

# Monitoring de la composition chimique de l'eau dans les sols forestiers : un outil pour évaluer leur acidification

Elisabeth Graf Pannatier, Maria Schmitt, Anne Thimonier, Peter Waldner, Lorenz Walthert, Peter Blaser

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage

## Résumé

Afin d'évaluer l'impact des dépôts atmosphériques acides sur les sols forestiers, l'eau du sol est analysée de manière régulière sur neuf placettes d'observation en Suisse. Le rapport entre les cations basiques et l'aluminium (BC/Al) est mesuré dans l'eau afin d'évaluer l'acidification du sol et les risques écologiques associés. A Copera au Tessin, on observe une forte diminution des rapports BC/Al depuis 1987, indiquant une rapide acidification du sol. Sur les deux placettes situées au Tessin, les risques écologiques dus à la toxicité de l'Al paraissent élevés. Sur les autres placettes, en observation depuis 1999, les rapports BC/Al sont restés stables en moyenne, suggérant un taux d'acidification constant. Bien que les valeurs BC/Al atteignent parfois la valeur critique de 1, les risques écologiques semblent limités, compte tenu des faibles concentrations des formes d'Al toxiques ( $Al^{3+}$  et  $AlOH^{2+}$ ).

## Monitoring of water chemistry: a tool to assess acidification in forest soils

The soil water chemistry has been monitored in nine plots in Switzerland to measure the soil response to atmospheric acid deposition. The ratio of base nutrient cations to dissolved aluminium (BC/Al) was used to assess soil acidification and the associated ecological risks. At Copera in Ticino, a significant decrease in BC/Al ratios has been observed since 1987, indicating a rapid soil acidification. In both plots located in Ticino, the ecological risk due to Al toxicity seems to be high. In the other plots, monitored since 1999, the BC/Al ratios have been stable on average, suggesting a constant acidification rate. The ecological risks are limited, because of low concentrations of toxic Al.

**Keywords:** soil acidification, soil solution, BC/Al, aluminium

## 1. Introduction

Les dépôts atmosphériques acides peuvent modifier la chimie des sols et des eaux de percolation dans les écosystèmes forestiers et accélérer leur acidification naturelle. Dans les sols acides en particulier, les apports de substances acidifiantes augmentent la mobilité de l'aluminium (Al) dans le sol, toxique à haute concentration pour certaines espèces végétales sensibles. Ils entraînent également un lessivage accru des cations basiques (Ca, Mg, K). Ces éléments sont essentiels pour la nutrition des arbres. Un déficit en nutriments peut affecter la production de la biomasse, la santé des arbres ainsi que leur sensibilité aux maladies. Une nutrition déséquilibrée peut nuire à la formation des racines et à leurs fonctions.

Afin d'évaluer l'impact des dépôts atmosphériques sur les sols forestiers, on analyse la composition chimique de l'eau du sol au cours du temps. Le monitoring représente une méthode prometteuse, car l'eau du sol réagit de

manière sensible et rapide aux processus d'acidification. Les sols au contraire, compte tenu de leur capacité plus ou moins grande à neutraliser les acides, ne réagissent que lentement. Il est dès lors difficile de mettre en évidence leur acidification en analysant leur composition chimique à plusieurs reprises.

Dans le cadre du projet de recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers (LWF) (Thimonier et al. 2001), l'eau du sol a été échantillonnée dans huit placettes d'observation réparties dans différentes régions de Suisse. Le même type d'analyses a également été effectué depuis 1987 dans une forêt de châtaigniers au Tessin (Blaser et al. 1999). Cette série constitue probablement l'enregistrement le plus long disponible en Suisse.

