



*L'acidification du sol peut conduire à une moindre résistance des arbres au vent.*

Simon Tresch, IAP

# L'acidification des sols forestiers provoque des effets sévères

**Sven-Eric Hopf, Simon Tresch, Lucienne de Witte, Sabine Braun\*** | *Les émissions dues aux activités humaines accélèrent et augmentent l'acidification des sols. L'examen de rondelles de troncs<sup>1)</sup> permet de reconstituer l'histoire de l'acidification des sols forestiers. Malgré une diminution des apports acidifiants, le processus se poursuit: il peut conduire à une carence en nutriments.*

L'acidification du sol est un processus naturel extrêmement lent. Les causes naturelles de cette acidification sont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) issu de la respiration racinaire et les acides organiques provenant de la décomposition de la litière. Le dioxyde de carbone ne provoque cependant pas une forte réduction du pH (= acidification) et les acides organiques provenant de la litière se cantonnent en surface. Par contre, l'augmentation des émissions de soufre et d'azote dues aux activités humaines a fortement accéléré l'acidification du sol. Ceci a été démontré par les analyses de solutions du sol réalisées dans le cadre du programme d'observation permanente des forêts [2<sup>2)</sup>]. Les indicateurs d'acidification du sol mesurés à travers tout le territoire national font

clairement part de cette tendance (fig. 1A). Environ 40% des mesures sont inférieures à la valeur limite critique, avec un rapport entre cations basiques – Ca, Mg, K – et aluminium (BC/Al) inférieur à 7 (fig. 1B).

**Les apports d'azote stagnent à un haut niveau**  
Les activités humaines ont largement perturbé les cycles naturels de matières durant le siècle dernier [3<sup>2)</sup>]. Dues à l'industrialisation, à l'augmentation de la consommation d'énergie, au trafic routier et à l'agriculture, les émissions de polluants atmosphériques en Suisse n'ont cessé d'aller en s'aggravant jusque dans les années 1990 (fig. 2). Les sols forestiers ont été de plus en plus exposés aux dépôts acidifiants de sulfate (provenant de processus de combustion dégageant du  $\text{SO}_2$ ), puis plus tard à ceux de liaisons azotées comme le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) [4<sup>2)</sup>].

En raison des mesures de réduction de la pollution de l'air (désulfuration des car-

burants et huiles de chauffage, épuration des fumées dans l'industrie, catalyseurs des véhicules à moteur), les émissions de  $\text{NO}_x$  et  $\text{SO}_x$  ont diminué en Europe centrale à partir de 1980. En Suisse aujourd'hui, un tiers des émissions d'azote provient de l'industrie, du trafic routier et des ménages. Deux tiers sont émis par l'agriculture [5<sup>2)</sup>], dont l'am-

<sup>1)</sup> L'étude «Reconstitution de l'acidification des sols forestiers en Suisse par observation des concentrations d'éléments dans des rondelles de troncs» (publiée en allemand sous le titre «Rekonstruktion der Bodenversauerung in Schweizer Wäldern anhand von Elementkonzentrationen in Stammscheiben») a été réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

<sup>2)</sup> Le rapport final ainsi que la bibliographie afférente à cet article sont disponibles sur: [www.iap.ch/publikationen.html](http://www.iap.ch/publikationen.html) [www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/forets/publications-etudes/etudes.html](http://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/forets/publications-etudes/etudes.html)

\* Les auteurs travaillent à l'Institut de biologie végétale appliquée (IAP AG), Benkenstrasse 254a, 4108 Witterswil (BL); tél. +41 61 485 50 70. Traduction: Vincent Barbezat, Le Prévoux (NE)

moniaque, stagnant à un niveau élevé depuis l'an 2000 environ (fig. 2) [6<sup>2)</sup>].

