, BASHOUR & SAYEGH 2007). De ce fait, les résultats sont exprimés en fonction de la masse de sol séché à l'air, l'humidité résiduelle n'ayant pu être mesurée suite à la forte tendance du gypse à la déshydratation (PORTA 1998).

Les échantillons ont été tamisés à 2 mm et broyés à l'agate. Les pH_{H20} et pH_{KCl} ont été mesurés au pH-mètre électrique et le taux de gypse par la méthode thermogravimétrique (LEBRON *et al.* 2009). Cette méthode est fondée sur la perte en eau du gypse lors du passage à l'étuve à 105°C durant 24 heures, selon l'équation suivante:

$$CaSO_4 \cdot 2\ H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O + 3/2\ H_2O$$

Le dosage des carbonates de calcium (calcite) et de magnésium (dolomite) a été effectué au moyen d'un calcimètre Bernard par volumétrie, après une attaque à l'acide chlorhydrique 6M (DREIMANIS 1962).

Les analyses pédologiques suivantes ont été réalisées uniquement sur trois des sols choisis comme étant les plus représentatifs: Ollon, Saint-Léonard et Col de la Croix (profil orienté au sud). La capacité d'échange cationique (CEC) a été mesurée par la méthode au chlorure de cobaltihexamine, qui a le double avantage de s'effectuer au pH du sol et d'être bien adaptée aux sols calcaires et riches en sels solubles (CIESIELSKI & STERCKEMAN 1997). Le taux de phosphore biodisponible a été obtenu par une extraction au bicarbonate de sodium (OLSEN *et al.* 1954) suivie d'un dosage par spectrophotométrie (Biochrom, modèle Libra S11™). Les teneurs en azote total et en carbone organique ont été mesurées à l'analyseur CHN par pyrolyse oxydative (Thermo Finnigan Flash EA 1112) après traitement préalable des échantillons à des vapeurs d'acide chlorhydrique concentré, afin d'éliminer la fraction de carbone minéral. De ces analyses a été calculé le rapport C/N (carbone organique par azote total), informant sur la dégradabilité de la matière organique. Une analyse granulométrique a été opérée au granulomètre laser en voie sèche (Malvern, modèle Mastersizer 2000™; module de dispersion Scirocco 2000™); afin de ne pas s'écarter des résultats observés sur le terrain, aucun traitement préalable n'a été appliqué aux échantillons de sols. Pour terminer, l'analyse minéralogique de la roche totale par diffraction aux rayons X (analyseur Thermo Scientific, ARL X'TRA Powder Diffractometer™) a été utilisée afin de contrôler la présence d'autres sels hydratés qui pourraient fausser les résultats comme la mirabilite ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), l'epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) ou encore le carbonate de sodium ($Na_2CO_2 \cdot 7H_2O$) (ROULET 2011).

Les observations de terrain et les analyses ont permis d'identifier et de nommer les horizons de référence et de rattacher les sols observés à un type sur la base du *Référentiel pédologique* (BAIZE & GIRARD 2009). Une correspondance est donnée avec la *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS 2014) dans les annexes (documents accessibles par http://www3.unil.ch/wpmu/svsn/bulletin-de-la-svsn/annexes/).

Résultats

Les observations des différents profils de sols et les relevés phytosociologiques sont présentés sous forme de fiches descriptives en annexe. Avec l'aide des analyses de laboratoire (tableaux 2 et 3), il est possible de se faire une idée des caractéristiques pédogénétiques liées à la présence de sulfate de calcium dihydraté. Il est à noter qu'aucun des sels pouvant biaiser les analyses du gypse n'a été détecté en quantité suffisante par la diffraction aux rayons X (tableau 4), rendant cette dernière parfaitement interprétable.

Gypse et carbonates

La présence de gypse dans les sols étudiés est aisément reconnaissable dans la majeure partie des profils. Bien que Herrero & Boixadera (2002) affirment que l'origine géologique (primaire) ou pédologique (secondaire) du sulfate de calcium en milieu aride est extrêmement difficile à différencier à cause de l'apport éolien possible de gypse aux sols, cette distinction semble plus aisée en climat tempéré. Le gypse secondaire apparaît principalement sous forme de pseudo-mycéliums (figure 2a), amas ou nodules, voire de fins cristaux blancs. Il précipite de préférence dans des fissures, dans des canaux racinaires et autour des racines. Lors de grosses accumulations, ces cristaux sont tassés et forment une induration cimentée pour finir par former une croûte blanchâtre et caverneuse (figure 2b).

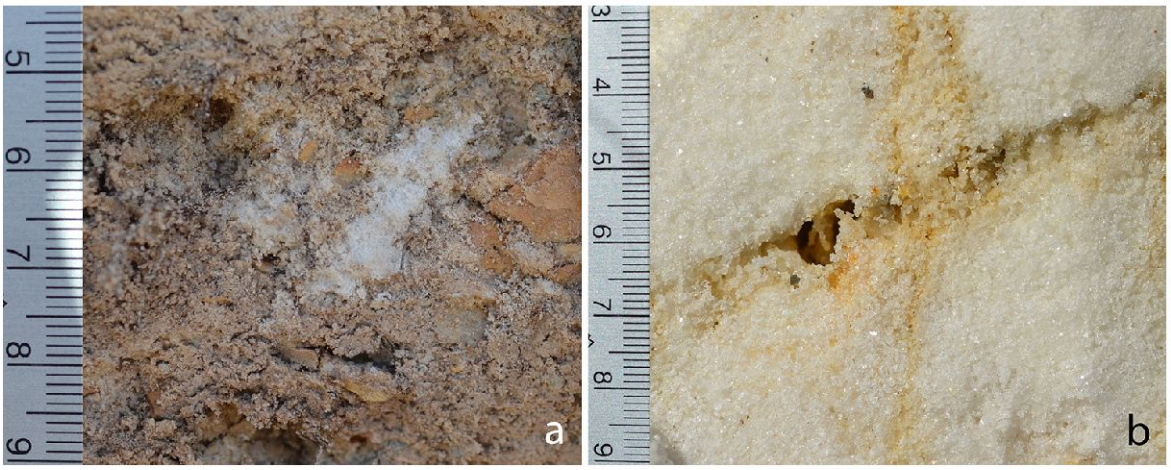

Figure 2.–Accumulation secondaire de gypse dans un sol à Saint-Léonard (VS): (a) le gypse a précipité sous forme de pseudo-mycéliums et de fins cristaux (sol beige floconneux) ainsi que d'un nodule blanc; (b) plus en profondeur, les cristaux sont indurés et cimentés, formant un bloc blanc, caverneux. Photos P. Vittoz.

Les analyses effectuées en laboratoire confirment que, exceptés les horizons profonds du Lukmanier et du Col de la Croix (orienté au nord), tous les horizons pédologiques ont une teneur en gypse supérieure à 3%, permettant de les qualifier au minimum de gypseux (suffixe –y). Les maxima ont été mesurés à Ollon et à Saint-Léonard, avec des valeurs de 61,6% et 73,0% de gypse. Pour deux horizons, ces hauts pourcentages et le faciès particulier (très blancs, compacts, avec début d'encroûtement; figures 3 et 4) ont permis de les qualifier d'horizons gypsiques de profondeur, ou horizons Yp (tableau 2). Cependant, ce qualificatif

Tableau 2.–Résultats des analyses de laboratoire effectuées sur tous les sols. Les références des horizons et des sols se fondent sur BAIZE & GIRARD (2009) et les références des formes d'humus sur ZANELLA *et al.* (2011). Voir la signification des abréviations décrivant les horizons dans les résultats.