Depuis la moitié des années 1980, les apports atmosphériques d'acides, sous forme de précipitations et de dépôts secs, ont diminué en Suisse comme en Europe, suite aux dispositions prises par les pays européens pour réduire les émissions de dioxydes de soufre. Une des questions majeures est de savoir si l'acidification

des sols ralentit suite à l'amélioration de la qualité de l'air. Dans cet article, nous utilisons le rapport BC/Al, soit le rapport molaire entre les cations basiques (BC) et l'aluminium (Al) dans l'eau du sol. Cet indicateur, employé dans le calcul des charges critiques d'acidité, permet d'évaluer l'acidification du sol et les risques écologiques associés. Un rapport supérieur à 1 préserverait les arbres d'effets négatifs.

Finalement, nous vérifions si les charges critiques d'acidité, calculées au moyen du modèle SMB, sont dépassées.



© Office fédéral de la statistique/Office fédéral de la topographie

Figure 1 : Localisation des sites d'observation où l'eau du sol est échantillonnée

## 2. Méthodes

L'eau du sol est prélevée dans différents écosystèmes forestiers : le climat, le type de sol, la végétation diffèrent (Table 1). L'eau du sol est échantillonnée tous les 15 jours depuis 1999 ou 2000 sur huit placettes LWF, ainsi qu'à Copera depuis 1987 (Fig. 1). L'échantillonnage de l'eau sur l'un des sites, Othmarsingen, a été interrompu après une année.

L'eau du sol est prélevée par succion (500 hPa) à 15 cm, 50 cm et 80 cm de profondeur à l'aide de lysimètres (Graf Pannatier et al. 2004).

Table 1 : Caractéristiques des sites d'observation

Région	Site	Altitude (m)	Type de sol (selon les caractéristiques morphologiques)	Essence principale	Zone des racines (cm)
Jura	Bettlachstock	1200	Sol brun calcaire	<i>Fagus sylvatica</i>	> 120
Plateau	Lausanne	800	Sol brun, légèrement pseudogley	<i>Fagus sylvatica</i>	> 240
	Vordemwald	480	Stagnogley	<i>Abies alba</i>	> 120
	Othmarsingen	500	Sol brun lessivé	<i>Fagus sylvatica</i>	> 190
Préalpes	Beatenberg	1500	Podzol humique (pseudovergley)	<i>Picea abies</i>	55
	Schänis	700	Sol brun, légèrement pseudogley	<i>Fagus sylvatica</i>	> 160
Alpes	Celerina	1850	Podzol ferrugineux	<i>Pinus cembra</i>	> 100
Tessin	Novaggio	950	Sol brun	<i>Quercus cerris</i>	> 150
	Copera	650	Podzol	<i>Castanea sativa</i>	> 130

Des plaques gravitationnelles collectent l'eau percolant à travers la litière (0 cm). L'eau est échantillonnée à huit endroits différents selon une grille régulière. Au laboratoire, les huit échantillons prélevés à chaque profondeur sont mélangés et filtrés (0.45 µm). Les paramètres suivants sont ensuite analysés : pH, conductivité électrique, cations et anions majeurs, carbone organique dissous. La spéciation de l'Al dissous a été calculée à l'aide de WHAM 6.0 (2001), en tenant compte des réactions de complexation avec OH<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>, Si et les acides fulviques.

La force de succion du sol pour l'eau, ou le potentiel matriciel, a été mesuré au moyen de tensiomètres à plusieurs profondeurs sur les placettes LWF.

Les caractéristiques physico-chimiques des sols, ainsi que les méthodes d'échantillonnage et d'analyse sont décrites dans Walthert et al. (2003).

Les dépôts atmosphériques sont estimés selon la méthode décrite dans Thimonier et al. (2005).

## 3. Les rapports BC/Al

Les rapports BC/Al mesurés dans l'eau du sol à différentes profondeurs sont illustrés dans la Fig. 2 et la Table 2. Les rapports à Schänis et Bettlachstock sont supérieurs à 100 aux quatre profondeurs, compte tenu du pH élevé dans l'eau du sol. Nous ne reviendrons plus sur ces deux sols car ils ne présentent aucun risque de phytotoxicité de l'Al et possèdent une large capacité à neutraliser les dépôts acides (Walthert et al., 2003).