### Presque partout trop d'azote

La Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (UNECE) a établi une convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, où sont fixées des valeurs limites pour les dépôts d'azote dans les écosystèmes [8<sup>2)</sup>]. Ainsi, la forêt feuillue en zone tempérée ne devrait pas recevoir plus de 10–20 kg d'azote par hectare et par an, et la forêt résineuse plus de 5 à 15 kg. Ces valeurs limites sont dépassées sur presque 90% de la surface forestière suisse [9<sup>2)</sup>]. Les dépôts atteignent même suivant les régions plus de 40 à 50 kg (fig. 7), ils contribuent à l'acidification du sol et occasionnent un grand nombre de dégâts [10, 11<sup>2)</sup>].

### Coup d'œil dans le passé

Peu de données concernant les modifications de la chimie du sol durant ces dernières décades sont disponibles. En Forêt-Noire (sud de l'Allemagne), une diminution du pH a pu être constatée sur des substrats très différents dans la couche supérieure du sol entre 1927 et 1997 [23<sup>2)</sup>]. D'autres études menées en Allemagne [24<sup>2)</sup>], en Autriche [25<sup>2)</sup>] et en Suède [27, 28<sup>2)</sup>] montrent également une acidification durant ces quelques dernières décennies. Sur deux périodes de cinq ans, des études du Service de la protection des sols du canton de Zurich ont montré que le pH des sols forestiers n'a pas cessé de diminuer (mesures 1995–1999 et 2000–2004) [28<sup>2)</sup>].

L'étude «Reconstitution de l'acidification des sols forestiers en Suisse» [1<sup>2)</sup>], dont il est question ici, avait pour objectif de rechercher dans quelle mesure la concentration de différents éléments chimiques dans le bois pouvait être utilisée comme un indicateur des processus se déroulant dans le sol, par le passé et aujourd'hui. A cette fin, 96 sections (rondelles) de troncs (49 d'épicéa, 23 de hêtre, 24 de chêne) ont été analysées. Elles sont issues de 22 stations forestières faisant

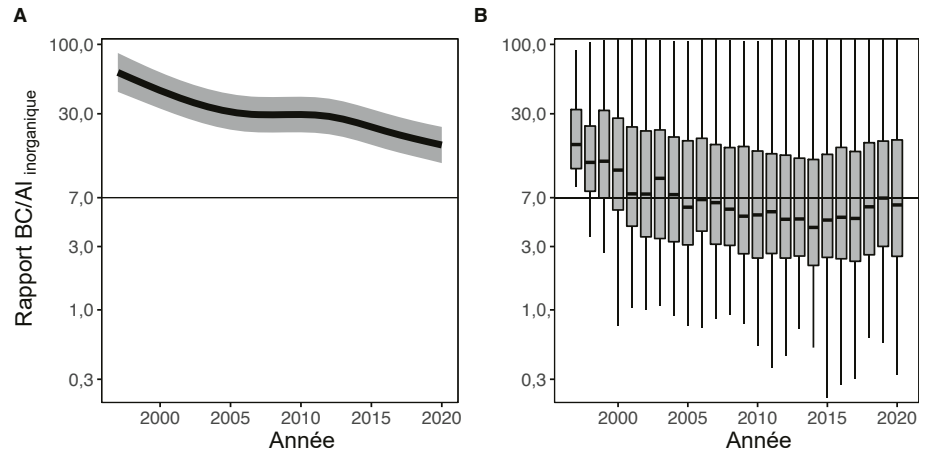


Fig. 1A et 1B: Lorsque le sol s'acidifie, le rapport entre les cations basiques et l'aluminium (BC/Al) change. La valeur critique pour la Suisse se situe à un niveau 7 (ligne noire).

A: Evolution dans le temps modélisée indépendamment de la station et de la chimie du sol pour toutes les essences.