Stations et références des sols	Horizons diagnostiques	pH			Taux de gypse (%)	Taux de carbonates		Rapport molaire
		H_2O	KCl	ΔpH		$CaCO_3$ (%)	$MgCO_3$ (%)	$CaCO_3/MgCO_3$
Saint-Léonard	Adoy	7.8	7.8	0	6.8	7.4	18.1	0.8
DOLOMITOSOL à horizon gypsique, loessique, à Eumull	Sdoy1	8.1	8	0.1	4.9	13.6	13.7	1.8
	Sdoy2	8.2	8.2	0	3.2	12.4	16.9	1.4
	IICy	7.9	7.8	0.1	11.6	6.9	45.8	0.3
	IIYpm	7.7	7.7	0	73.0	0	27.9	0
	IIMyk	7.8	7.7	0.1	48.8	1.3	49.0	0.1
	IIRy	7.3	7.3	0	62.7	0	27.6	0
Ollon	OLn	6	5.4	0.6	-	-	-	-
DOLOMITOSOL leptique à horizon gypsique, colluvial, à Dysmull	OF1	6.6	6.5	0.1	-	2.1	24.6	0.2
	OF2	6.9	6.6	0.3	29.9	5.7	31.1	0.3
	Adoy	7.6	7.5	0.1	24.1	9.3	33.3	0.5
	Cydo1	7.7	7.7	0	66.8	0	22.3	0
	Yp	7.9	7.8	0.1	61.6	4.1	20.2	0.4
	Cydo2	7.9	7.8	0.1	47.5	8.3	25.8	0.6
	Myk	7.9	7.8	0.1	52.2	7.0	21.1	0.6
Col de la Croix (Sud)	OF [Ay]	7.7	7.4	0.3	30.5	-	-	-
DOLOMITOSOL colluvial, gypseux, de doline, à Dysmull	Adoy-Ddo	8.1	7.7	0.4	14.3	0.4	69.4	0
	Adoy	8.2	7.9	0.3	6.2	0.6	61.3	0
	Ddoy	8.2	8.1	0.1	5.2	0.3	66.2	0
	Rdoy	8.8	8.2	0.6	4.5	0.4	71.1	0
Col de la Croix (Nord)	OFr	5	4.6	0.4	-	-	-	-
DOLOMITOSOL leptique, gypseux, alpin, à Rhizoamphi	OFm	3.9	3.5	0.4	-	-	-	-
	Adoy	7.8	7.3	0.5	64.9	0.3	29.9	0
	Sdoy	8.3	7.4	0.9	19.7	4.1	43.8	0.2
	Cdoy	8.4	7.6	0.8	9.3	7.5	49.3	0.3
	Mdok	8.7	8.6	0.1	1.2	7.4	67.5	0.2
Zeglingen	Adoy	7.4	7.3	0.1	12.7	0.3	6.0	0.1
DOLOMITOSOL leptique, gypseux, colluvial, à Oligomull	Adoy-Sdoy	7.3	7.3	0	10.5	0.4	29.1	0
	Cdoy [Adoy]	7.5	7.4	0.1	14.2	8.8	34.0	0.5
	Mdoy1	7.3	7.3	0	36.8	2.9	24.3	0.2
	Mdoy2	7.4	7.3	0.1	23.9	8.4	28.2	0.6

Kienberg	Adoy	7.7	7.5	0.2	13.2	14.6	30.4	0.9
	Adoy-Sdoy	7.7	7.6	0.1	8.5	24.7	26.3	1.7
DOLOMITOSOL gypseux, colluvial, à Mésomull	Sdoy	7.8	7.8	0	4.7	20.7	29.8	1.3
	Ddoy1	7.7	7.6	0.1	13.4	24.0	26.1	1.7
	Mdoy1	7.9	7.9	0	14.3	28.9	32.6	1.6
	Ddoy2	7.6	7.6	0	18.4	21.9	22.6	1.8
	Mdoy2	7.7	7.6	0.1	13.3	24.2	19.2	2.3
Bex	Adoy	8.2	7.8	0.4	14.3	9.1	33.2	0.5
DOLOMITOSOL gypseux, calcarique, à Oligomull	Sdoy	8.4	8.0	0.4	9.7	15.7	41.7	0.7
	Myk1	8.7	8.5	0.2	12.0	19.9	53.3	0.7
	Myk2	8.6	8.6	0	12.3	26.6	40.6	1.2
	Mdoyk	8.8	8.7	0.1	21.5	10.2	62.4	0.3
Krattigen	Adoy	7.9	7.3	0.6	16.3	0.3	6.0	0.1
DOLOMITOSOL gypseux, colluvial, à Mésomull	Sdoy	8.3	7.7	0.6	9.3	6.5	49.6	0.2
	Mdoy	8.4	8.3	0.1	12.1	4.6	70.6	0.1
	Ddoy	8.3	7.8	0.5	20.3	7.2	33.8	0.4
	Cdoy	8.3	8.0	0.3	13.3	6.6	45.0	0.3
Kerns-Melbach	Adoy	7.4	7.2	0.2	18.1	7.5	35.5	0.4
DOLOMITOSOL leptique, gypseux, colluvial, à Dysmull	Sdoy	7.7	7.4	0.3	44.2	2.8	12.3	0.4
	Ddoy	7.9	7.4	0.5	46.4	2.8	16.8	0.3
Col du Lukmanier	Aciy	7.3	6.5	0.8	28.0	0	0	0
DOLOMITOSOL gypseux, alpin, à Dysmull	Sciy	7.5	6.6	0.9	14.8	0	0.2	0
	Ccadok1	8.3	7.8	0.5	0.8	0	29.7	0
	Ccadok2	9.2	8.9	0.3	0	0	53.3	0

n'a pu être attribué aux autres horizons profonds des sols de Saint-Léonard, Ollon et Bex, car, malgré une accumulation secondaire massive de gypse et de carbonates, ils ne présentaient pas d'induration. Caractérisés par un mélange de roches meubles carbonato-gypseuses, ils ont été nommés horizons Myk. De hautes concentrations de gypses et de pareils faciès n'ont jamais été observés en surface.

Excepté en altitude (Lukmanier et Col de la Croix), la quantité de gypse augmente avec la profondeur. En effet, les amas de cristaux de gypse, arborant une couleur blanche typique dans ces sols, sont en plus grande quantité dans les horizons inférieurs. Cette augmentation a généralement été confirmée par l'analyse thermogravimétrique, bien que le taux de gypse soit fréquemment plus élevé dans l'horizon A que dans l'horizon structural S (tableau 2).

Le taux de carbonates est généralement élevé à très élevé (dépassant au total 30%, voire 60%; tableau 2), avec une dominance de dolomite. Effectivement, le rapport molaire

$CaCO_3/MgCO_3$ est très bas, ce qui permet de qualifier les horizons de dolomitiques, avec le suffixe –do (limite à 1,5, Baize & Girard 2009). Aucune corrélation n'a pu être observée entre le taux de carbonates et la profondeur ou le taux de gypse de l'horizon. Cependant, des horizons d'accumulation de carbonates secondaires (calcite et/ou dolomite) ont été décelés à Saint-Léonard, Ollon, Bex, au Col de la Croix (orientation nord) et au Lukmanier, souvent accompagnés de cristaux de gypse secondaire. Ce début d'accumulation de carbonates secondaires est désigné par le suffixe –k.

Texture et structure

La texture est presque exclusivement limono-sableuse à sableuse, et les microagrégats sont généralement microstructurés et peu stables. La macrostructure qui en découle est presque toujours particulaire. Ainsi, beaucoup d'horizons de profondeur ont été rattachés à l'horizon M, qui indique un matériau minéral meuble. Une autre particularité est la présence importante de colluvions de la taille de graviers et petits cailloux, non consolidés, amenés par de fortes pentes et constituant des horizons D.