Sur les autres placettes, les rapports sont supérieurs à 10 sous la litière (0 cm), à l'exception de Vordemwald, du fait des hautes concentrations de cations basiques fournis par la décomposition de la litière et des faibles teneurs en Al. A Vordemwald, les rapports relativement

bas s'expliquent par la présence d'Al. Celui-ci provient des horizons inférieurs (Ah et ESw), amenés par la remontée hivernale d'une nappe d'eau perchée (Zimmermann et al., 2006).

Les rapports BC/Al diminuent fortement à 15 cm de profondeur dans toutes les placettes. C'est à cette profondeur qu'ils atteignent une valeur minimale, sauf à Beatenberg, car ce sont les horizons minéraux superficiels qui sont le plus acidifiés. A Beatenberg, l'eau prélevée provient des horizons H et Ah, ce qui explique les concentrations relativement basses d'Al par rapport aux horizons sous-jacents (E3). Les rapports minimaux se trouvent à 50 cm et 80 cm. Dans les autres placettes, les rapports augmentent en profondeur et atteignent une

valeur maximale à 80 cm.

Bien qu'on observe des variations saisonnières ou annuelles, nous n'avons pas décelé de tendance significative à la baisse ou à la hausse des rapports BC/Al sur les placettes LWF, suggérant un taux d'acidification constant pendant la période d'observation.

A Copera, on distingue par contre une nette diminution des rapports BC/Al entre 1987 et 2004, indiquant une accélération de l'acidification (Blaser et al., 1999). Une analyse temporelle détaillée montre que les rapports BC/Al se stabilisent à la fin des années 90, suggérant un ralentissement de l'acidification (Graf Pannatier et al., 2005).