B: Toutes les mesures de solutions du sol réalisées dans le cadre du Programme d'observation permanente des forêts (46 surfaces). IAP

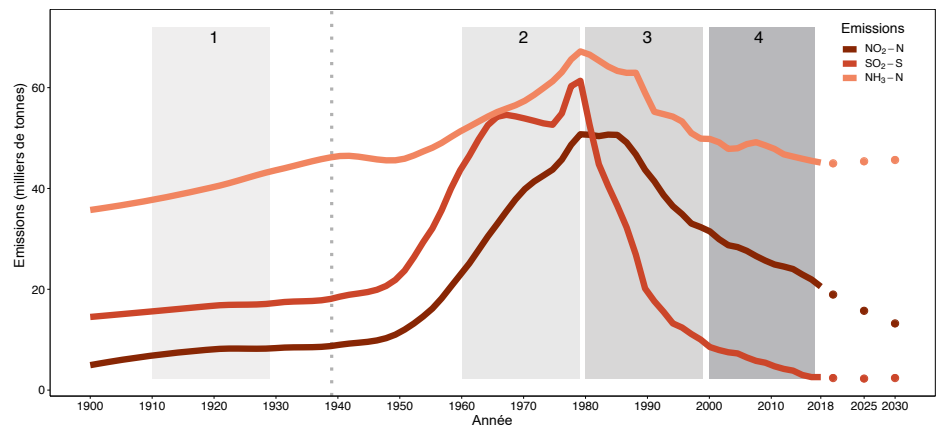


Fig. 2: Emissions de polluants atmosphériques ( $SO_2-S$ ,  $NO_2-N$  et  $NH_3-N$ ) en Suisse de 1900 à 2018 et projection jusqu'en 2030, en milliers de tonnes (kt) [7<sup>2)</sup>]. En grisé, les périodes 1 à 4 ayant fait l'objet d'échantillons:

- période 1 (1910–1929), émissions faibles;
- période 2 (1960–1979), émissions en augmentation;
- période 3 (1980–1999), émissions les plus élevées;
- période 4 (2000–2017), émissions en diminution.

Le pointillé vertical correspond à l'extension de la période 1 jusqu'en 1939, lorsque l'échantillonnage sur une rondelle de bois n'était pas possible antérieurement. IAP

## RAPPEL THÉORIQUE

A travers leurs racines, les plantes absorbent des éléments et les stockent dans leur biomasse. Si l'un des éléments est présent en grande quantité dans l'espace racinaire, il sera généralement plus absorbé par les racines.

Les éléments sont stockés différemment selon leur mobilité.

Dans les cernes des arbres, on va distinguer entre:

- les éléments très mobiles, comme le phosphore [P], l'azote [N], le potassium [K] ou le magnésium [Mg];

- les éléments modérément mobiles tels que le calcium [Ca], le manganèse [Mn], le zinc [Zn] ou le cuivre [Cu];
- les éléments faiblement mobiles comme l'aluminium [Al], le fer [Fe] et le plomb [Pb] [29<sup>2)</sup>].

Ainsi, des changements de concentrations d'éléments dans le bois vont mettre en évidence des changements environnementaux liés à certaines périodes, par exemple une acidification du sol [30, 31<sup>2)</sup>].