L'analyse granulométrique a confirmé ces observations de terrain, avec un taux d'argiles très faible, dépassant rarement 1% dans les trois sols analysés en détail (tableau 3). Les valeurs les plus élevées ont été mesurées à Saint-Léonard, probablement dues à l'influence de lœss (limons éoliens) riches en argiles granulométriques. Ces lœss sont confirmés par les taux élevés de quartz mesurés dans les horizons supérieurs (tableau 4), ainsi que par des études micromorphologiques (Biedermann *et al.*, en préparation). Inversement, le taux de sables dépasse systématiquement 40%, voire excède 50% dans tous les horizons de deux des sols (tableau 3).

Matière organique

Les horizons organo-minéraux A sont généralement peu épais et surmontés d'un horizon holorganique OL (litière pas ou peu dégradée) également mince, comme c'est le cas à Kienberg, Saint-Léonard, Zeglingen et Krattigen. En revanche, lorsqu'il est présent, l'horizon OF (litière partiellement décomposée, mélange d'éléments fragmentés et de matière très fine, noire) est généralement très épais et parfois acide en surface (sols d'Ollon et du Col de la Croix).

Les teneurs en carbone organique dans les horizons organo-minéraux, situées entre 3% et 6%, indiquent un pourcentage important de matière organique (tableau 3), contrairement aux sols gypseux des milieux arides où il ne dépasse pas 1% (Prudat 2010; Roulet 2011). Ce taux diminue assez rapidement avec la profondeur du sol. Évaluée par le rapport C/N, l'efficacité de décomposition de la matière organique est moyenne à Ollon et au Col de la Croix (valeurs supérieures à 20), mais meilleure à Saint-Léonard (valeurs inférieures à 16).

Les formes d'humus se rattachent majoritairement au type Mull, correspondant à une bonne activité biologique (tableau 2 et annexes). La plus efficace a été trouvée à Saint-Léonard avec un Eumull. Excepté à Kerns-Melbach, les formes d'humus décrites sous les hêtraies varient entre le Mésomull et l'Oligomull. Les autres sols possèdent un épisolum humifère qualifié de Dysmull, ce qui traduit une efficacité biologique de décomposition de la matière organique plus faible que sous les hêtraies. Enfin, le sol du Col de la Croix orienté

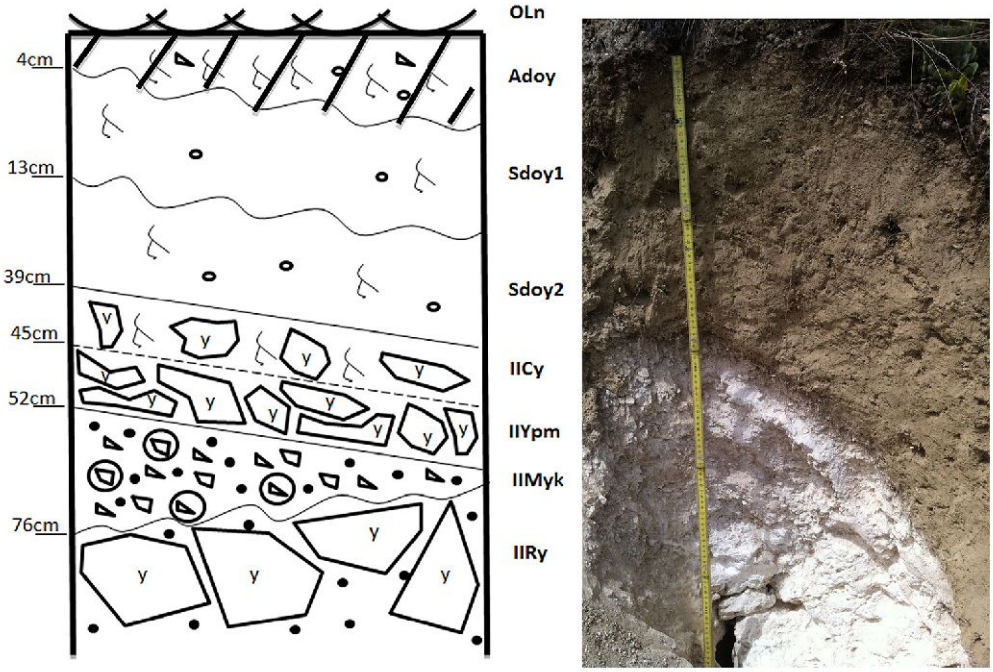

Figure 3.–Profil pédologique du DOLOMITOSOL à horizon gypsique, loessique, à Saint-Léonard (VS). La végétation locale se rattache au *Stipo-Poion*. Voir tableau 2 et annexe 1 pour la description détaillée des horizons. Photo Y. Biedermann.

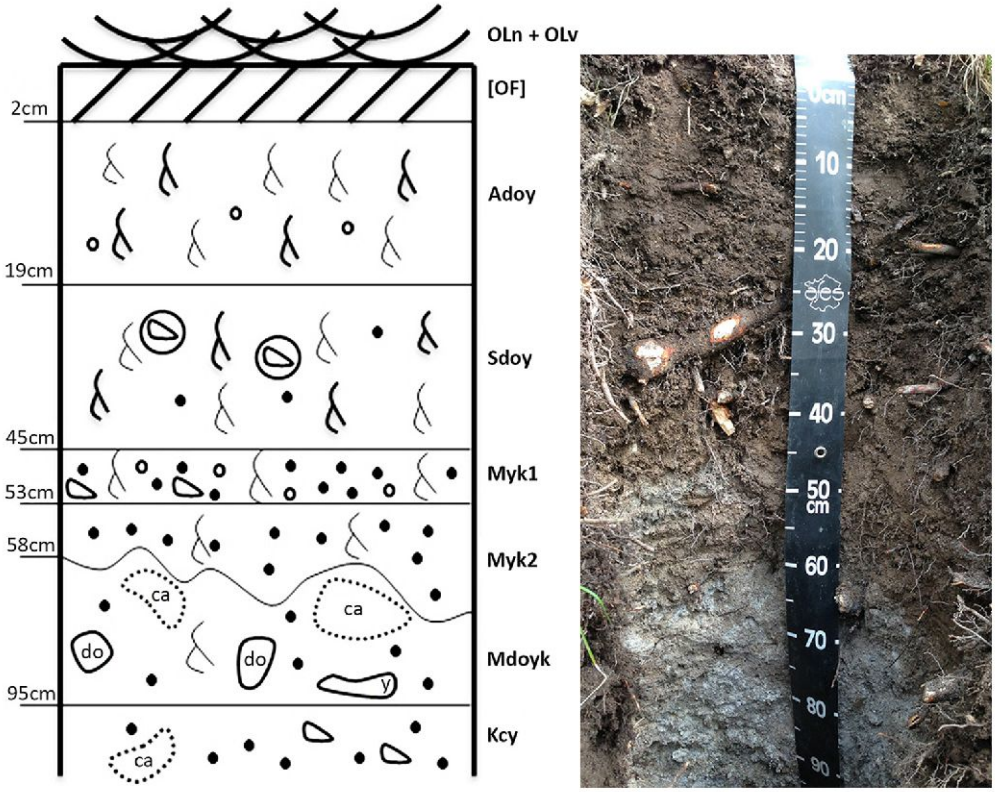

Figure 4.–Profil pédologique du DOLOMITOSOL gypseux, calcarique, à Bex (VD). La végétation locale appartient au *Cephalanthero-Fagenion*. Voir tableau 2 et annexe 7 pour la description détaillée des horizons. Photo Y. Biedermann.

au nord possède une forme d'humus qualifiée de Rhizoamphi; en raison probablement des contraintes climatiques, la matière organique s'accumule en surface dans un état peu dégradé, malgré la forte activité des vers dans l'horizon A.