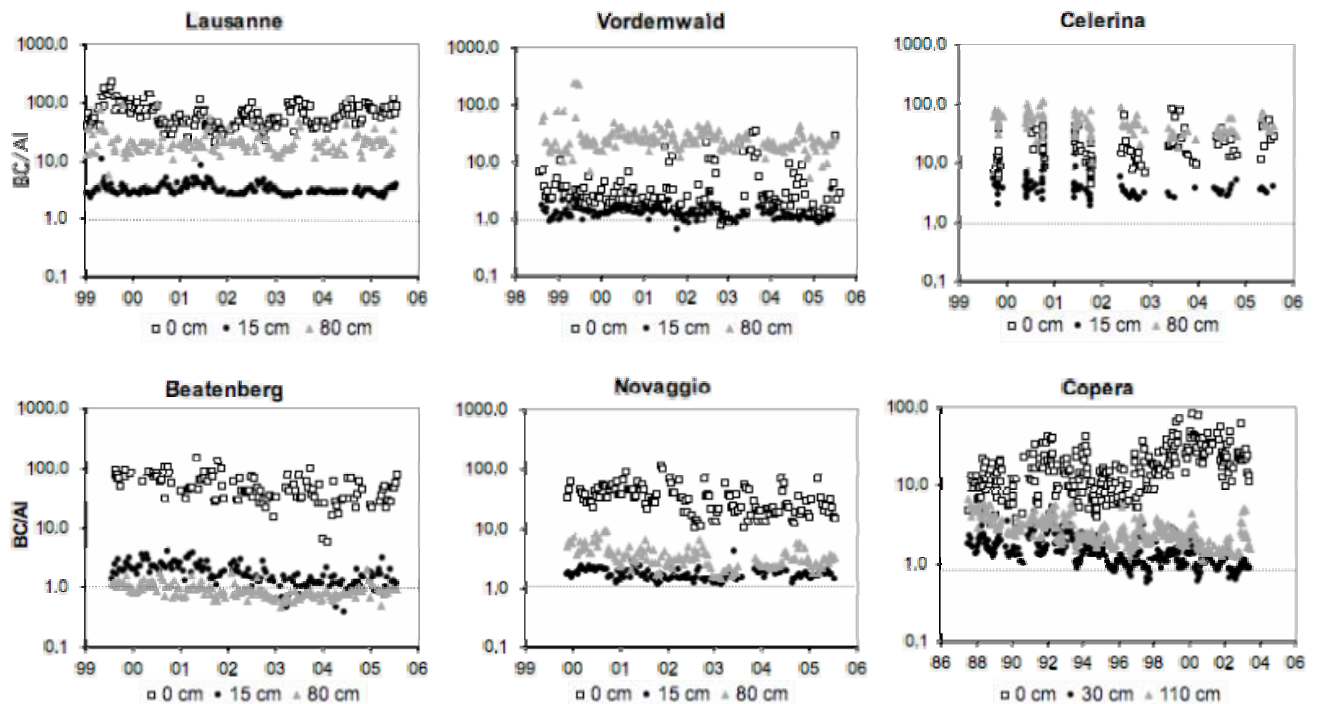


Figure 2 : Rapports BC/Al dans l'eau du sol sur les placettes LWF (Lausanne, Vordemwald, Celerina, Beatenberg, Novaggio) et à Copera sous la litière (0 cm), à 15 cm et 80 cm de profondeur.

#### 4. Les risques écologiques

Le rapport BC/Al est un indicateur fréquemment employé dans le calcul des charges critiques d'acidité pour évaluer les risques écologiques associés à la toxicité de l'Al (Sverdrup et Warfvinge, 1993). Un rapport supérieur à 1 ne devrait pas causer de dommages aux racines des arbres à long terme.

Les rapports BC/Al sont généralement calculés en utilisant les concentrations d'Al total dissous dans l'eau du sol. Or, il s'agit surtout de l'ion  $Al^{3+}$  et de l'ion hydroxylé  $AlOH^{2+}$  qui sont toxiques pour les racines (Løkke et al. 1996). Les

concentrations des différents complexes d'Al ont été estimées à l'aide d'un programme de spéciation (Wham 6.0, 2001).

A Beatenberg, où les rapports BC/Al à 50 cm et 80 cm sont proches de la valeur critique de 1, l'Al se trouve principalement complexé à la matière organique dissoute (Table 2). Par conséquent, ils ne devraient pas constituer de risque pour la végétation. De plus, les racines des épicéas se situent essentiellement dans la couche organique (horizons L, F et H), riche en cations basiques et caractérisés par des rapports BC/Al élevés.

Table 2 : Caractéristiques chimiques de l'eau du sol (moyenne 1999-2005)