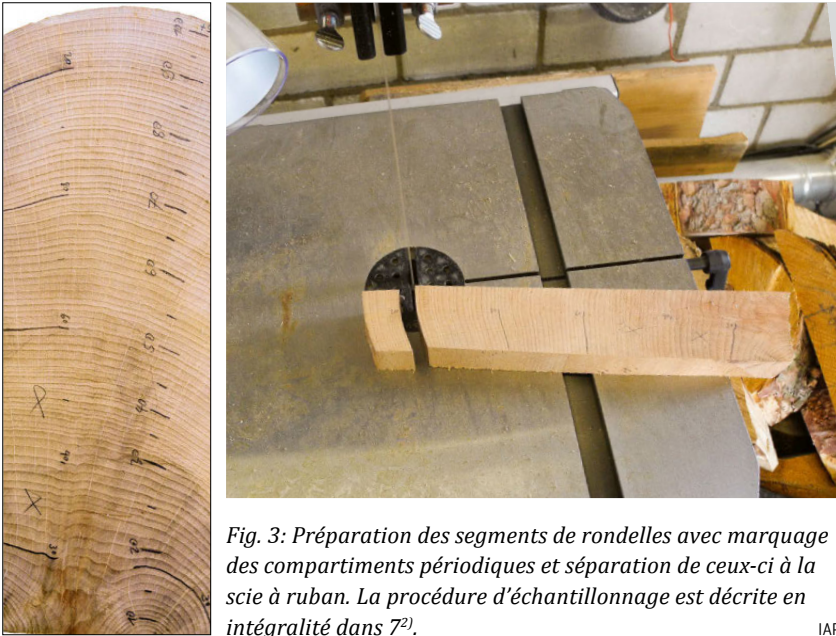


Fig. 3: Préparation des segments de rondelles avec marquage des compartiments périodiques et séparation de ceux-ci à la scie à ruban. La procédure d'échantillonnage est décrite en intégralité dans 7<sup>2</sup>).

IAP

partie du Programme d'observation permanente des forêts. Les sections de bois ont été divisées en fonction des quatre périodes de dépôt des polluants atmosphériques, de 1910 à 2017 (fig. 2), zones grisées, (fig. 3). Le bois des segments correspondant a été moulu et désagrégé chimiquement avant de déterminer la concentration de ses différents éléments.

### Résultats de l'étude

Les analyses ont montré que, pour l'épicéa et le hêtre, les concentrations des éléments

Al, Mn, Ca et K sont des indicateurs dendrochimiques à même de rendre compte de l'évolution de l'acidification du sol. Le chêne, en revanche, concentre ces éléments dans l'aubier, ce qui est aussi confirmé par d'autres études [32<sup>2</sup>]. Les rondelles de chêne n'ont donc pas pu être utilisées pour la reconstitution des processus du sol.

Les concentrations d'aluminium dans le bois des épicéas augmentent de manière significative de la période 3 (1980-1999) à la période 4 (2000-2017) (fig. 4). Les rondelles issues des surfaces forestières avec

une valeur de pH basse (pH <4,2) entre 0 et 40 cm de profondeur présentent en outre des concentrations d'aluminium significativement plus élevées. La combinaison de ces deux résultats signale une acidification croissante du sol.

Les concentrations en manganèse dans le bois d'épicéa et de hêtre ont diminué entre 1910 et 2017, en particulier dans les surfaces forestières avec un pH bas. Ceci indique que le tamponnage de l'acide par la dissolution des oxydes de manganèse (pH 5-4,2) a déjà eu lieu et que, à ce stade, il subsiste surtout un tamponnage par dissolution des oxydes d'aluminium (pH <4,2).

Les concentrations de calcium dans le bois d'épicéa ont diminué fortement après la période 2 (1960-1980), indépendamment du pH du sol. Il en était de même pour celles dans le bois de hêtre.

Il a pu être démontré, à l'aide de modèles d'équations structurelles, que pour les trois essences, l'augmentation du dépôt d'azote conduisait à une diminution significative des valeurs de saturation en bases du sol et, partant, à un changement des teneurs en éléments dans le bois. Dans le bois d'épicéa, cela conduisait à une augmentation des concentrations d'aluminium. Les dépôts azotés, à travers leur influence sur la saturation en bases du sol, avaient une influence indirecte sur les concentrations en calcaire des épicéas et hêtres.

### Reconstitution de l'acidification du sol

Sur la base de la relation négative entre la saturation en bases du sol et la concentration d'aluminium dans le bois d'épicéa (fig. 5), il a été possible de reconstituer les valeurs de la saturation en bases du sol de surface.

Ces valeurs reconstituées, en moyenne de toutes les surfaces (fig. 6), montrent une claire diminution de la saturation en bases entre l'avant-dernière (1980-1999) et la dernière période (2000-2017). Cela signifie que, proportionnellement, l'acidification des sols a augmenté. Ces résultats ont aussi permis pour la première fois de valider un modèle de bilan des matières souvent utilisé en Suisse [SAFE, 29<sup>2</sup>].