Autres caractéristiques chimiques

Compte tenu de la faible teneur en argile, la capacité d'échange cationique (CEC) est fortement corrélée au taux de matière organique (R^2 = 0,96). Les valeurs de CEC sont faibles à moyennes dans les horizons organo-minéraux A, avec des valeurs comprises entre 14,4 et 24,0 $cmol^+/kg$, descendant au-dessous de 10 $cmol^+/kg$ dans les horizons inférieurs (tableau 3).

Les teneurs en phosphore assimilable sont faibles, avec un maximum de 86 ppm au Col de la Croix (tableau 3). Elles sont même particulièrement faibles à Ollon (36 ppm), où seuls les horizons superficiels sont exploités par les racines.

Les valeurs de pH élevées sont en accord avec celles retrouvées habituellement dans des sols à roche-mère carbonatée (tableau 2). Les valeurs les plus élevées se situent généralement en bas des profils, atteignant des pH proches de 9.

La végétation

Les espèces recensées en terrain gypseux ne sont pas caractéristiques du gypse mais appartiennent à une végétation de type calcicole et xérique (Rickebusch 2002). Les étages collinéen et submontagnard sont caractérisés par la sous-alliance du *Cephalanthero-Fagenion* (hêtraies xérothermophiles; tableau 1). Ces stations sont souvent pauvres en espèces car elles ont été passablement influencées par l'homme jusque dans les années 1950 (SGTK 1997), qui y a souvent planté des épicéas (*Picea abies*). Observées à Kienberg, Bex, Zeglingen et Kerns-Melbach, ces forêts sur gypse sont ouvertes et lumineuses, fortement dominées par le hêtre (*Fagus sylvatica*) et, en strate herbacée, par les Poacées. A Krattigen, l'exposition nord plus fraîche tend à une transition vers la hêtraie mésophile de l'étage montagnard inférieur (*Lonicero-Fagenion*). À Ollon, une pinède subcontinentale basophile (*Erico-Pinion sylvestris*) a pu s'implanter (Delarze & Gonseth 2008), caractérisée par des pins de petite taille (environ 9 m) et une strate herbacée largement dominée par *Erica carnea*. À l'étage subalpin, la strate arborescente est plus rare et la strate herbacée est caractéristique des landes calcicoles (*Ericion carneae*) ou des pelouses calcaires sèches (*Seslerion*).

Cependant, certains microclimats peuvent modifier le type de végétation. Ainsi, des espèces acidophiles du *Vaccinio-Piceion,* comme *Vaccinium vitis-idaea, V. myrtillus* et *Rhododendron ferrugineum* ont été relevées au Col de la Croix en exposition nord, où les horizons holorganiques épais sont caractérisés par un pH acide (tableaux 1 et 2). Enfin, le climat subcontinental particulièrement sec de la plaine du Rhône en Valais central permet le développement d'une pelouse steppique secondaire à Saint-Léonard, remplaçant probablement la chênaie buissonnante (*Quercion pubescenti-petraeae*) originelle. Le lichen *Fulgensia vulgaris* y a été observé, espèce considérée par Braun-Blanquet (1961) dans son étude sur les pelouses sèches des vallées alpines comme caractéristique du *Fulgensio-Koelerietum vallesianae,* association typique des milieux gypseux alpins.

Tableau 3.–Résultats des analyses relatives à la fertilité minérale réalisées sur les sols de Saint-Léonard, d'Ollon et du Col de la Croix. La granulométrie est définie comme suit: argiles (<2 µm), limons fins (2-20 µm), limons grossiers (20-50 µm), sables fins (50-200 µm), sables grossiers (200-2000 µm). C/N, rapport entre carbone organique et azote total; CEC, capacité d'échange cationique; Pbio, phosphore biodisponible; C_{org}, teneur en carbone organique.

Station	Horizons diagnostiques	Granulométrie (%)					C/N	CEC (cmol+/kg)	Pbio (µg/g)	C_{org} (%)
		Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers				
Saint-Léonard	Adoy	1.5	21.4	27.7	29.8	19.6	12.0	14.4	70.3	3.5
	Sdoy1	3.2	27.4	27.3	26.5	15.6	13.9	9.4	79.3	1.8
	Sdoy2	4.4	28.7	25	23.3	18.6	15.9	5.6	39.1	0.9
	IICy	3.0	29.5	21.6	21.1	24.8	10.9	2.7	33.5	0.8
	IIYpm	5.2	34.8	8.0	15.4	36.6	16.4	0.3	33.1	0.5
	IIMyk	1.2	26	15.4	27.3	30.1	8.8	0.1	27.7	0.3
	IIRy	-	-	-	-	-	0.1	0	1.9	0
Ollon	OF1	-	-	-	-	-	25.2	-	-	19.0
	OF2	-	-	-	-	-	25.6	-	-	12.1
	Adoy	0.2	13.4	17.2	25.0	44.2	21.8	24.0	36.4	5.7
	Cydo1	1.0	23.7	18.3	21.1	35.9	32.7	3.0	2.5	1.0
	Yp	0.8	21.6	19.2	24.9	33.5	22.0	6.7	16.3	1.6
	Cydo2	0.2	16.8	15.1	23.0	44.9	17.7	8.2	32.1	1.7
	MyK	0.6	18.5	14.8	19.8	46.4	24.8	5.9	28.2	1.6
Col de la Croix (orienté Sud)	Adoy-Ddo	0.9	26.0	22.3	21.6	29.3	22.1	6.9	68.5	1.6
	Adoy	0	14.3	19.6	24.4	41.7	12.0	15.2	59.8	3.5
	Ddoy	0.1	15.9	16.1	22.6	45.4	21.2	4.2	81.0	1.1
	Rdoy	0	10.3	10.5	18.1	61.1	76.5	1.6	86.1	1.2

Tableau 4.–Teneurs en minéraux (% en masse) des échantillons, déterminées par l'analyse par diffraction aux rayons X. Les «indosés» correspondent aux minéraux dont les standards n'ont pas été utilisés, à la matière organique, à des phyllosilicates ou à des minéraux mal cristallisés comme les oxydes de fer pédogéniques.

Station	Horizon diagnostique	Phyllo-silicates	Quartz	Feldspath-K	Plagioclase-Na	Calcite	Dolomite	Gypse	Indosés
Saint-Léonard	Adoy	27.7	32.2	0	13.2	6.8	16.0	0.9	3.3
	Sdoy1	20.1	30.7	4.1	16.1	13.8	10.3	1.0	4.0
	Sdoy2	13.8	20.3	4.0	42.8	5.7	8.1	0	5.3
	IICy	7.7	7.5	4.1	3.0	8.3	49.3	14.9	5.4
	IIYpm	3.1	0.8	0	11.6	2.1	38.2	41.1	3.2
	IIMyk	4.1	0.5	0	0	0	30.2	63.0	2.2
	IIRy	0	0.5	0	1.7	0	40.0	57.1	0.8
Ollon	OF2	8.1	4.4	1.8	2.1	7.7	68.3	6.9	0.7
	Adoy	7.1	2.9	1.8	0	11.7	52.1	24.0	0.4
	Cydo1	5.2	0.3	0	0	1.1	15.1	76.5	1.9
	Yp	4.1	1.1	0	3.3	0	19.5	69.2	2.8
	Cydo2	9.2	3.4	0	12.5	8.2	21.7	44.0	1
Col de la Croix (or. Sud)	Adoy-Ddo	5.8	1.5	0	2.8	0	89.4	0	0.6
	Adoy	4.9	1.7	0	0	0	85.0	0	8.4
	Ddoy	6.3	1.7	0	0	1.4	89.1	0	1.6
	Rdoy	5.3	1.0	0	0	1.0	90.3	0	2.3

Parmi l'ensemble des espèces observées, certaines semblent particulièrement bien adaptées aux sols gypseux de Suisse, apparaissant régulièrement dans les relevés: *Sesleria caerulea, Carex alba, Erica carnea, Polygala chamaebuxus, Acer opalus, Fagus sylvatica, Sorbus aria* et *Pinus sylvestris*.