	Site	Profondeur (cm)	pH	DOC (mg/L)	BC ( $\mu\text{mol/L}$ )	Al ( $\mu\text{mol/L}$ )	BC/Al	Al <sup>3+</sup> + AlOH <sup>2+</sup> ( $\mu\text{mol/L}$ )	Al-FA ( $\mu\text{mol/L}$ )	BC/Al <sup>3+</sup> + AlOH <sup>2+</sup>
<b>Bettlachstock</b>	L	0	6.5	27.4	471	1.0	> 100	- <sup>2)</sup>	-	-
	A	15	8.3	12.4	1505	< l.d. <sup>1)</sup>	> 100	-	-	-
	B	50	8.4	6.1	1620	< l.d.	> 100	-	-	-
	IIBC	80	8.4	5.2	1640	< l.d.	> 100	-	-	-
<b>Lausanne</b>	L	0	5.1	33.5	284	4.7	67.4	-	-	-
	A(Sw)3	15	4.6	4.5	135	44.6	3.2	26.7	6.8	5.2
	B(Sd)1	50	5.0	1.4	112	20.7	5.9	13.5	1.6	9.7
	B(Sd)1	80	5.8	1.0	118	6.4	22.3	-	-	-
<b>Vordemwald</b>	L+F+Ah	0	4.3	38.9	83	28.5	4.2	1.4	32.0	> 100
	ESw	15	4.8	5.6	31	23.4	1.3	10.4	7.9	3.6
	Sw	50	4.9	1.4	55	18.4	3.1	9.8	1.5	6.7
	Sd1	80	5.7	1.2	92	4.1	29.2	-	-	-
<b>Othmarsingen</b>	L	0	5.8	28.9	417	2.2	> 100	-	-	-
	AEI2	15	4.3	12.9	313	60.1	5.4	40.1	15.1	7.4
	Bt	50	4.7	4.1	282	32.5	9.1	17.7	5.1	14.6
	Bt	80	6.1	3.2	335	2.4	> 100	-	-	-
<b>Beatenberg</b>	L+F	0	4.2	34.1	98	2.1	51.4	-	-	-
	H + Ah1	15	3.8	47.5	27	16.4	1.7	< 0.1	16.4	> 100
	E3	50	4.1	31.8	28	34.9	0.8	6.8	29.6	5.1
	E3, Bs,h1	80	4.4	22.3	35	39.3	0.9	11.5	26.9	3.6
<b>Schänis</b>	L	0	7.0	14.6	327	< l.d.	> 100	-	-	-
	AB	15	7.7	4.8	430	< l.d.	> 100	-	-	-
	B(Sd)	50	7.9	1.3	500	< l.d.	> 100	-	-	-
	B(Sd)	80	8.0	1.1	660	< l.d.	> 100	-	-	-
<b>Celerina</b>	L	0	5.1	43.6	195	12.4	22.7	-	-	-
	(E)1	15	5.7	19.4	76	21.2	4.1	-	-	-
	B	50	6.6	4.3	51	7.7	17.8	-	-	-
	BC	80	6.8	3.3	63	1.5	47.2	-	-	-
<b>Novaggio</b>	L+F	0	5.0	35.2	213	7.6	33.3	-	-	-
	Ah3+A	15	4.7	6.9	53	31.1	1.7	15.1	10.1	3.6
	AB	50	5.3	2.7	36	13.9	2.6	5.7	3.6	6.7
	B	80	5.2	1.8	35	11.0	3.5	4.1	2.4	13.4
<b>Copera</b>	L	0	5.3	16.6	266	21	19.2	-	-	-
	(AE)	15	4.7	3.6	82	58	1.5	27.6	3.0	1.6
	(Bh)Bs	50	4.8	2.2	111	48	2.4	27.3	1.3	2.8
	B(s)C	80	5.1	1.9	82	33	2.7	23.6	1.0	2.9

<sup>1)</sup> < l.d. = inférieur à la limite de détection (0.56  $\mu\text{mol/L}$ )

<sup>2)</sup> - = pas calculé car rapport BC/Al élevé (> 10)

Sur les placettes du Plateau (Lausanne, Vordemwald, Othmarsingen) ainsi qu'à Celerina, les rapports BC/Al les plus faibles se situent à 15 cm de profondeur (Table 2). Lorsqu'on considère uniquement les formes toxiques de l'Al, les rapports BC/(Al<sup>3+</sup> + AlOH<sup>2+</sup>) atteignent des valeurs supérieures à 3 (Table 2). De ce fait, ils constituent aujourd'hui un risque limité pour les racines. En outre, les rapports diminuent en profondeur. A 80 cm, toujours dans l'espace racinaire, les rapports BC/(Al<sup>3+</sup> + AlOH<sup>2+</sup>) sont supérieurs à 100, indiquant que les risques écologiques sont minimes. Il faudra cependant observer leur évolution temporelle, notamment sur les placettes du Plateau, car ces sols sont sensibles aux dépôts atmosphériques acides, et leur acidification pourrait s'accélérer sous leur influence (Walther et al. 2003). Une accélération de l'acidification du sol à Celerina paraît

improbable, car cette placette est située dans une vallée alpine où les dépôts acides sont minimes (Waldner et al., 2006).