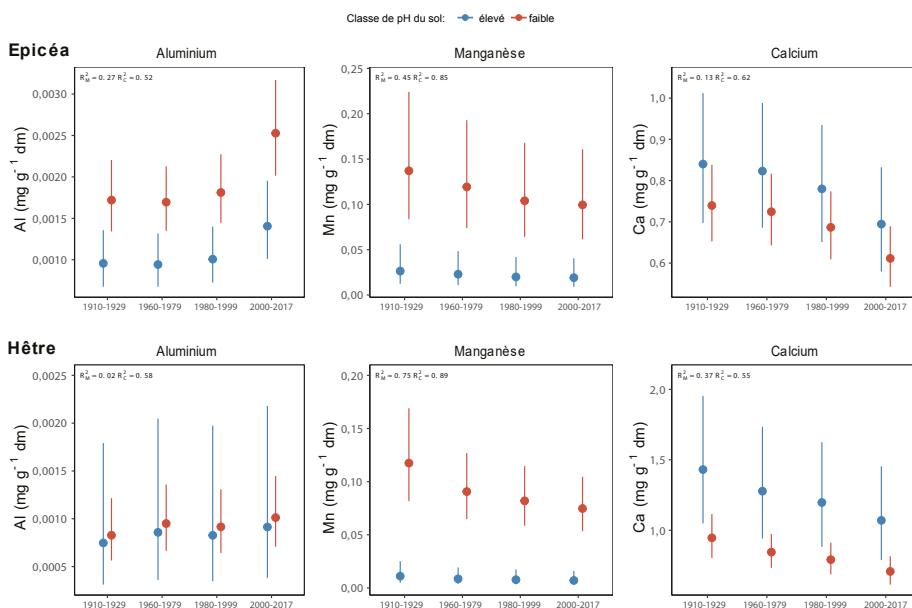


Fig. 4: Concentrations (moyennes de toutes les stations) des éléments Al, Mn et Ca sur épicéa et hêtre pour les différentes périodes. Deux classes sont définies en fonction de la valeur de pH du sol: en bleu, pH élevé >4,2; en rouge pH faible <4,2.

IAP

## Conclusions

L'analyse des concentrations en éléments dans des rondelles de troncs donne un aperçu des processus se déroulant au niveau du sol. Les concentrations des éléments Al, Mn et Ca dans des rondelles d'épicéa et de hêtre se révèlent être des indicateurs dendrochimiques des processus en cours dans le sol. Elles reflètent les effets directs et indirects des polluants atmosphériques, tout comme l'évolution dans le temps des propriétés du sol. La reconstitution dendrochimique des valeurs historiques de la saturation en bases du sol a permis de montrer la progression de l'acidification du sol entre 1910 et 2017.

De valeurs plus faibles de la saturation en bases du sol, auxquelles sont liées dans le bois d'épicéa et de hêtre des concentrations d'Al en hausse et des concentrations de Mn en baisse, ont montré l'effet acidifiant des dépôts azotés. De plus, les valeurs reconstituées de la saturation en bases ont pu être utilisées pour valider les valeurs de saturation des bases issues du modèle SAFE. ■

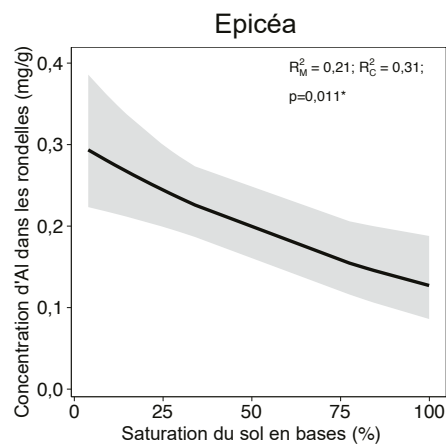


Fig. 5: Relation entre la concentration en aluminium (Al) dans le bois d'épicéa et la saturation en bases du sol (valeur moyenne, entre 0 et 40 cm de profondeur). IAP