Discussion

Nomenclature des sols sur gypse en Suisse

Au vu de nos résultats et sur la base des critères de rattachement du *Référentiel pédologique* (Baize & Girard 2009), utilisé ici, aucun «vrai» gypsosol (gypsosol haplique ou gypsosol pétrogypsique selon Baize & Girard 2009) n'a été décelé sur le territoire suisse: les précipitations sont trop importantes et l'évapotranspiration insuffisante (cf. ci-dessous) pour obtenir des horizons gypsiques de surface Ys ou Ym, condition nécessaire pour parler de gypsosol. En revanche, selon la *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS 2014), cinq des sols étudiés peuvent être attribués aux *Gypsisols*, en raison de critères moins contraignants quant à la définition de l'horizon *gypsic* et à un rattachement à ce type de sol.

Le rattachement des sols à une référence du *Référentiel pédologique* (Baize & Girard 2009) se fonde donc sur l'autre composant important de ces sols, la dolomite. En effet, tous les sols étudiés présentent une part importante de carbonates, principalement sous forme de dolomite. La dolomite primaire partageant une origine assez semblable à celle du gypse (Nicod 1976), il n'est pas étonnant de la retrouver comme matériau parental des roches contenant du gypse, généralement des dolomies, parfois des cornieules. Ainsi, tous les sols ont été rattachés aux dolomitosols sur la base du rapport molaire $CaCO_3/MgCO_3$.

Tous les sols étudiés possèdent des horizons plus ou moins riches en gypse, et les différents types de gypsification décrits par Stoops & Ilaiwi (1981), du pseudo-mycélium à l'encroûtement massif en passant par le gypse à cristaux grossiers, ont été observés en Suisse (Biedermann *et al.*, en préparation). L'importance du gypse dans ces sols permet l'ajout du qualificatif *gypseux* à la plupart d'entre eux. Deux cas particuliers, les sols d'Ollon et de Saint-Léonard, ont toutefois pu être qualifiés de sols à horizon *gypsique* car possédant un horizon d'enrichissement de gypse en profondeur (Yp). Ceci prouve une évolution pédogénétique proche des vrais gypsosols, avec une précipitation secondaire de gypse plus intense, attestée également par une étude micromorphologique (Biedermann *et al.*, en préparation). Un troisième sol, à Bex, montre également une forte précipitation secondaire de gypse, mais sans induration (horizons Myk). L'importance des précipitations dans ces trois stations est probablement à mettre en relation avec le climat local. En effet, la station de Saint-Léonard se trouve dans la partie la plus sèche de Suisse (Bouët 1972), caractérisée par un important déficit hydrique entre avril et septembre (-604 mm, tableau 1). La gypsification (enrichissement en gypse secondaire) y est la plus intense, avec un véritable ciment de gypse secondaire, conduisant à l'induration de l'horizon, nommé alors Ypm. Les stations d'Ollon et de Bex sont dans un mésoclimat où le déficit hydrique moyen est moins marqué durant cette période, mais où les épisodes de foehn sont fréquents, induisant une forte évapotranspiration momentanée. La gypsification est donc moins marquée à Ollon, où l'horizon gypsique de profondeur est plus friable (faciès calcaro-gypseux), et aucune induration n'est observée à Bex.

Finalement, le qualificatif leptique a souvent été ajouté aux noms des sols pour noter l'absence d'un horizon structural Sdo ou une épaisseur cumulée Ado+Sdo < 35 cm. Le qualificatif calcarique a, lui, été attaché à un sol (Bex, figure 4 et annexe 7), en raison d'un enrichissement en carbonates concomitant à celui en gypse (horizon Kcy).

Influence du gypse sur la végétation

Par leurs caractéristiques physico-chimiques, les sols sur gypse contraignent à plusieurs niveaux la croissance des plantes. Un premier facteur est l'instabilité, avec un caractère colluvial observé pour plusieurs sols. En effet, beaucoup d'horizons étudiés ont en leur sein une fraction élevée de squelette issu de colluvionnement et composé de graviers et de cailloux anguleux de nature dolomitique et/ou gypseuse. Ce colluvionnement est dû à la topographie escarpée héritée de la solubilisation et de l'altération des évaporites, créant localement de profondes dolines, et à l'alternance des phases de gel/dégel. D'ailleurs, Rickebusch (2002) affirme que la végétation au Col de la Croix est plus dépendante de la topographie que du type de roche lui-même, bien que le gypse soit directement responsable de cette topographie.

Le principal élément nécessaire à la vie est sans conteste l'eau, mais elle est peu disponible dans les sols sur gypse. En effet, la pierrosité élevée (colluvionnement), l'important taux de sables et le très faible taux d'argiles concourent à une faible rétention de l'eau. L'abondance des sables se traduit dans les descriptions par l'utilisation fréquente du code d'horizon pédologique M, correspondant aux cristaux de gypse, de calcite et de dolomite secondairement précipités, avec une taille granulométrique comparable à celle des sables (FAO 1990). Ce phénomène induit une structure particulaire parfois tassée, parfois lâche, voire poudreuse (*flour-like* pour Herrero *et al.* 1992) dans les horizons profonds. Il en découle un caractère très drainant de ces sols. De son côté, la faible proportion des argiles empêche la formation d'une structure biomacroagrégée des horizons par la faune du sol (Roulet 2011), importante pour retenir l'eau. De plus, les dissolutions et lixiviations prédominantes du gypse créent rapidement des canaux d'écoulement pour l'eau. Tous ces aspects expliquent l'importance des espèces xérophiles sur ces sols.

Dans les situations où la précipitation du gypse est importante, l'eau disponible peut encore être réduite par le faible volume accessible aux racines. En effet, l'accumulation de gypse en grande quantité peut former un obstacle physique difficile à traverser pour les racines, particulièrement en cas d'induration (Poch & Verplancke 1997), comme Roulet (2011) l'a montré pour le palmier-dattier en Tunisie. Ce phénomène est exceptionnel en Suisse, mais il est potentiellement présent dans les régions où le bilan hydrique est déjà contraignant pour la croissance des plantes. Romao & Escudero (2005) constatent que la principale adaptation des plantes gypsophiles en milieu aride concerne leur capacité à traverser des couches indurées.

Les sols sur gypse sont aussi contraignants du point de vue chimique. Bureau & Roederer (1960) affirment qu'une quantité de 30% de gypse dans les sols les rend toxiques pour la croissance végétale. En effet, une forte concentration en sulfates réduit l'absorption du phosphate (Kamprath *et al.* 1956) et la saturation en Ca^{2+} engendre des chloroses chez certains arbres fruitiers (Herrero & Boixadera 2002, Delarze 1978), notamment en limitant l'absorption d'oligo-éléments comme le magnésium ou le potassium. Mais les sols

issus de ces roches montrent également une faible teneur en éléments nutritifs (Baize & Girard 2009), suite à une mauvaise rétention des cations (cf. les faibles CEC mesurées), surtout en climat tempéré où les précipitations sont abondantes et, couplées à l'important drainage, provoquent la lixiviation des éléments nutritifs (Herrero & Boixadera 2002). Ainsi, les valeurs de phosphore biodisponible mesurées sont en dessous de la moyenne minimale suisse (Frossard *et al.* 2004). Ceci peut aussi être lié à la précipitation du phosphore sous forme de phosphates de calcium en présence de grandes concentrations de Ca^{2+} en pH neutre à basique (FAO 1990, Frossard *et al.* 2004). De plus, nous avons constaté à plusieurs reprises que, comme la calcite, le gypse précipite autour des racines à cause des exsudats racinaires. Cet enrobage réduit la surface d'échange et diminue les capacités d'absorption des plantes (El Fekih & Pouget 1966).