A Copera, les formes toxiques de l'Al constituent plus de 80 % de l'Al dissous total à 30 cm, 57 cm et 110 cm de profondeur. Les rapports BC/(Al<sup>3+</sup> + AlOH<sup>2+</sup>) sont faibles et varient de 1.6 à 2.9 (Table 2), suggérant que le risque d'impacts négatifs dû à l'Al sur les racines est élevé.

A Novaggio, les rapports BC/Al sont plus élevés qu'à Copera, le sol étant moins acidifié (Graf Pannatier et al., 2004). Les valeurs actuelles ne sont pas critiques. Cependant, à long terme, le risque d'impacts négatifs est élevé, comme à Copera. Ces deux sols, perméables et développés à partir de substrat acide, sont sensibles aux dépôts acides. Ces derniers retombent en quantité importante sur ces deux placettes, compte tenu des émissions locales et de longue distance d'azote et de soufre et des

fortes précipitations dans la région (Waldner et al., 2006 ; Graf Pannatier et al., 2005).

## 5. Les charges critiques d'acidité

Les charges critiques d'acidité ont été calculées avec le modèle SMB (« simple mass balance ») sur les placettes LWF (Waldner et al. 2006). Ce modèle a été appliqué à l'échelle de la Suisse pour les sols forestiers (Rihm 1994). Il considère un espace racinaire de 50 cm d'épaisseur pour les sites situés en dessous de 1600 m d'altitude et de 35 cm pour les sites entre 1600 m et 2000 m (Rihm, 1994). Comme les racines ont été observées à de plus grandes profondeurs aux placettes LWF, nous avons également calculé les charges critiques en utilisant l'espace racinaire observé (Table 1).

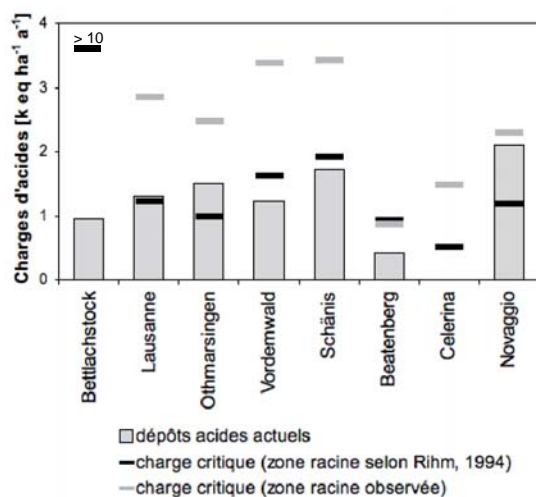


Figure 3 : Dépôts atmosphériques acides actuels sur les placettes LWF et charges critiques (Waldner et al., 2006)

Les charges critiques d'acidité calculées avec les estimations de Rihm (1994) sont relativement basses (0.5- 2.0 keq ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>), à l'exception de Bettlachstock où la charge critique est supérieur à 10 (Fig. 3). Le sol à cet endroit est calcaire (Table 1) et, par conséquent, peut tamponner de larges quantités de dépôts acides. Lorsqu'on compare les dépôts atmosphériques d'acides avec les charges critiques, on s'aperçoit que celles-ci sont dépassées à Lausanne, à Othmarsingen et à Novaggio (Fig. 3). Ces estimations suggèrent qu'il existe un risque élevé d'impacts négatifs sur les racines si les dépôts acides continuent à tomber en excès. A Vorderwald, Schänis et Beatenberg, les dépôts acides ne sont que légèrement inférieurs aux seuils critiques et pourraient aussi constituer un risque écologique à long terme

Lorsqu'on introduit dans le modèle l'espace racinaire observé, on obtient des charges critiques presque deux fois plus élevées, à

l'exception de Beatenberg où l'estimation de Rihm (1994) correspond aux observations (Fig. 1). Les dépôts atmosphériques acides sont inférieurs aux seuils critiques sur toutes les placettes LWF. Ils sont toutefois très proches des valeurs critiques à Novaggio. Ces estimations nous montrent que l'épaisseur de l'espace racinaire joue un rôle important pour le calcul des charges critiques.