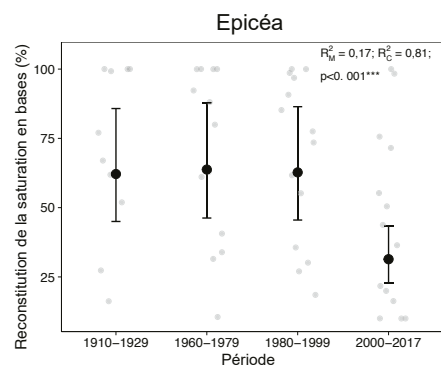


Fig. 6: Evolution dans le temps de la reconstitution de la saturation en bases. Les points correspondent aux valeurs moyennes calculées par le modèle et les lignes indiquent l'intervalle de confiance de 95%. Les points en gris représentent les valeurs reconstituées de la saturation en bases du sol de chacune des stations. IAP

## CONSÉQUENCES DE L'ACIDIFICATION DES SOLS

### • Entrave à l'absorption des nutriments

Lorsque la valeur de pH du sol diminue, le manganèse [Mn] est d'abord libéré, plus tard l'aluminium [Al] est mobilisé. Ce dernier a un effet néfaste sur les racines des plantes et entrave l'absorption des nutriments [12, 13<sup>2)</sup>].

### • Lessivage des nutriments

Un excédent de sulfate et de nitrate va entraîner un lessivage des nutriments [Ca, Mg, K]. Cela provoque un appauvrissement du sol en nutriments et une diminution de la saturation des bases. Les conséquences peuvent être des déséquilibres et un manque des nutriments nécessaires à la nutrition de l'arbre [14-16<sup>2)</sup>].

### • Baisse de l'activité biologique du sol

En cas d'acidification avancée (pH < 4,5), la faune du sol est également impactée. Le nombre de vers de terre qui creusent en profondeur diminue [17<sup>2)</sup>] et l'activité biologique dans le sol est réduite [18<sup>2)</sup>].

### • Modification de la végétation

La composition des espèces de la végétation au sol se modifie [19<sup>2)</sup>].

### • Impact sur les mycorhizes

L'acidification du sol influence la vitalité et la diversité des champignons mycorhiziens [20<sup>2)</sup>].

### • Capacité d'enracinement réduite

Dans les stations acides, pauvres en bases, la capacité d'enracinement du hêtre et de l'épicéa est amoindrie [21<sup>2)</sup>] et les chablis dus aux tempêtes augmentent drastiquement [22<sup>2)</sup>].