Au bilan, bien que les contraintes soient nombreuses, avec des conditions édaphiques pas idéales pour la végétation, les sols sur gypse ne constituent pas une limite physiologique pour les arbres en climat tempéré. Cependant, les conditions particulières conduisent bien souvent la végétation vers un climax stationnel au lieu d'un climax climatique. Le plus bel exemple est la présence presque systématique, voire dominante à Ollon, du pin sylvestre sur ces sols, alors qu'il est rarement concurrentiel face aux feuillus en Suisse aux étages collinéen et montagnard. Selon Delarze (1978), l'existence de la pinède d'Ollon est liée à la faible capacité de production des sols contenant du gypse, mais notre étude montre que d'autres facteurs physiques contribuent probablement à sa présence. Cette forêt correspond d'ailleurs au sol qui contient les plus fortes teneurs en gypse. Par contre, le hêtre supplante le pin à Bex, quelques kilomètres plus loin, sur un sol présentant des teneurs bien inférieures. Le facteur limitant le hêtre sur gypse n'est pas clair, compte tenu de sa grande plasticité vis-à-vis du chimisme des sols (Duchaufour & Bonneau 1960). Guinier (1950) suggère que la sécheresse, et non la faible fertilité minérale, serait la principale contrainte.

Pédogenèse des sols sur gypse en climat tempéré

Le sulfate de calcium présent dans les sols peut provenir de plusieurs sources. Dultz & Kühn (2005) affirment qu'en climat humide le gypse ne peut exister dans les sols que s'il provient de l'altération d'un matériel parental évaporitique (dépôts sédimentaires gypseux, argiles ou marnes gypseuses), alors qu'en climat aride son origine peut être éolienne ou provenir d'une eau de nappe ou de surface chargée en ions sulfates et calcium (Verheye & Boyadgiev 1997). D'après Herrero & Porta (2000), la haute solubilité du gypse est la propriété principale qui va dicter son comportement à l'intérieur du sol. Dans les régions où de véritables gypsosols ont été décrits, les températures moyennes en juillet dépassent les 30°C et l'évapotranspiration potentielle (1400 à 1900 mm) excède largement les précipitations annuelles (200 à 300 mm), donnant un bilan hydrique fortement déficitaire: -1300 mm en Tunisie (-916 mm entre avril et septembre; Pouget 1968), -1600 mm en Iran (Hashemi *et al.* 2011) ou en Algérie (Mostephaoui & Bensaid 2014). Les mouvements de l'eau dans les sols sont donc majoritairement ascendants, avec accumulation et phénomènes de dallage et d'encroûtements en surface. Par contre, en Suisse, seules certaines stations de plaine montrent un déficit hydrique (tableau 1), qui plus est limité à l'été; le reste de l'année, les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration et les mouvements de l'eau dans les

sols sont donc majoritairement descendants, avec des ions rapidement lixiviés, s'accumulant parfois dans les horizons profonds (Legros 2007, Herrero & Boixadera 2002).

Bien que le bilan hydrique en Suisse ne soit de loin pas aussi déficitaire que dans les régions arides à gypsosols, l'évapotranspiration joue certainement un rôle dans les très hautes teneurs en gypse observées dans certains horizons de profondeur. Dans le climat sec à tendance subcontinentale du Valais ou sous l'effet asséchant du foehn dans le Chablais (Bouët 1972), la lixiviation est limitée par l'évapotranspiration estivale; une part importante des ions précipitent alors dans le solum, sous forme particulaire, sableuse ou formant presque une «roche» secondaire, massive mais friable, l'horizon gypsique Yp. Il est d'ailleurs révélateur que le sol de Suisse qui s'approche le plus des gypsosols, à Saint-Léonard, se trouve dans le site avec le plus important déficit hydrique, s'étendant de mars à octobre, pour un total annuel de -484 mm.

Les sols présentant une accumulation de gypse sont souvent accompagnés d'une accumulation secondaire de calcite et de dolomite. Cela s'explique par l'apport important en ions Ca^{2+} par le gypse et la forte concentration en CO_2 dans le sol (respiration des organismes vivants), qui conduisent à une sursaturation du sol par rapport à la calcite, qui précipite (Al-Barrack & Rowell 2006, Loeppert & Suarez 1996).

Malgré les précipitations globalement importantes et la forte solubilisation du gypse, les horizons supérieurs des sols étudiés ne montrent pas de décarbonatation en surface, ce qui peut s'expliquer par l'apport continu de colluvions carbonatées de l'amont. Le colluvionnement mais aussi l'apport d'ions dissous dans les eaux qui s'écoulent en surface (Verheye & Boyadgiev 1997) sont probablement également responsables des grands pourcentages de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ rencontrés dans les horizons supérieurs de certains profils (Lukmanier et Col de la Croix). En effet, l'évapotranspiration est insuffisante dans ces stations de montagne pour observer une accumulation gypseuse en surface liée à la remontée du gypse (Pouget 1968). Mais il est aussi possible que ces valeurs élevées en surface soient, partiellement ou totalement, des artefacts dus à la thermogravimétrie utilisée pour doser le gypse. En effet, l'humidité résiduelle contenue dans ces horizons riches en matière organique peut également expliquer ces valeurs (Mäder 2014). Cette hypothèse serait soutenue par l'absence de gypse détecté au Col de la Croix dans les horizons A par la diffraction aux rayons X (tableau 4).

L'eau peu disponible, la lixiviation des éléments nutritifs, le complexe argilo-humique déficitaire, la saturation ionique des sols par le calcium, la faible CEC sont toutes des caractéristiques qui impliquent une baisse de la qualité biologique des sols à gypse et qui favorisent des espèces tolérantes au stress, libérant une litière parfois difficile à dégrader. Mais ces contraintes ne sont pas les mêmes partout, avec un gradient entre de faibles teneurs en gypse et une végétation peu influencée (par ex. Krattigen, annexe 8), et des stations fortement marquées par le gypse, tant en ce qui concerne le sol, la topographie ou la végétation (par ex. Ollon, annexe 2).

Les formes d'humus, reflet fonctionnel de l'épisolum humifère, sont de bonnes indicatrices du mode d'humification et de minéralisation de la litière, et donc du potentiel d'incorporation de la matière organique dans les sols (Gobat *et al.* 2010; Zanella *et al.* 2011). Dans ce contexte, le gypse semble avoir une action négative directe sur l'humification et sur le type de molécules résultant de la décomposition (Velasco *et al.* 1980). En effet,

tout comme dans les sols carbonatés, les acides fulviques se voient rapidement insolubilisés par le calcium et/ou les carbonates, bloquant la minéralisation de la matière organique; il en résulte une baisse de l'activité biologique.

Les formes d'humus observées sous les hêtraies (Oligomull et Mésomull) ont montré une meilleure activité biologique de décomposition de la matière organique que dans les autres stations, site de Saint-Léonard excepté. Ceci s'explique par des conditions climatiques favorables à l'intégration de la matière organique, comparées à celles des stations subalpines, et une teneur en gypse des horizons superficiels suffisamment basse pour ne pas être contraignante. Par contre, la litière difficile à dégrader de *Pinus sylvestris* et d'*Erica carnea* à Ollon ou le climat froid en altitude (Col de la Croix, Lukmanier) sont à l'origine d'une moins bonne activité des décomposeurs et donc de l'apparition de Dysmull et de Rhizoamphi.