Les processus de diffusion de cations basiques vers les horizons supérieurs peuvent également modifier la composition chimique de l'eau du sol (Grigal et Ohmann, 2005) et diminuer les risques écologiques. Ces processus ne sont pas pris en compte dans le modèle SMB.

Ils pourraient toutefois jouer un rôle important dans les sols hydromorphes, développés à partir d'un substrat calcaire et caractérisés par un fort gradient du taux de saturation en cations basiques dans l'espace racinaire. C'est le cas de plusieurs placettes LWF situées sur le Plateau suisse. A Vorderwald, le taux de saturation augmente de 5% dans l'horizon Sd1 (60 - 100 cm) à 63% dans l'horizon sous-jacent Sd2 (100 - 155 cm) (Fig. 4). Le gradient du taux de saturation est également marqué à Lausanne, ainsi qu'à Othmarsingen (Walthert et al., 2003). La présence d'horizons peu perméables aux trois sites réduit le lessivage des nutriments en profondeur. Les nutriments provenant de la partie supérieure du sol enrichissent les horizons inférieurs où l'eau de pluie s'accumule, compte tenu de leur faible conductivité hydraulique. Lorsque le sol en surface s'assèche en été, les eaux accumulées en profondeur remonte par capillarité et apportent des nutriments provenant des horizons inférieurs. Ces processus causent une augmentation des concentrations de cations basiques dans l'eau du sol à 80 cm de profondeur (Table 2).

## 6. Les travaux futurs

Compte tenu des limitations du modèle SMB, des modèles dynamiques sont utilisés pour prédire l'impact de différents scénarios de réduction d'émissions sur les sols forestiers. Le modèle SAFE a été utilisé à l'échelle suisse (Kurz et al., 1998), mais les résultats n'ont pas pu être confrontés à la réalité du terrain. Le monitoring de la composition chimique de l'eau du sol offre la possibilité de valider ces modèles. Afin d'obtenir une meilleure estimation des risques écologiques au niveau suisse, il nous faut également déterminer la proportion et la distribution géographique des sols acides hydromorphes développés à partir d'un substrat calcaire.

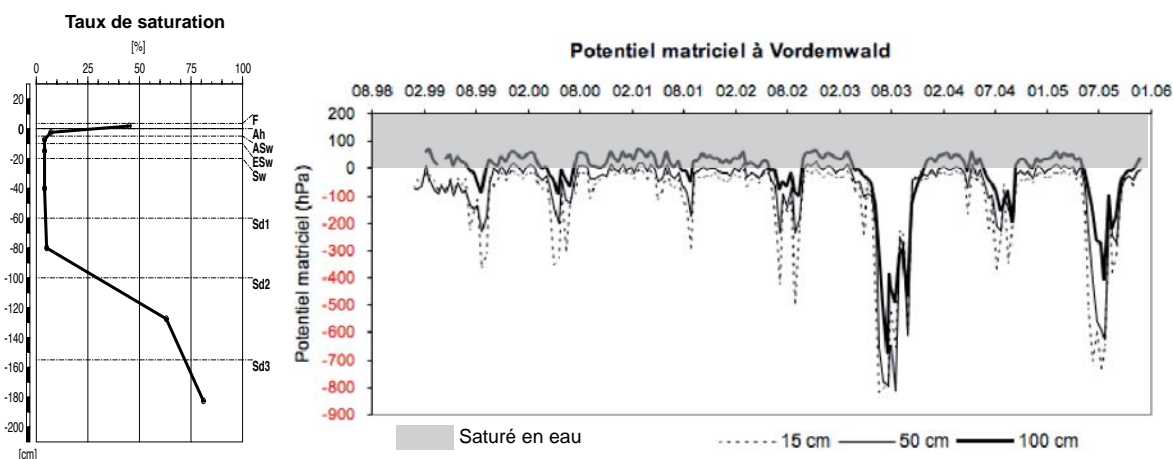


Figure 4 : A gauche : taux de saturation en cations basiques à Vordemwald (Walthert et al. 2003)