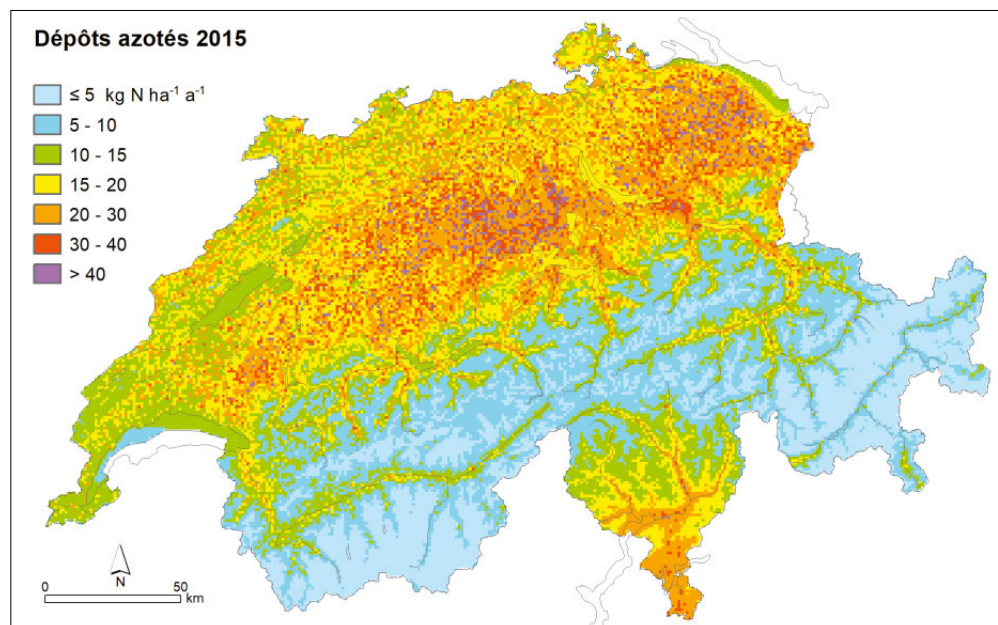


Fig. 7: Dépôts azotés en kg d'azote par hectare et par an. C'est avant tout sur le Plateau et le Tessin que les plus fortes quantités d'azote sont enregistrées. OFEV, carte Meteotest



## IMPRESSUM

# LA FORÊT

Revue spécialisée dans le domaine de la forêt et du bois fondée en 1947  
Paraît 11 fois par an

ISSN 0015-7597

Editeur

 **ForêtSuisse**  
Association des propriétaires forestiers

Président: Daniel Fässler  
Directeur: Thomas Troger-Bumann  
Responsable d'édition: Florian Landolt

### Rédaction/Administration:

Rosenweg 14  
CH-4502 Soleure  
T +41 32 625 88 00  
F +41 32 625 88 99  
laforet@foretsuisse.ch

Réd. en chef: Fabio Gilardi [fg]  
[fabio.gilardi@foretsuisse.ch](mailto:fabio.gilardi@foretsuisse.ch)

Rédacteurs:  
Alain Douard [ad]  
[alain.douard@foretsuisse.ch](mailto:alain.douard@foretsuisse.ch)

Ferdinand Oberer [fo], rédacteur  
[ferdinand.oberer@waldschweiz.ch](mailto:ferdinand.oberer@waldschweiz.ch)

Reto Rescalli [rr], rédacteur  
[reto.rescalli@waldschweiz.ch](mailto:reto.rescalli@waldschweiz.ch)

### Annonces:

Agripromo, Ulrich Utiger  
Sandstrasse 88  
CH-3302 Moosseedorf [BE]  
T +41 79 15 44 01  
F +41 31 859 12 29  
[agripromo@gmx.ch](mailto:agripromo@gmx.ch)  
[www.agripromo.ch](http://www.agripromo.ch)

### Abonnements:

Maude Schenk  
[maude.schenk@foretsuisse.ch](mailto:maude.schenk@foretsuisse.ch)

### Prix de vente:

Abonnement annuel Fr. 89.-  
Prix pour apprentis,  
étudiants, retraités et groupes Fr. 59.-  
Pour l'étranger Fr. 118.- ou euros 98.-  
Prix à l'unité Fr. 10.-

### Tirage:

1454 ex. [REMP / CS septembre 2020]

### Mise en page:

Valérie Perrenoud Oriental [resp.]  
Stämpfli SA, Wölflistrasse 1  
CH-3001 Berne

### Impression:

Stämpfli SA, Wölflistrasse 1  
CH-3001 Berne

La reproduction des articles n'est autorisée qu'avec l'accord de la rédaction.  
Mention des sources obligatoire.



imprimé en  
suisse

Label de qualité du groupe presse spécialisée de l'Association de la presse suisse

# CET ARTICLE EST TIRÉ DE

Le mensuel suisse de la forêt et du bois

# LA FORÊT



## Oui, je m'abonne à LA FORÊT [onze numéros par an]

Entreprise

Nom / Prénom

Profession

Rue

NPA / Lieu

Téléphone / Courriel

Vous pouvez imprimer cette page, découper le coupon et l'envoyer par la poste à:  
**Service abonnements, LA FORÊT, ForêtSuisse, Rosenweg 14, CH-4502 Soleure**  
ou utiliser le bulletin d'abonnement en ligne sur [www.laforet.ch](http://www.laforet.ch)