Il y a donc à basse altitude des relations complexes, avec feed-back, entre gypse, végétation, matière organique et pédogenèse. De fortes teneurs en gypse dans le sol contraignent la végétation vers la pinède. La décomposition de la matière organique est ralentie par la qualité de la litière et le gypse, donnant un Dysmull. Cette forme d'humus marque la limite avec les moders, qui ont une moins bonne intégration de la matière organique à la matière minérale et présentent souvent une structure grumeleuse à particulaire peu stable. Inversement, avec de faibles teneurs en gypse, la hêtraie apporte une meilleure litière, dont la décomposition n'est guère limitée par le gypse, ce qui favorise l'activité biologique et l'intégration de la matière organique dans le sol. Ainsi, les horizons organo-minéraux (A) de Bex, Kienberg, Krattigen et Zeglingen, sous hêtraie, possèdent une structure nettement grumeleuse et plus stable, qui augmente la capacité productive des sols. Une question reste toutefois en suspens concernant cette répartition entre la pinède et la hêtraie: Bex et Ollon partagent globalement le même climat et, à Ollon même, la pinède ne représente que des îlots au sein de la hêtraie. Une différence géologique initiale (présence d'un dépôt morainique; DELARZE 1978) ou topographique (importance du colluvionnement) est probable, influençant dès le départ les teneurs en gypse dans le sol et donc l'essence dominante. MÄDER (2014) semble confirmer, parmi d'autres facteurs, un lien entre l'épaisseur de la moraine – qui jouerait un rôle d'«isolant» face au substrat gypseux – et la répartition de la hêtraie et de la pinède à Ollon. On ne peut exclure non plus un effet anthropique, plusieurs petites carrières de gypse ayant été autrefois ouvertes à Ollon (DELARZE 1978; MÄDER 2014). Les perturbations subséquentes auraient favorisé le pin, qui serait alors, au moins à certains endroits, à considérer comme pionnier. Mais, compte tenu des sols observés sous ces forêts respectives, une dynamique allant de la pinède à la hêtraie ne nous paraît pas envisageable pour toutes les stations.

La pédogenèse des sols gypseux ou gypsiques des régions tempérées se différencie sur deux points au moins des gypsosols des milieux arides. Une première différence, d'origine climatique, règle les processus pédologiques dominants: en climat aride, les migrations ascendantes dominent, avec une forte évapotranspiration permettant la précipitation de gypse en surface; en climat tempéré, l'inverse se produit, les processus d'écoulement, de lixiviation et de lessivage étant majoritaires. Cependant, la formation d'un horizon enrichi en gypse reste possible en profondeur lorsque le bilan hydrique est momentanément très déficitaire. La deuxième différence majeure est la teneur en matière organique, nettement plus élevée en climat tempéré, et qui joue un rôle clé dans le développement des sols (POUGET 1968). Cette matière organique s'explique par la production végétale plus importante

(conditions climatiques favorables à la croissance), mais aussi par l'absence d'encroûtement superficiel de gypse limitant l'enracinement. Dès lors, bien que la production reste faible comparativement aux sols «moyens» des climats tempérés comme les CALCOSOLS ou les brunisols, les horizons de surface peuvent acquérir une structure grumeleuse grâce aux liaisons argilo-humiques, un développement très difficile en climat aride. Cette structuration limite les effets néfastes du gypse, améliorant la rétention en eau et la réserve nutritive du sol. À l'échelle macroscopique, certains profils pédologiques montrent d'ailleurs des limites nettes de couleurs ou de répartition des racines en fonction de la matière organique.

Malgré ces différences, de grandes similitudes sont relevées entre les sols à gypse des régions arides et tempérées: une texture sableuse, une structure particulaire de nombreux horizons, une forte concentration en sels ($CaSO_4$, $CaCO_3$, $MgCO_3$), un pH élevé, une très faible CEC, des cristallisations de gypse secondaires et une présence occasionnelle d'encroûtements. Ces aspects communs attestent que, sous climat tempéré, avec une évapotranspiration potentielle suffisante, le processus de gypsification pédologique est réalisé.

Conclusion

Les sols contenant du gypse en Suisse font partie des DOLOMITOSOLS. Ils sont toujours caractérisés par une teneur élevée en carbonates de calcium (calcite) et de magnésium (dolomite), le gypse étant à l'origine contenu dans une roche de type dolomie, éventuellement cornieule. Mais, grâce à ses teneurs élevées dans les sites étudiés, le gypse influence lui aussi le développement et le fonctionnement de ces sols, ainsi que la végétation. Il confère alors aux sols instabilité (karstification du sous-sol) et friabilité (texture sableuse dominante due aux carbonates précipités). Il modifie leur régime hydrique (drainage important, faible rétention due à la rareté des argiles) et leur capacité de production (saturation de Ca^{2+}, faible CEC). Bien qu'il ne soit pas aussi prononcé qu'en climat aride, le processus de gypsification a été observé partout où le gypse affleurait. L'accumulation de gypse secondaire se fait dans les horizons de profondeur, avec de fortes teneurs (horizon Yp), voire une cimentation (horizon Ypm) dans les régions au bilan hydrique le plus déficitaire, comme en Valais. Plus les teneurs en gypse sont importantes, plus cette influence se fait sentir sur la végétation: réduction de l'absorption du phosphate par les sulfates, très fort drainage entraînant les éléments nutritifs, teneurs très élevées en calcium favorisant des espèces calcicoles xérothermophiles. Dans les cas les plus extrêmes, des espèces très tolérantes au stress, comme *Pinus sylvestris* et *Erica carnea*, dominent.

Remerciements

Les auteurs remercient Roxane Kohler-Milleret, collaboratrice scientifique au Laboratoire Sol & Végétation de l'Université de Neuchâtel, pour son aide précieuse et sa disponibilité lors des analyses de laboratoire. Leur gratitude va également à Thierry Adatte et Eric Verrecchia, de la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne, pour leur aide lors des analyses et interprétations minéralogiques, ainsi qu'à Claire Guenat et un relecteur anonyme, dont les commentaires sur une première version ont permis d'améliorer sensiblement ce manuscrit.

Bibliographie

Al-Barrak K. & Rowell D. L., 2006. The solubility of gypsum in calcareous soils. *Geoderma* 136: 830-837.

Atlas de la Suisse 2, 2004. *Logiciel de données de cartographie thématique.* Office fédéral de topographie, Ecole polytechnique fédérale de Zurich et Office fédéral de la statistique.

Baize D. & Girard M.C., 2009. *Référentiel pédologique.* AFES, Versailles. 435 p.

Baize D. & Jabiol B., 1995. *Guide pour la description des sols.* INRA, Paris. 375 p.

Bartoli Ch., 1966. Etudes écologiques sur les associations forestières de la Haute-Maurienne. *Annales E.N.G.R.E.F. et C.N.R.F.*, XXIII(3): 433-749.

Bashour I. I. & Sayegh A. H., 2007. *Methods of Analysis for Soils of Arid and Semi-arid Regions.* Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome. 119 p.

Biedermann Y., Vittoz P., Gobat J.-M., Verrecchia E.P., (*en préparation*). Micromorphological study of two gypsum-containing soils in Switzerland – influence of gypsiferous bedrock in temperate climate soils.

Bouët M. 1972. *Climat et météorologie de la Suisse romande.* Payot, Lausanne. 170 p.

Braun-Blanquet J., 1961. Die inneralpine Trockenvegetation. Von der Provence bis zur Steiermark. *Geobotanica Selecta.* Band I, Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Vol. I: 1-273.

Braun-Blanquet J., 1964. *Pflanzensoziologie.* Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Aufl., Springer, Wien/New-York. 865 p.

Bureau P. & Roederer P., 1960. Contribution à l'étude des sols gypseux de la partie sud du golfe de Gabès. *Bulletin de l'AFES* 8: 145-149.

Ciesielski H. & Sterckeman T., 1997. A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. *Agronomie* 17(1): 9-16.

Delarze R., 1978. La pinède de la Glaivaz. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 74: 45-67.