A droite : Potentiel matriciel à 15 cm, 50 cm et 100 cm de profondeur à Vordemwald

## Bibliographie

- Blaser, P., M. Zysset, S. Zimmermann et J. Luster, 1999: Soil Acidification in Southern Switzerland between 1987 and 1997: A Case Study Based on the Critical Load Concept. *Environmental Science & Technology* 33, 2383-2389.
- Graf Pannatier, E., J. Luster, S. Zimmermann et P. Blaser, 2005: Acidification of Soil Solution in a Chestnut Forest Stand in Southern Switzerland: Are There Signs of Recovery. *Environmental Science and Technology* 39, 7761-7767.
- Graf Pannatier, E., L. Walthert et P. Blaser, 2004: Solution chemistry in acid forest soils: Are the BC: Al ratios as critical as expected in Switzerland? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167, 160-168.
- Grigal, D. F. et P.R. Ohmann, 2005 : Calcium and forest systems: diffusion from deep sources. *Soil Science* 170, 129-136.
- Løkke, H., J. Bak, U. Falkengren-Grerup, R. D. Finlay, H. Ilvesniemi, P. H. Nygaard et M. Starr, 1996: Critical Loads of Acidic Deposition for Forest Soils: Is the Current Approach Adequate? *Ambio* 25, 510-516.
- Rihm, B. (1994): Critical loads of acidity for forest soils and alpine lakes. Steady state mass balance method. *Environmental Series* 234, Office fédéral de l'environnement, Berne, 68 pp.
- Sverdrup, H. et P. Warfvinge, 1993: The effect of soil acidification on the growth of trees, grasses and herbs as expressed by the  $(Ca + Mg+K)/Al$  ratio. *Reports in Ecology and Environmental Engineering* 1993:2, Department of Chemical Engineering II, Lund University.
- Thimonier, A., M. Schmitt, P. Cherubini et N. Kräuchi (2001): Monitoring the Swiss forest: building a research platform. In T. Anfodillo and V. Carraro: *Monitoraggio ambientale: metodologie ed applicazioni*. Atti del XXXVIII Corso di Cultura in Ecologia, S. Vito di Cadore, Centro Studi per l'Ambiente Alpino, Università degli Studi di Padova, p.121-134.
- Thimonier, A., M. Schmitt, P. Waldner et B. Rihm, 2005 : Atmospheric deposition on Swiss long-term forest ecosystem research (LWF) plots. *Environmental Monitoring and Assessment* 104, 81-118.
- Waldner, P., M. Schaub, E. Graf Pannatier, M. Schmitt, A. Thimonier, L. Walthert, 2006 : Atmospheric deposition and ozone in swiss forests. Are critical values exceeded ? *Environmental Monitoring and Assessment* (accepté).
- Walthert, L., P. Blaser, P. Lüscher, J. Luster, et S. Zimmermann (2003): *Langfristige Waldökosystem-Forschung LWF. Kernprojekt Bodenmatrix. Ergebnisse der ersten Erhebung 1994-1999*. Internet < <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=bericht&nr=276> >. Zürich, Eidg., Techn. Hochschule. 340 pp. + Anhang 153 pp. [pdf].
- WHAM 6 (2001): *Windermere Humic Aqueous Model, Equilibrium chemical speciation for natural waters, Version 6.0*. @Natural Environment Research Council
- Zimmermann, S., L. Luster, P. Blaser, L. Walthert et P. Lüscher, 2006: *Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen*. - Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL; Bern, hep Verlag. ca. 900 S (à paraître)