Delarze R. & Gonseth Y., 2008. Guide des milieux naturels de Suisse. Ed. Rossolis, Bussigny. 424 p.

Dreimanis A., 1962. Quantitative gazometric determination of calcite and dolomite by using Chittick apparatus. *Journal of Sedimentary Petrology* 32: 520-529.

Dronkert H., 1987. Diagenesis of Triassic evaporites in northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 80: 397-413.

Duchaufour Ph. & Bonneau M., 1960. Les sols de la hêtraie en Europe occidentale. *Bulletin de l'institut agronomique et des statistiques de recherche de Gembloux* 1: 59-74.

Dultz S. & Kühn P., 2005. Occurrence, formation, and micromorphology of gypsum in soils from the Central-German Chernozem region. *Geoderma* 129: 230-250.

El Fekih M. & Pouget M., 1966. Les sols des oasis du Sud tunisien. Conférence sur les «Sols Méditerranéens». Madrid.

FAO, 1990. Management of gypsiferous soils. *Bulletin de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture* 62, Rome. 81 p.

Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement* no 368. Office fédéral de l'environnement, Berne. 180 p.

Gallandat J.-D., Gobat J.-M. & Rion V., 2012. Végétation de la Suisse: guide syntaxonomique. Non publié. Université de Neuchatel, Laboratoire Sol & Végétation. 37 p.

Gensac P., 1969. Les sols sur gypse en Moyenne Tarentaise. *Bulletin de l'AFES* 3: 57-67.

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

Guinier Ph., 1951. Pour comprendre les forêts des Alpes. *Bulletin de la société botanique française* 98: 32-37.

Hashemi S. S., Baghernejad M. & Khademi H., 2011. Micromorphology of gypsum crystals in Southern Iranian soils under different moisture regimes. *Journal of agricultural science and technology* 13: 273 - 288.

Heinze M. & Fiedler H.J., 1984. Physikalische Eigenschaften von Gipsböden und ihren Begleitbodenformen in Kyffhäuser-Gebirge. *Hercynia N.F.* 21: 190–203.

Herrero J. & Boixadera J., 2002. Gypsic soils. *Encyclopedia of soil science.* Marcel Dekker, New York: 635-639.

HERRERO J. & PORTA J., 2000. The terminology and concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96: 47-61.

HERRERO J., PORTA J. & FÉDOROFF N., 1992. Hypergypsic Soil Micromorpholgy and Landscape Relationsships in Northeastern Spain. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1188-1194.

IUSS, 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. *World Soil Resources Reports No. 106.* FAO, Rome.

KAMPRATH E. J., NELSON W. L. & FITTS J. W., 1956. The effect of pH, sulfate and phosphate concentrations on the adsorption of sulfate. *Soil Science Society of America Journal* 20: 463-466.

LEBRON I., HERRERO J. & ROBINSON D.A., 2009. Determination of Gypsum Content in Dryland Soils Exploiting the Gypsum-Bassanite Phase Change. *Soil Science Society of America Journal* 73: 403-411.

LEGROS J.P., 2007. *Les grands sols du monde.* Collection Sciences de la Terre. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. 574 p.

LOEPPERT R. H. & SUAREZ D. L., 1996. Carbonate and Gypsum. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison: 437-474.

MÄDER L., 2014. *Relation entre les sols à gypse et la végétation à deux étages de* végétation *du Chablais vaudois (Suisse), en climat tempéré.* Travail de Master en biogéosciences, Universités de Lausanne et Neuchâtel. 72 p.

MANDIA Y., 1991. *Typologie des aquifères évaporitiques du trias dans le bassin lémanique du Rhône (Alpes occidentales).* Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne. 366 p.

MOSTEPHAOUI T. & BENSAID R., 2014. Caractérisation des sols gypseux dans les zones arides par télédétection: le cas du sous-bassin de l'oued Djedi-Biskra. *Lebanese Science Journal* 15: 99-115.

NICOD J., 1976. Karsts des gypses et des évaporites associées. *Annales de Géographie* 471: 513-554.

OLSEN S. R., COLE C. V., WATANABE F. S. & DEAN L. A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S.D.A. Circular* 939. 8 p.

POCH R. M. & VERPLANCKE H., 1997. Penetration resistance of gypsiferous horizons. *European Journal of Soil Science* 48: 535-543.

PORTA J., 1998. Methodologies for the analysis and characterization of gypsum in soils: A review. *Geoderma* 87: 31-46.

POUGET M., 1968. Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud tunisien. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* VI: 309-365.

PRUDAT B., 2010. *La matière organique des sols sableux des palmeraies du Jérid tunisien.* Travail de Master, Université de Neuchâtel. 67 p.

RICKEBUSCH S., 2002. *Végétation des pyramides et dolines de gypse du Col de la Croix (VD).* Travail de Diplôme en biologie. Université de Lausanne. 33 p.

ROMAO R. L. & ESCUDERO A., 2005. Gypsum physical soil crusts and the existence of gypsophytes in semi-arid central Spain. *Plant Ecology* 181: 127-137.

ROULET L., 2011. *Étude pédologique dans une palmeraie du Jérid (Tunisie) et mise en relation avec l'état de développement et de santé des palmiers dattiers.* Travail de Master en biogéosciences, Université de Neuchâtel. 84 p.

SCHOENEICH P. & IMFELD P., 1997. Les karsts du gypse de la zone des Cols (Préalpes Vaudoises). *Bulletin de la société Neuchâteloise de Géographie* 41: 39-54.

SGTK (SCHWEIZERISCHE GEOTECHNISCHE KOMMISSION), 1997. *Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz.* Ecole polytechnique fédérale (Zürich); Schweizerische geotechnische Kommission. 522 p.

SOMMARUGA A., 1997. Geology of the central Jura and the molasse basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. *Société neuchâteloise des sciences naturelles: Bibliothèque publique et universitaire diff.* 176 p.

STOOPS G. & ILAIWI M., 1981. Gypsum in arid soils, morphology and genesis. *Proceedings of the Third International Soil Classification Workshop.* Damascus: 175-185.

TRÜMPY R., 1980. *Geology of Switzerland: a guide book.* Wepf and Co., Basel. 334 p.

VELASCO F., POLO A., LADERO M. & ALMENDROS G., 1980. La humificación en diversos ecosistemas forestales representivos de la provincia de Toledo. *Anales del Jardin Botánico de Madrid* 37: 129-141.

VERHEYE W. H. & BOYADGIEV T. G., 1997. Evaluating the land use potential of gypsiferous soils from field pedogenic characteristics. *Soil Use and Management* 13: 97-103.

VIEILLEFON J., 1979. Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, XVII: 195-223.

ZANELLA A. JABIOL B., PONGE J. F., SARTORI G., DE WAAL R., VAN DELFT B., GRAEFE U., COOLS N., KATZENSTEINER K., HAGER H. & ENGLISCH M., 2011. A European morphofunctional classification of humus forms. *Geoderma* 164: 138-145.

ZIMMERMANN N. E & KIENAST F., 1999. Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: species versus community approach. *Journal of Vegetation Science* 10: 469-482.

Manuscrit reçu le 22 août 2014

ANNEXES

Les annexes sont disponibles sur le site web de la SVSN (http://www3.unil.ch/wpmu/svsn/bulletin-de-la-svsn/annexes/).

Les annexes 1 à 10 regroupent les fiches descriptives des différentes stations étudiées dans cet article. L'en-tête donne les coordonnées de la fosse pédologique, quelques variables environnementales, le type de végétation (alliance selon DELARZE & GONSETH, 2008, et association végétale), ainsi que les références du sol et de la forme d'humus utilisées dans cet article (en français; BAIZE & GIRARD, 2009; ZANELLA *et al.*, 2011) et sur la base d'une nomenclature internationale (en anglais et italique; IUSS 2014).